

MODÉLISATION HYBRIDE STOCHASTIQUE-DÉTERMINISTE DES INCENDIES DE FORÊTS

Yann BILLAUD

Équipe - Dynamique des Feux - IUSTI de Marseille

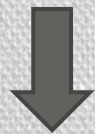
Équipe - SPE - de Corte

14^{ème} rencontre GDR Incendie - Nancy -
08-09 Décembre 2011



Constat récent: comportement fractal des grands feux

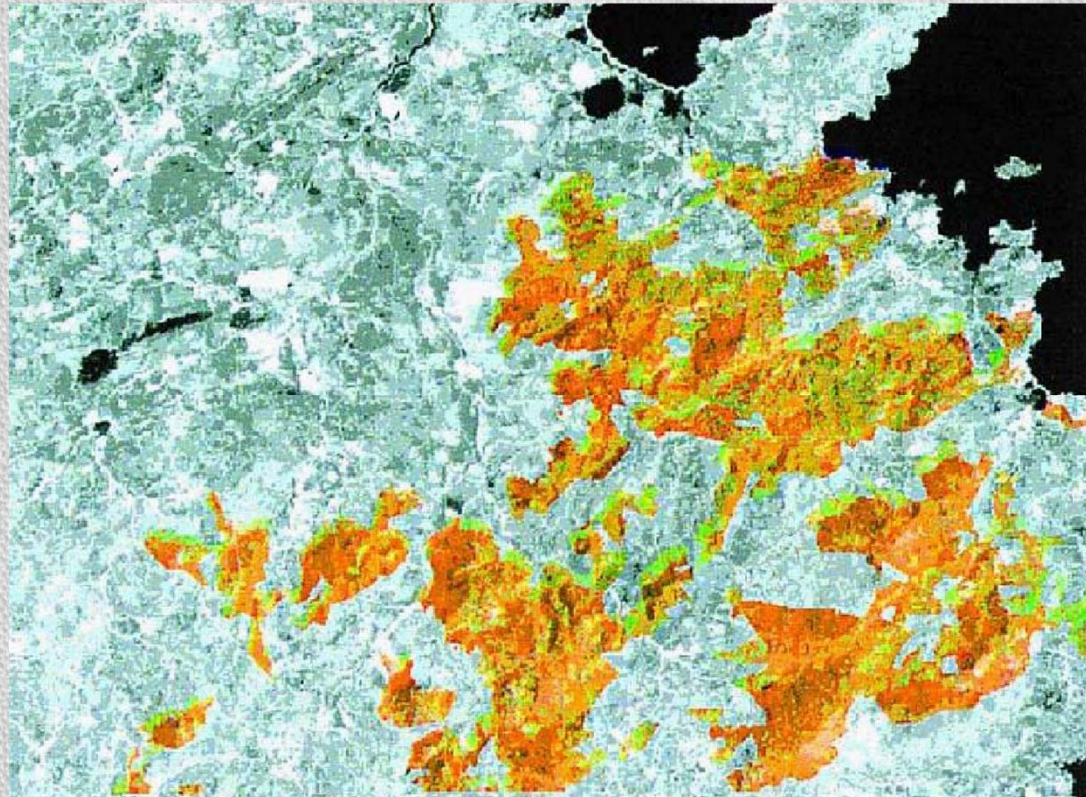
A l'échelle Gigascopique
Comportement fractal
du front de feu



Hétérogénéités locales:
Vent, Relief, Végétation



Modèle Stochastique



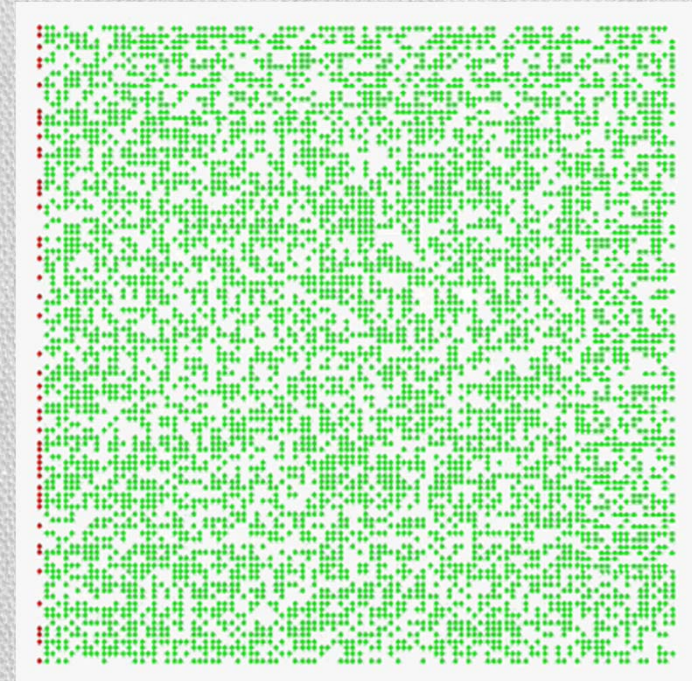
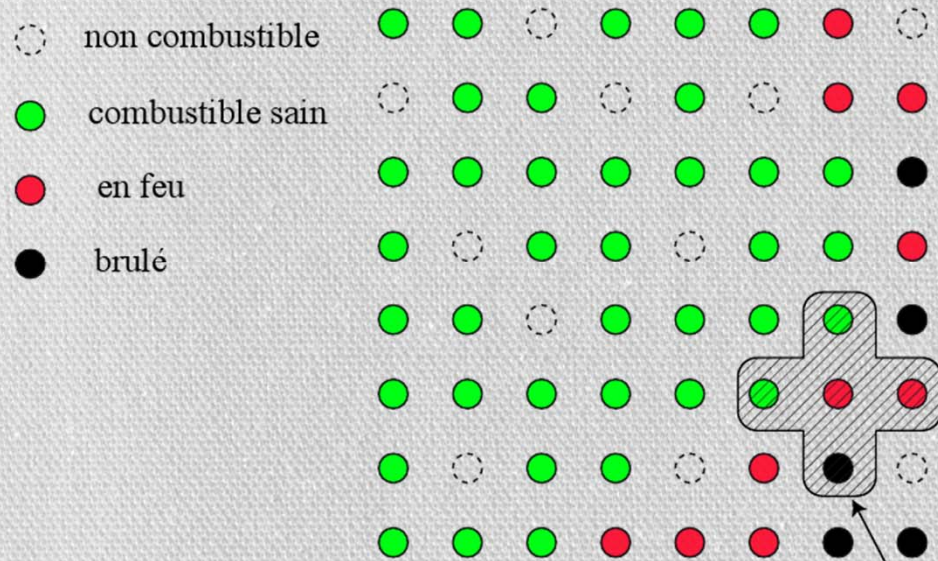
MODIS, Juillet 2003, Italie du Nord

Dimension fractale $D_p \approx 1,3$
[Caldarelli et al, 2001]

Limite des réseaux réguliers (percolation, automates cellulaires)

Transmission → *Plus proches voisins*

Site:



Modèle de percolation, $p=0,59$

Domaine = 100×100 sites

→ ne reproduisent pas correctement les feux réels (V_p, S_b, D_f)
[de Gennes, 1976]

→ limités à des configurations simples (sans vent ni pente,
végétation mono-disperse)

Une nouvelle approche: le réseau de « petit monde »

Transmission → $\begin{cases} \text{Domaine d'interaction} \\ \text{Courts-circuits} \end{cases}$

Site:

