

Approches expérimentale et de modélisation pour la compréhension du comportement et de l'impact des incendies de végétation

Paul-Antoine Santoni^{*}, Bernard Porterie[‡] Dominique Morvan[§]

^{*} Université de Corse Pascal Paoli / CNRS UMR 6134 SPE

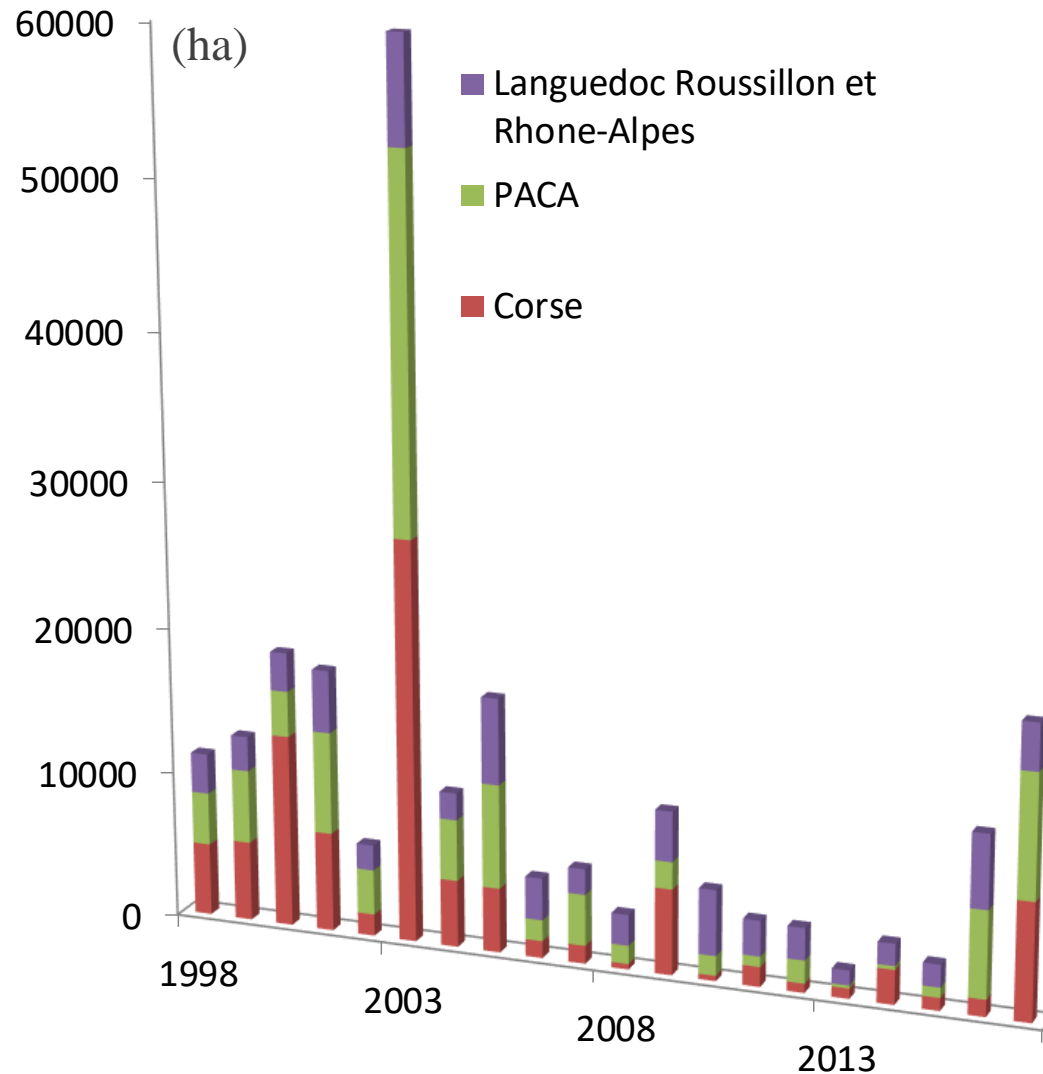
[‡] Aix-Marseille Université / CNRS UMR 7343 IUSTI

