

Un modèle de propagation de feux de végétation à grande échelle

Mohamed DRISSI

Équipe Dynamique des feux

CFM 2013 Bordeaux du 26 au 30 août



Sommaire

- ❖ **Présentation du modèle de propagation**
- ❖ **Validation du modèle de propagation sur brûlage dirigé et feu réel**
- ❖ **Etude de sensibilité**
- ❖ **Conclusions**

- **Présentation du modèle de propagation**

Construction du réseau



Végétation homogène et uniforme

Réseau basé sur une structure sous jacente **carrée ou hexagonale**



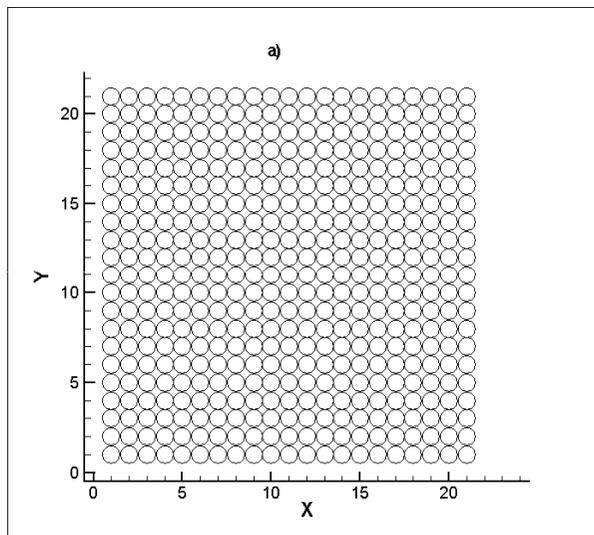
Végétation épars + distribution aléatoire

Réseau **amorphe** polydisperse avec un taux de remplissage prédéfini

Construction du réseau

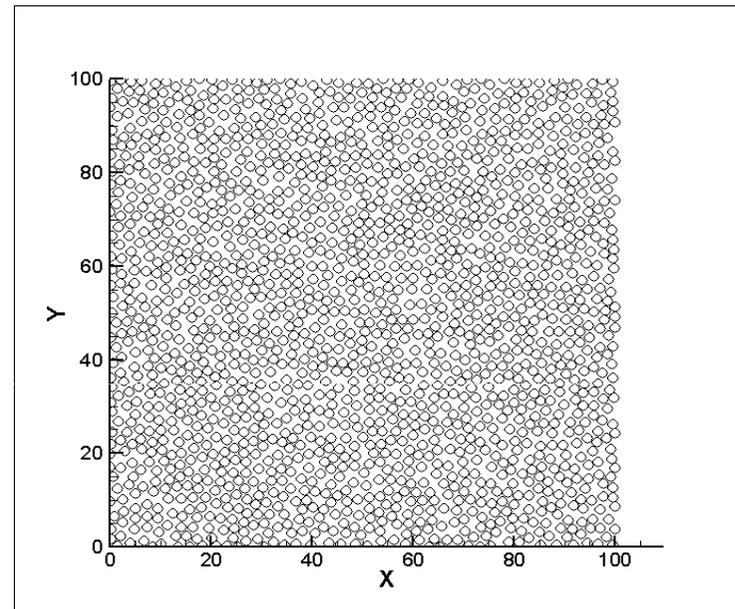
Méthodes de génération sans chevauchement de sites

- ✓ Structure sous-jacente carrée ou hexagonale



- limité aux réseaux monodisperses ou polydisperses faiblement dopés
- peu représentatif de la végétation réelle

- ✓ À la volée

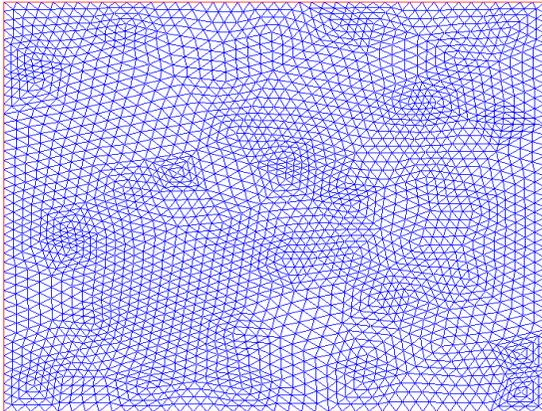


Réseau monodisperse amorphe dopé à 56%.

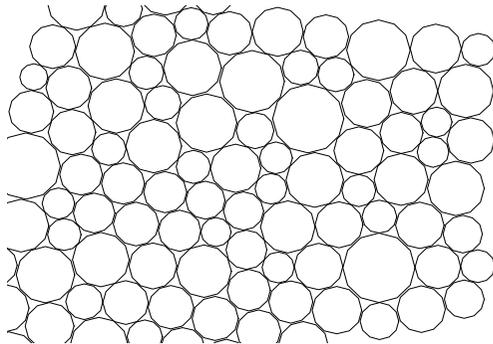
- difficulté à atteindre des taux de remplissage élevés (max. 0,56 en monodisperse)

