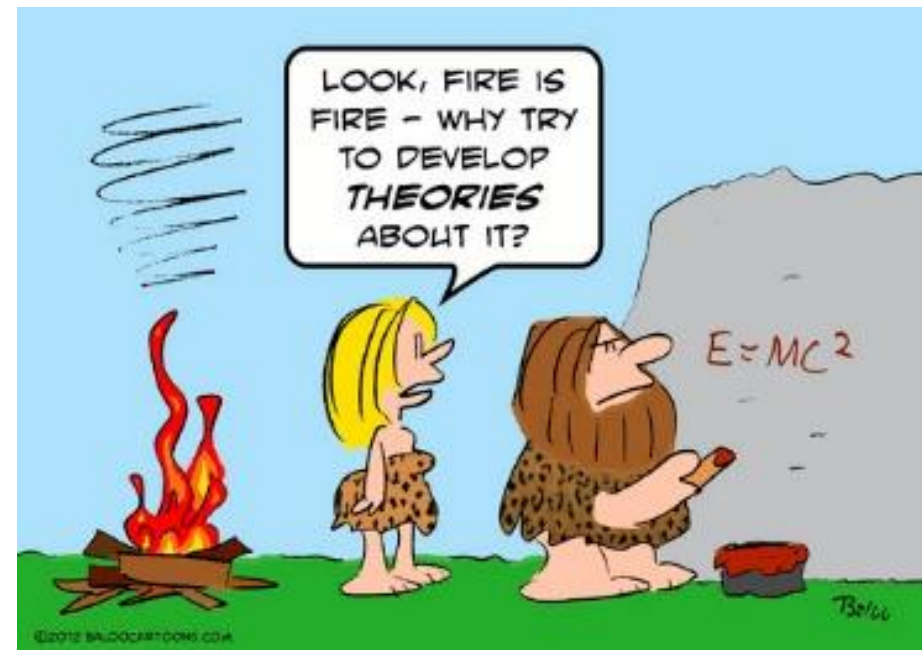


Physique des feux et combustion

Dominique MORVAN
Aix-Marseille Université

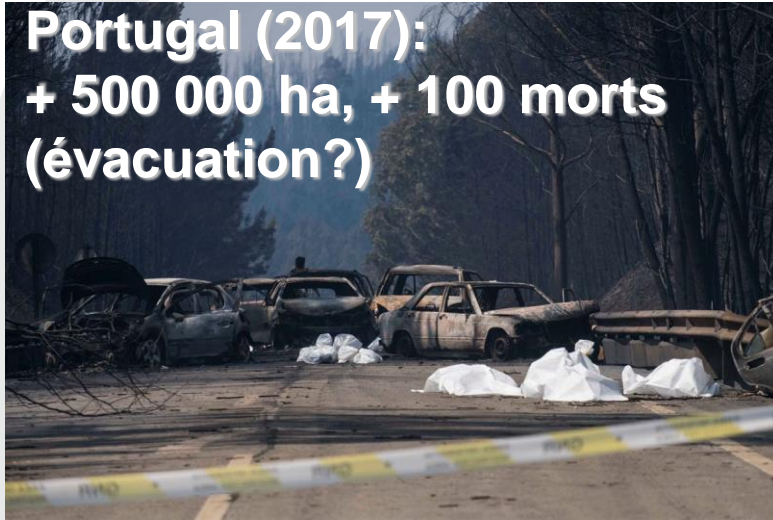


Feux de structure, feux de végétation.





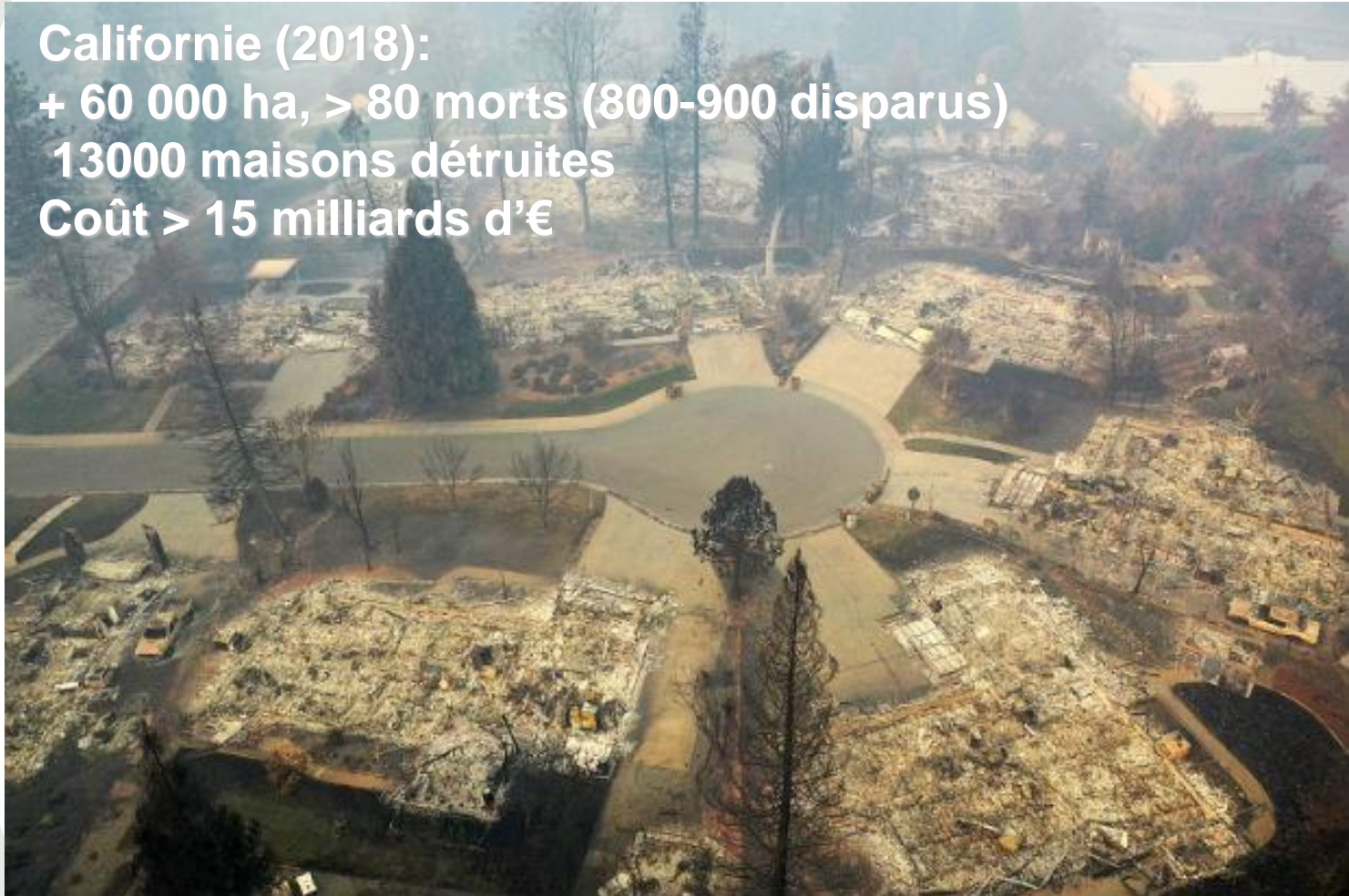
Feux de végétation: évènement catastrophique ou phénomènes naturels ?





Camp fire (Californie, Novembre 2018)

Californie (2018):
+ 60 000 ha, > 80 morts (800-900 disparus)
13000 maisons détruites
Coût > 15 milliards d'€

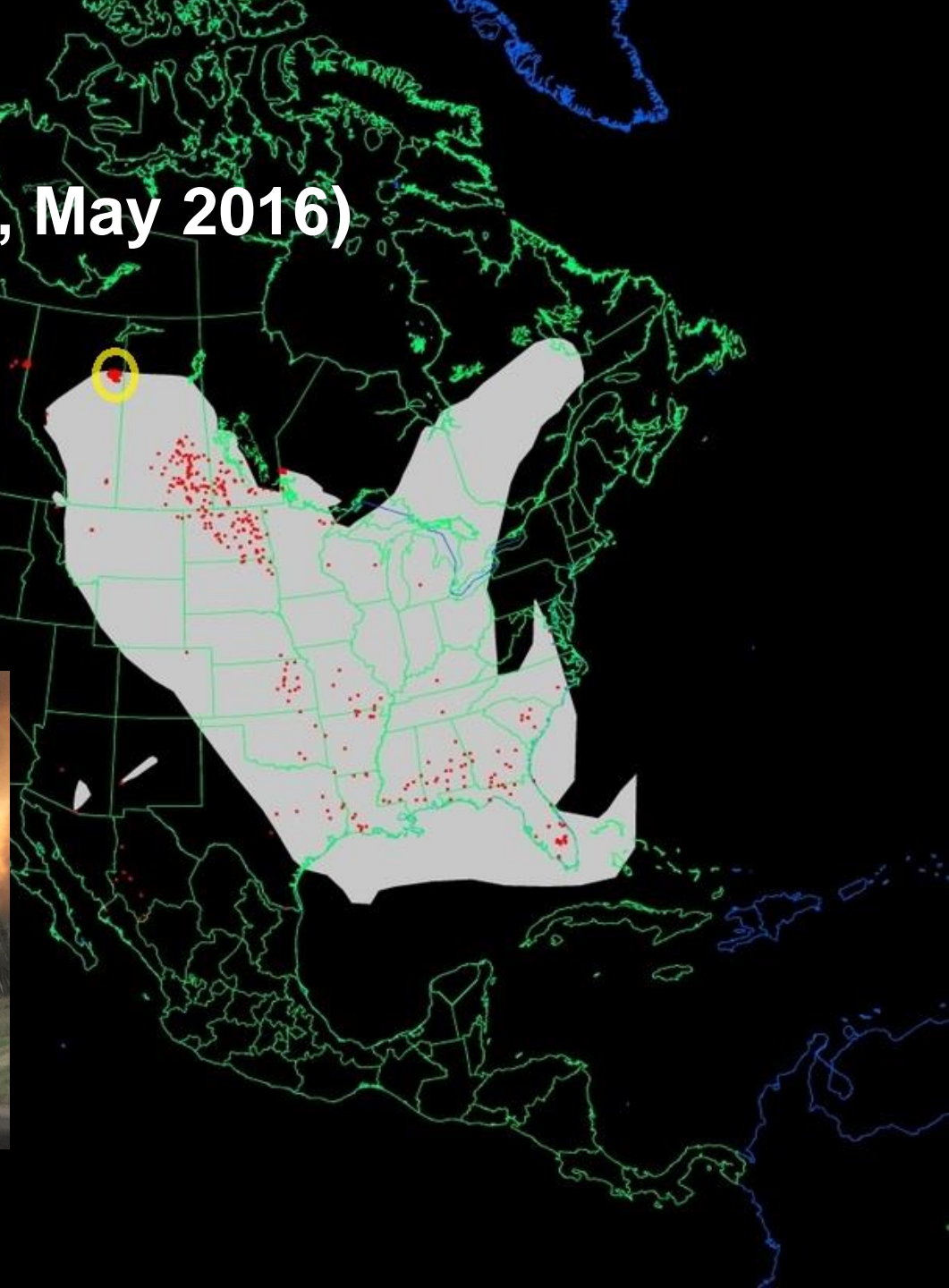


Fort McMurray (Alberta, May 2016)

600 000 ha brûlés

2400 maisons détruites

coût = 6 milliards d'€



Black Saturday (07/02/2009) Victoria district (Australia)

Firestorm (Kinglake)

100 000 ha brûlés en 12H

120 morts

$I \sim 80\,000 \text{ kW/m}$ ($\gg 7000 \text{ kW/m}$)