[§] Aix-Marseille Université / CNRS UMR 7340 M2P2



Introduction générale

Les incendies en France entre 1998 et 2017



Moyenne superficies brûlées / an

12000 ha

(sans 2003) 9400 ha

Rq: 16000 ha/an de 90 à 2000

Superficies brûlées en 20 ans

Corse 92000 ha

PACA 86000 ha

LR & RH 62000 ha

Territoire sensible brûlé

Corse 13,5 %

PACA 5,0 %

LR & RH 2,8 %

Introduction générale

Les Grands Incendies (> 100 ha) en France et en Italie

	Nb mise à feu	Nb GI	Sup GI/Sup Totale
Corse (20 ans)	14172	0.8 %	76 %
Sardaigne (20 ans)	52434	0.9%	55 %
Ligurie (20 ans)	8928	1.2%	48 %
France (2017)	2320	1.1 %	75 %



Introduction générale

Les incendies en Europe et dans le Monde

Quelques chiffres (FAO : Incendies + feux d'aménagement)

	Millions d'ha
Afrique Sub-Saharienne	230
Australie	55
Sud-Est Asiatique	7
Asie du Sud	4
Amérique du Nord	4
Amérique du Sud	3
Asie Centrale	2
Méditerranée	0,7 à 1
...	
Monde	> 300



Plan de la présentation

Introduction générale sur les incendies de végétation

Approche phénoménologique des incendies de végétation

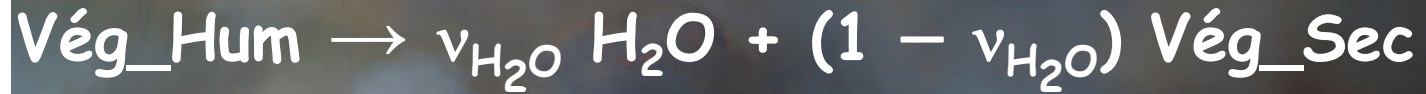
Réaction au feu des végétaux et modèles de végétation