Construction du réseau

- ✓ Minimisation de fonctionnelle

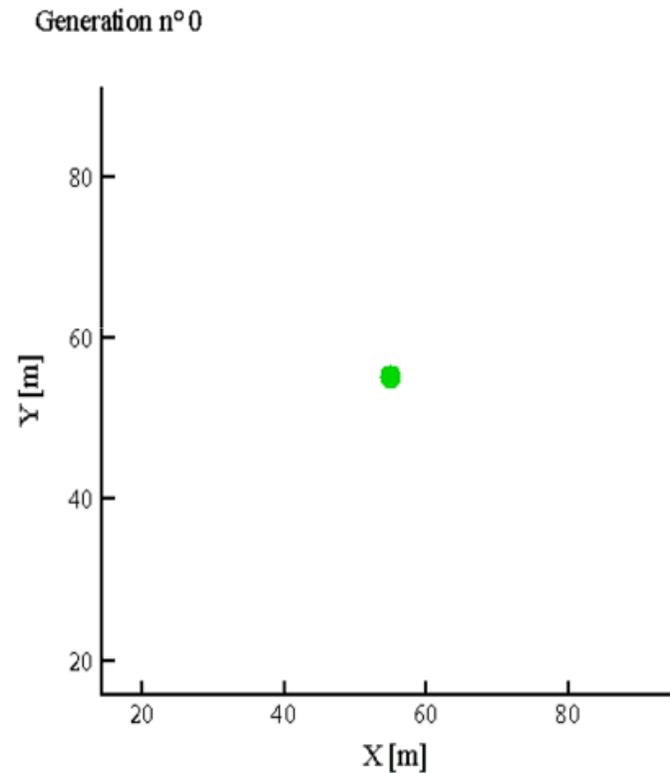


Maillage triangulaire non structuré de Delaunay.



→ adaptée au polydisperse et difficulté de maîtriser l'amorphisme et la distribution en taille

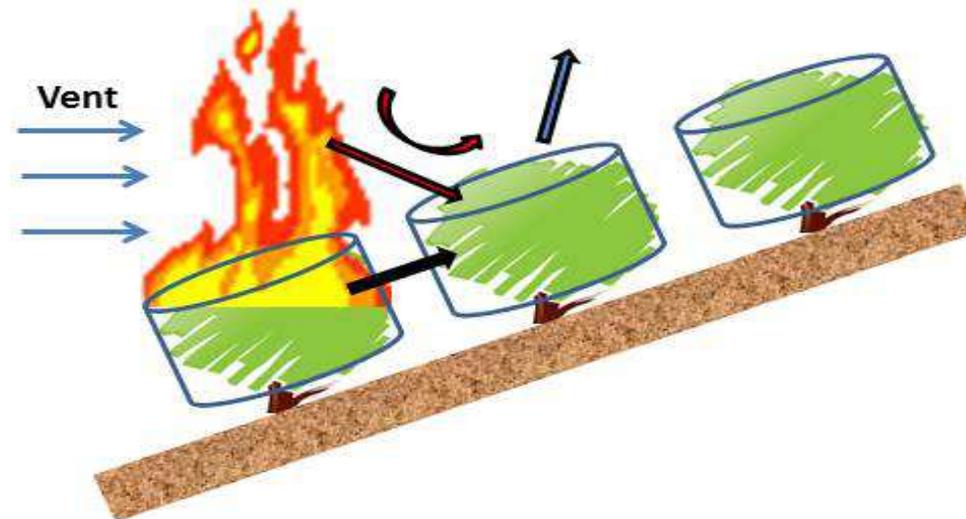
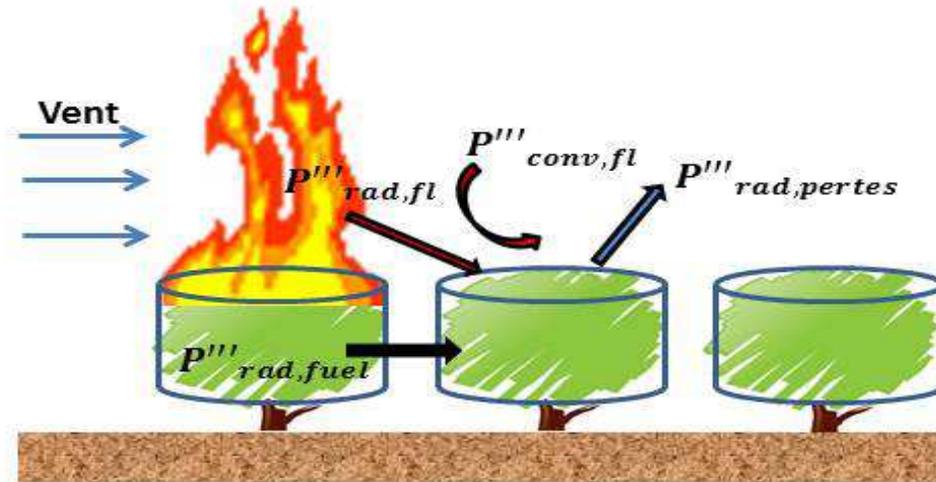
- ✓ Algorithme génétique
Critère de sélection sur la distance aux 6 plus proches voisins



