



Modèle physique réduit pour simulateur de feu

Jacques-Henri Balbi, Jean-Louis Rossi,

Paul-Antoine Santoni, Thierry Marcelli

SPE, UMR CNRS 6134

Université de Corse

Objectifs

Construire un modèle ayant les propriétés

P1 Temps de calcul \ll temps réel

P2 Maximum de physique ; minimum d'empirique

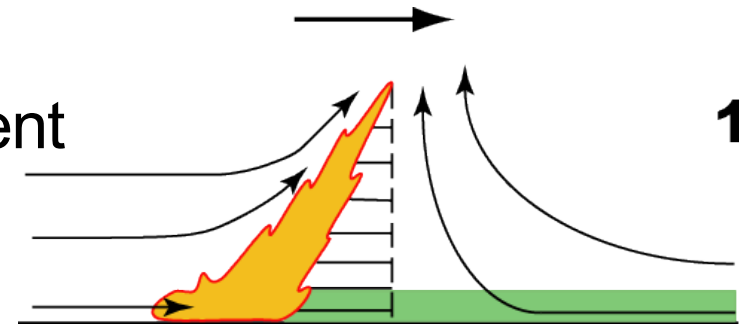
P3 Peu de paramètres, faciles à caler

P4 Donner la tendance (c, Q, ...) dans toutes les situations

Hypothèses simplificatrices

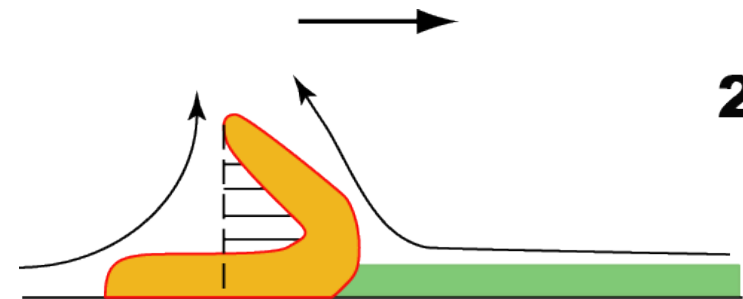
H1 Vitesse nulle sous la flamme

Conséquence : seul le rayonnement joue pour la propagation



H2 Rayonnement dans la base de la flamme, agit dans le volume de la végétation à courte distance

H3 Rayonnement de la flamme agit à longue distance ;



annulé par la convection d'air frais, ailleurs que dans la flamme.

Sous la flamme \Rightarrow préchauffe le végétal

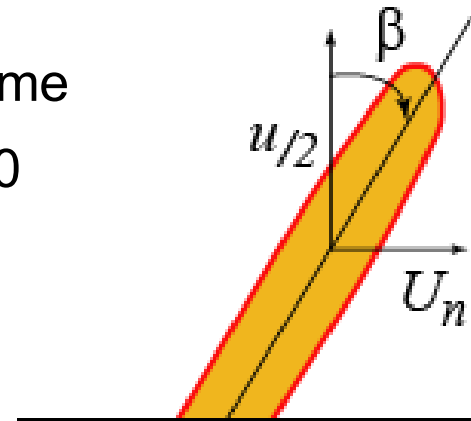
Hypothèses simplificatrices

H4 Le front de flamme sera assimilé à son plan tangent, considéré comme un panneau radiant gris infini

H5 Fraction rayonnée $\chi = \epsilon_s \left(\frac{c}{c_s} \right)^{-\frac{1}{q}}$

H6 Inclinaison de la flamme / verticale $\tan \beta = \frac{U_n}{u_{1/2}}$

- U_n composante normale au front de flamme du vent extérieur, du vent induit si $V_{ext} = 0$
- u vitesse verticale en haut de la flamme