ROS ~ 1 à 3 m/s

Hauteur du panache $\sim 15 \text{ km}$

(limite inférieure de la stratosphère)

$$I = \eta M_{\text{fuel}} \times \Delta H \times R \sim 300 \times H_f^2$$





Les feux: un problème complexe multi-échelle

Colorado

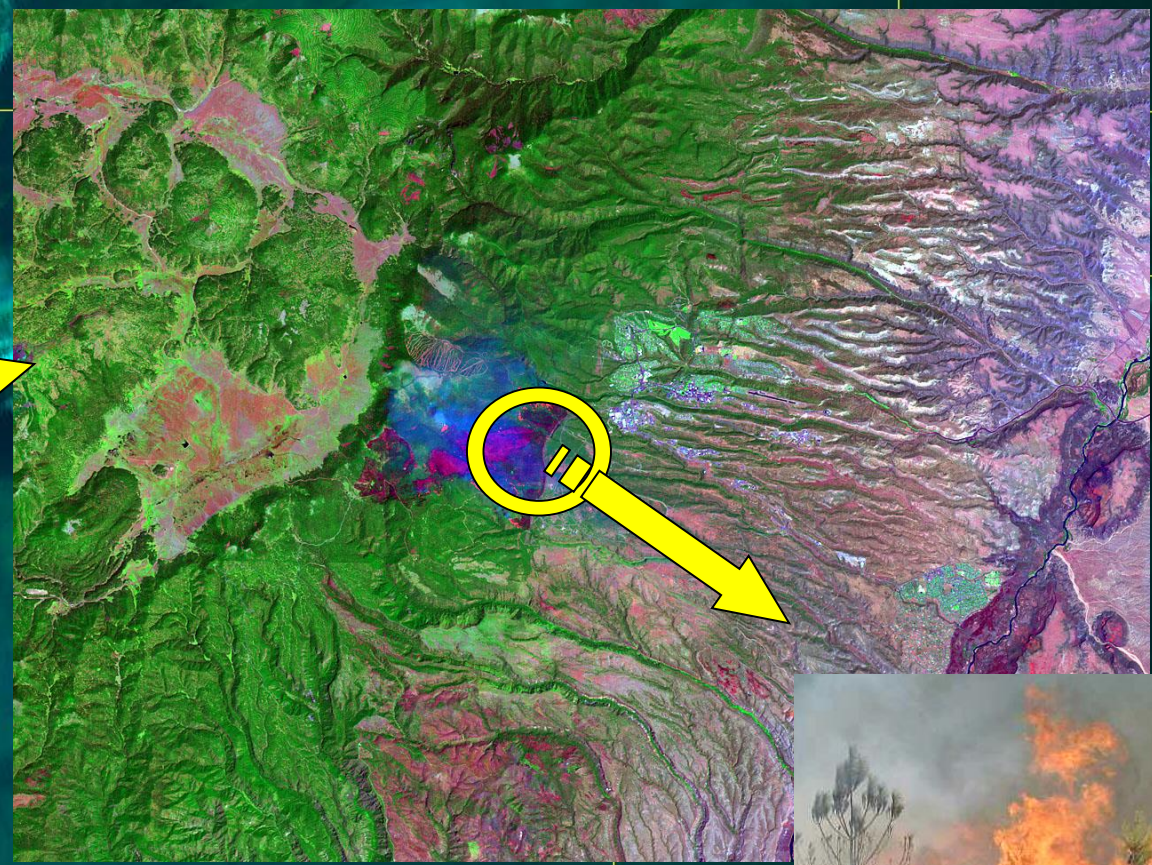
Kansas

(Los Alamos fire May 2000)



140 km

New Mexico

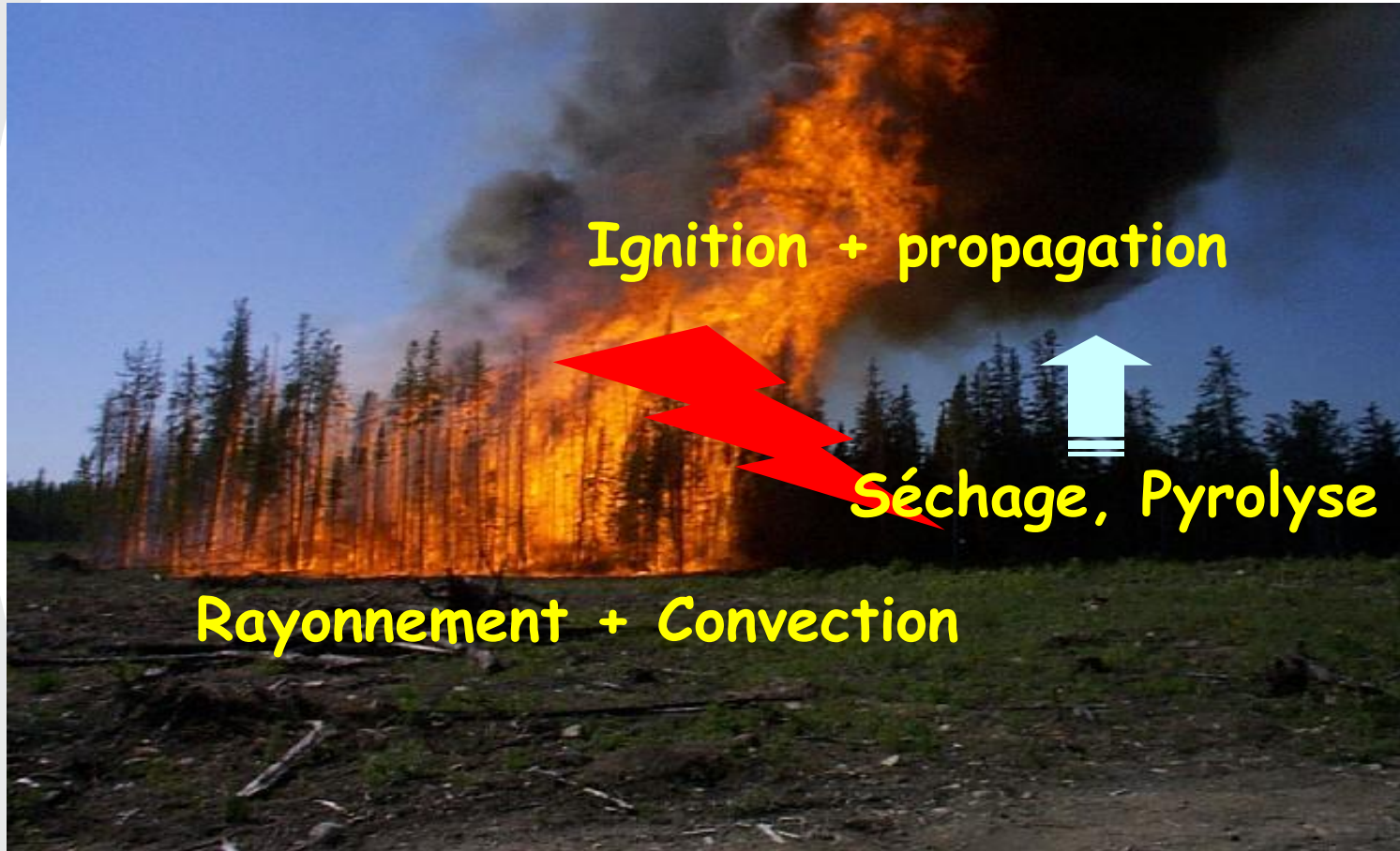


500 μm





Mécanismes de transfert de chaleur à l'origine du comportement des feux



Ignition + propagation

Séchage, Pyrolyse

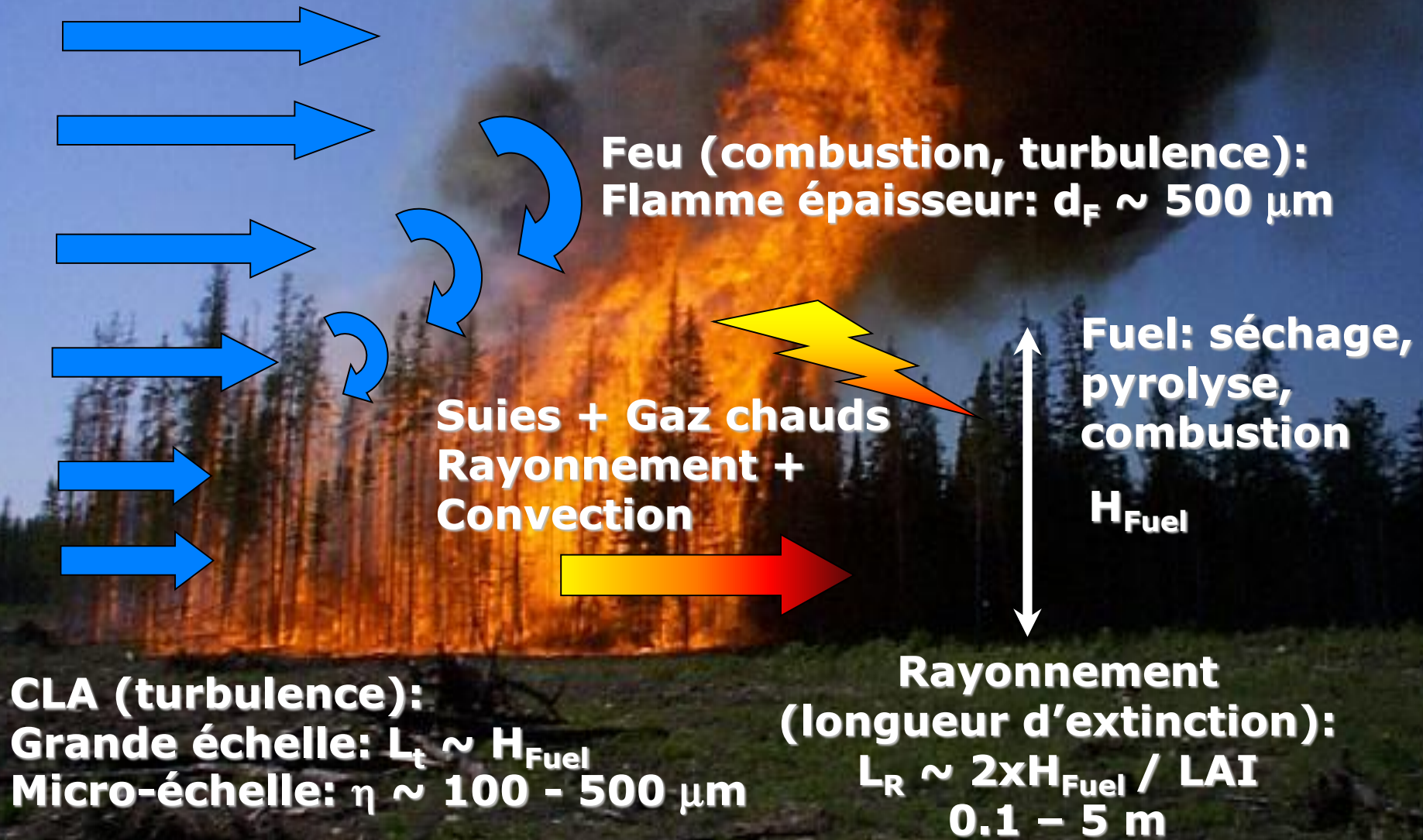
Rayonnement + Convection

Un autre mécanisme de propagation des feux: les brandons



Distance parcourue par un brandon > 2400 m (source: SALTUS) !