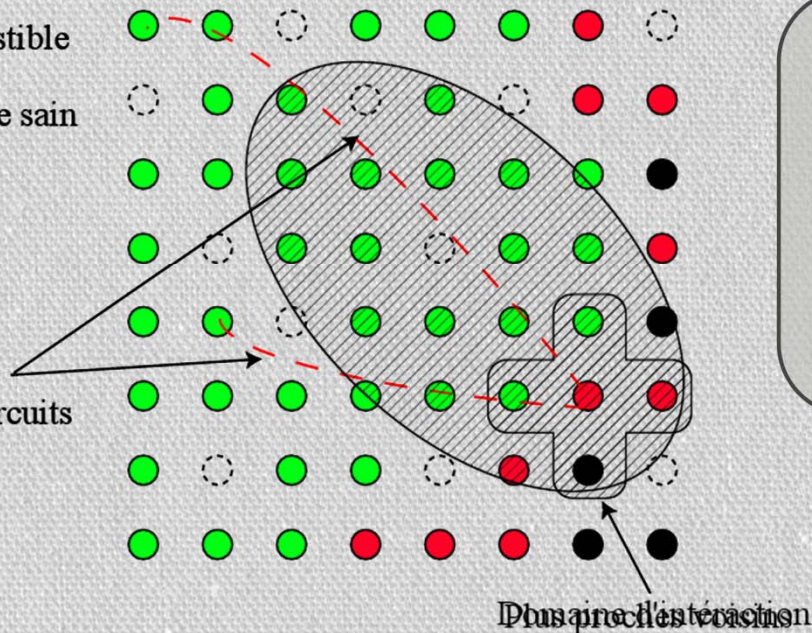
○ non combustible

● combustible sain

● en feu

● brûlé

Courts-circuits

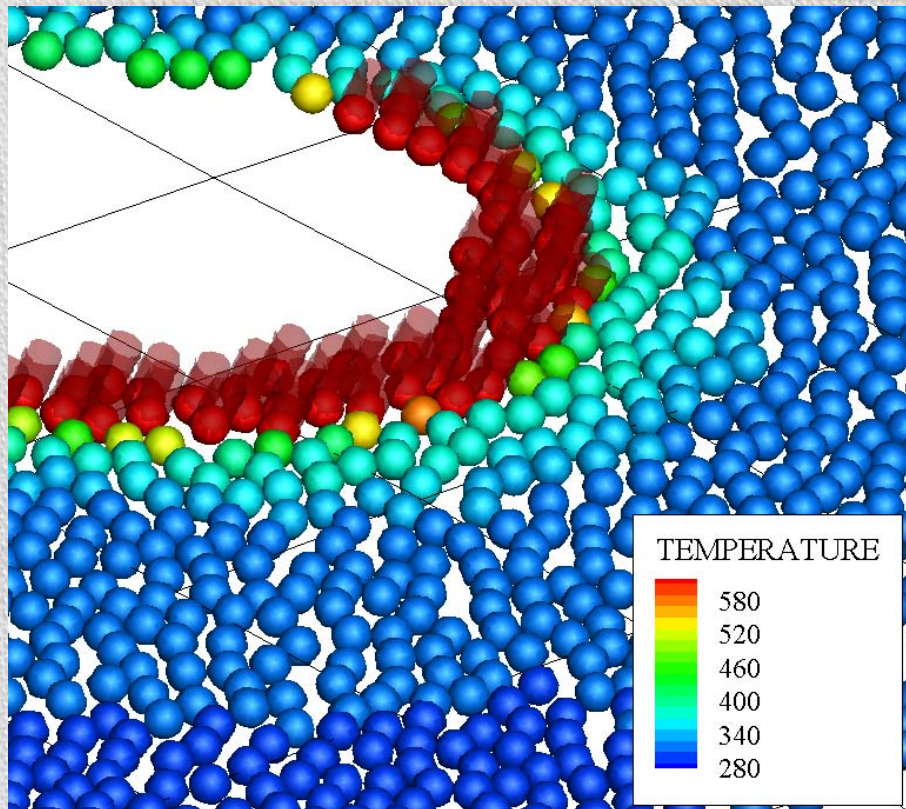


- ✓ Introduits par Watts et Strogatz en 1998.
- ✓ Modélisation de réseaux sociaux (propagation des épidémies, virus informatiques, etc.)

Extension aux feux de forêts [Zekri, Porterie, Clerc, 2005]:

- domaine d'interaction d'un site en feu
- procédure de pondération des sites basée sur la physique de la combustion

I - PARAMETRES DU MODELE



I.1/ Réseau Amorphe

I.2/ Modèle de Site

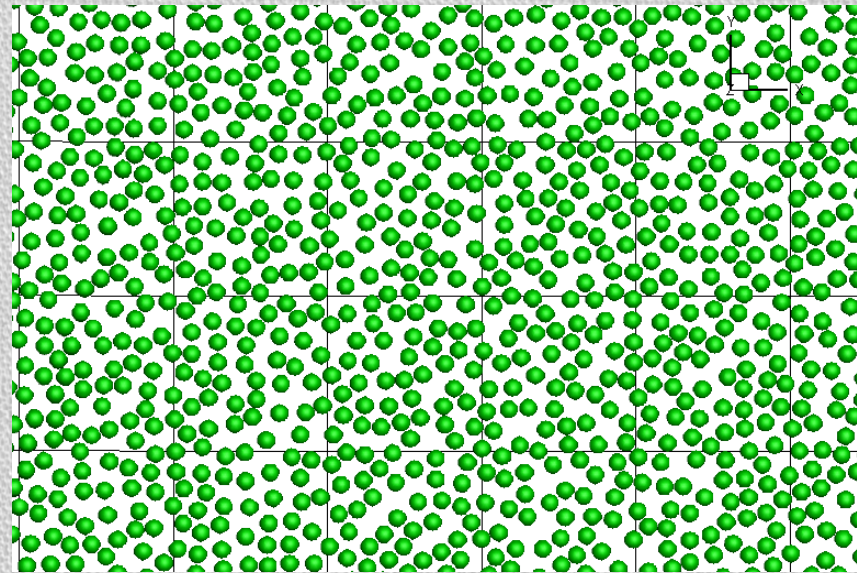
I.3/ Bilan d'énergie

I.4/ Modèle de Site en
feu

I.1/ Réseau amorphe

Hypothèse #1: Sites
sphériques

Hypothèse #2: Répartition
homogène (disposition
aléatoire, condition de non-
recouvrement)

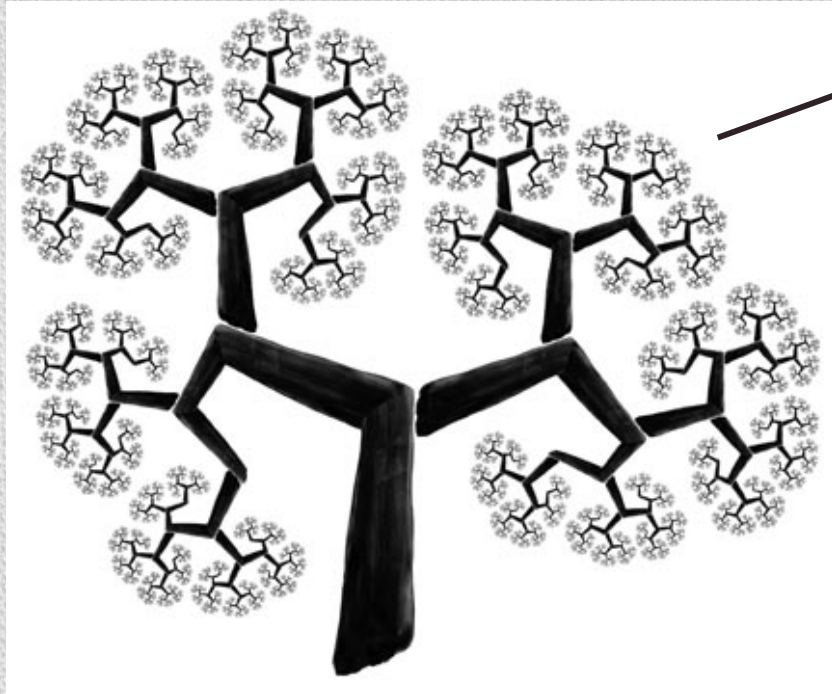


Réseau constitué de sites de Diamètre égal à 3m.