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Conclusions

Approche phénoménologique

Les mécanismes physiques de la propagation



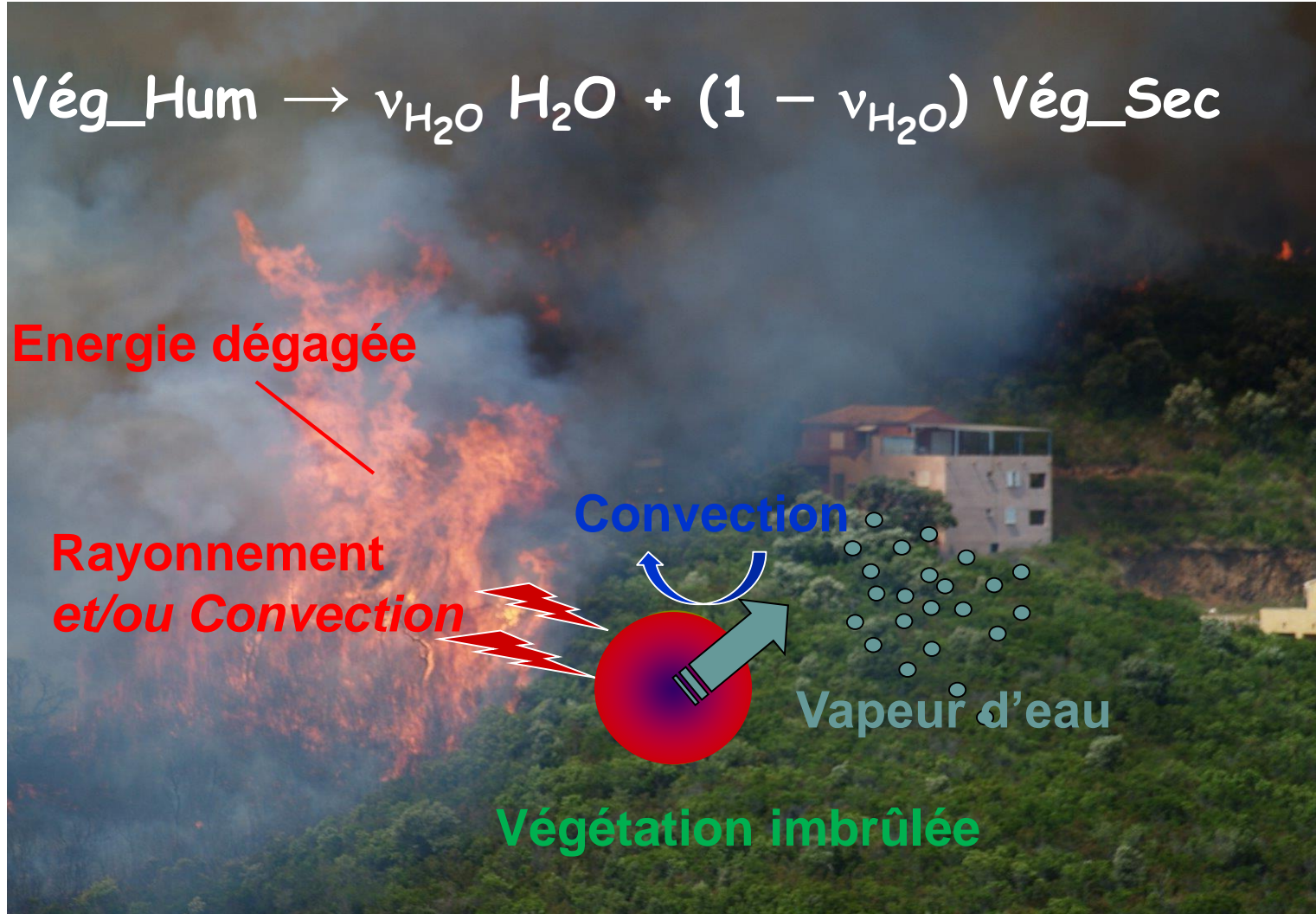
Energie dégagée

Rayonnement
et/ou Convection

Convection

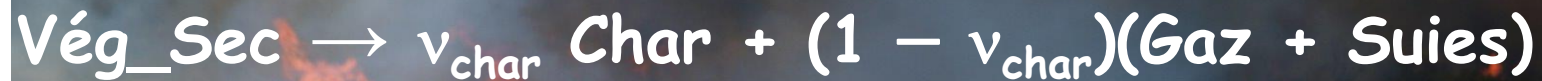
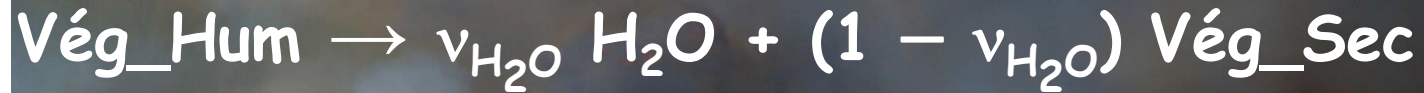
Vapeur d'eau