Hypothèses simplificatrices

H7 Vent induit $U_i = u_G$

$$\tan \beta = \frac{U_G}{u_{\gamma}}$$

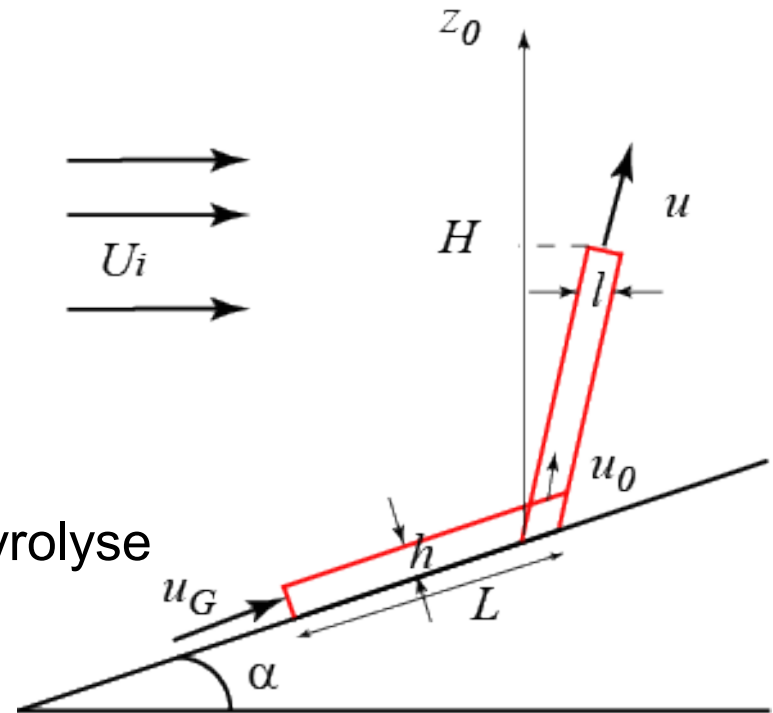
H8 Base et corps de flamme

Base : admission d'air frais + gaz de pyrolyse

prémélange

Corps : combustion et expansion

température moyenne T



H9 Base et corps de même masse

Hypothèses simplificatrices

H10 La hauteur est donnée par le sous-modèle empirique de McCaffrey

$$H = 1,48 Q^{2/5}$$

H11 Gaz parfaits ; transformations isobares

H12 Entrée d'air stœchiométrique

H13 Décroissance linéaire de la masse

$$\dot{\sigma} = \frac{\sigma}{\tau} \quad \tau : \textit{temps de résidence}$$

Equations - Flamme

E1 Hauteur de flamme

$$H_f = \dots \wedge Q^{1/2}$$

E2 Equation d'état

$$\rho T = \rho_a T_a$$

E3 Quantité de mouvement verticale

$$\rho \frac{du}{dt} = g(\rho_a - \rho)$$

$$u^2 = 2g \left(\frac{\rho_a - \rho}{\rho} \right) H_f$$

$$u^2 = 2g \left(\frac{T}{T_a} - 1 \right) H_f \Rightarrow u = a^* Q^{1/2}, \quad a^* \approx \left(2g \left(\frac{T}{T_a} - 1 \right) \right)^{1/2}$$

Equations - Flamme

E4 Conservation d'énergie

$$T = T_a + \frac{(\lambda - \chi) \Delta H}{s c_p}$$

E5 Entrée d'air stœchiométrique

$$\rho_a h u_G = s L \dot{\sigma}$$

Equations - Flamme

E6 Conservation de la masse

$$\rho l u = (s + \nu) L \sigma'$$

E7 Corps \rightarrow base

$$H, l = hL \frac{T}{T_a}$$

Equations - Rayonnement

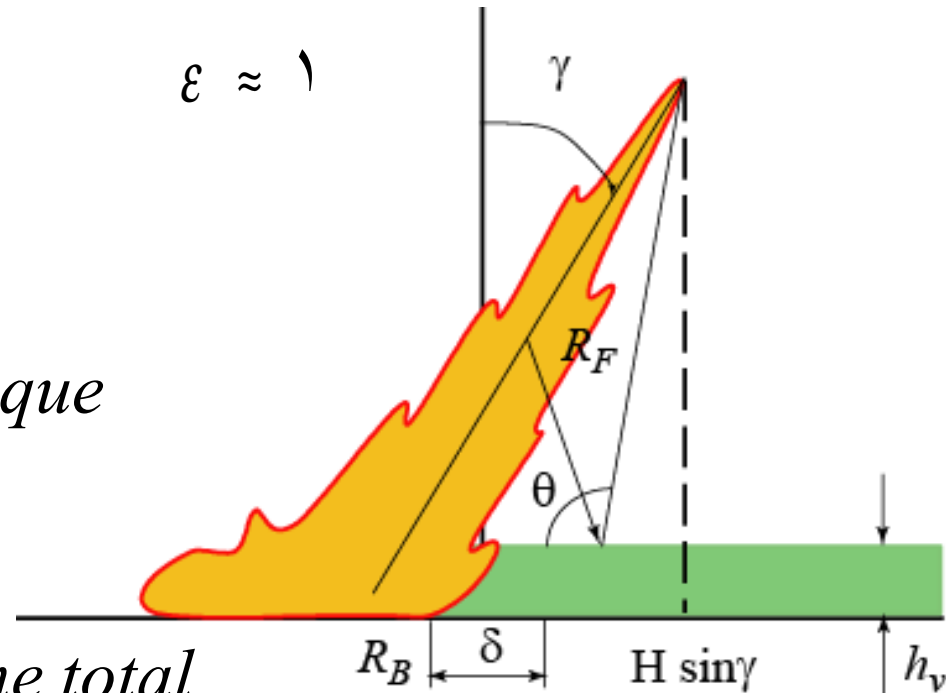
Rayonnement de la base

E8 $R_B = \varepsilon \sigma_B T^z h_v (\delta - x)$ $\varepsilon \approx 1$

$\delta = \frac{\xi}{s_v V_v}$ *profondeur optique*

$s_v = (\text{surface} / \text{volume})_{\text{végétal}}$

$V_v = \text{volume végétal} / \text{volume total}$



Equations - Rayonnement

Rayonnement du corps de la flamme

$$R_F = \varepsilon \sigma_B T^\xi \frac{1}{\pi} \int_{FF} \frac{\cos \varphi_N \cos \varphi_M}{R^2} dS \quad (\varepsilon \neq 1)$$



Hypothèse du plan tangent



E9

$$R_F = \frac{\varepsilon}{\gamma} \sigma_B T^\xi (1 - \cos \theta)$$

Equations - Préchauffage

Propagation à contre-courant / recule

$$\sigma c_p \frac{dT_v}{dt} = R_B - \Delta h \frac{d\sigma_{H_2O}}{dt}$$

↓

$$c_p \sigma (T_i - T_e) = \frac{1}{\gamma} \varepsilon \sigma_B T^{\xi} h_v \delta^{\gamma} - \Delta h \eta \sigma c_p \quad \left(\eta = \frac{\sigma_{H_2O}}{\sigma} \right)$$

E10

$$c_p = \frac{\varepsilon \sigma_B T^{\xi} h_v \delta^{\gamma}}{\gamma \sigma (c_p \Delta T + \eta \Delta h)}$$