Taux d'occupation (Surface occupée / Surface totale) = 0,5

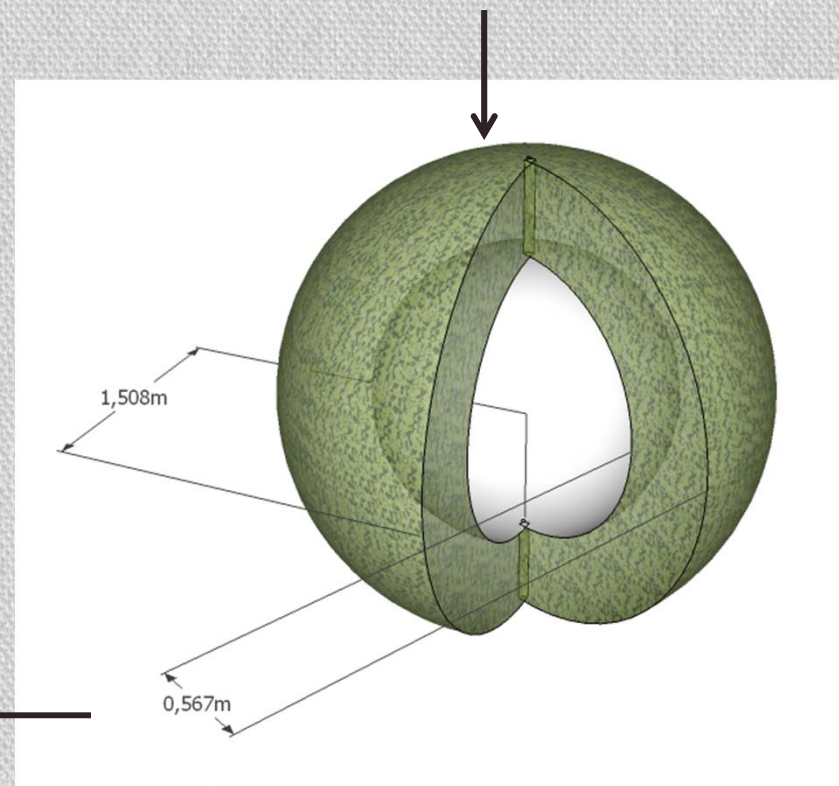
Incidence de 70° par rapport à la normale $\rightarrow 0^\circ$ 6

1.2/ Modèle de site



Arbre a structure fractal [A. Collin et al., 2011]

Hypothèse #3: Particules = Enveloppe sphérique

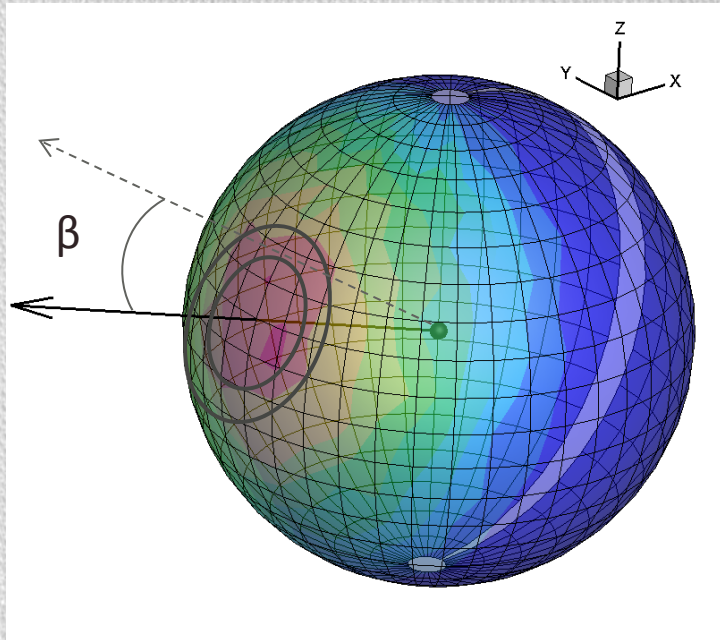


Enveloppe sphérique de rayon extérieur R_{site} et d'épaisseur δ

Hypothèses #4, 5 et 6:

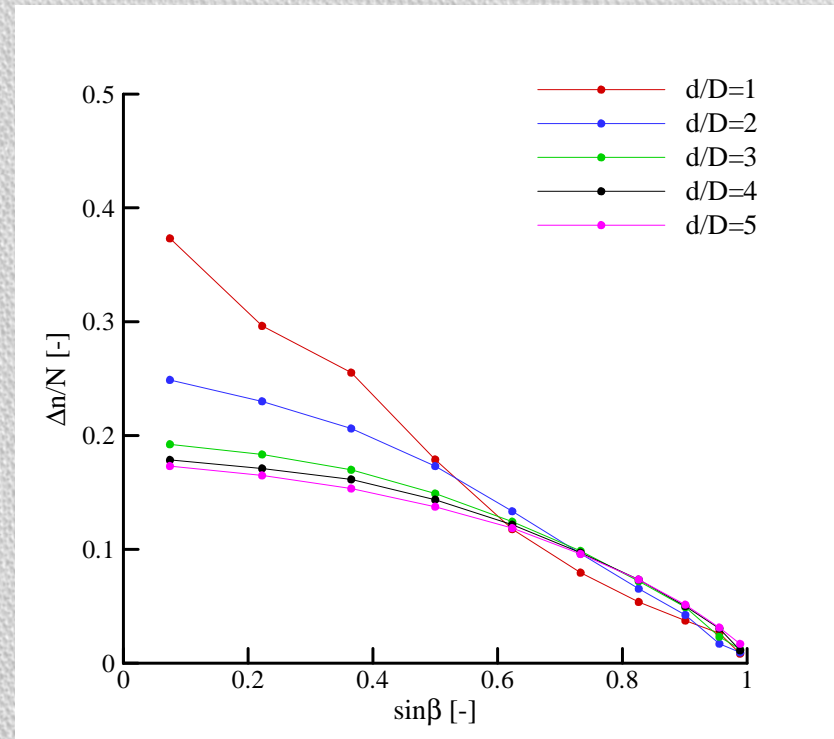
- Distribution homogène des particules
- Flux reçu moyenné sur la $\frac{1}{2} S.$ → 1D
- Flux reçu moyenné sur δ → 0D

1.2/ Modèle de site → Hypothèse #5



**Cartographie de la densité de quanta reçue
à la surface d'un site**

Le rapport distance/taille de site est de 4.
Discrétisation : $n_\theta \times n_\psi = 21 \times 41$, $n_q = 10^5 \text{ q.m}^{-2}$



**Distribution du nbre de q. reçu par couronne
adimensionné par le nbre de q. total selon $\sin \beta$, $1 < d/D < 5$**

Surface touchée → ½ sphère, même à faible distance
Distributions du flux radiatif d'autant + homogène que d est grand →
Transition à $d=3D$

1.2/ Modèle de site → Hypothèse #6

Milieu thermiquement fin?



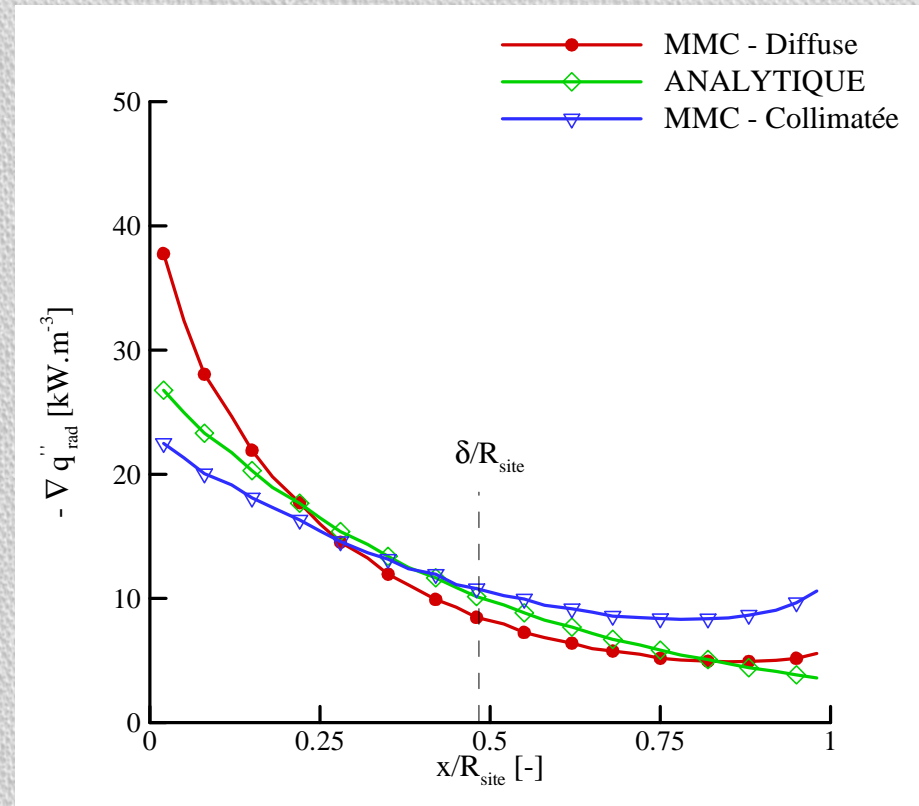
Modélise les Transferts radiatif dans le lit (1D) par une méthode de Monte Carlo