Végétation imbrûlée



Approche phénoménologique

Les mécanismes physiques de la propagation



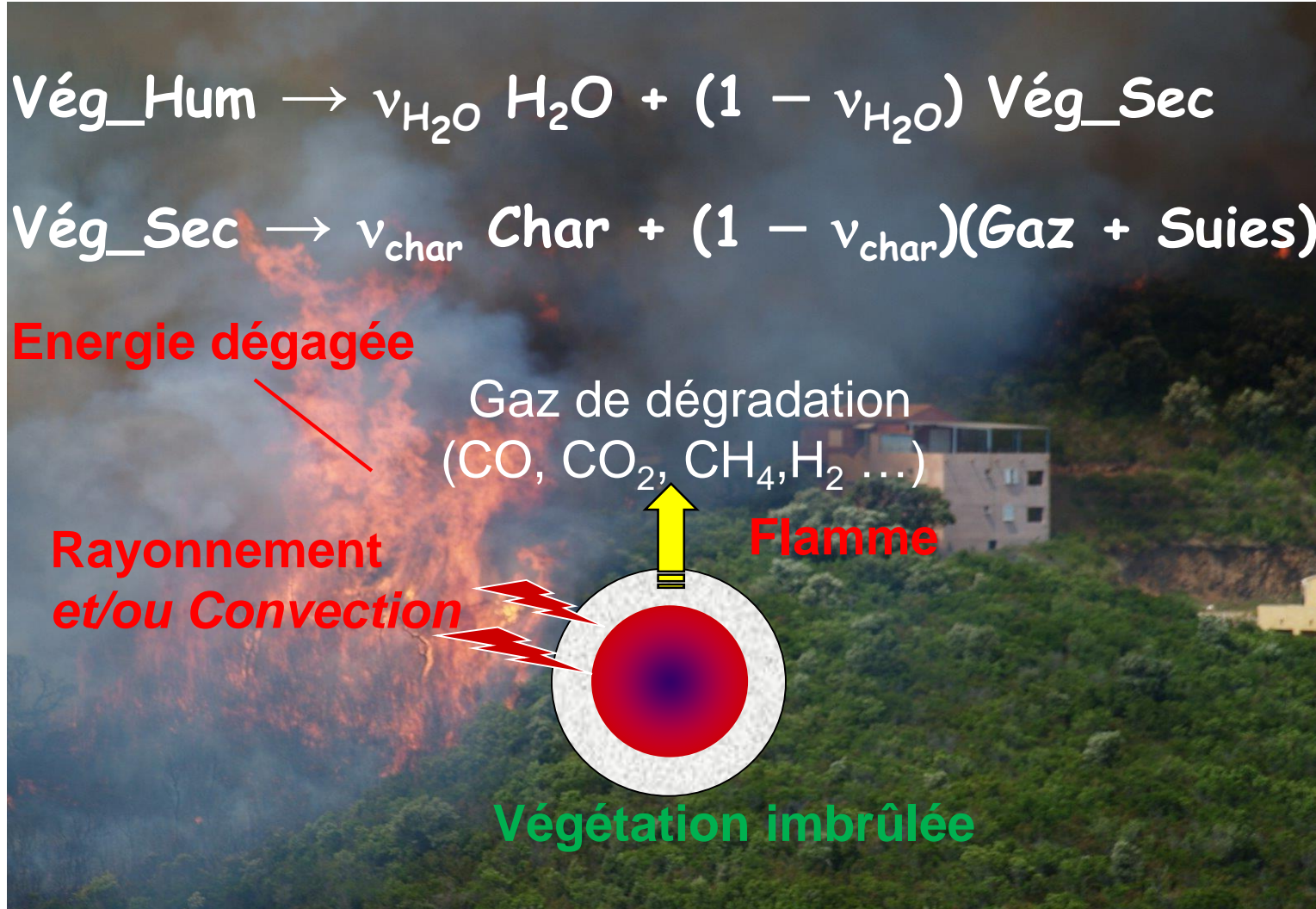
Energie dégagée

**Rayonnement
et/ou Convection**

Gaz de dégradation
(CO, CO₂, CH₄, H₂ ...)