c_0 indépendant de l'angle → FF se déplace sans déformation

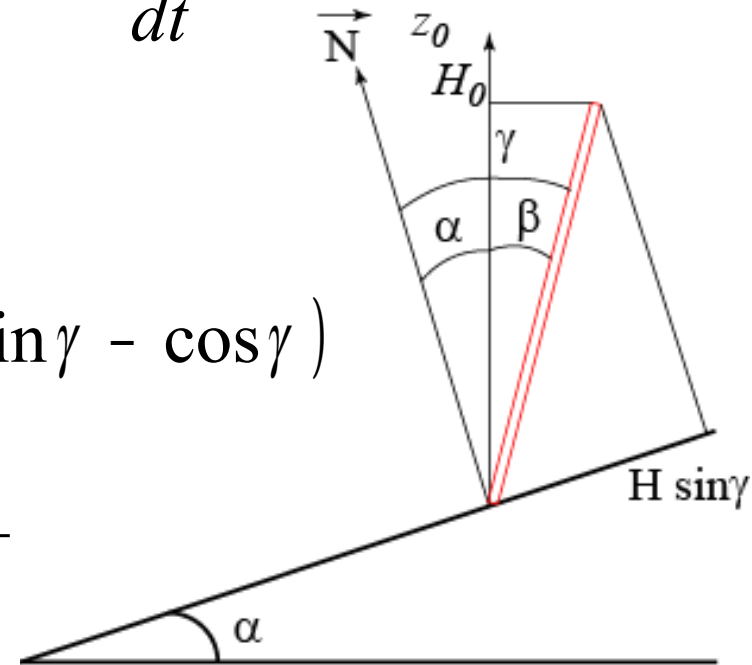
Equations - Préchauffage

Propagation à co-courant / ascendant

$$\sigma c_p \frac{dT_v}{dt} = R_B + R_F - \Delta h \frac{d\sigma_{H \rightarrow O}}{dt}$$

$$\mathbf{E11} \quad \int_0^{H \sin \gamma} R_F dx = \frac{1}{\gamma} \varepsilon \sigma_R T^\xi H (\gamma + \sin \gamma - \cos \gamma)$$

$$H \text{ longueur de flamme : } H = \frac{H_0}{\cos \beta}$$



Equations - Préchauffage

$$\mathbf{E12} \quad c = c_B + \frac{\varepsilon \sigma T^\xi H}{\gamma \sigma (c_p \Delta T + \eta \Delta h)} (\lambda + \sin \gamma - \cos \gamma)$$

Or

$$\varepsilon \sigma T^\xi = \chi \frac{Q}{H} \quad (\text{énergie rayonnée par unité de surface de } l\tau)$$

$$Q = \Delta H L \dot{\sigma}$$

$$\mathbf{H13} \rightarrow Q = \Delta H \sigma c \quad \text{car} \quad \dot{\sigma} = \frac{\sigma}{\tau}, \quad L = c\tau$$

$$c \approx \frac{\chi \Delta H c}{\gamma (c_p \Delta T + \eta \Delta h)} (\lambda + \sin \gamma - \cos \gamma)$$

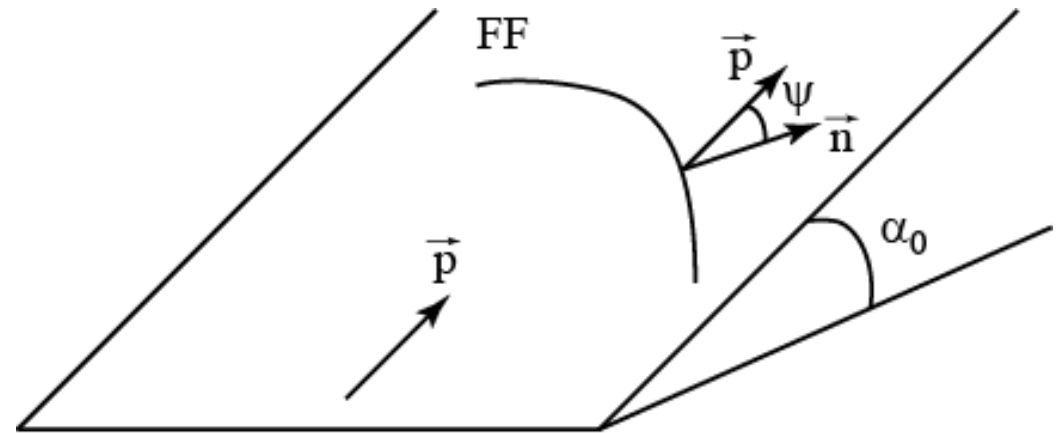
Equations - Préchauffage

$$\mathbf{H5} \rightarrow \chi = \left(\frac{c}{c_s} \right)^{-1/q}$$

$$\frac{c}{c_s} = \left(\frac{\chi^q \Delta H}{(c_p \Delta T + \eta \Delta h)} \right)^q (\chi + \sin \gamma - \cos \gamma)^q$$

Modèle

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{c}{c_0} = A(\lambda + \sin \gamma - \cos \gamma)^q \\ A = \left(\frac{\lambda_0 \Delta H}{(c_p \Delta T + \eta \Delta h)} \right)^q \\ \gamma = \alpha + \beta \end{array} \right.$$



$$\sin \alpha = \frac{\sin \alpha_0 \cos \psi}{(\sin^2 \alpha_0 \cos^2 \psi + \cos^2 \alpha_0)^{1/2}}$$