- Le lit (milieu diphasique, absorbant et diffusant) assimilé à un Gaz Gris ($w=0,1$)
- Direction d'émission des quanta incidents : Flux collimaté ou diffus ($x=0$)
- La distance d'interaction quanta/matière s :

$$s = \frac{-\ln R_s}{k} \text{ avec } k = (1 - \tau_k)\alpha_k\sigma_k/4 (= 0,28)$$

[Monod et al., 2009]

 - A $x=s$: Absorption ou Réflexion
- Rémission isotrope des couches chaudes



Divergence du flux radiatif dans un lit soumis à un flux incident de $20 \text{ kW}\cdot\text{m}^{-2}$, $n=10^5$, $\Delta x=2 \text{ cm}$

- ✓ La relation de BEER-LAMBERT nous donne une bonne approximation
 - ✓ 63% du flux incident est capté par la couche d'épaisseur δ

$$\dot{q}'''_{rad} = \dot{q}''_{inc} (1 - e^{-1}) / \delta$$

1.3/ Bilan d'énergie

$$q_{sensible} + q_{latent} = \dot{q}'''_{rad,g} + \dot{q}'''_{rad,l} + \dot{q}'''_{conv,g}$$

Gain par rayonnement (MMC):

$$\frac{nq(1 - e^{-1})}{\delta^{1/2} S_{site}}$$

Pertes par rayonnement:

$$\frac{\varepsilon_{fb} \sigma (T_{site}^4 - T_{\infty}^4)}{\delta}$$

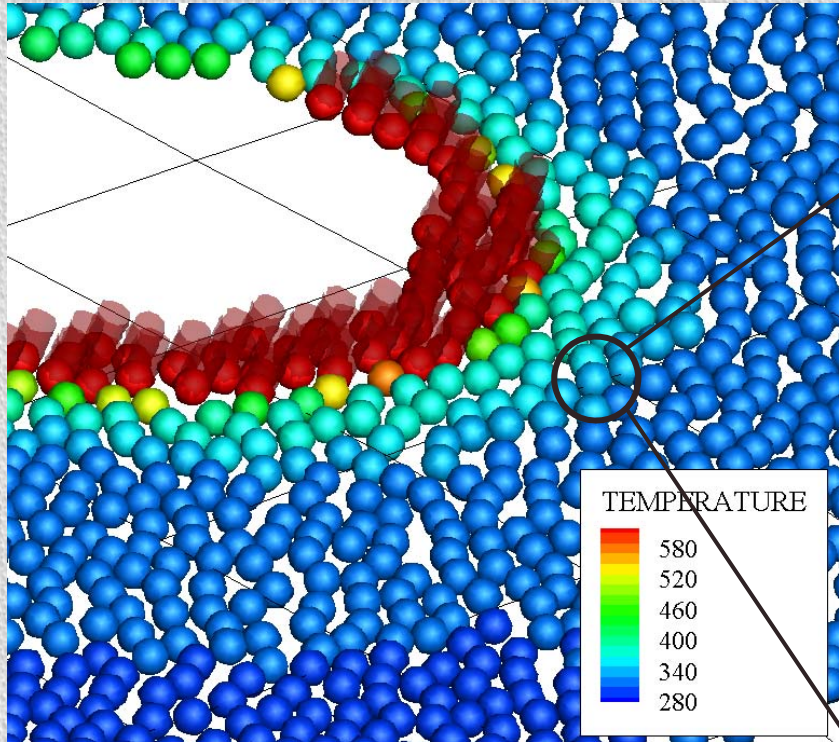
Hypothèses #8, 9 et 10:

- Chaleur latente de Pyrolyse négligée
- Élévation de Température et Évaporation ont lieu séparément
- Inflammation à $T=571K$ [Grishin]

Gain par Convection [Pagni, 1973]:

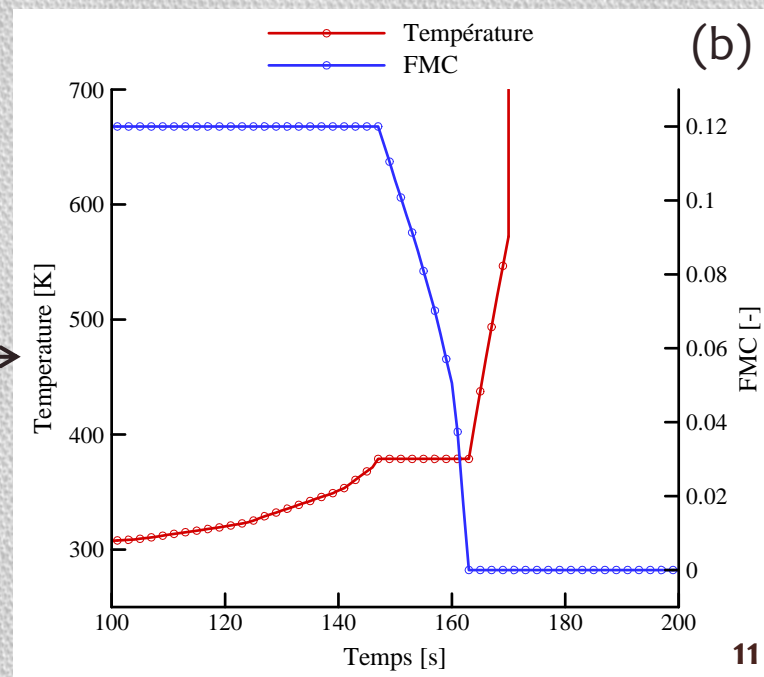
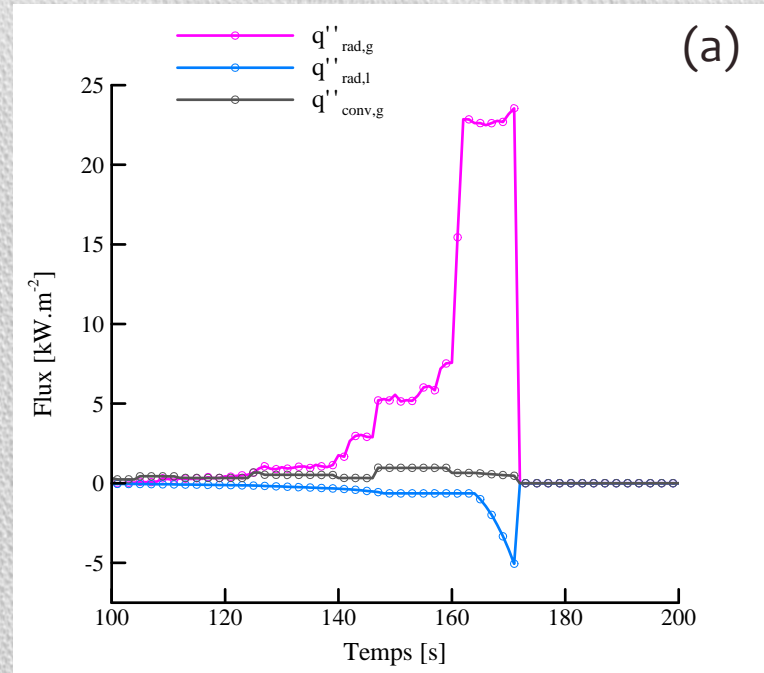
$$\frac{0,565 k_{fl} Re_y^{1/2} Pr^{1/2}}{y\delta} (T_{fl} - T_{site}) e^{-0,3y/L_{fl}}$$