Les feux: un problème complexe multi-échelle



Régimes de propagation

Nombre de Byram convectif

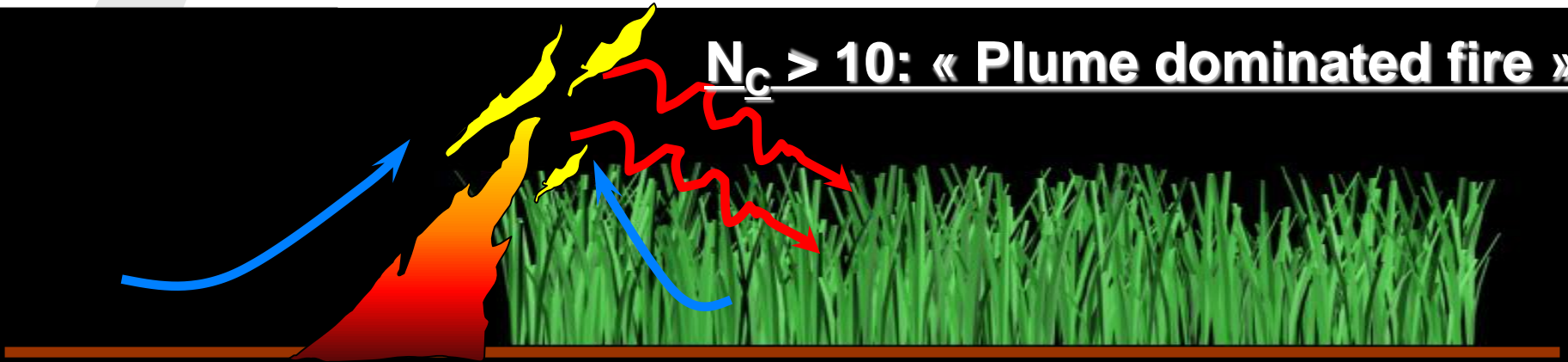
$$P_{Plume} = \frac{g I}{C_P T_0}$$


$$P_{Wind} = \frac{1}{2} \rho (U_W - ROS)^3$$

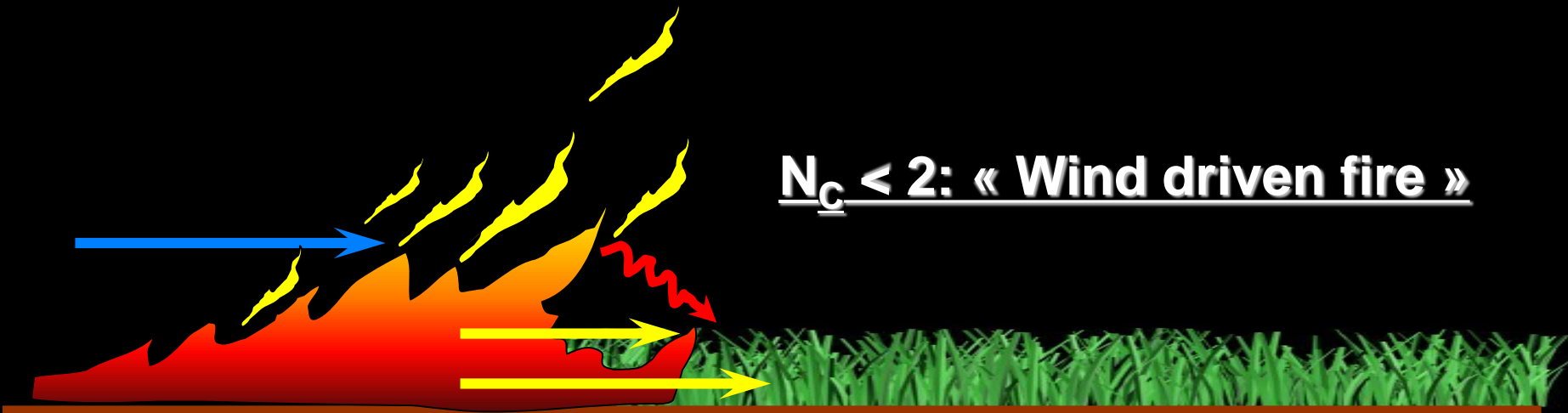
$$N_C = \frac{P_{Plume}}{P_{Wind}} = \frac{2 g I}{\rho C_P T_0 (U_W - ROS)^3}$$

Régimes de propagation des feux de surface (Nelson Jr IJWF 2015)

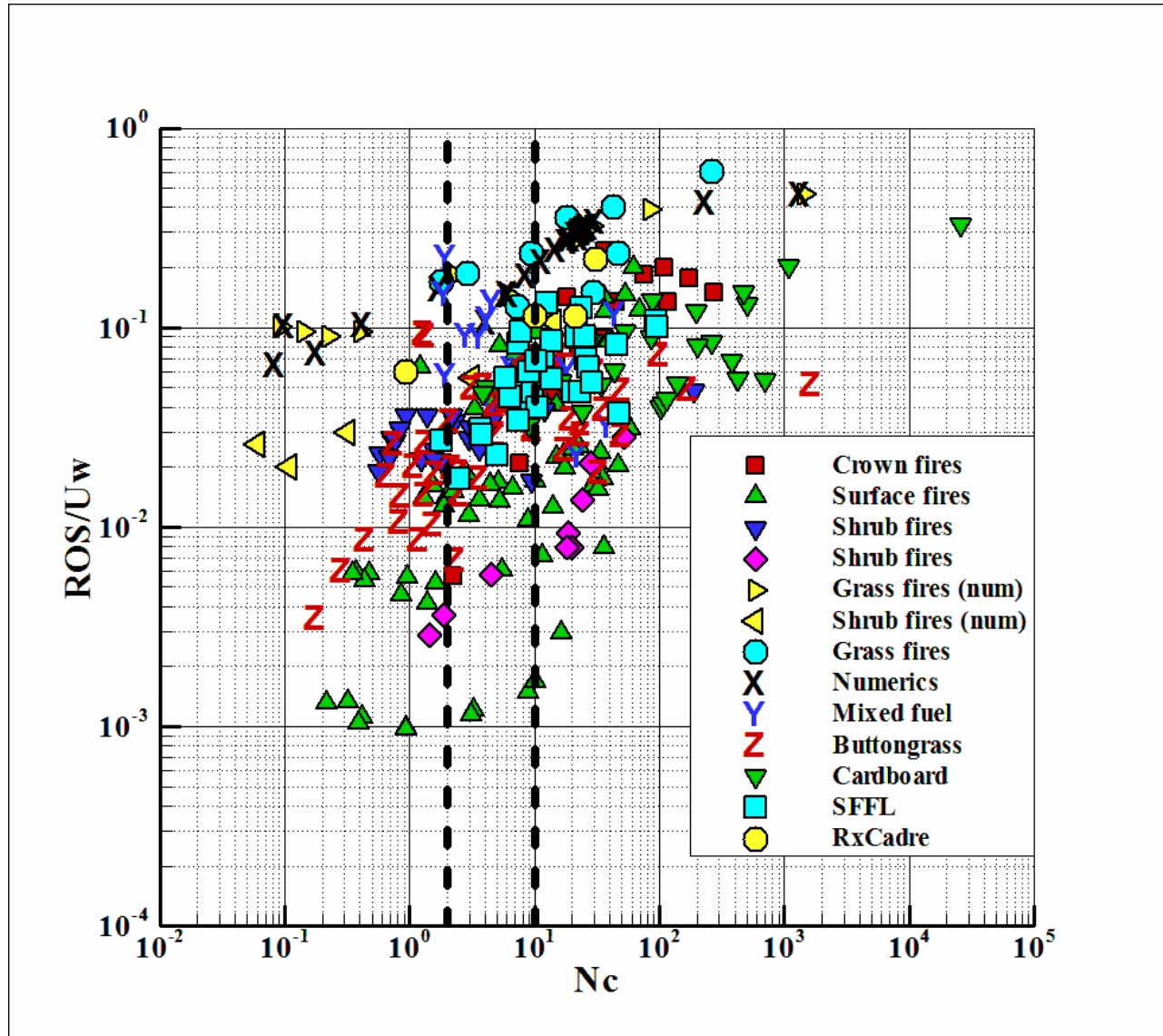
$N_c > 10$: « Plume dominated fire »



$N_c < 2$: « Wind driven fire »



Régime de propagation vs nombre de Byram convectif



Simulation des feux: phénomènes physiques et échelles associées?

Phénomènes physiques

Effets de compressibilité
Chimie (pyrolyse, combustion homogène, hétérogène)
Turbulence (flottaison)
Rayonnement (gaz, suies)
Interface Solide/Gaz



Echelles

Conditions externes (vent, ventilation ...)
Epaisseur de flamme
Structures turbulentes
Longueur d'extinction
Combustible solide

Effets de compressibilité: approximation à faible nombre de Mach

Equations de Navier-Stokes compressibles

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j}{\partial x_j} = 0$$

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_j U_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i$$

$$\frac{p}{\rho} = \frac{RT}{M}$$

$$\frac{\Delta p}{p} = O(Mach^2) \quad Mach = \frac{U}{a} \quad a: \text{sound speed in air } (\sim 340 \text{ m s}^{-1})$$

$$U = 100 \text{ km/h} = 27 \text{ m/s} \rightarrow Mach = 0.08 \rightarrow \frac{\Delta p}{p} = 0.006 \quad (\sim 600 \text{ pa})$$

$$p = \hat{P} + p' \rightarrow \frac{\hat{P}}{\rho} = \frac{RT}{M} \quad (\text{en milieu ouvert } \hat{P} = \text{cte} = 10^5 \text{ pa})$$



Approximation à faible nombre de Mach

Condition de stabilité, critère CFL

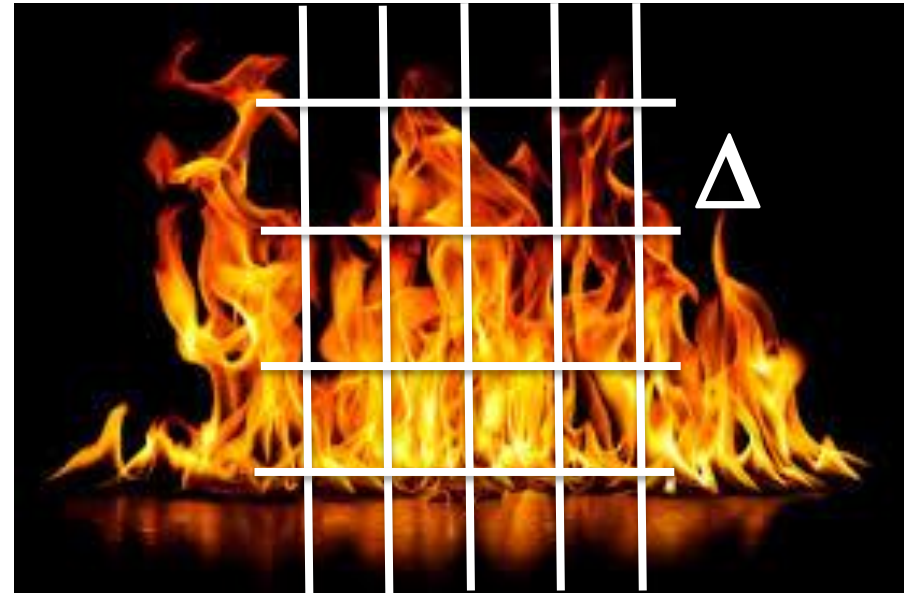
$$\frac{V \delta t}{\Delta} < C$$

Schéma explicite: $C > 1$
Schéma explicite : $C < 1$

"Full compressible"
 $V = \max(U, a)$

"Low Mach number"
 $V = U$

δt : pas de temps
 Δ : pas d'espace



L'approche à faible Mach permet de réduire le pas de temps d'un facteur de l'ordre de $1/\text{Mach}$

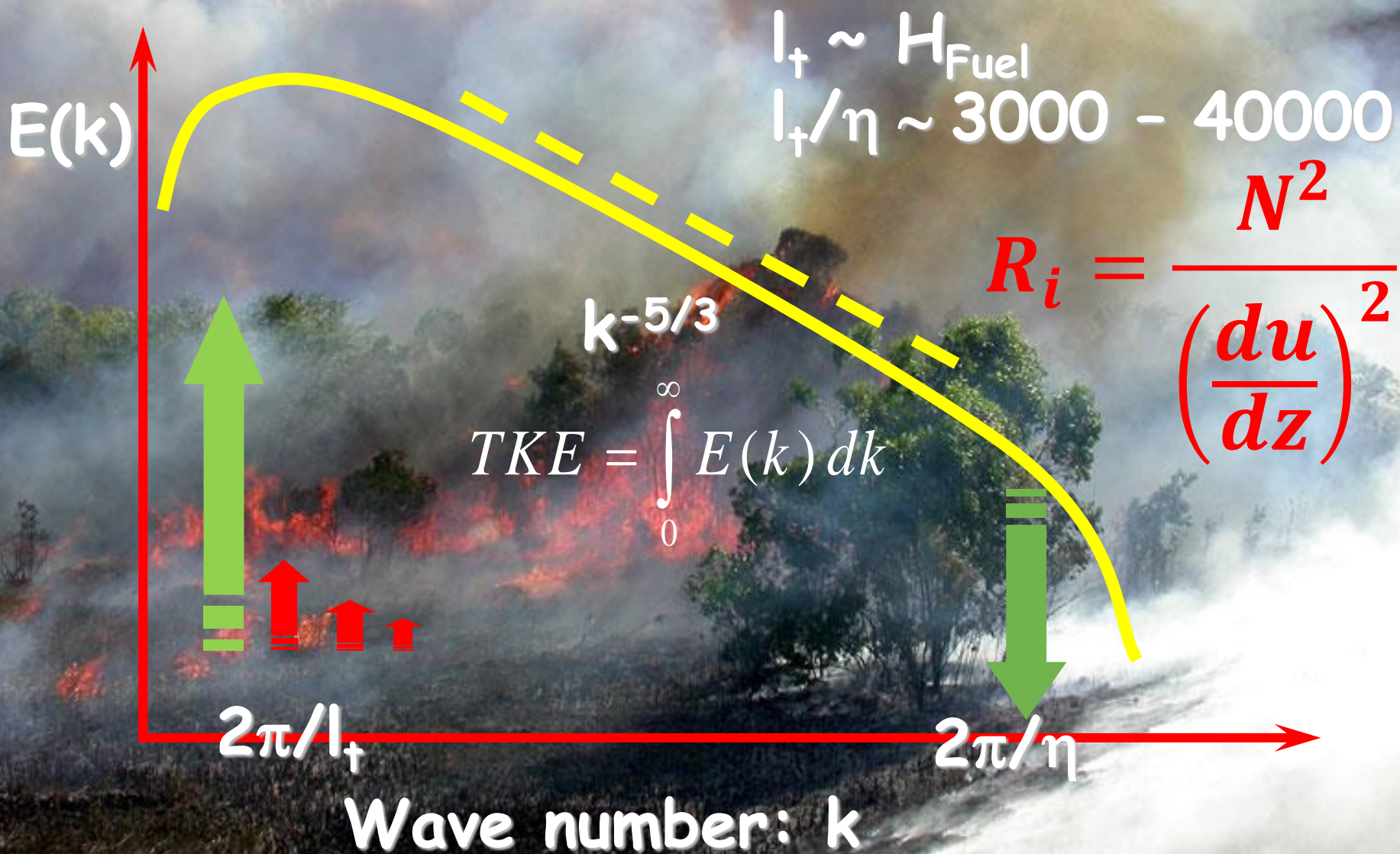
Influence de la stratification de l'atmosphère sur la dynamique des feux.