Vent extérieur

Vent induit

$$\tan \beta = b U_n c^{-1/2}$$

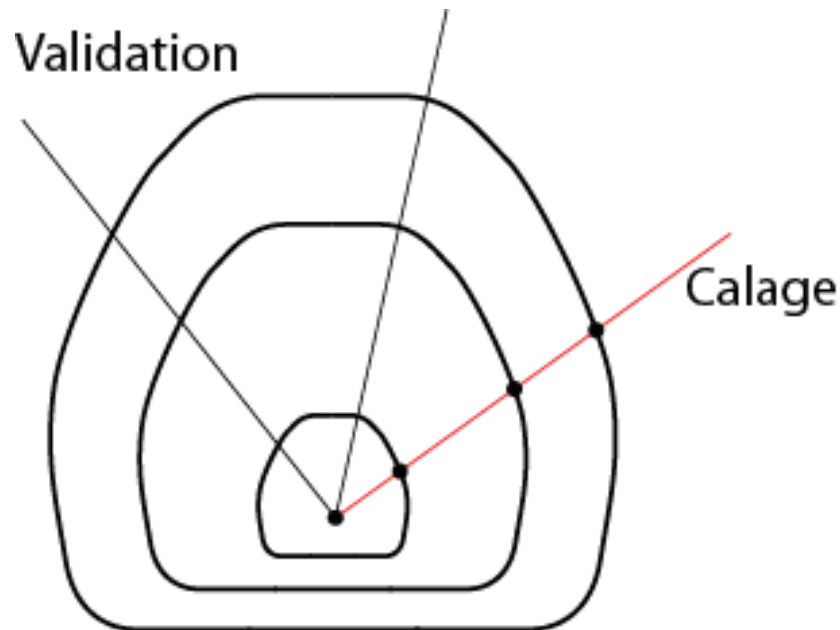
$$\tan \beta = b_1 c^{3/2}$$

c varie en tout point \Rightarrow le FF se déforme

Paramètres à caler : c_0, b, A, q ou c_0, b_1, A, q

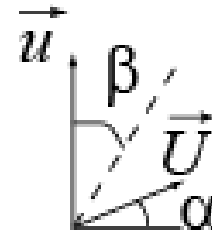
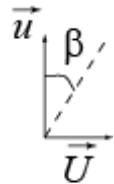
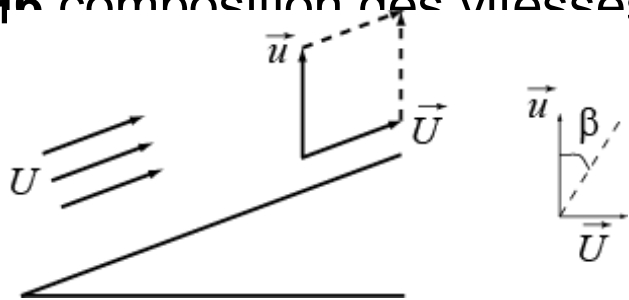
Points forts

- Bonne validation sur des feux de labo
- Temps de calcul quasi nul
- Front 3D, pente et vent
- Calage des 4 paramètres pour une végétation + validation – prévision sur une seule expérience



Points faibles → Nouveau modèle

- **H10** relation empirique de McCaffrey $H = 0,08Q^{2/5}$
- **H5** relation empirique $\chi = 0,3(c/c_0)^{-1/q}$
- **H6** composition des vitesses



- **H9** $m_{base} = m_{corps}$

- **H7** vent induit = u_G

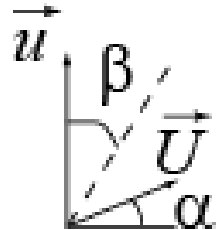
- Effet de pointe

- • abandonnée
- • gardée ; trouver une justification physique ?
 q universel (=3) ?
- • modifiée
- • abandonnée
- • que faire ?

Nouveau modèle

Nouvelles hypothèses

H6bis



H9 et H10 abandonnées

H13 $h = h_{\text{végétation}}$

H14 stœchiométrie locale : la combustion s'amorce quand en un point

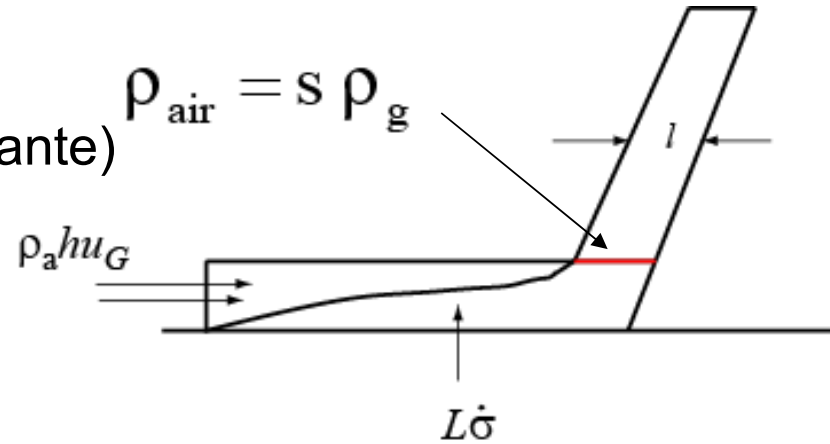
$$\rho_{\text{air}} = S \rho_{\text{g}}$$

Nouveau modèle

H15 concentration fonction de l'épaisseur
(vitesse constante, température constante)

$$\rho_g l u_c = \rho_g L u_c$$

$$\rho_g = \frac{L}{l} \rho_g \quad \rho_g = \frac{\sigma}{u_c}$$



H14 \rightarrow
$$\rho_a = s \frac{L \sigma}{l u_c} \quad \frac{l}{L} = \frac{s}{\rho_a u_c} \sigma \quad (\text{E14})$$

$$\rho u = (s + 1) \frac{L}{l} \sigma \quad \longrightarrow \quad u = \frac{T}{T_a} u_c \quad \text{E15}$$