1.3/ Bilan d'énergie

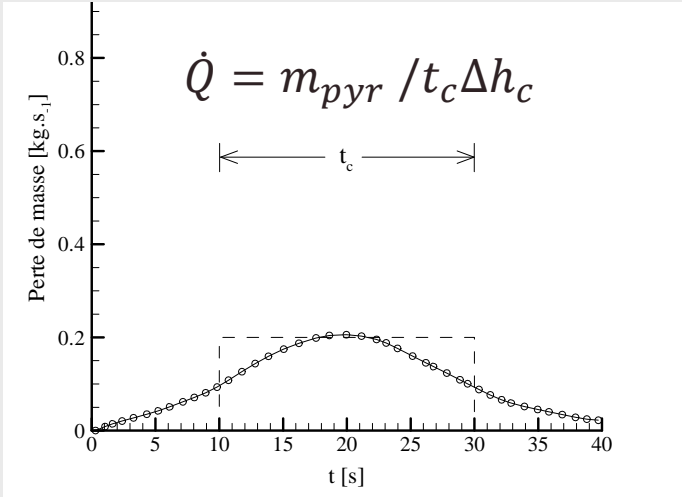


Evolution au cours du temps (a) des flux, (b) de la température et de la teneur en eau d'un site situé sur le parcours du front

L'évaporation a lieu à température constante (palier), le site s'enflamme à $T=571$ K, le rayonnement des flammes est prédominant



I.4/ Modèle de Site en feu

t_c [s]	<p>[Trabaud, 1976], [Mell et al, 2006]</p>	 <p>$\dot{Q} = m_{pyr} / t_c \Delta h_c$</p> <p><i>Evolution au cours du temps de la perte de masse mesurée lors de la combustion d'un pins Douglas.</i></p>	<p>30 ($\dot{Q} = 7 \text{ MW}$)</p>
H_f [m]	<p>[Heskestad, 1983], [Putnam, 1965]</p>	$H_{f0} = -1,02D + 0,0148\dot{Q}^{2/5}$ $H_f = H_{f0} \left(1 + 4 \frac{u^2}{gH_{f0}} \right)^{-0,5}$	<p>4,5 ($U_w = 2 \text{ m.s}^{-1}$)</p>
α_f [°]	<p>[Albini, 1981]</p>	$\tan(\alpha_f) = 1,22F_r^{0,5}$ $F_r = u^2 / gH_f$	<p>20</p>

1.4/ Modèle de Site en feu



Jusqu'à présent, le pouvoir émissif de la flamme ne dépendait pas du site.

→ Coefficient d'extinction moyen : $\bar{\kappa} = 0,3 \text{ m}^{-1}$

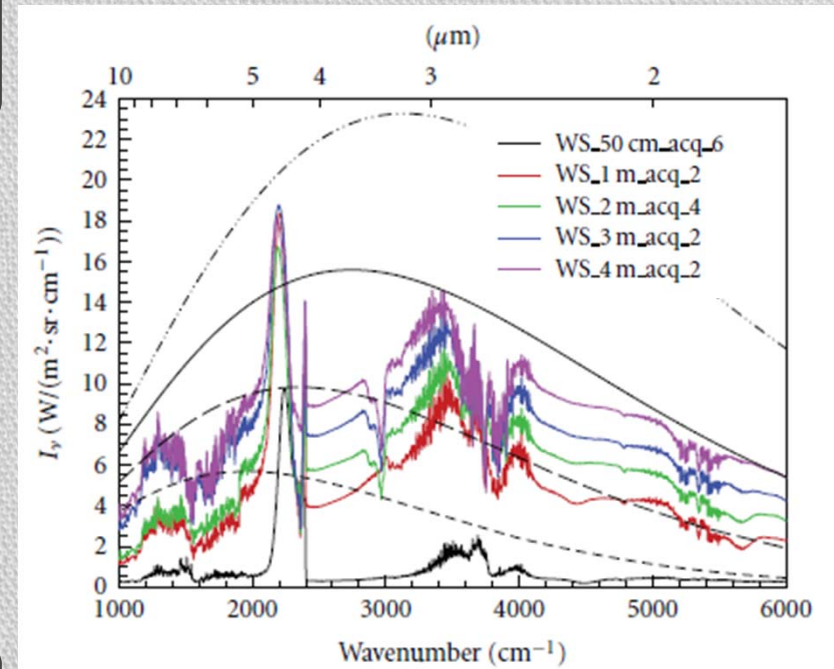
→ Température moyenne de flamme : $T_{ref} = 1200 \text{ K}$

$$\varepsilon = 1 - e^{-\bar{\kappa} D_{site}}$$

$$P'' = \varepsilon M^o(T_{ref})$$



Le pouvoir émissif d'un site en feu dépend ainsi de la taille du site.



Spectres de flammes de frisure de bois d'épaisseur comprises entre 1 et 4 m
[Boulet et al., 2011]

L'écrantage, qui était total, dépend maintenant du site traversé.

→ La probabilité qu'un quanta traverse une flamme est proportionnelle à l'absorptivité de celle-ci et dépend donc de la longueur du trajet du quanta dans la flamme.