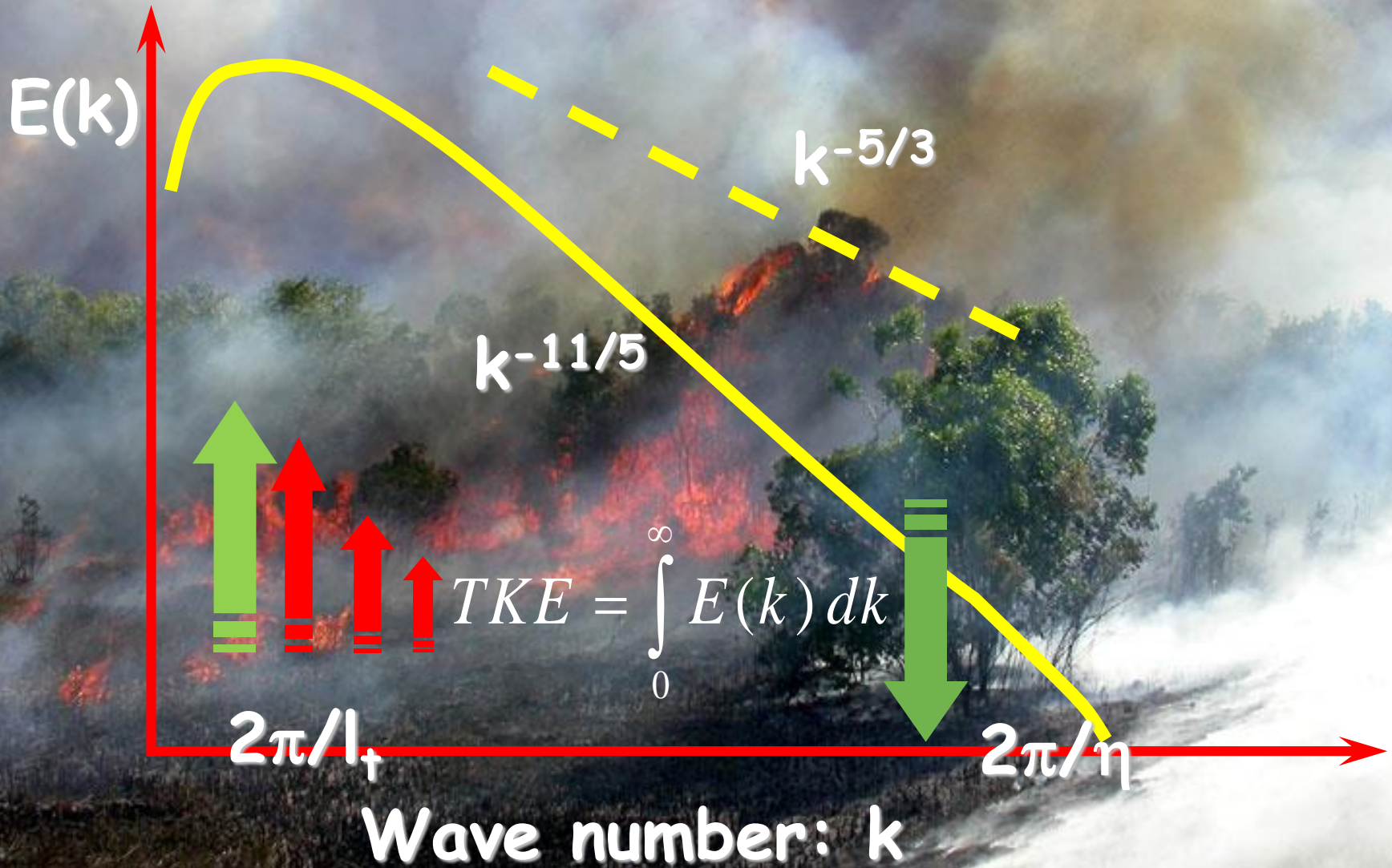
$$R_i = \frac{N^2}{\left(\frac{du}{dz}\right)^2}$$

Effets de stratification (stabilité) de l'atmosphère sur la dynamique des feux, du panache, le transport des aérosols, la turbulence ...

Weak gravity flow (Kolmogorov): $Ri \ll 1$

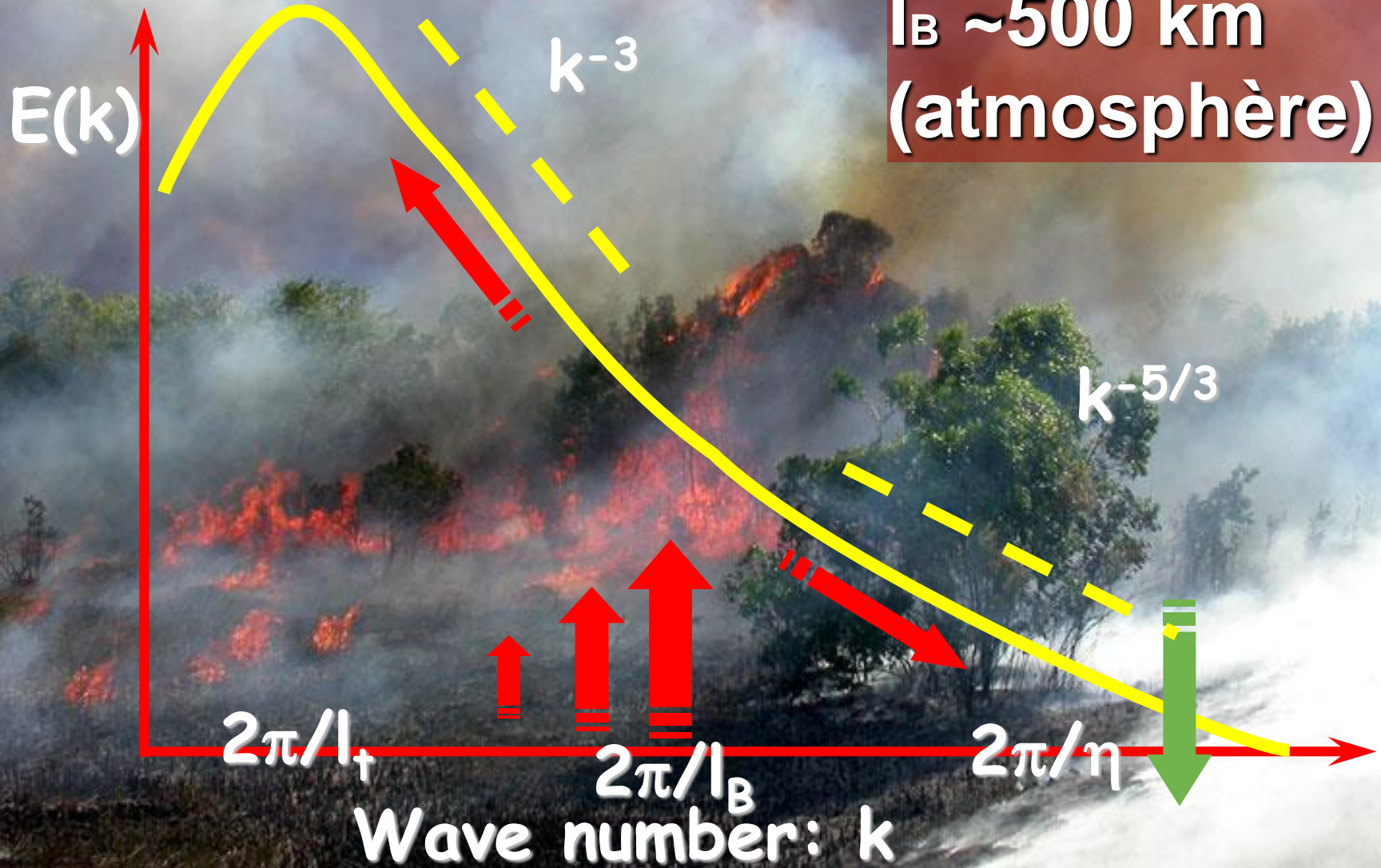


Moderate gravity flow (Bolgiano-Obukhov): $Ri \sim 1$



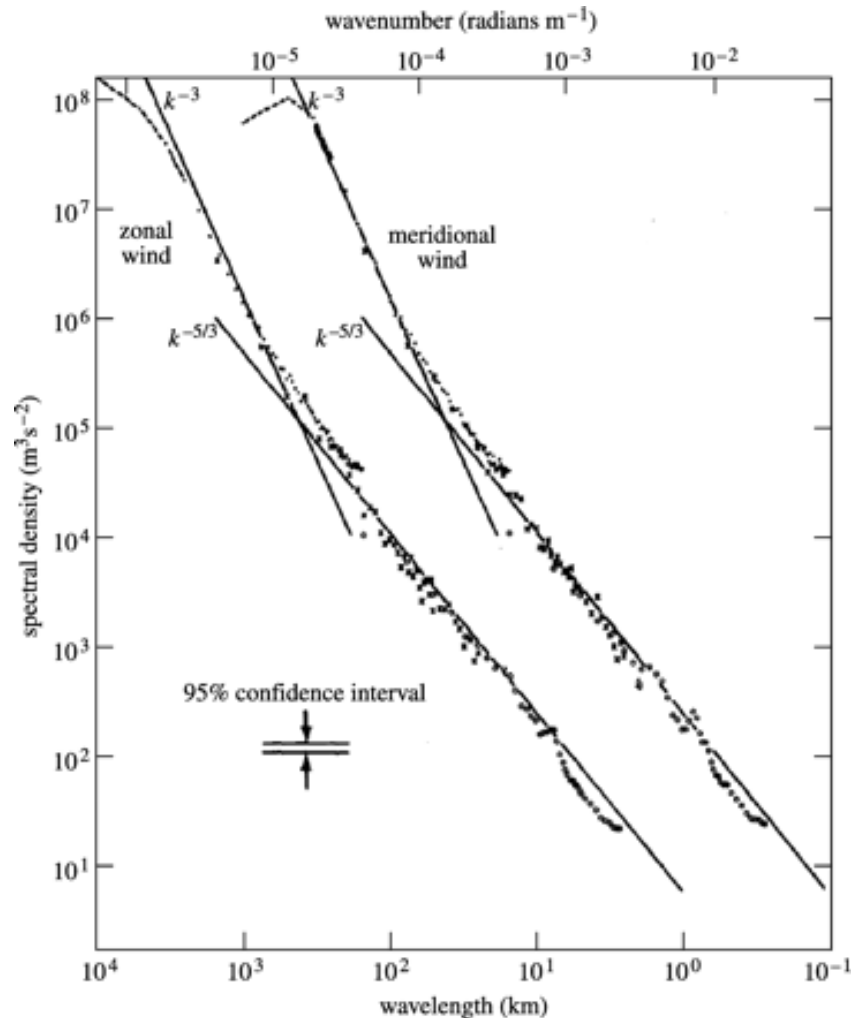
Strong gravity flow: $Ri \gg 1$ (Bolgiano scaling)