→ bonne maîtrise de l'amorphisme et de la polydispersité

→ CPU élevé

Modèle macroscopique de combustion

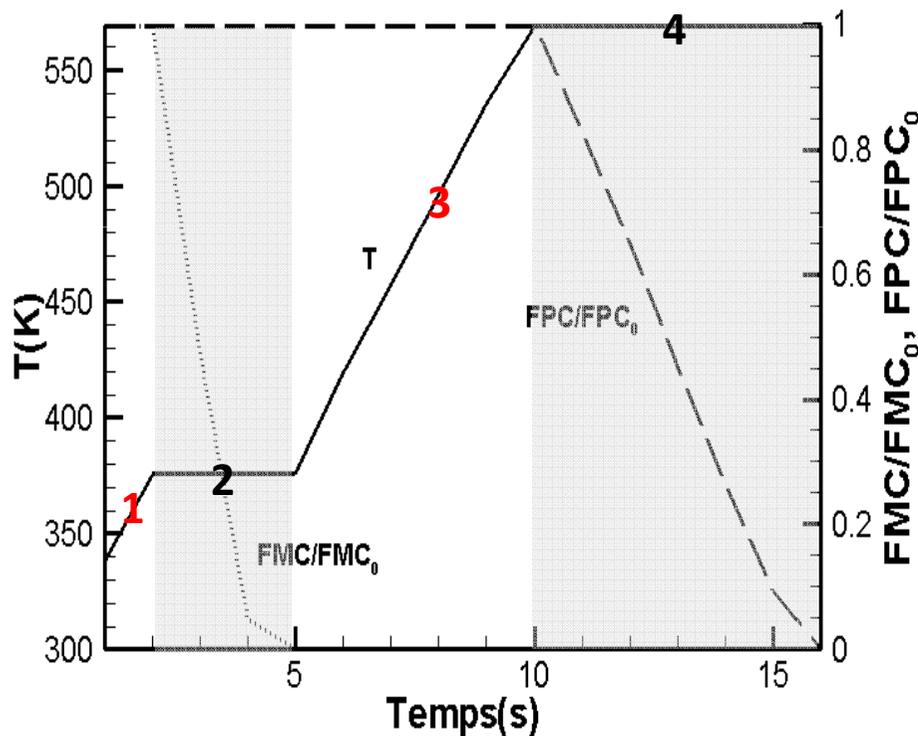


- Les éléments fins (typiquement $<0,6\text{cm}$) propagent le feu de flammes.
- Les éléments épais participent à la combustion (généralement sans flamme) en arrière du front.

Dégradation thermique d'un site récepteur

Equation de bilan d'un site récepteur exposé à N sites en feu

$$\sum_{i=1}^N [P'''_{rad,fl(i)} + P'''_{rad,fuel(i)} + P'''_{conv(i)}] - P'''_{rad,pertes} = \begin{cases} \rho_{WFF} c_{p,WFF} \alpha \frac{dT}{dt} & \text{si } T < T_{vap} \\ -\rho_{DFE} L_{vap} \alpha \frac{dFMC}{dt} & \text{si } T = T_{vap} \\ \rho_{DFE} c_{p,DFE} \alpha \frac{dT}{dt} & \text{si } T_{vap} < T < T_{pyr} \\ -\rho_{DFE} L_{pyr} \alpha \frac{dFPC}{dt} & \text{si } T = T_{pyr} \end{cases}$$



Phase 1: préchauffage du combustible humide

Phase 2: déshydratation du combustible

Phase 3: préchauffage du combustible sec

Phase 4: pyrolyse

Critère d'inflammation:

$T = T_{pyr}$ et $\dot{m}''_{pyr} > \dot{m}''_{cr,pyr}$
 (présent travail: $\dot{m}''_{cr,pyr} = 0$)

Convection et pertes radiatives base du modèle de Koo et al. (2005)

• Puissance radiative des braises

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

$$P'''_{rad,fuel} = a_{fb} \sigma T_b^4 \exp\left(-\frac{y}{\delta}\right)$$

a_{fb} : absorptivité de la strate végétale

T_b : température des braises

δ : profondeur de pénétration du rayt

• Puissance convective reçue par le site exposé au feu

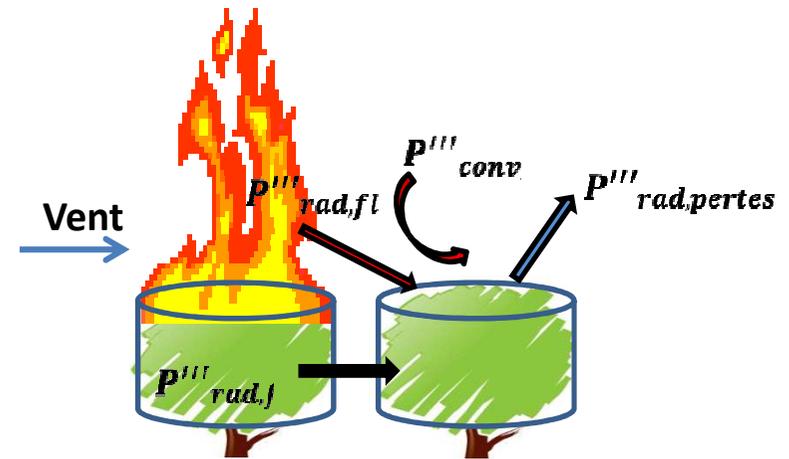
Décroissance exponentielle avec la distance
(distance caractéristique $\sim 3L_{fl}$)

$$P'''_{conv} = \frac{h}{\delta_{eff}} (T_{fl} - T) \exp(-0.3 y / L_{fl})$$

h : coeff. moyen de convection (sur plaque plane)

T_{fl} : température de flamme

δ_{eff} : profondeur effective de pénétration du rayt



• Pertes radiatives du site exposé au feu

$$P'''_{rad,pertes} = \frac{\varepsilon_{fb} \sigma (T^4 - T_{\infty}^4)}{\delta_{eff}}$$