Nouveau modèle

$$H = \frac{u^\gamma}{\gamma g \left(\frac{T}{T_a} - 1 \right)}$$

va peu varier

$$H \approx H_0$$

$$u = \left(\frac{T_{\max}}{T_a} - \eta c^{-\gamma/q} \right) u_0$$

$$u_G = \frac{sL\sigma}{\rho_a h}$$

Récapitulatif

Modèle **E13** inchangé

sauf

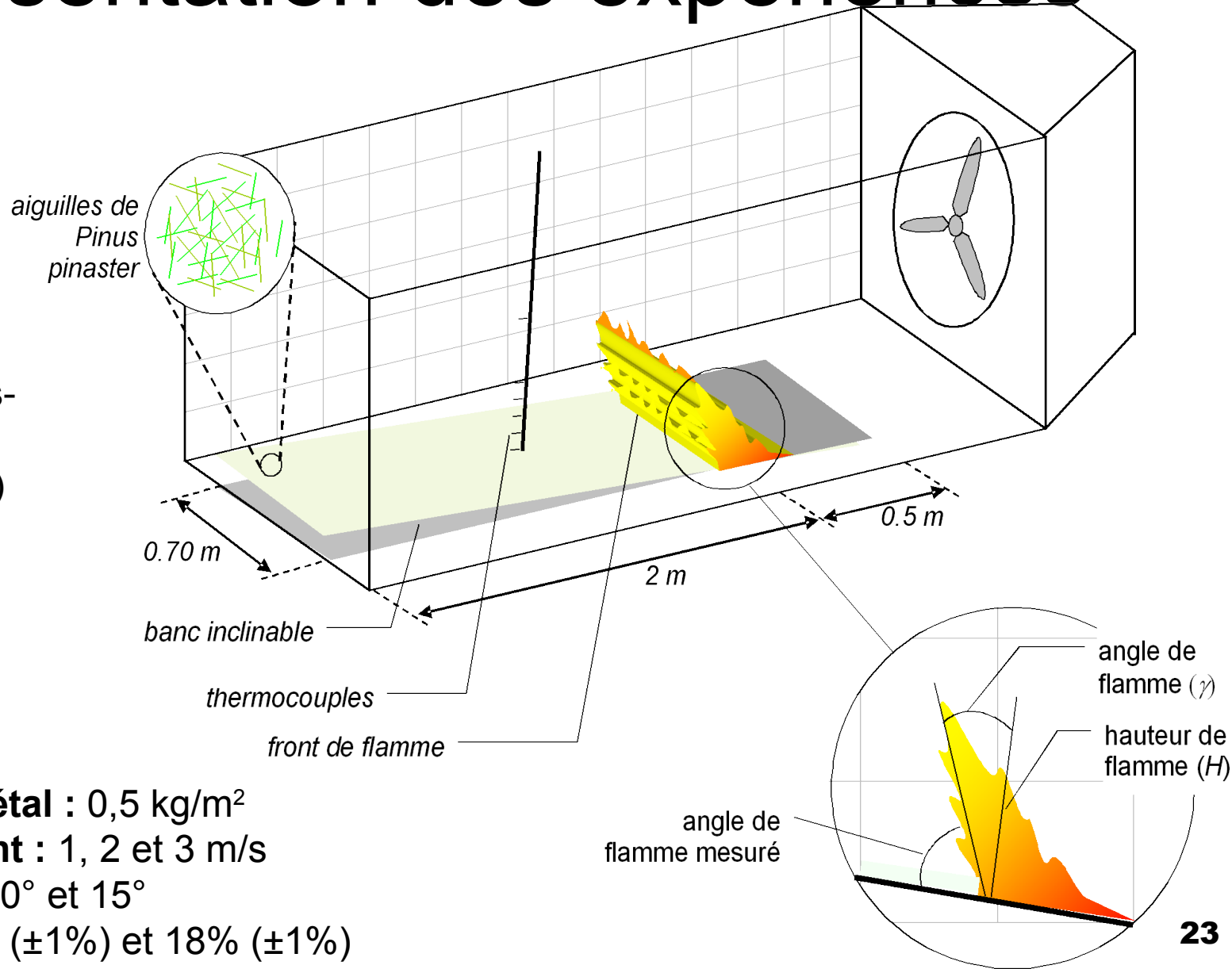
$$\tan \beta = \frac{u \cos \alpha}{u_G + u \sin \alpha} \quad \text{et} \quad u = u_{\max} - \eta * c^{-1/q}$$

Si vent induit

$$\tan \beta = \frac{u_G}{u} = a \frac{c}{u}$$

Présentation des expériences

Données
expérimentales
issues
d'expériences
réalisées à l'IST
de Lisbonne par
J. M. C. Mendes-
Lopes (IJWF,
2003, **12**, 67-84)



Charge de végétal : 0,5 kg/m²
Vitesses de vent : 1, 2 et 3 m/s
Pente : 0°, 5°, 10° et 15°
Humidité : 10% ($\pm 1\%$) et 18% ($\pm 1\%$)

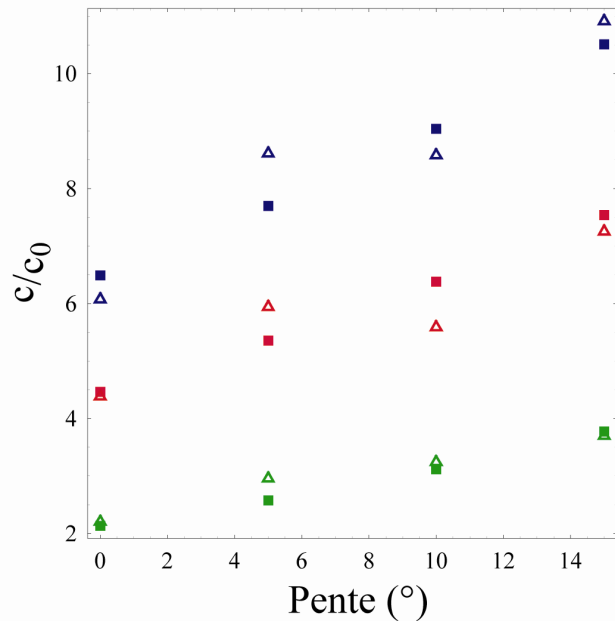
Calage des paramètres

Humidité : $\eta = 18\%$

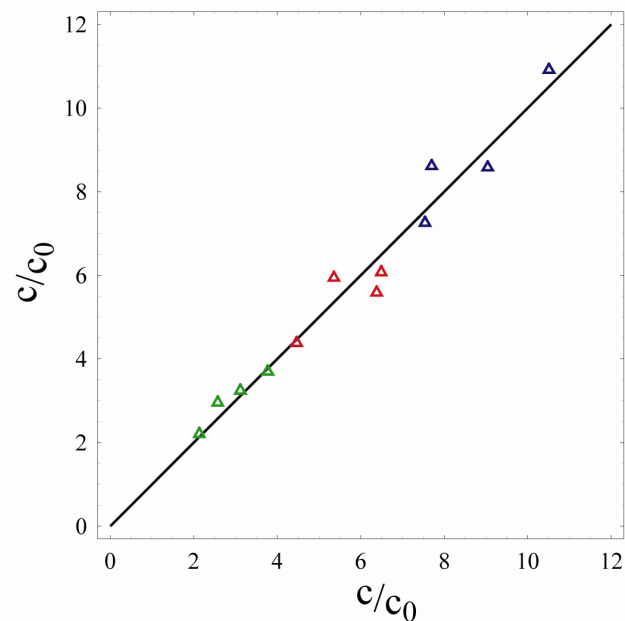
Calage de A et b ($q = 3$) pour $U = 1$ m/s, $U = 2$ m/s et $U = 3$ m/s
et $\alpha = 0, 5, 10$ et 15°