$$l_B = (\beta g)^{-3/2} \varepsilon^{-5/3} \varepsilon_T^{-5/3}$$



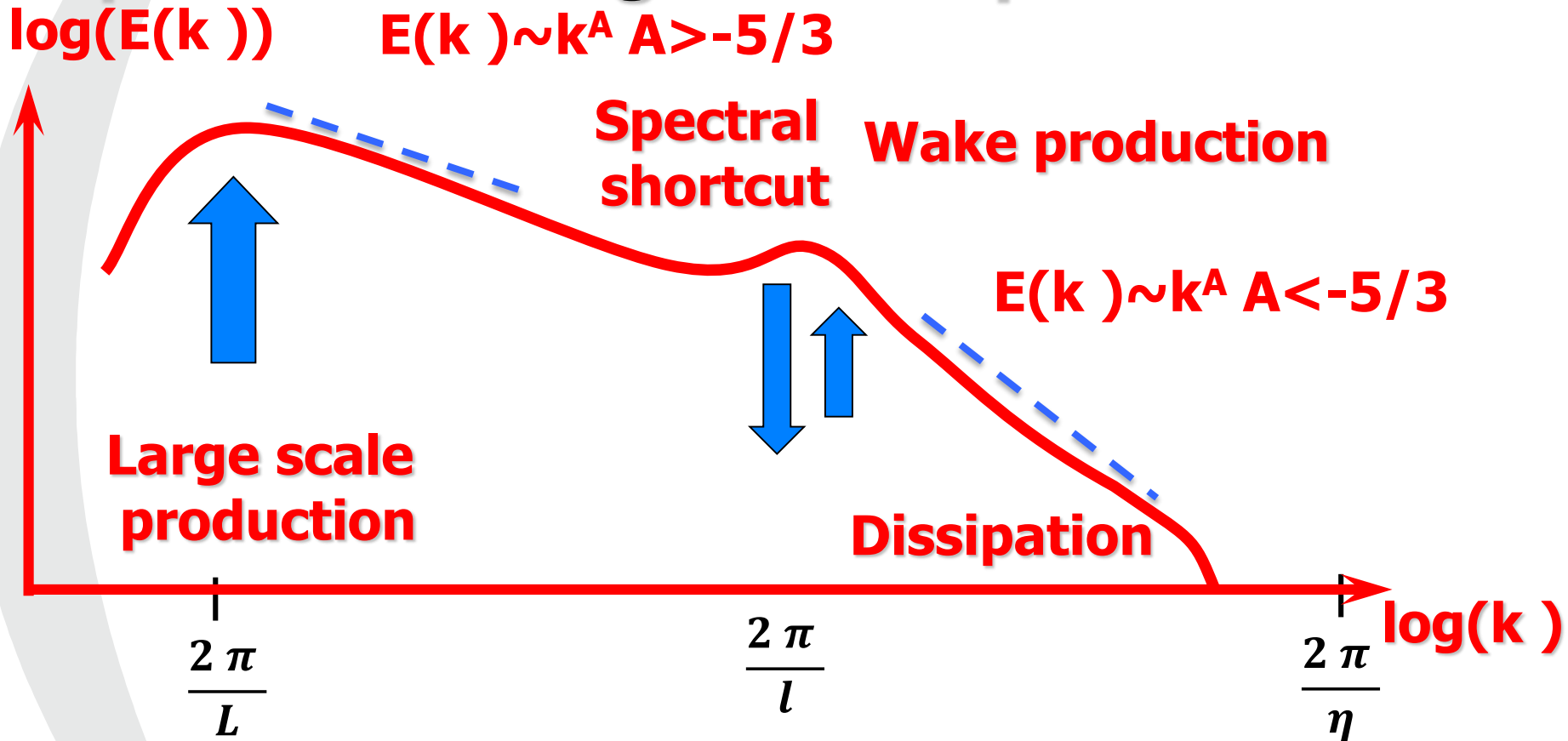
Spectre d'énergie cinétique turbulente dans l'atmosphère (GASP data)

GASP: Global Atmospheric Sampling Program (NASA)



Interaction CLA/Canopée

Spectre d'énergie cinétique turbulente



Modèle de turbulence, interaction CLA/canopée



Leaf Area Density (LAD)

$$\frac{\alpha_k \sigma_k}{2} = \text{LAD}$$

$$\frac{D\rho U}{Dt} = \text{Div } \bar{\bar{\sigma}} - \underbrace{\sum_k \rho C_D \frac{\alpha_k \sigma_k}{2} \|U\| U}$$

$$\frac{D\rho K}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_K} \frac{\partial K}{\partial x_j} \right] + \rho P - \rho \epsilon + \underbrace{\sum_k \rho C_D \frac{\alpha_k \sigma_k}{2} [U^3 - 4UK]}$$

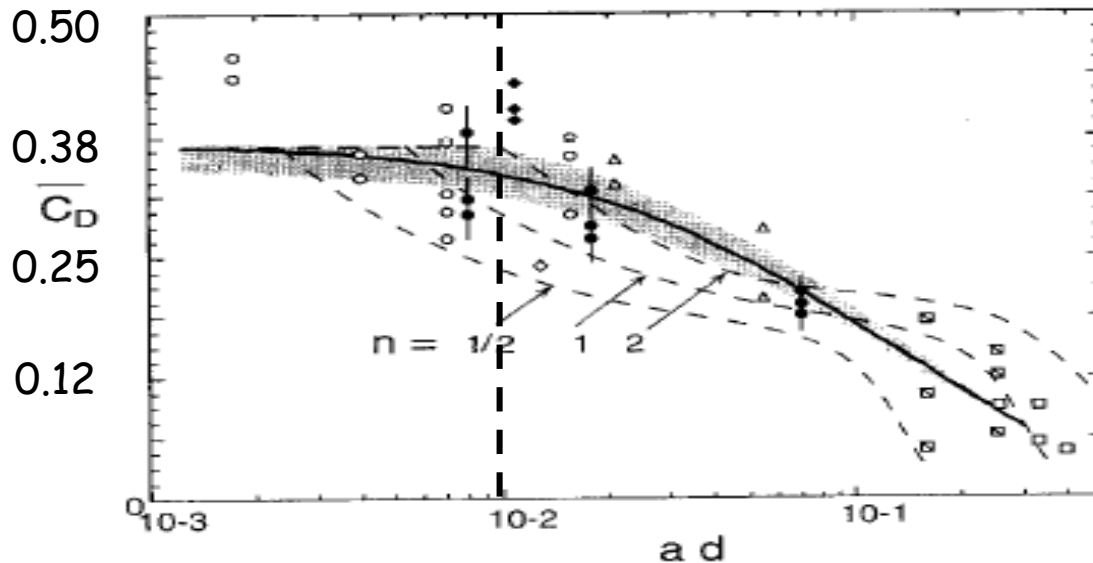
$$\frac{D\rho \epsilon}{Dt} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\frac{\mu_{eff}}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \rho C_{\epsilon 1} \frac{P}{T} - \rho (C_{\epsilon 2} + R) \frac{\epsilon}{T} + \underbrace{\sum_k \rho C_D \frac{\alpha_k \sigma_k}{2} \left[\frac{3\epsilon}{2K} U^3 - 6U\epsilon \right]}$$

$$T = \max(\tau, C_T \tau_\eta) \quad \tau = \frac{K}{\epsilon} \quad \tau_\eta = \left(\frac{\nu}{\epsilon} \right)^{1/2} \quad (\text{Echelle integrale de temps et microéchelle de Kolmogorov } C_T=6)$$

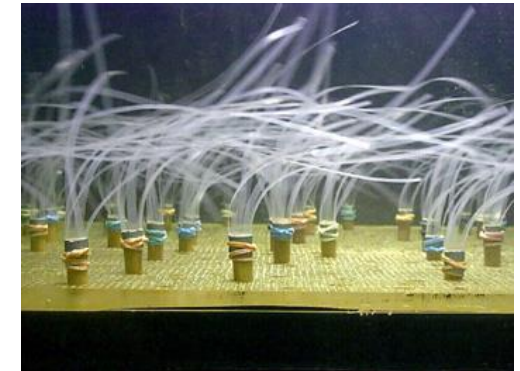
Termes additionnels résultant de l'interaction écoulement/végétation (micro-sillage) ! $C_d \sim 0.1-0.4$ (valeur typique)

Coefficient de trainee dans les prairies marines

(C_D défini à partir de la LAD (Leaf Area Density))



$$ad = \frac{4 \alpha_s}{\pi}$$



- If $ad < 0.01$ $\langle C_D \rangle = C_D (R_e)$ (\sim particule isolée)
 - If $ad > 0.01$ $\langle C_D \rangle = f(ad)$ (interaction de sillage)
 - Valeur typique: $ad \sim \alpha_s \sim 10^{-3} - 10^{-2}$ ➔ $C_D = 0.38$
- (Water Resources Research Vol.35(2) pp.479-489 (1999), H.M. Nepf)

Interaction CLA/canopée (Finnigan 2000)

- Canopée dense ($C_D \times LAI > 0.1$)
écoulement de type couche de mélange

$$LAD = \frac{\alpha_s \sigma_s}{2}$$

- Canopée clairsemée: écoulement de type couche limite

$$LAI = \int_0^H LAD(z) dz$$

**surface layer
logarithmic zone**

2 or 3 x H



**roughness layer
(KH instability)**

H



**canopy layer
exponential
decay**

Combustion, loi d'Arrhénius, turbulence



Feu:
Flamme turbulente
Particules de suie
Chimie
Rayonnement
Couplage
combustion/turbulence
rayonnement/turbulence

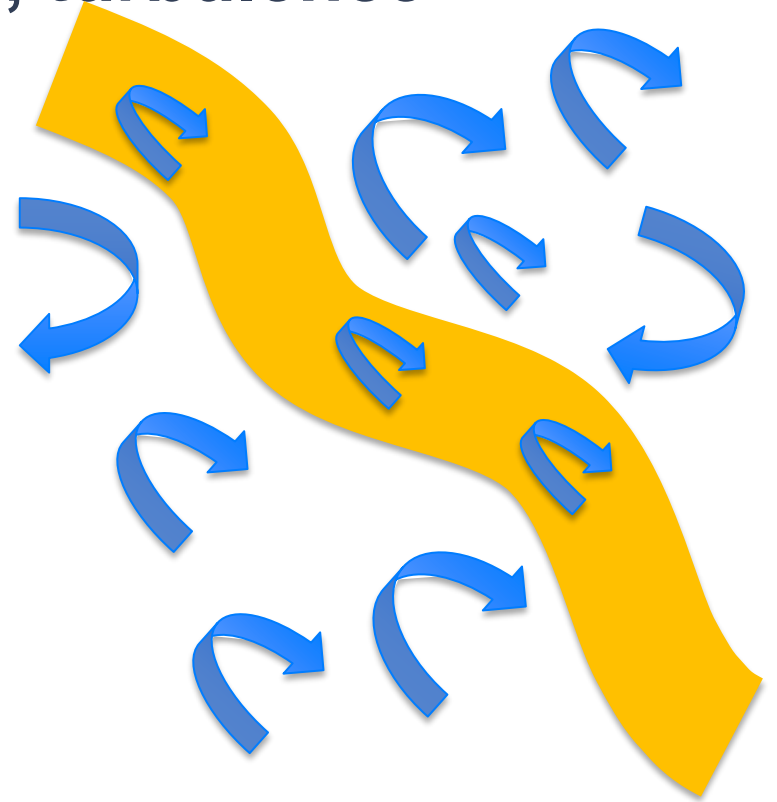


Reaction rate:

$$\dot{\omega}_{Fuel} = f(Y_{Fuel}, Y_{O_2}, T) = -k_0 Y_{Fuel}^a Y_{O_2}^b T^c \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$$

$$\overline{\dot{\omega}_{Fuel}} = f(\overline{Y_{Fuel}}, \overline{Y_{O_2}}, \overline{T}) ? \text{ Non car } \frac{\sqrt{\overline{T'^2}}}{\overline{T}} \gg 1$$