ε_{fb} : émissivité de la strate végétale

T : température du site végétal

Modèle de rayonnement de flamme

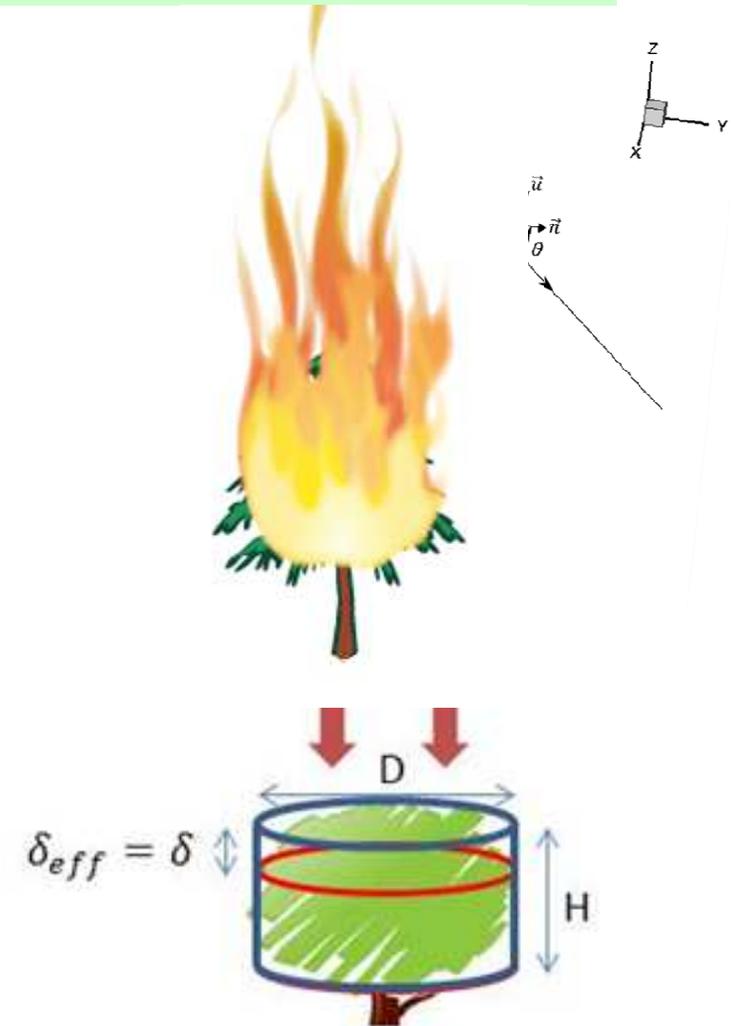
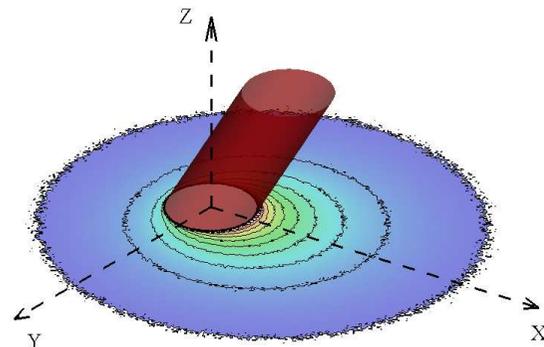
Modèle de rayonnement de flamme = modèle de flamme solide + méthode de Monte Carlo

Modèle de flamme solide :

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

Méthode statistique de Monte-Carlo

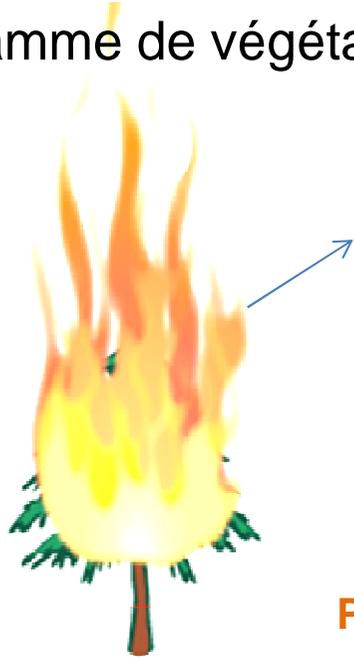
- De chaque élément surfacique de la flamme (m^2), N quanta de puissance q sont aléatoirement générés (Loi macroscopique de rayonnement de surface)
- Puissance reçue par la cible : $n \times q$



$$\delta_{eff} = \min(H, \delta) \text{ avec } \delta = 4/\sigma_k \alpha_k$$

Modèle de rayonnement

Détermination des propriétés géométriques et thermo-physiques d'une flamme de végétation



Puissance libérée par la combustion avec flamme des éléments végétaux fins

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

Fraction perdue par convection

Fraction rayonnée χ_r

Pouvoir émissif de la flamme:

$$P''_{fl} = \frac{\chi_r \dot{Q}}{S_{fl}}$$

Propriétés géométriques de la flamme

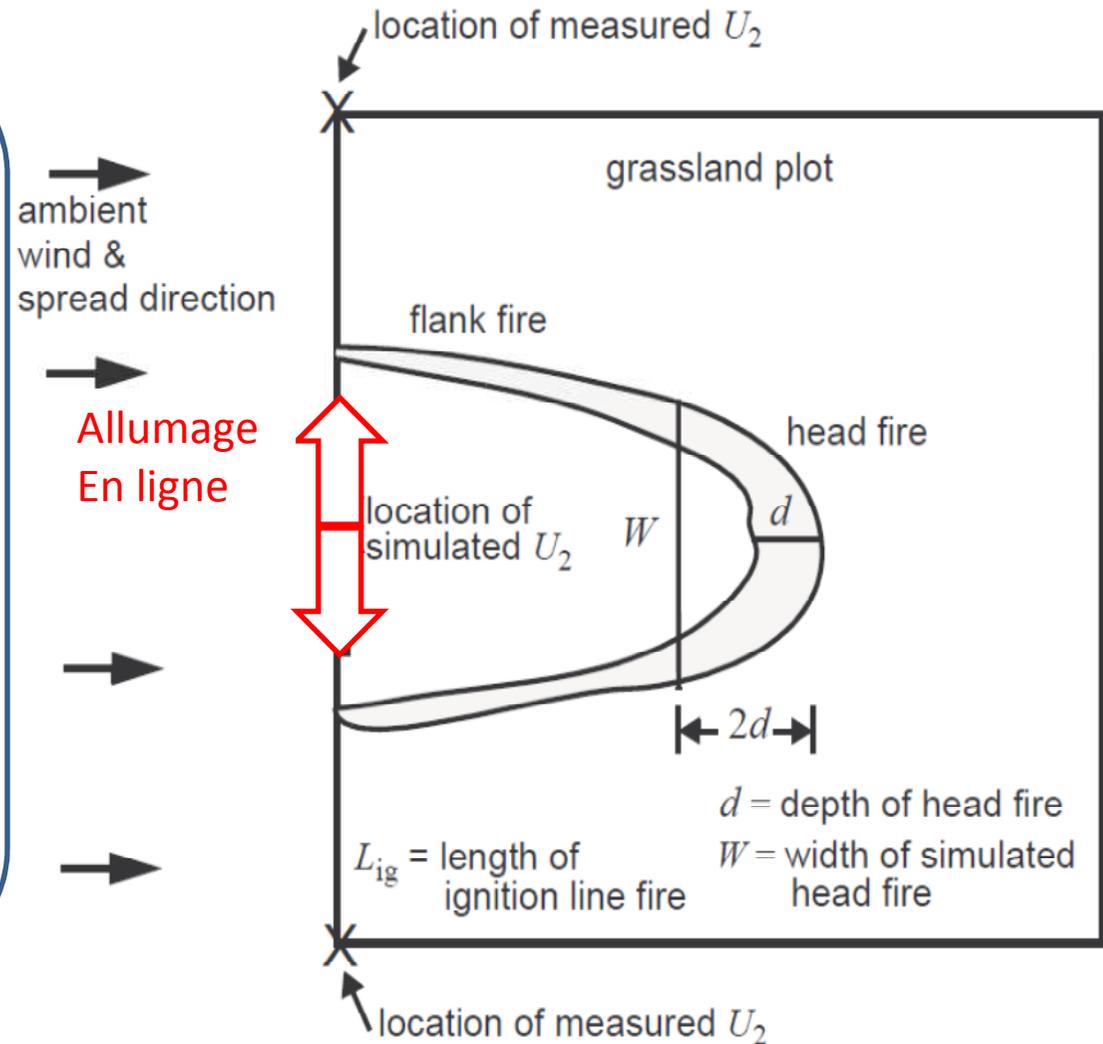
- | | | |
|----------------------------------|---|-------------------------|
| • Hauteur de flamme sans vent | $H_{fl0} = 0.0148 \dot{Q}^{2/5} - 1.02D$ | (Heskestad) |
| • Hauteur de flamme avec vent | $H_{fl} = H_{fl0} (1 + 4Fr_{H_{fl0}}^2)^{-0.5}$ | (Putnam) |
| • Angle d'inclinaison dû au vent | $\tan \alpha = 1.22 Fr_{H_{fl}}$ | (Albini) |
| • Longueur de la flamme | $L_{fl} \propto Fr_D^{-0,11}$ | (Thomas et al. , Nmira) |
| | $\rightarrow L_{fl} \sim H_{fl0}$ | |

Validation du modèle

Validation du modèle de propagation

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

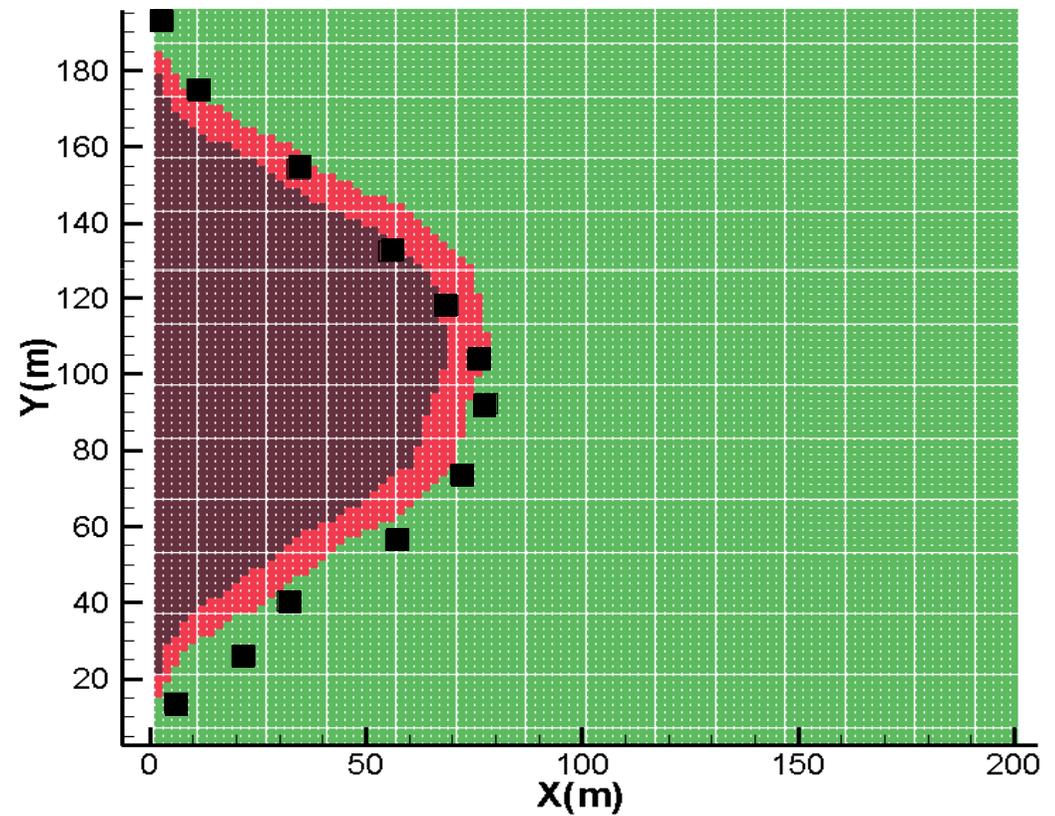
- Terrain plat 200mX200m
- Végétation homogène et continue d'herbacées
 - Teneur en eau: 6%
- Température ambiante: 34°C
 - Vent constant: 4.8m/s
 - HR de l'air: 20%