$A = 1,23969$, $b = 0,927241$

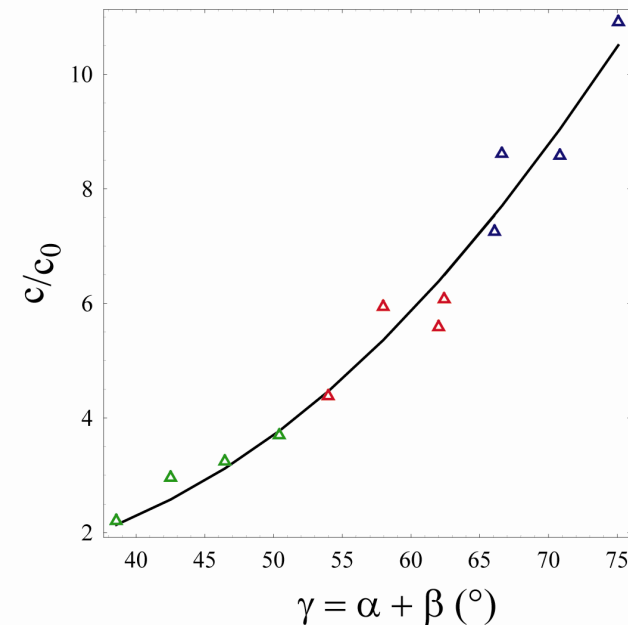
Vitesse front th. et exp. / pente



Vitesse front th. et exp.



γ / vitesse du front



Validation du modèle

Humidité : $\eta = 18\%$

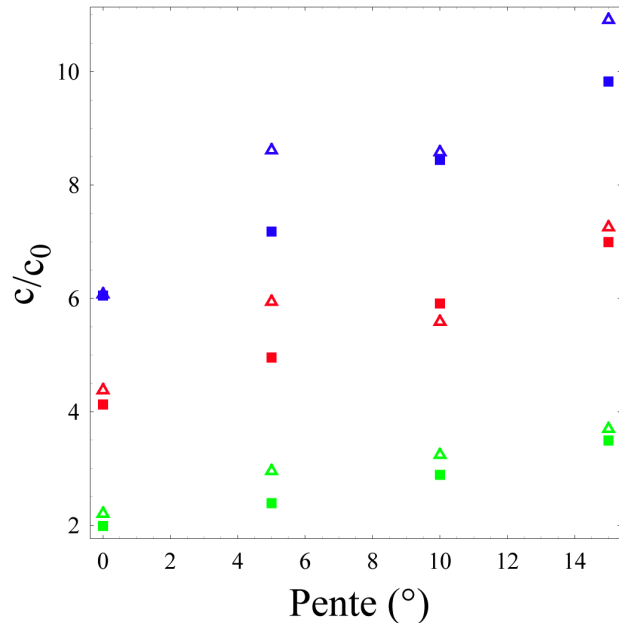
Calage de A et b ($q = 3$) pour $\alpha = 10^\circ$ et $U = 1, 2$ et 3 m/s

$A = 1,2256$, $b = 0,877101$

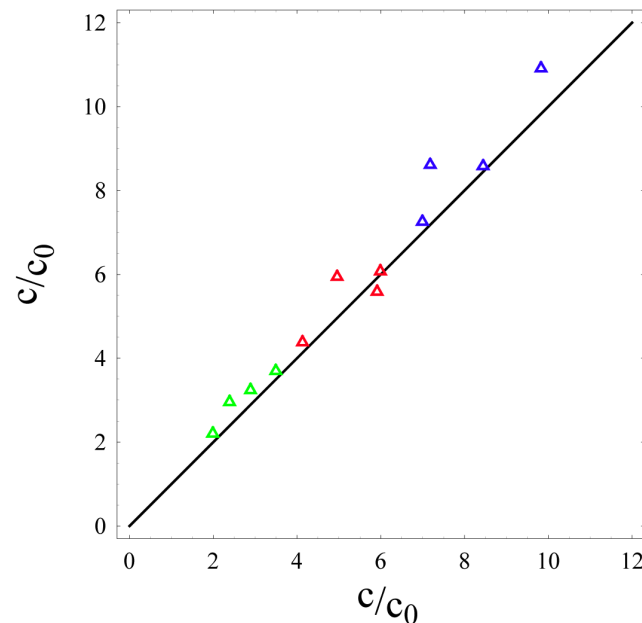
Vérification pour toutes les données

$U = 1$ m/s, $U = 2$ m/s et $U = 3$ m/s

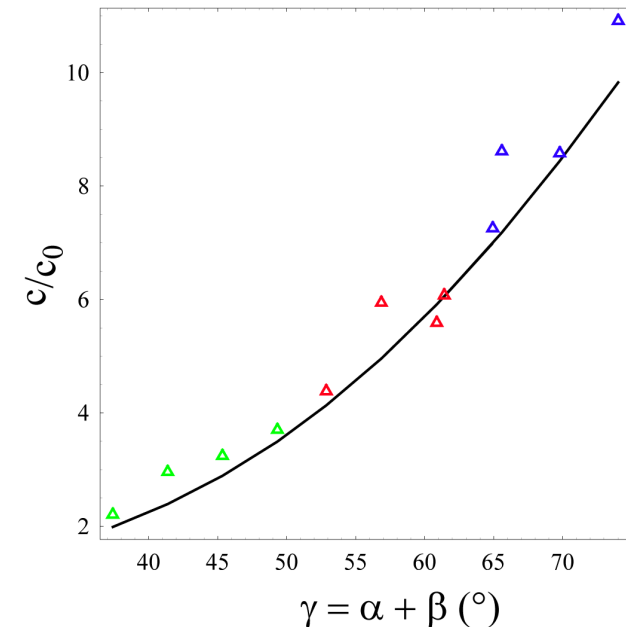
Vitesse front th. et exp. / pente



Vitesse front th. et exp.