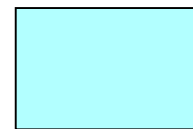
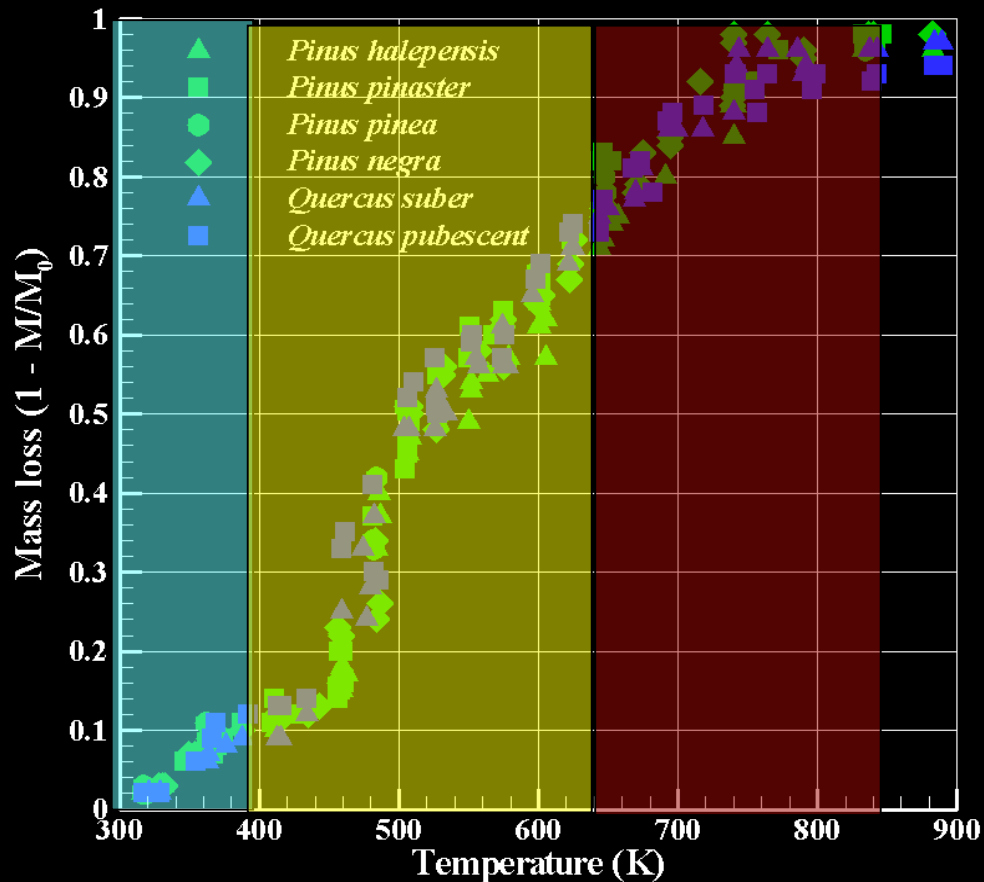
Combustion, loi d'Arrhénius, turbulence



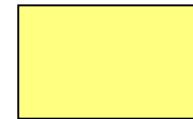
Reaction rate (EDC type model):

$$\overline{\dot{\omega}_{Fuel}} = \frac{\bar{\rho}}{\tau} \min \left(\overline{Y_{Fuel}}, \frac{\widetilde{Y_{O_2}}}{\nu} \right)$$

Analyse thermique d'échantillons de végétation Méditerranéenne (INRA-Avignon)



Séchage



Pyrolyse



Combustion

Description physique d'une strate de végétation



Propriétés physiques

- Densité
- Fraction volumique
- Rapport Surface / Volume (SAV)
- Teeneur en eau (FMC)



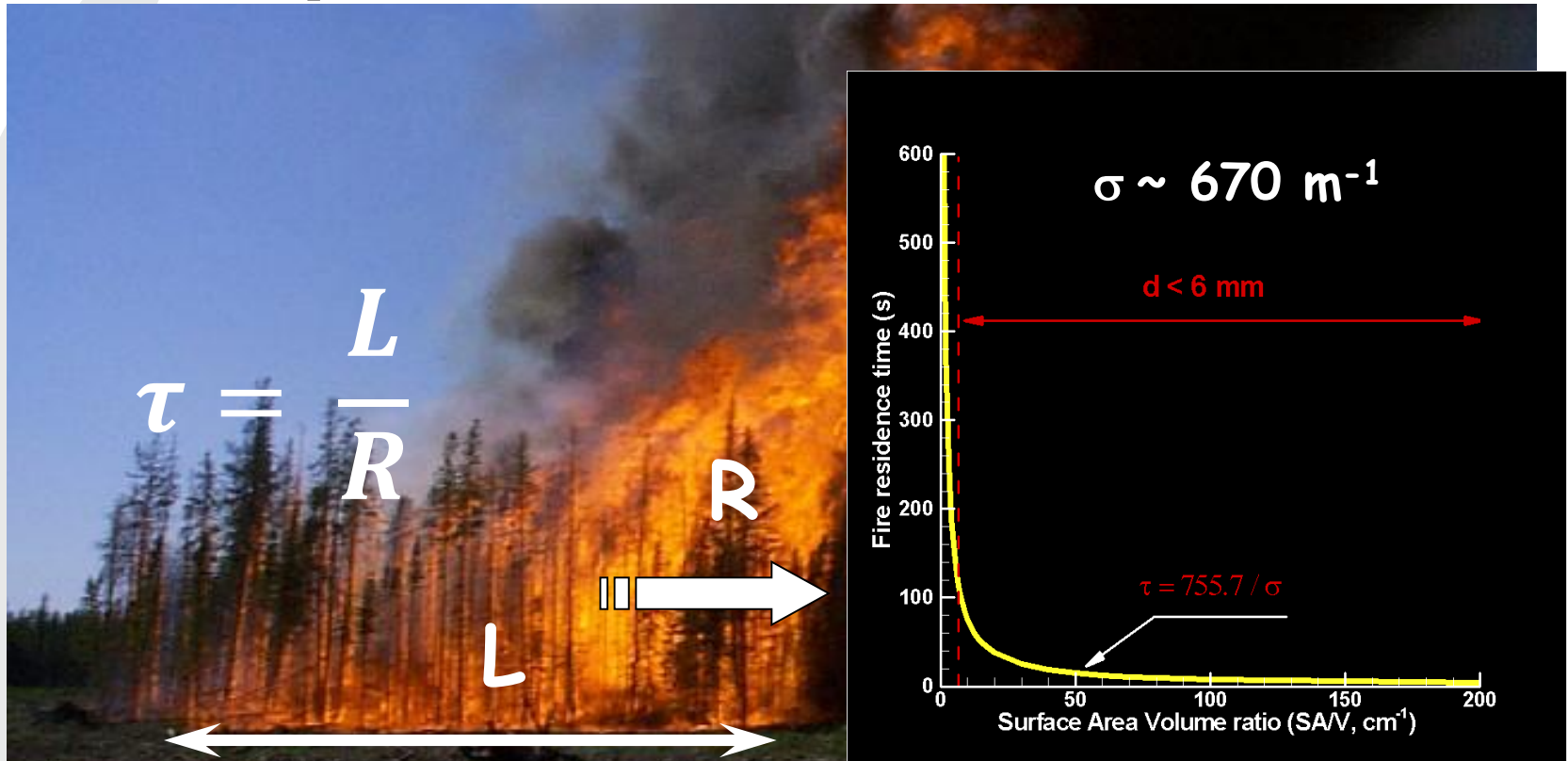
Classification du combustible solide: temps d'équilibre avec l'air ambiant



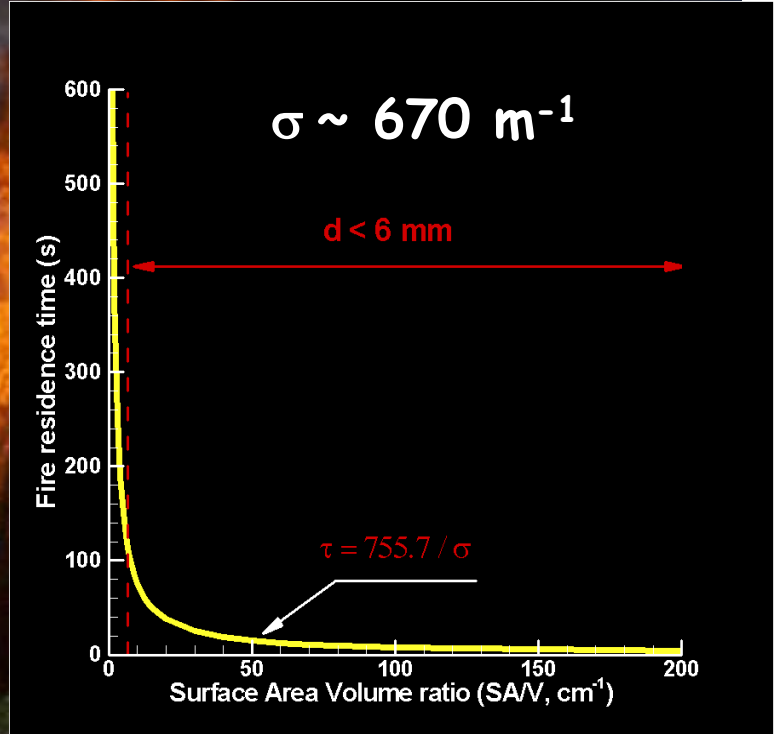
Temps d'équilibre (FMC/Air):

- 1H ϕ : 0-0.64 cm
- 10H ϕ : 0.64-2.54 cm
- 100H ϕ : 2.54-7.62 cm

Temps de résidence du feu



$$\tau = \frac{L}{R}$$



$\sigma \text{ (m}^{-1}\text{)}$	600	2000	5000	10000	20000
$\tau \text{ (s)}$	125	37	15	7	3

Longueur d'extinction: valeurs typiques

Fuel	Boreal forest	Grass	Med. forest	Med. shrubs
δ_R (m)	4.75	0.15-0.5	0.25	0.15

Fuel	Pine needles	Shrubland (Galice)
δ_R (m)	0.025	0.015

$$\Delta \approx \delta_R = \frac{4}{\alpha_k \sigma}$$

Simulation numérique de la propagation d'un feu: critère de dimensionnement du maillage

$$\Delta < H_{Fuel}$$

$$\Delta < \delta_R$$

$$\Delta = \min(\delta_R, H_{Fuel}/6)$$



The diagram shows a yellow grid representing a numerical mesh overlaid on a photograph of a forest fire. A vertical white double-headed arrow on the left side of the grid is labeled H_{Fuel} , indicating the height of the fire. A horizontal white double-headed arrow below the grid is labeled Δ , indicating the size of a single grid cell. Dashed lines outline the grid's extent.

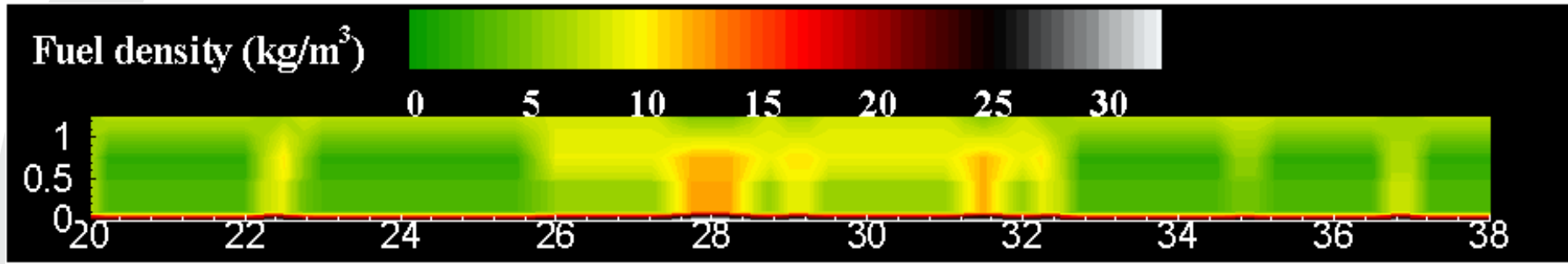
H_{Fuel}

Δ

Experiences de feux de maquis (EU Firestar project, Galicia-Spain)



Experiences de feux de maquis (EU Firestar project, Galicia-Spain)