Validation du modèle de propagation



(Cheney et al. , 1986)



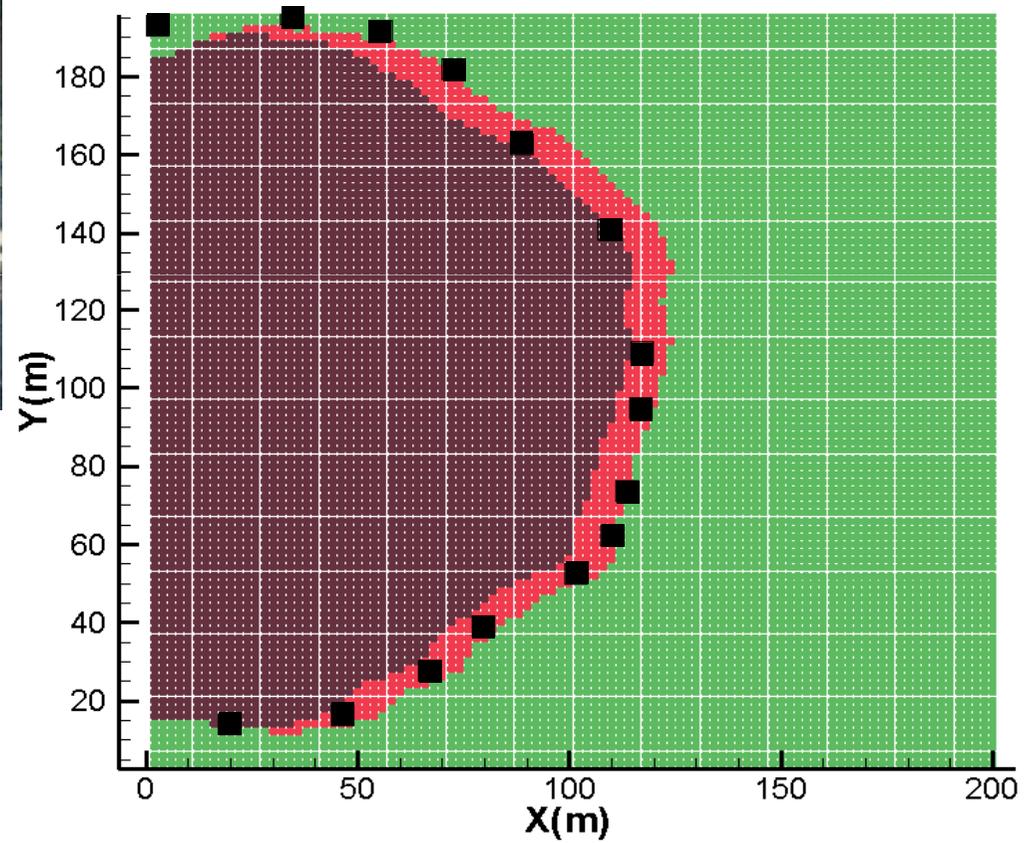
Contour du feu à $t=56s$

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

Validation du modèle de propagation



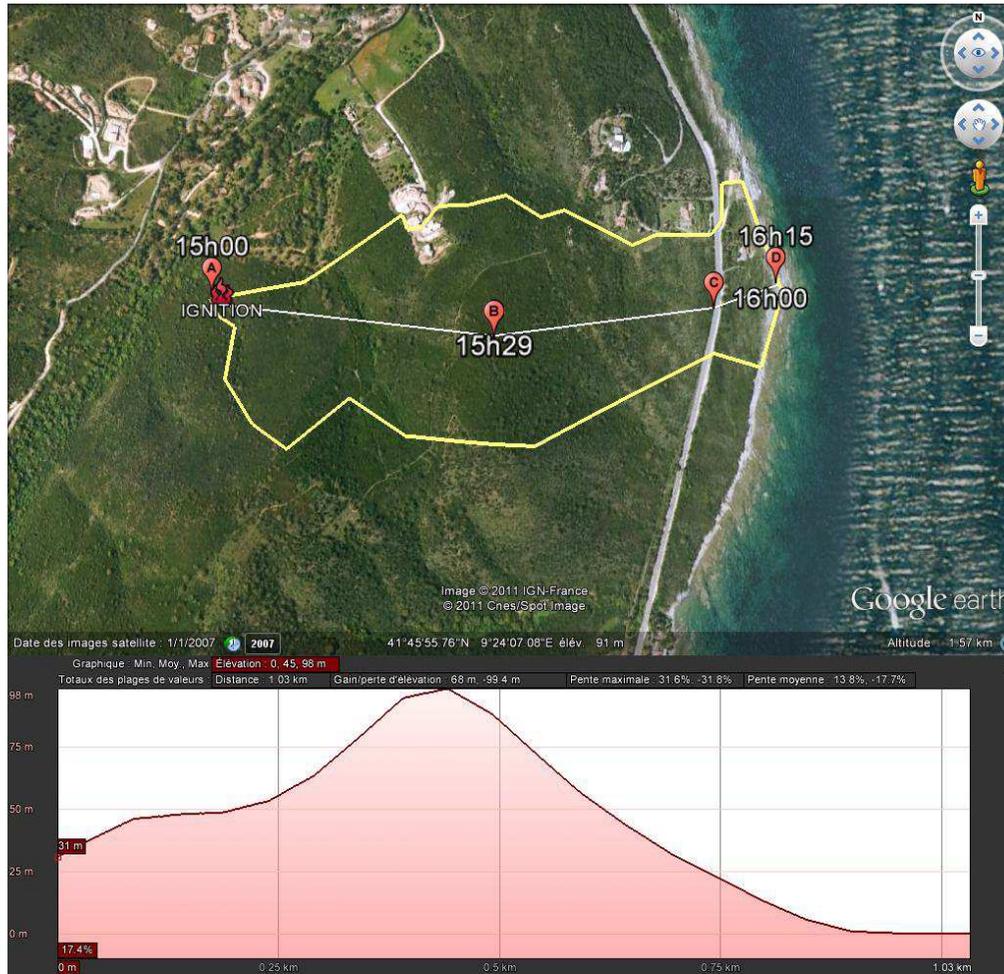
(Cheney et al. , 1986)