γ / vitesse du front



Validation du modèle

Humidité : $\eta = 18\%$

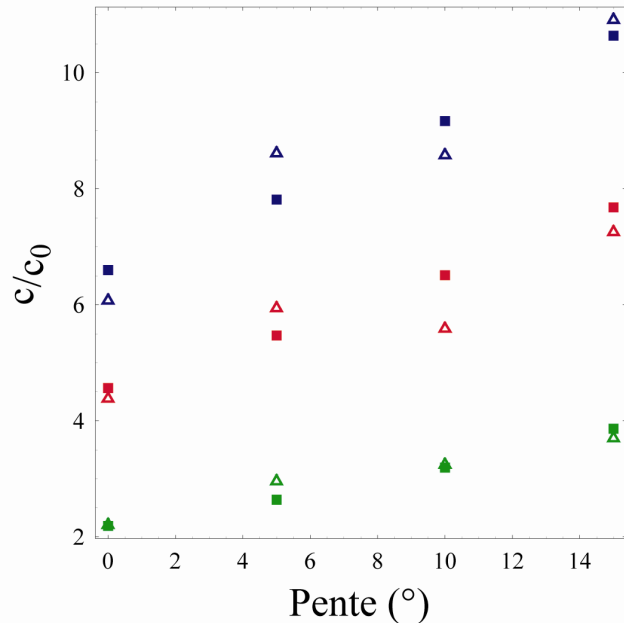
Calage de A et b ($q = 3$) pour $U = 3$ m/s et $\alpha = 0, 5, 10$ et 15°

$A = 1,23586$, $b = 0,9534$

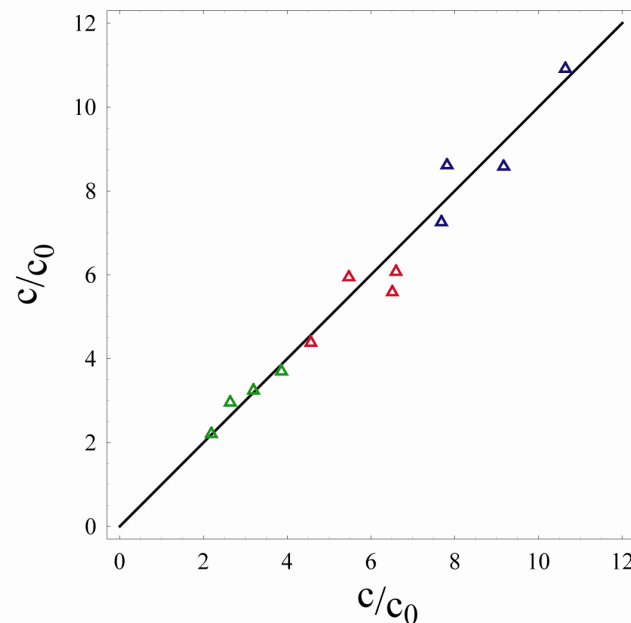
Vérification pour toutes les données

$U = 1$ m/s, $U = 2$ m/s et $U = 3$ m/s

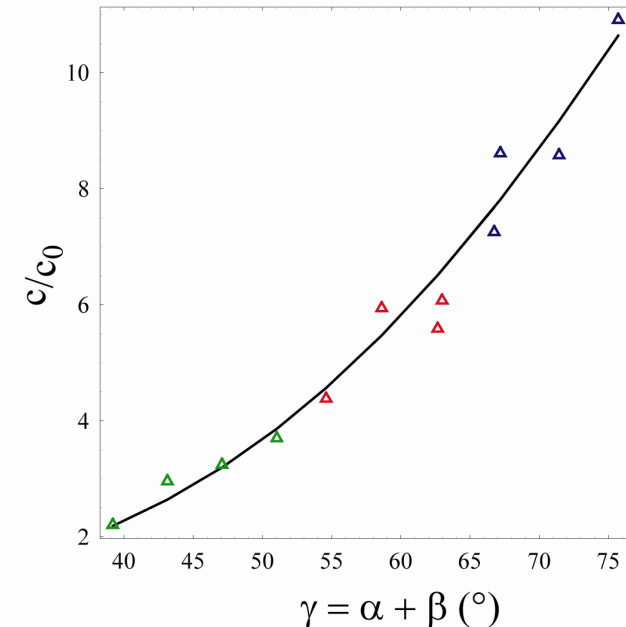
Vitesse front th. et exp. / pente



Vitesse front th. et exp.



γ / vitesse du front



Calcul du paramètre A

Le paramètre A peut être calculé à partir d'une valeur de référence (à η fixée).