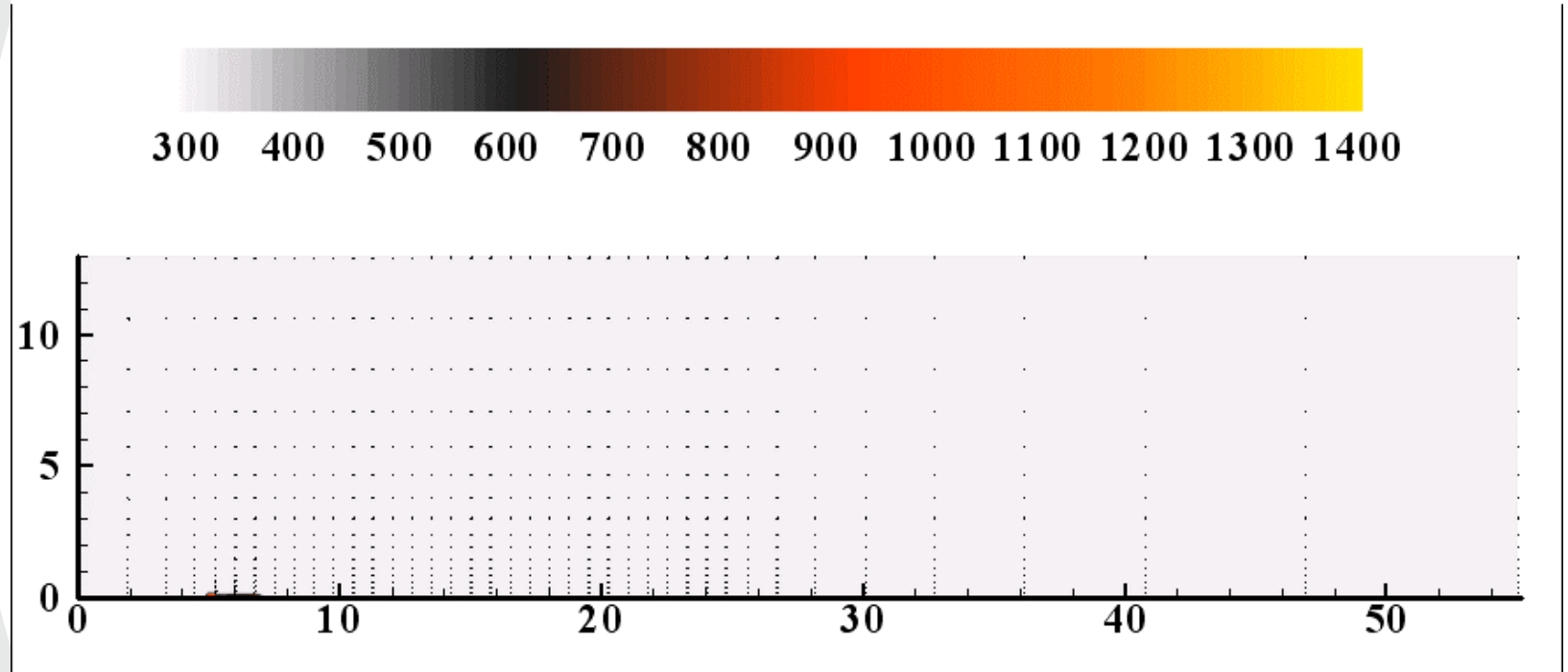


- **Combustible: *Ulex (Europaeus, Minor)* (ajoncs)**
- **Familles de combustible = 14**
- **FMC:**
108-150 % (living), 10-32% (dead)
- **Hauteur de combustible = 1.25 m,**
- **Vent : 5.7 m/s (z=10 m),**
- **Pente : 5°**



Experimental fire in shrubland (EU Firestar project, Galicia-Spain)

Grassland fire | 30 Nov 2005 | FIRESTAR

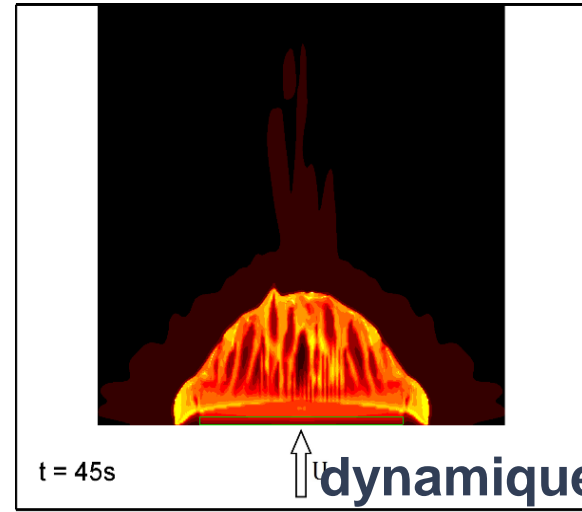
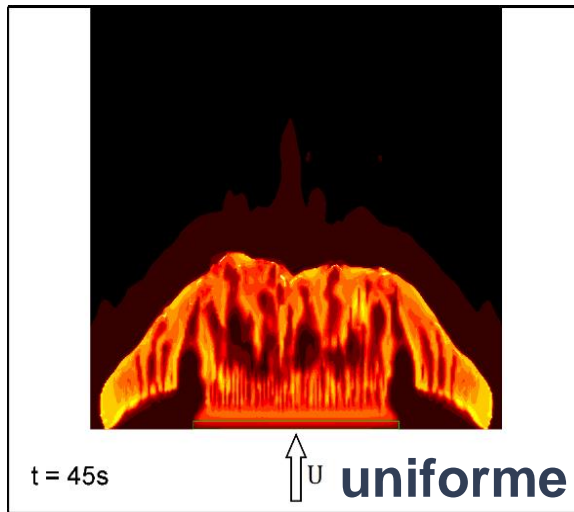


- **Experiment: ROS = 0.273 m/s**
- **Simulation : ROS = 0.248 m/s**

Effet du protocole d'ignition



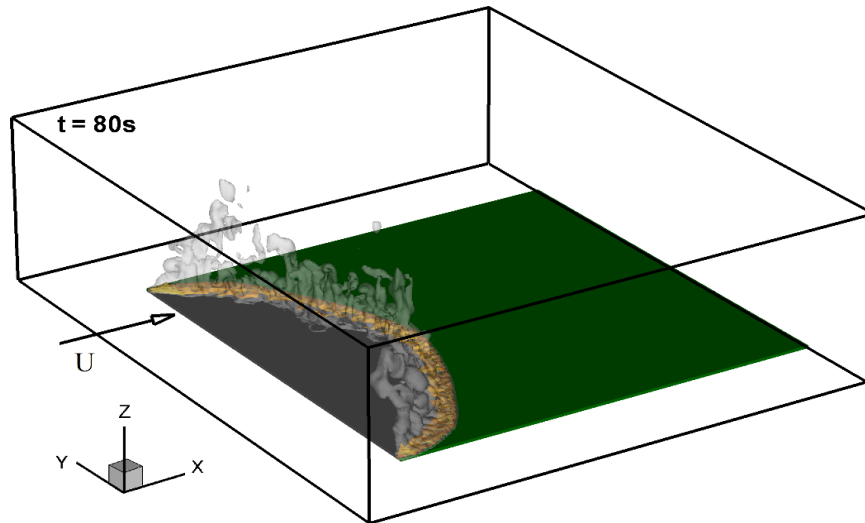
(1)



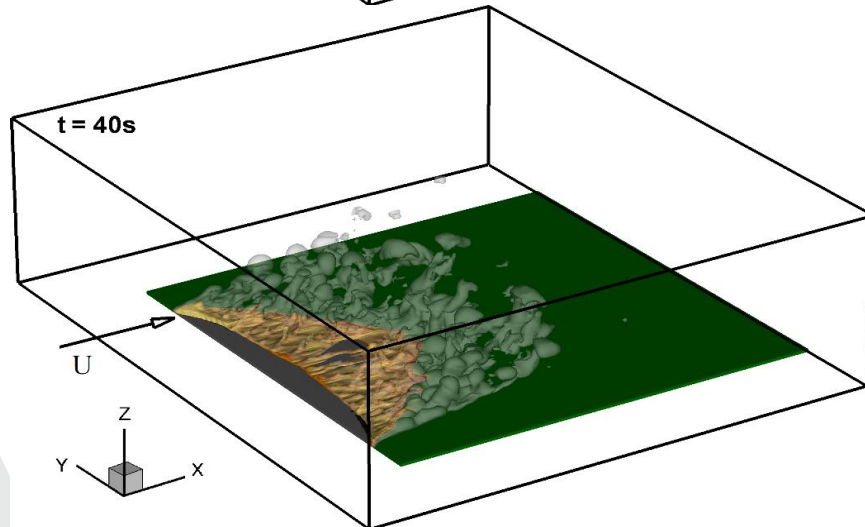
(2)