Contour du feu à t=86s

Validation du modèle de propagation

Validation sur le feu de Favone (Corse, Juillet 2009)

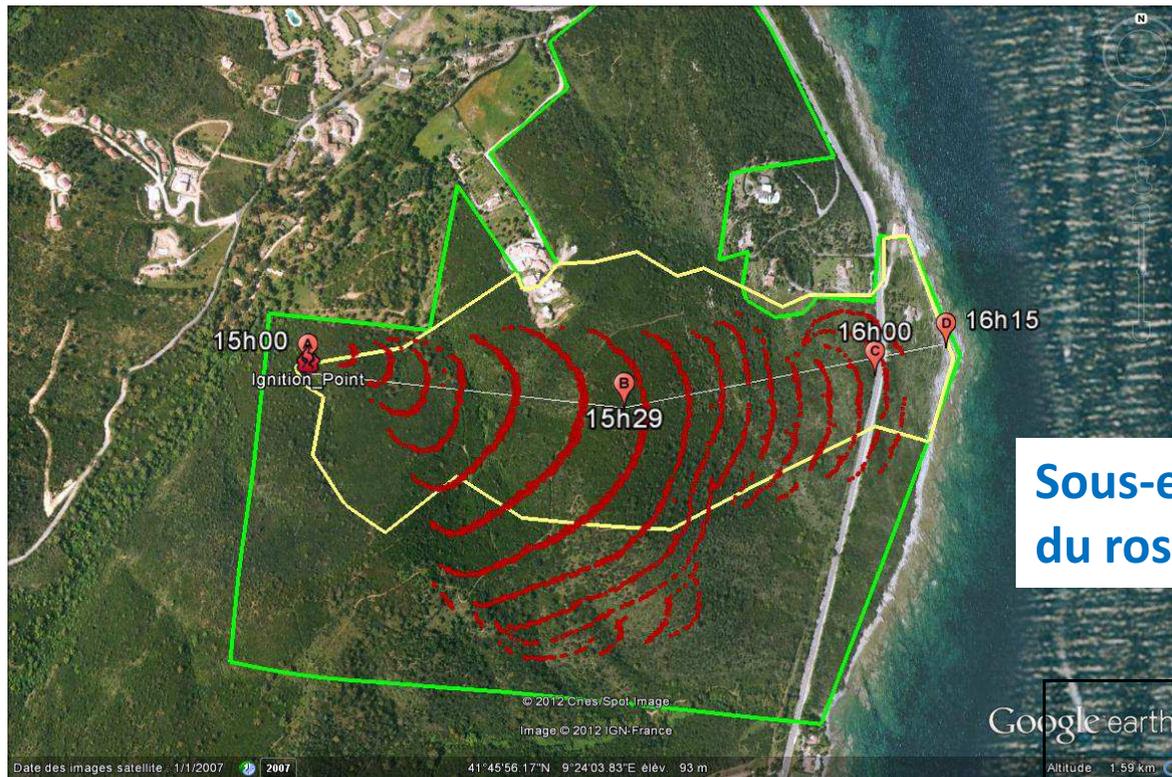


- Surface brûlée: 29 ha
- Durée du feu: 1h15min
- points et temps de passage du feu (Santoni et al., 2011)

- Modèle numérique du terrain
25m×25m
 - Espèce dominante: *Erica arborea*
 - Teneur en eau: 69%
 - Calcul du vent local à partir du vent moyen (7m/s, direction 250°)
(Flowstar)
 - HR de l'air: 42%
 - Taux de remplissage: 50%
 - ➔ Réseau amorphe polydisperse
- (Santoni et al., 2011)

Validation du modèle de propagation

Validation sur le feu de Favone (Corse, 2009)



Sous-estimation
du ros

Surestimation
De la surface
brûlée

	Ros (m/min)		Aire Brûlée (ha)
	[A-B]	[B-C]	
Réel (SPE)	16.8	13.3	29
Prédite	14.0	10.8	34
Erreur relative	17%	19%	17,2%

Ecarts dus:

- Changement d'orientation du vent moyen
- Non prise en compte des moyens de lutte
- Mauvaise estimation de certains paramètres

→ étude de sensibilité

Etude de sensibilité

C'est étudier l'effet de variations de certains facteurs (input) sur certaines réponses (output) → Identifier et hiérarchiser les paramètres influents du modèle

- Réseau régulier 100m x100m : terrain plat
- Végétation homogène : chêne Kermès
- Strates de diamètre 2 m et de hauteur 2.5 m