II – CAS D'ÉTUDE



II.1/ Présentation

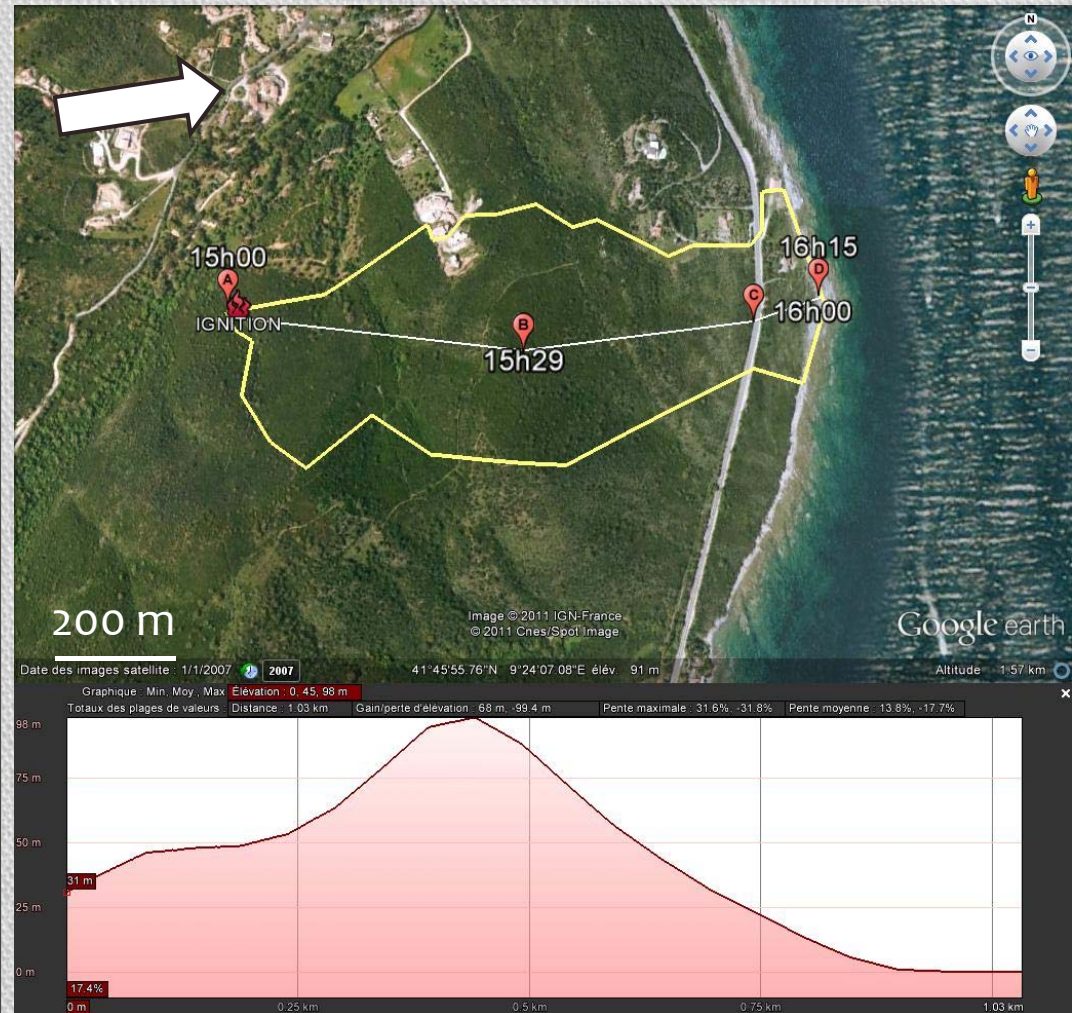
II.2/ Données

II.3/ Résultats

II.1/ Présentation

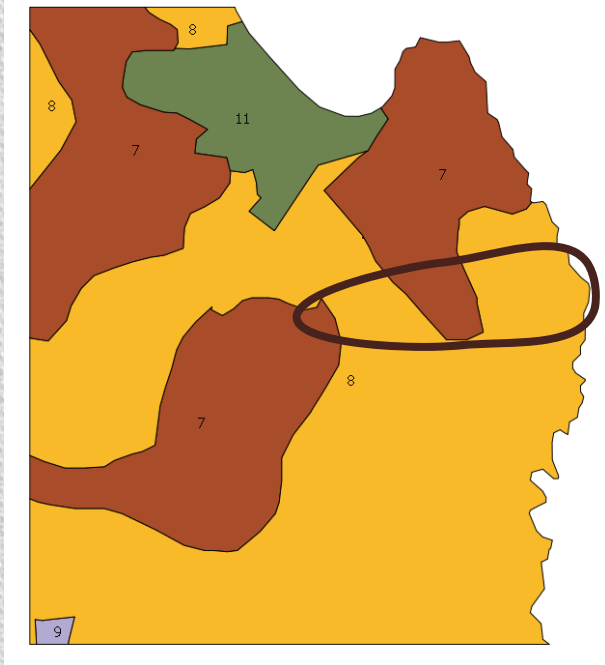
Données fournies par le SPE de Corte :

- Vitesse du vent entre 5 et 7 m.s⁻¹, orienté entre 240° et 270°
- Humidité Relative de l'air entre 41 et 46%
- Modèle Numérique de terrain (25×25 m)
- Caractérisation de la végétation : espèces, teneur en eau, propriétés physiques des éléments fins
 - Point d'éclosion : 41°45'57.08", long. 09°23'44.84", lat.



Feu de Favonne, Corse (Juillet 2009), 30 ha, 1h15min
Temps de passage aux points A, B, C et D. Contours brûlés (jaune). [Santoni et al., 2011]

II.2/ Données → Végétation



Classes de végétation (IFN)

7 - Futaie de feuillus

8 - Maquis boisé de feuillus

11 - Zones urbanisées / Cultures



Espèce majoritaire : Arbousier (40-50%) Génération du réseau à l'intérieur du polygone qui