- (1) Cheney et al 1995
- (2) Frangieh et al 2018

Numerical simulations of grassland fires

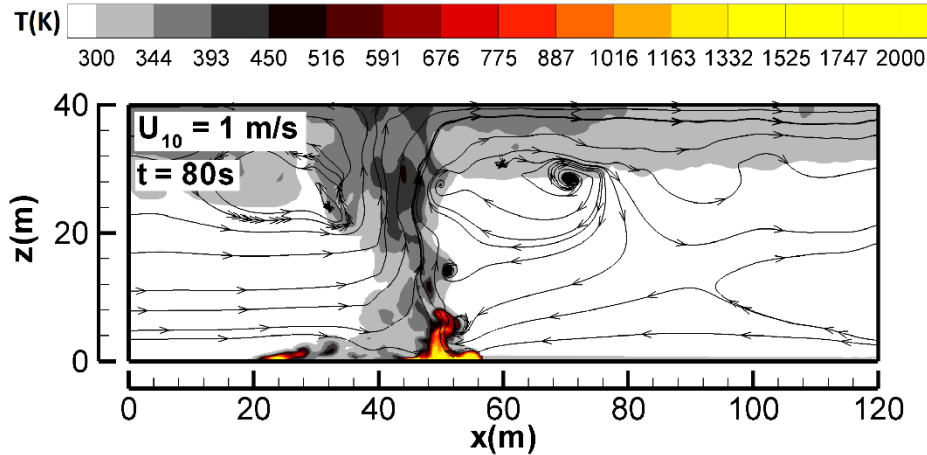


$U = 1 \text{ m/s}$

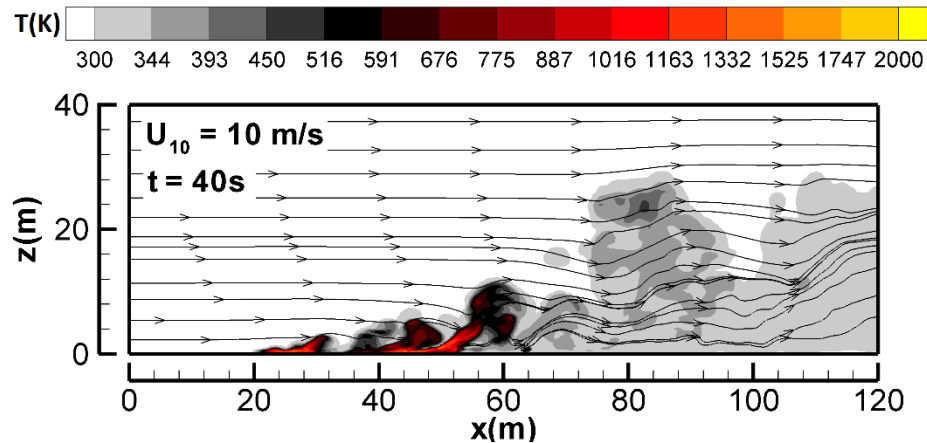


$U = 10 \text{ m/s}$

Simulation numérique de feux de prairie

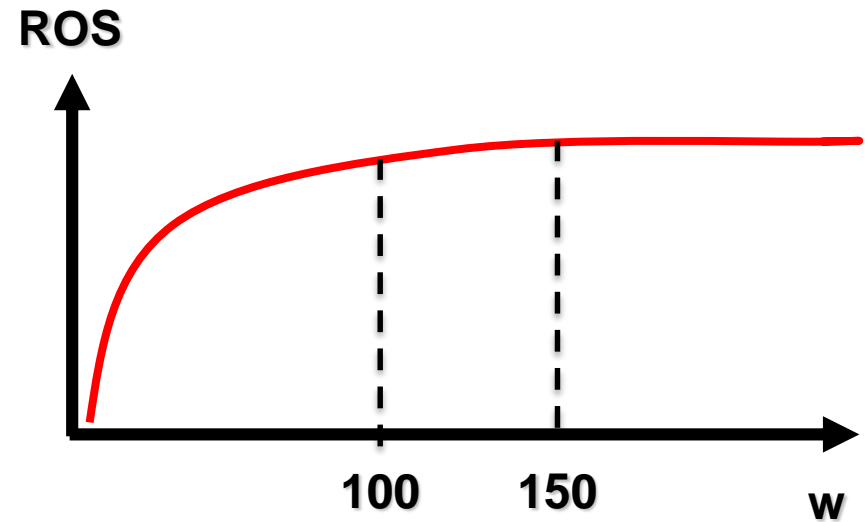


$U = 1 \text{ m/s}$



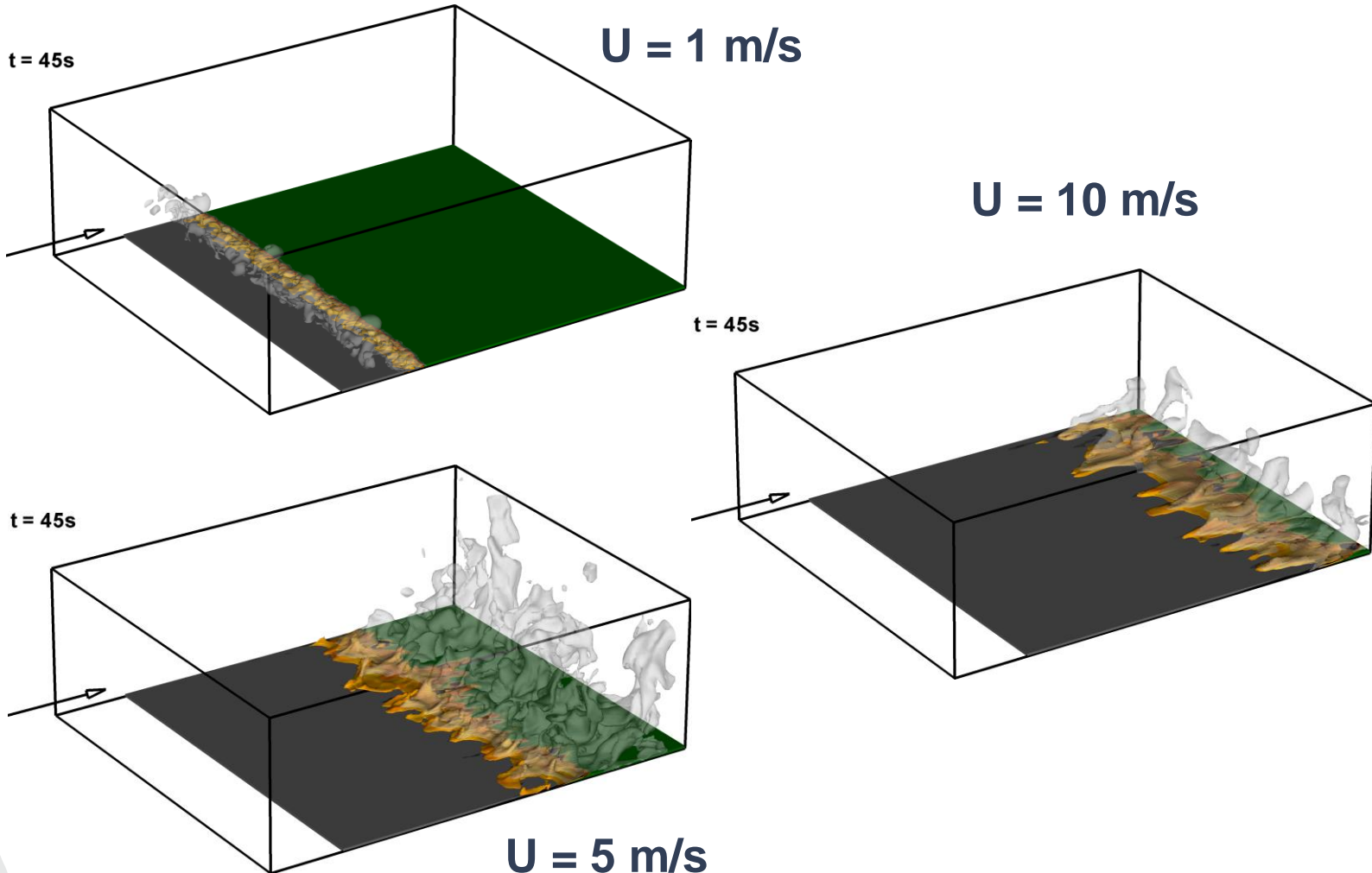
$U = 10 \text{ m/s}$

Feux de prairie

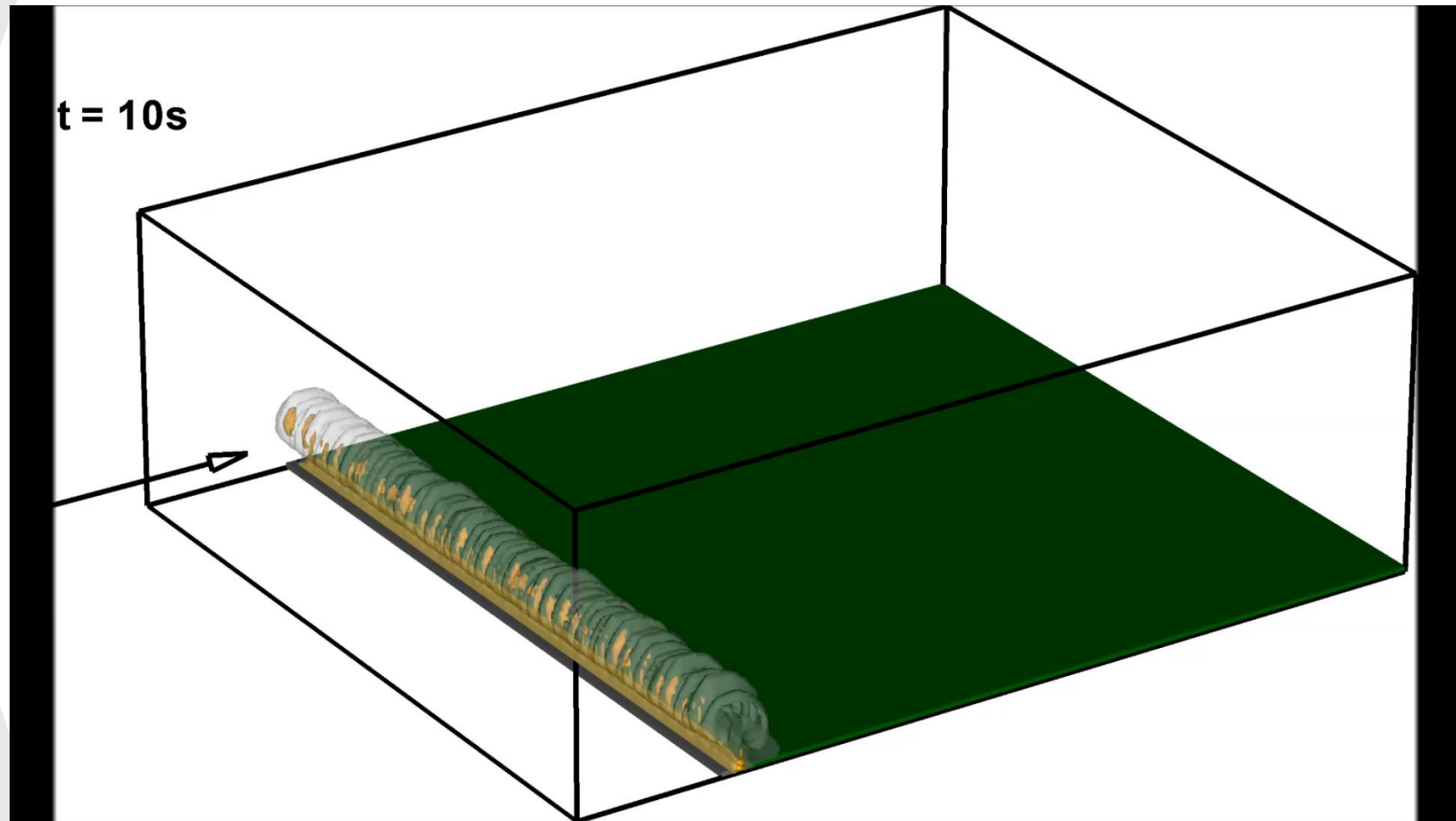


Cheney and Gould IJWF 1995

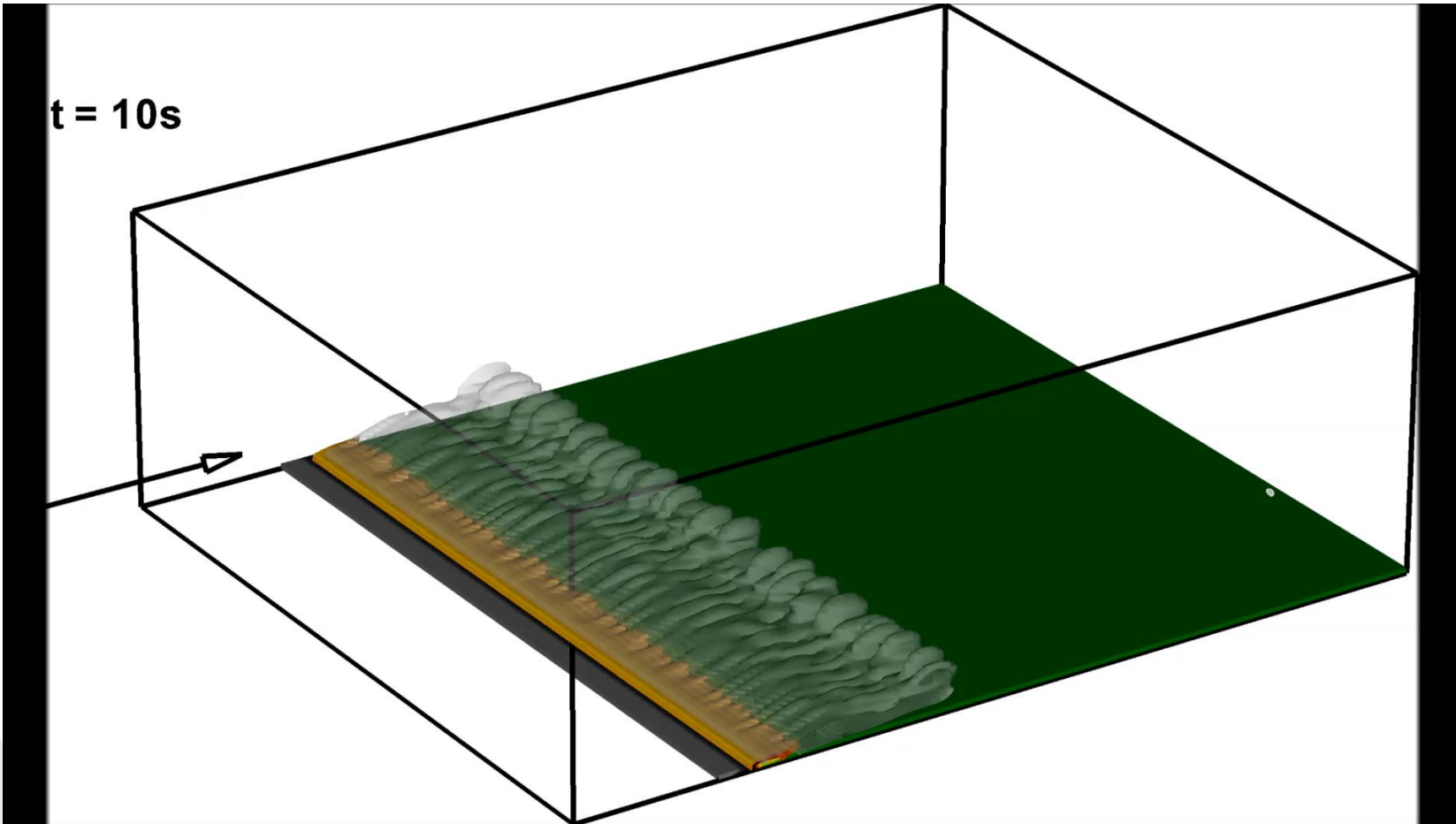
Simulation numérique de feux de prairie (conditions limites latérales périodique)



Simulation numérique de feux de prairie (CL périodiques) $U = 1$ m/s



Simulation numérique de feux de prairie (CL périodiques) $U = 10$ m/s



Modélisation des feux: les challenges

- Couplage de mécanismes non linéaires (chimie, turbulence, rayonnement ...),
- Caractère multi-échelle des phénomènes,
- Chimie complexe,
- Extinction, interaction feu/ventilation, couplage feu/atmosphère,
- Couplage feu/turbulence (CLA/canopée, stratification ...),
- La simulation 3D (HPC, outils, performance ...)

Merci pour votre attention.