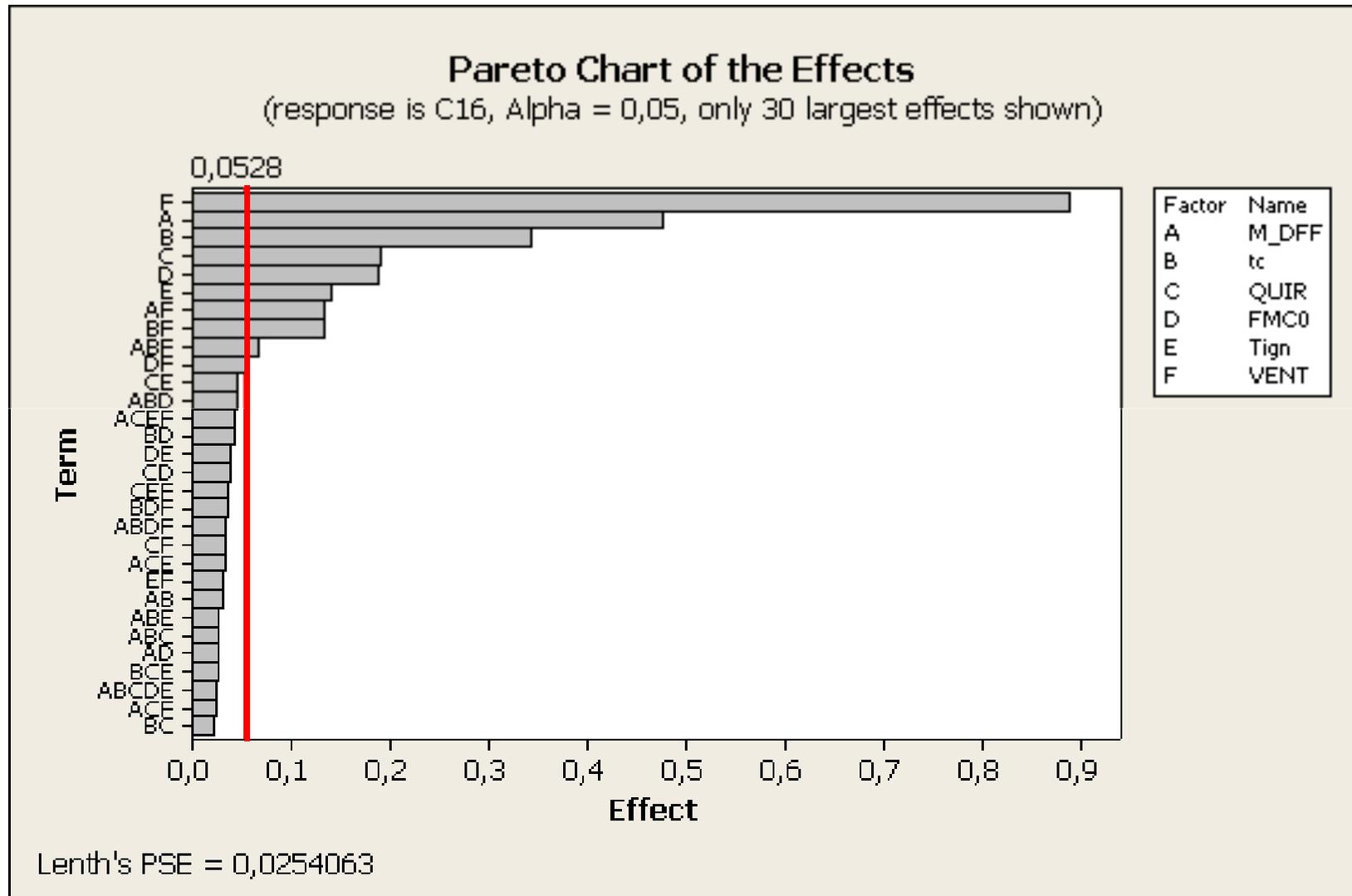
Plan factoriel complet:
6 facteurs
2 niveaux

Facteur	Niveau de référence	Niveau bas (-1)	Niveau haut (+1)
Charge sèche du végétal (kg/m ²)	3.0	2.5	3.5
Temps de résidence de flamme (s)	30	27	33
Teneur en eau initiale du végétal	0.2	0.16	0.24
Température d'allumage (K)	550	540	560
Fraction rayonnée	0.5	0.45	0.55
Vitesse du vent (m/s)	5	4	6



2⁶=64 simulations

Diagramme de Pareto



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

Approximation du premier ordre

$$\begin{aligned}\overline{ros}_1 = & 1.49 + 0.48(m_{DWF}'' - 3) - 0.06(t_c - 30) + 1.91(\chi_r - 0.5) \\ & - 2,35(FMC_0 - 0.2) - 0.01(T_{ign} - 550) + 0.44(U - 5)\end{aligned}$$

Approximation du second ordre

$$\begin{aligned}\overline{ros}_2 = \overline{ros}_1 & - 0.01(m_{DWF}'' - 3)(t_c - 30) \\ & + 0.15(m_{DWF}'' - 3)(\chi_r - 0.5) + \dots\end{aligned}$$

Conclusions

- ✓ Le modèle hybride développé permet désormais:
 - ✓ de prendre en compte la convection et les pertes radiatives dans le préchauffage d'un site exposé au feu
 - ✓ de mieux représenter la réalité du paysage (amorphisme, polydispersité)

- ✓ Le modèle a été validé sur un brûlage dirigé et sur un feu réel

- ✓ L'étude de sensibilité a permis:
 - ✓ d'identifier et de hiérarchiser les paramètres les plus influents du modèle
 - ✓ D'établir des corrélations simples reliant la vitesse de propagation à ces paramètres influents

Merci pour votre attention