$$\sigma_k = 5544 \text{ m}^{-1}$$

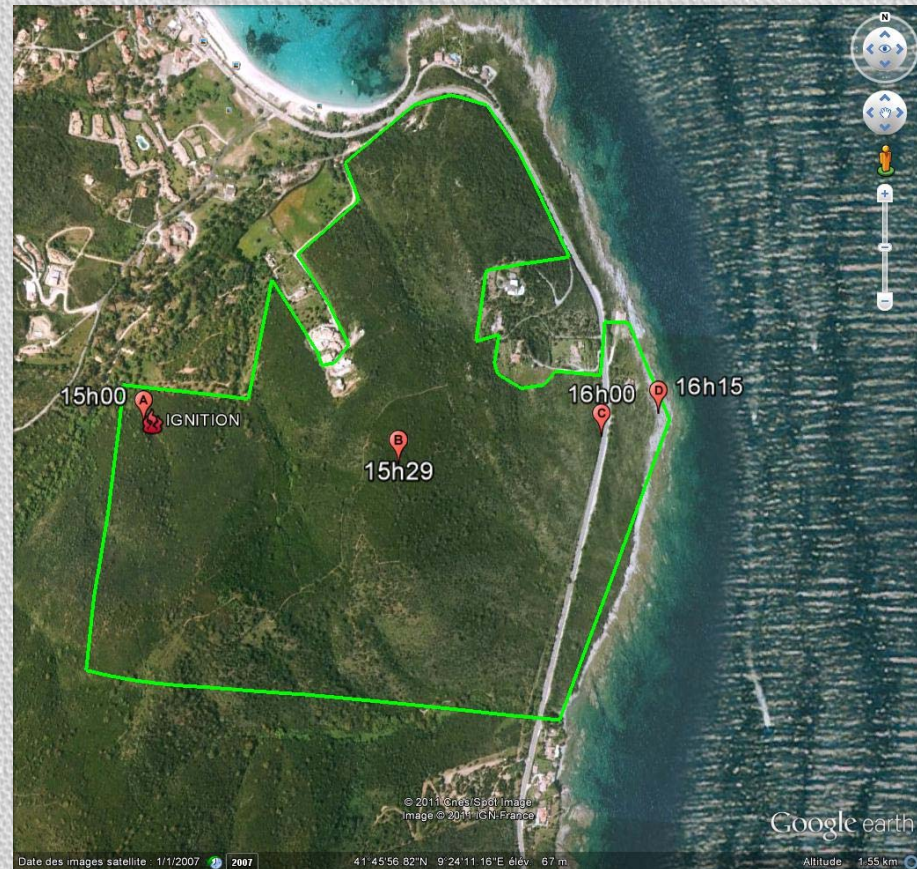
$$\text{FMC} = 8\%$$

$$D_{\text{Site}} = 3 \text{ m}$$

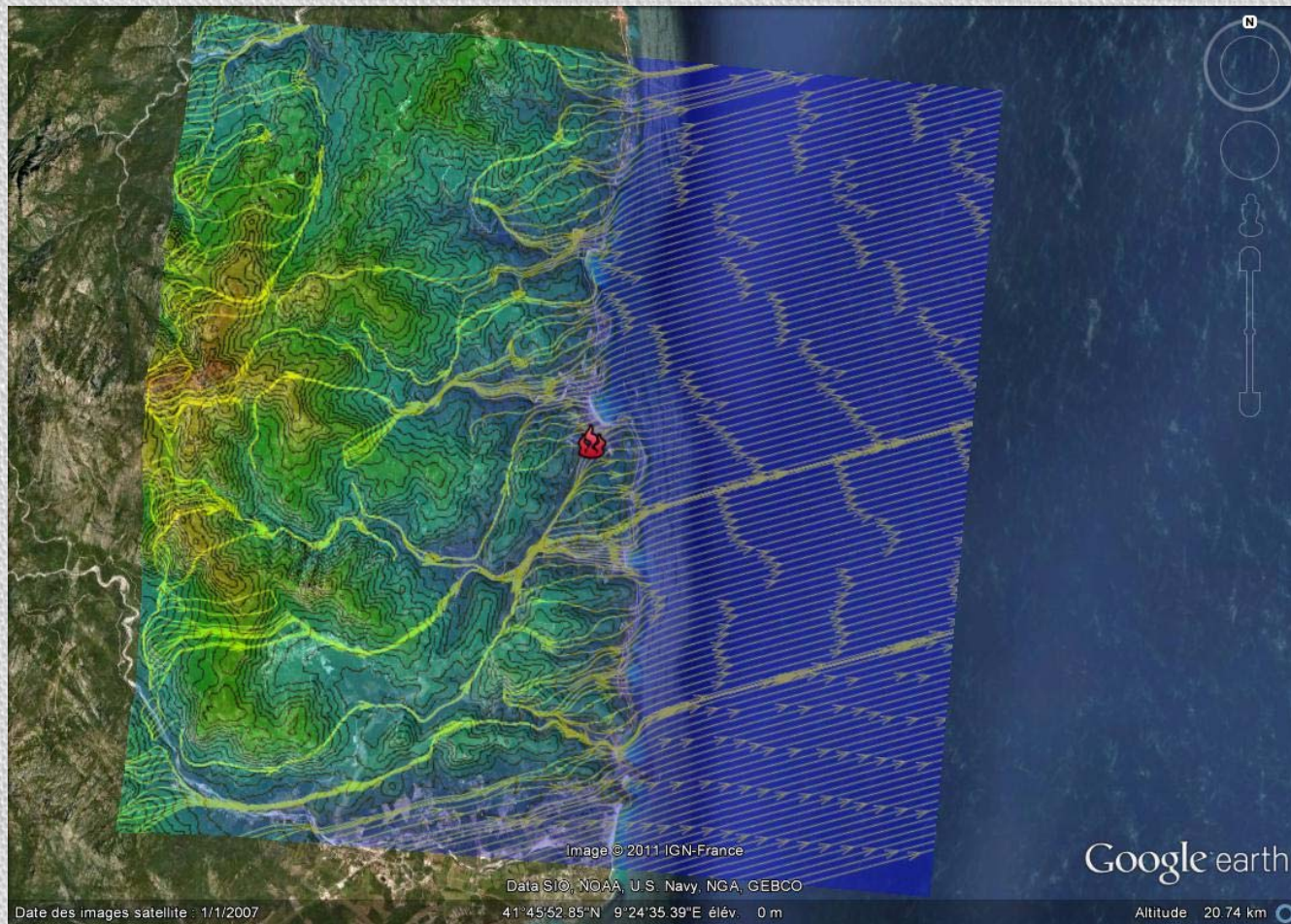
exclut les zones sans végétation



Intérêt du Réseau amorphe



II.2/ Données → Vent

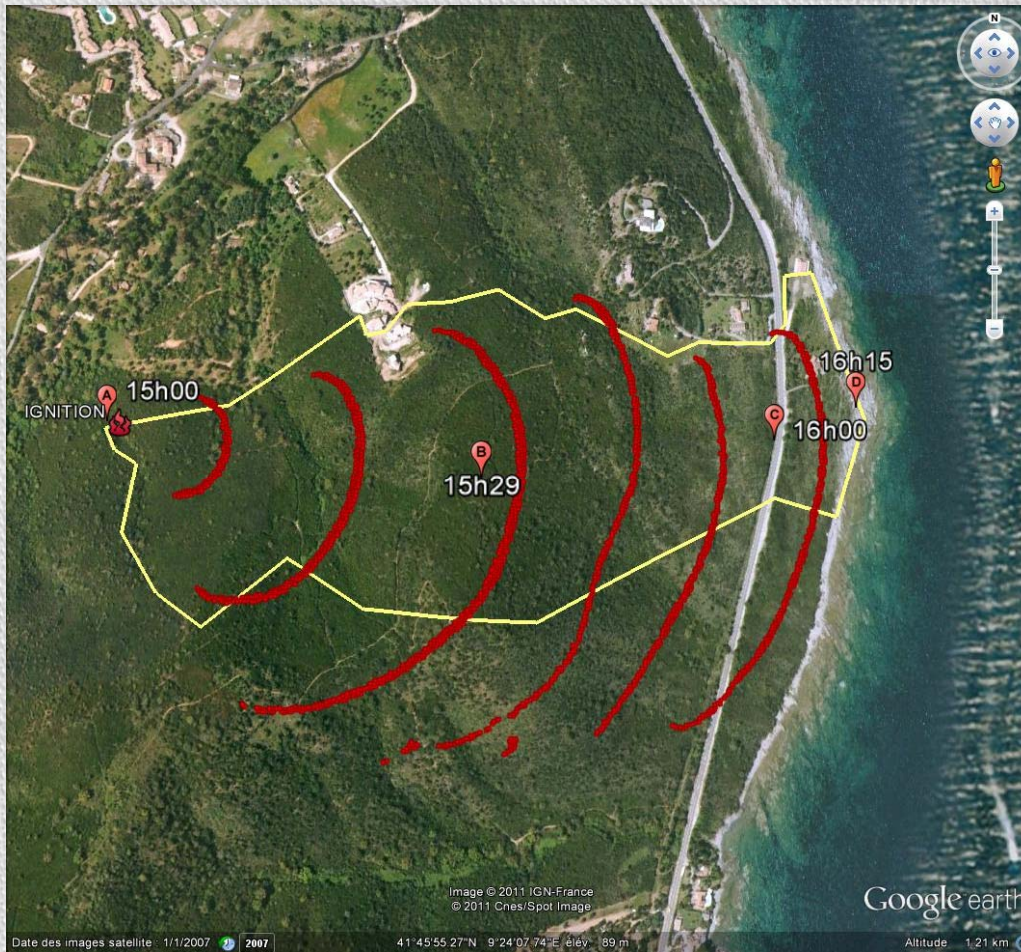


Simulation du vent local à mi-hauteur de flamme → Wind-Ninja 2.0

Vent moyen 6 m.s^{-1} à 10 m au dessus du sol, orienté à 255°

Domaine $15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$. Végétation uniforme (bush)

II.3/ Résultats



**Position du front simulé (rouge) toutes les 10 min
-Vs- Contour réel final (jaune)**

Porosité	$\alpha_k (-)$	2×10^{-3}
Tps de Comb.	$t_c (s)$	30
Teneur en Eau	$FMC (-)$	0,08
Humidité Relative Air	$HR (-)$	0,3
Taux d'Occupation	$\tau_{occup} (-)$	0,45
Pouvoir émissif	$P'' (kW.m^{-2})$	80
Vitesse du Vent Moy. (10 m)	$U_{\infty} (m.s^{-1})$	6
Température d'Infl.	$T_{infl} (K)$	571

Jeu de paramètre utilisé pour la simulation

II.3/ Résultats

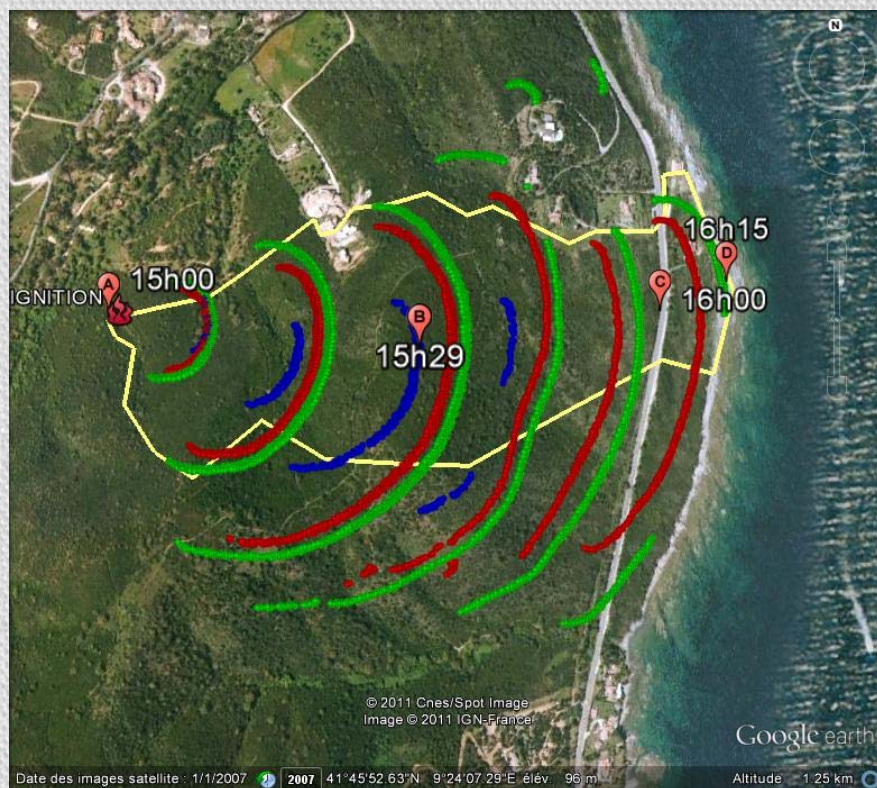
	Vitesse (m.s ⁻¹)		Surface Brûlée (enveloppe) (ha)
	[A-B]	[B-C]	
Expérimental	0,28	0,21	28,00
Simulation	0,31	0,23	42,74*

$$*(n_{\text{brûlés}} \times S_{\text{site}} / \tau_{\text{occup}})$$

Les vitesses de propagation entre [A-B] et [B-C] sont assez bien prédites (écart $\approx 8\%$).
Le rapport d'intervention fait état d'attaque latérales du feu.
La tête du feu n'a subi aucune intervention.

La surestimation de la surface brûlée s'explique en partie par la non prise en compte de l'action des services de luttés.