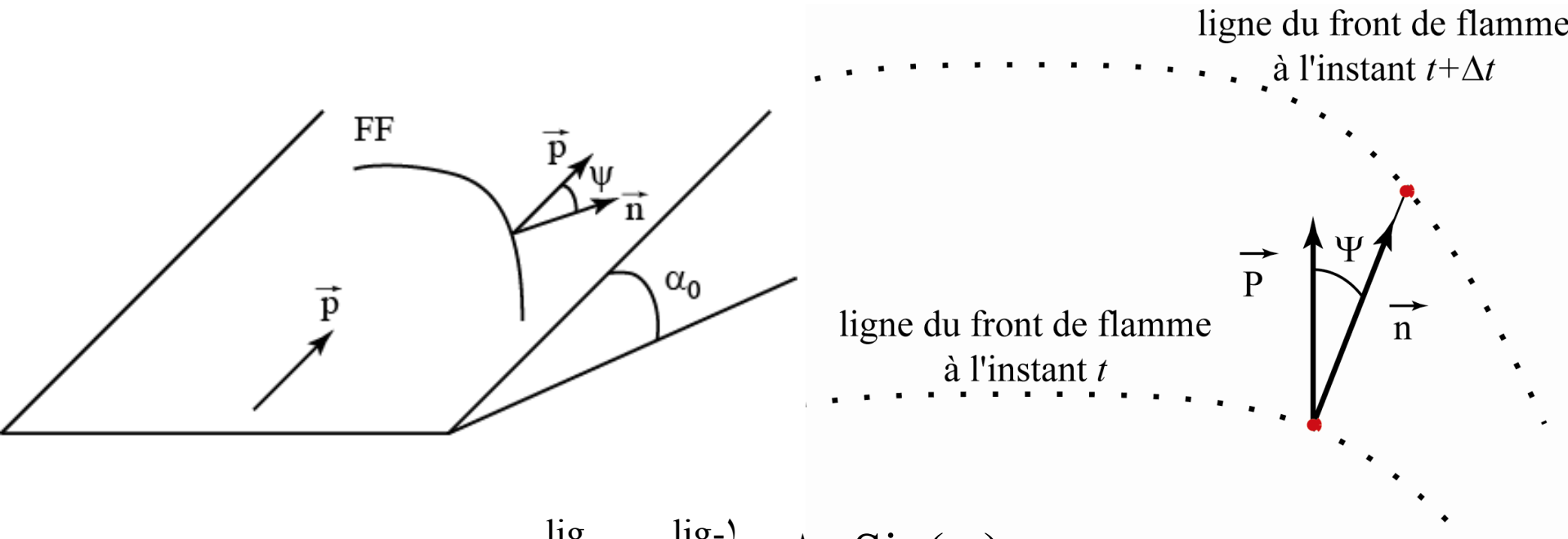
$$\left. \begin{aligned}
 A_{\lambda} &= \frac{\gamma, \lambda \Delta H}{(c_p \Delta T + \eta_{\lambda} \Delta h)} = \frac{\gamma, \lambda \Delta H c_p \Delta T}{\left(\lambda + \frac{\eta_{\lambda} \Delta h}{c_p \Delta T} \right)} \\
 A_{\lambda'} &= \frac{\gamma, \lambda' \Delta H c_p \Delta T}{\left(\lambda' + \frac{\eta_{\lambda'} \Delta h}{c_p \Delta T} \right)}
 \end{aligned} \right\} \frac{A_{\lambda'}}{A_{\lambda}} = \frac{\left(\lambda + \eta_{\lambda} \frac{\Delta h}{c_p \Delta T} \right)}{\left(\lambda' + \eta_{\lambda'} \frac{\Delta h}{c_p \Delta T} \right)}$$

Remarque : il faut modifier le rapport $\Delta h / (c_p \Delta T)$ pour obtenir des valeurs numériques proches des valeurs expérimentales.

Principe du code

- Initialisation des paramètres du problème
 - Définition de la parcelle et de l'allumage
 - Calcul d'une nouvelle ligne à partir de la précédente (calcul du ψ_{local} , du c_{local} (procédure resolution*) et des nouvelles coordonnées des points de la ligne)
- * : la procédure de résolution fournit en chaque point la vitesse locale du front, l'angle d'inclinaison de flamme

Déplacement des points du front de flamme

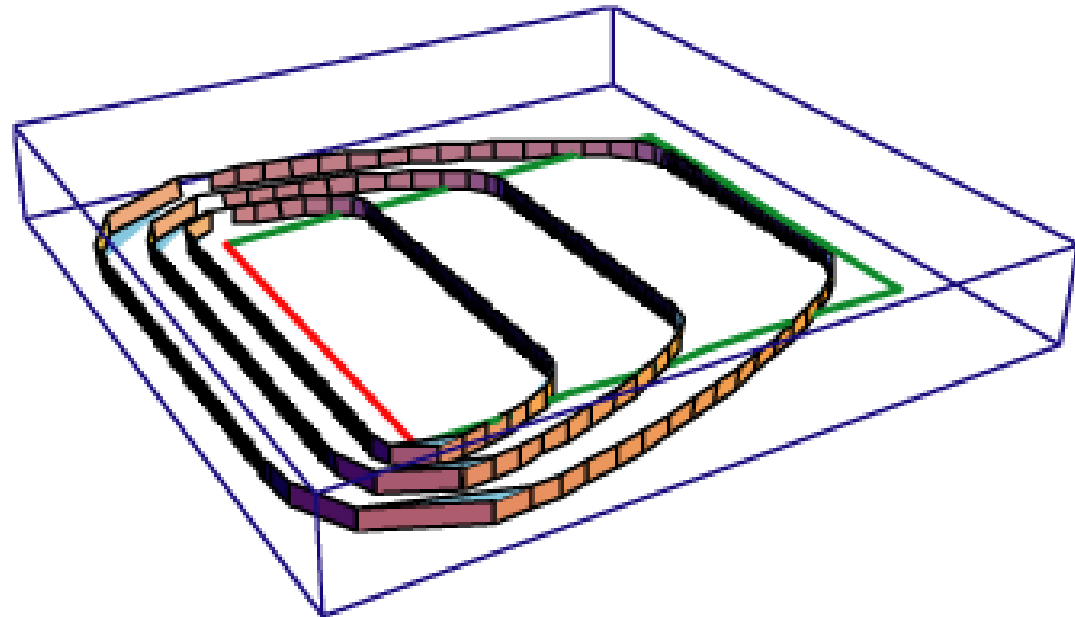


$$x_i^{\text{lig}} = x_i^{\text{lig}^{-1}} + \Delta t \sin(\psi) c$$

$$y_i^{\text{lig}} = y_i^{\text{lig}^{-1}} - \Delta t \cos(\psi) c$$

Propagation : visualisation 3D

Simulation réalisée avec les paramètres calés sur les expériences de Mendes-Lopes pour une pente de 15° avec une humidité de 18%



Dimension parcelle : **4 X 5 (m²)**

Nb de points par ligne : **100**

Nb de lignes : **50**

Temps de simulation : **11,997 s**

Temps simulé : **500 s**

C0 et c ??

Calculs réalisés sur un ordinateur Intel Centrino 2GHz, 1Go RAM

Perspectives

- Géométries réelles
- Rayonnement
- Différentes pentes
- Différents vents
- Vent de travers
- Milieu hétérogène