III – ETUDE DE SENSIBILITE



III.1/ Plan factoriel

III.2/ Résultats

III.3/ Conclusions

III.1/ Plan factoriel

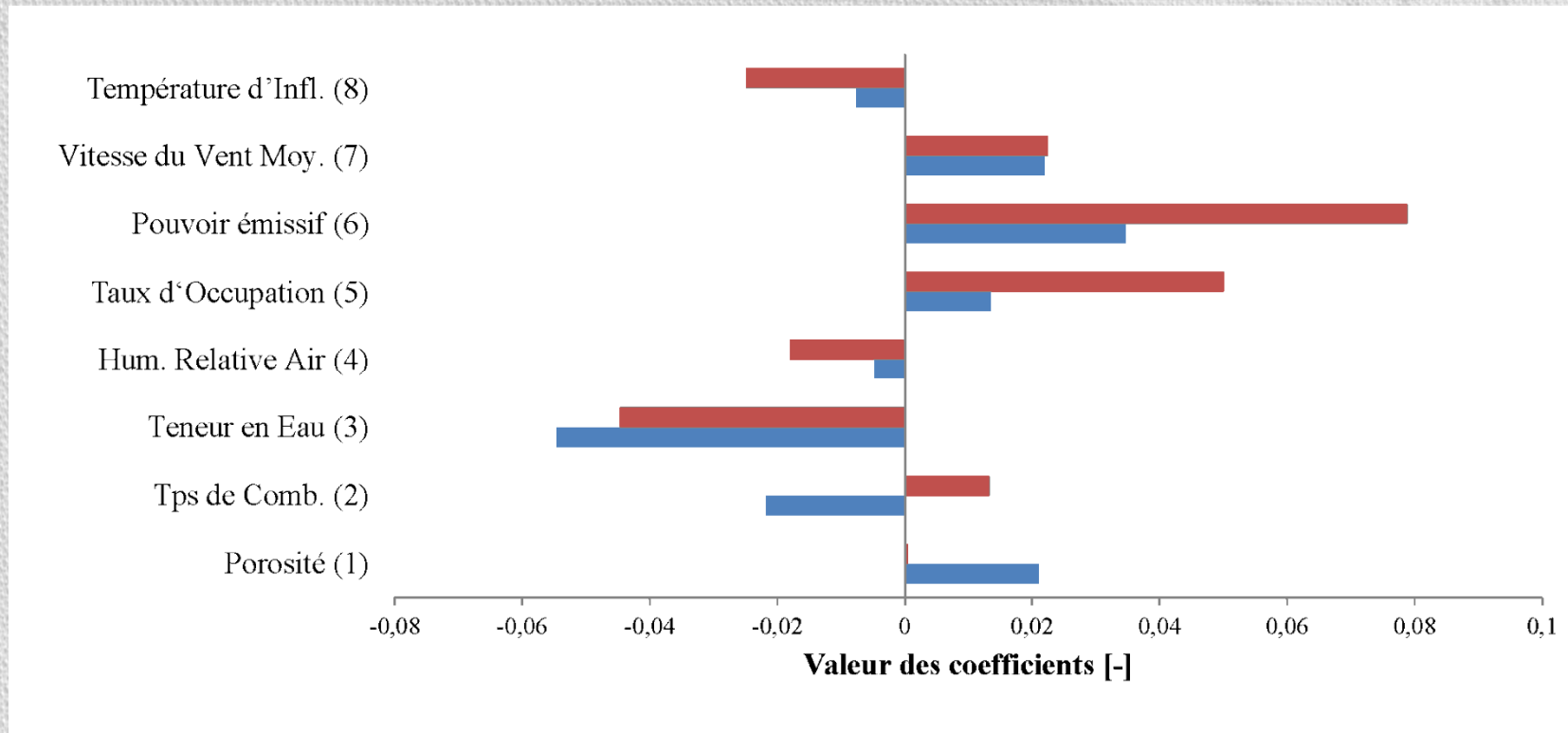
Facteurs	Niveau de Référence	Niveau bas (-1)	Niveau haut (+1)
Densité (1)	$2 \cdot 10^{-3}$	$1,5 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
Temps de combustion (2)	30 s	25 s	35 s
Teneur en Eau (3)	0,08	0,04	0,12
Humidité Relative Air (4)	0,3	0,1	0,4
Taux d'Occupation (5)	0,45	0,4	0,5
Pouvoir émissif (6)	80	70	90
Vitesse du vent (7)	6 m.s-1	4 m.s-1	8 m.s-1
Température d'Inflammation (8)	571	561	581

$2^8 = 256$ essais

Domaine d'étude

Plan Factoriel Complet → Plan Factoriel Fractionnaire 2^{8-3}
 (Aliaser des effets dans des contrastes)

III.2/ Résultats



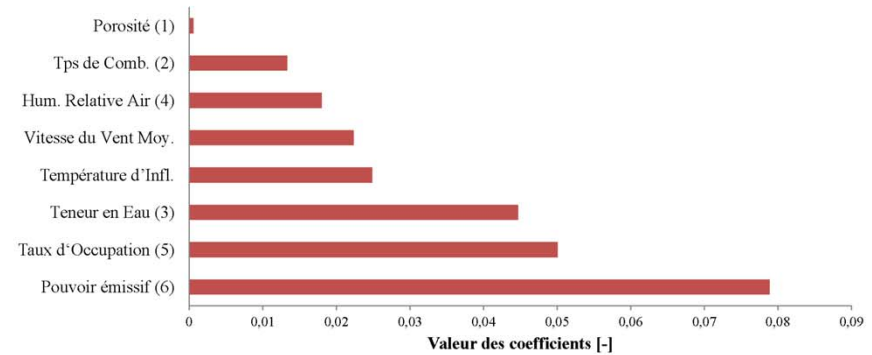
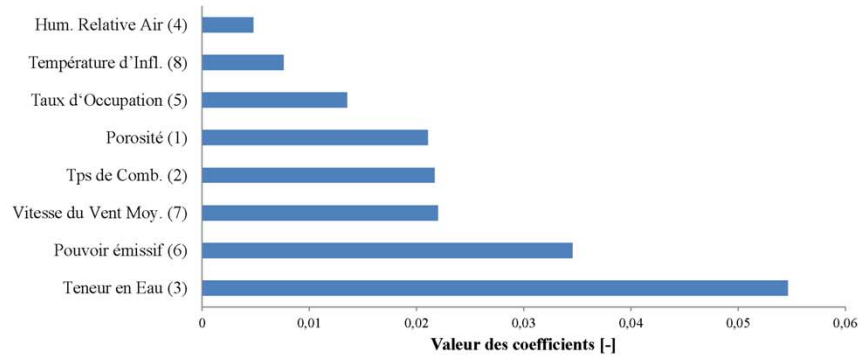
Histogramme des effets des paramètres sur les vitesses de propagation ascendante (bleu) et descendante (rouge).

Plan Factoriel Fractionnaire $2^{8-3}=32$ essais.

→ Signe des coefficients donne le sens de variation. Ex. : $t_c \nearrow \begin{matrix} V_{AB} \searrow \\ V_{BC} \nearrow \end{matrix}$

→ En général, la vitesse descendante est plus sensible (σ_{occup} , P'' , $T_{infl.}$) 22

III.2/ Résultats



Classement des effets par ordre d'influence sur la vitesse de propagation ascendante (bleu) et descendante (rouge).

→ Hiérarchisation des paramètres :

Pouvoir émissif, Taux d'occupation, Teneur en eau

→ Identification des paramètres les plus sensibles

→ Ces paramètres vont nécessiter une attention particulière

III.3/ Conclusions (✓) et Perspectives (○)

- ✓ Modèle de propagation stochastique repose sur une **description déterministe** à l'échelle **macroscopique** du rayonnement d'un site en feu et de l'inflammation d'un site sain
- ✓ Intérêt du réseau **amorphe**
- Effets d'une **distribution** en taille de site?
- ✓ Etude de la sensibilité du modèle à l'aide d'un plan factoriel fractionnaire → **hiérarchisation des facteurs**
- **Validation** à plus grande échelle sur d'autres feux (SPE)
- Configurations **Complexes** (Canyon, Interface Péri-Urbain, Coupures Percolatives, ...)
- Flamme solide, Corps Gris → **Mélange Gaz + Suies, Spectre** (Bandes étroites, Bandes larges, Globaux, ... ???)

Merci de votre attention