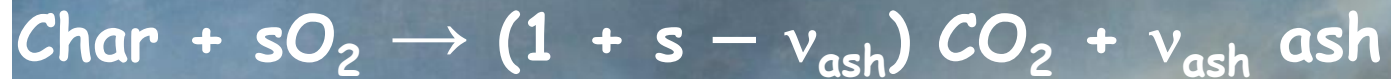
Flamme

Végétation imbrûlée



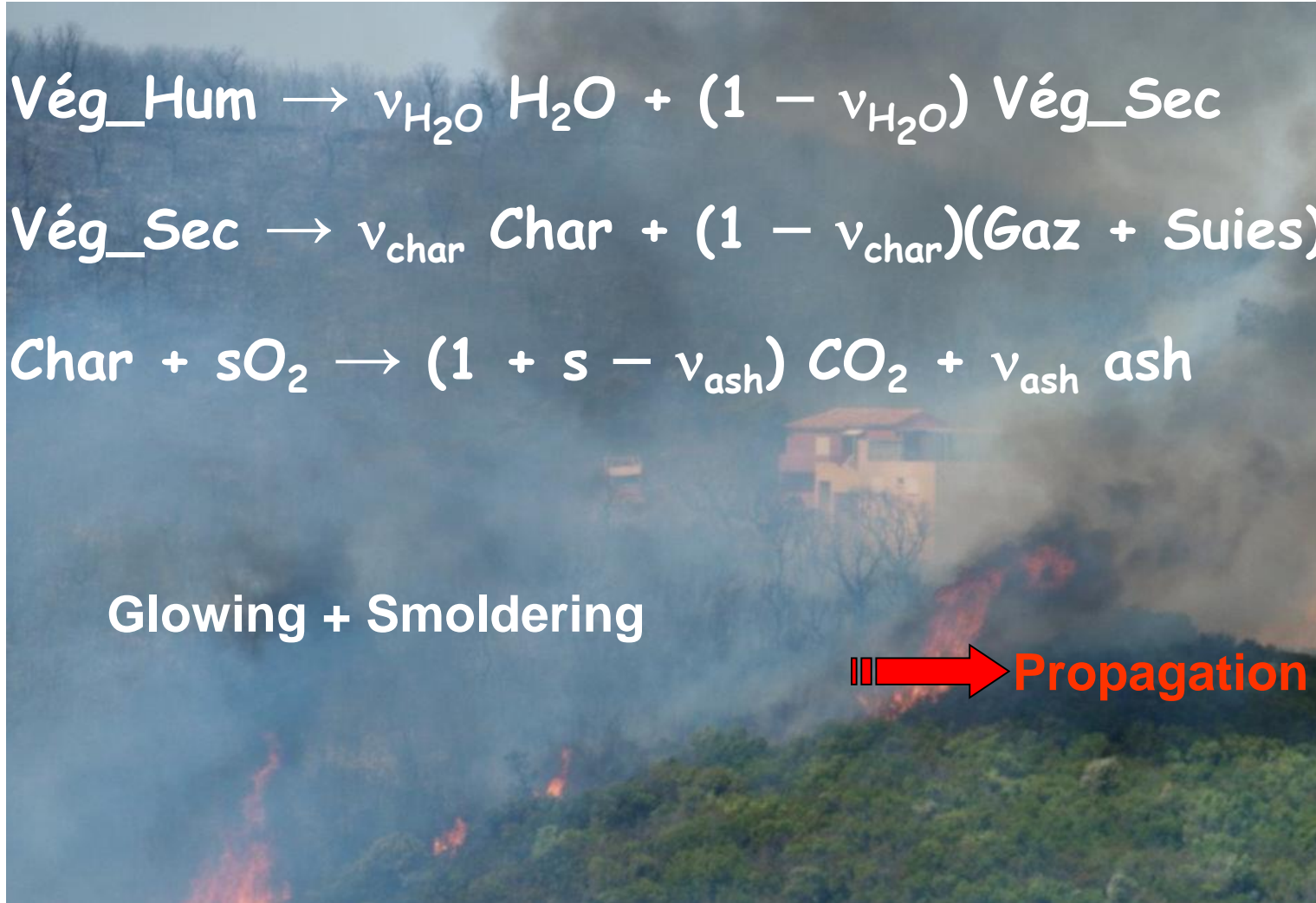
Approche phénoménologique

Les mécanismes physiques de la propagation



Glowing + Smoldering

 Propagation



Approche phénoménologique

Les facteurs environnementaux : la végétation (feux d'herbe)



Longueur de flamme : de l'ordre de la hauteur homme

Vitesse de propagation : 1 km/h pour un vent de 3,6 km/h et une Teneur en Eau (base sèche) du végétal mort de 5%.

La TE du végétal mort "fin" est très sensible à l'humidité de l'air
Des vitesses de 30 km/h en Australie pour des vents plus forts

Approche phénoménologique

Les facteurs environnementaux : la végétation (feux de maquis)



Longueur de flamme : bien plus grande que la hauteur d'homme

Vitesse de propagation : 0,6-0,9 km/h pour un vent de 18 km/h et
une Teneur en Eau du végétal mort de 8%
et pour végétal vivant 78% (AU) à 58% (CS)

Il est admis que le "risque incendie" est avéré pour une TE < 65 %

Des TE de l'ordre de 30% sont "classiques" pour CM

Approche phénoménologique

Les facteurs environnementaux : la végétation (feux de forêt)



Longueur de flamme : bien plus grande que la hauteur d'homme

Vitesse de propagation : 2,3 km/h pour un vent de 40 km/h et une Teneur en Eau du végétal mort de 8% et 60% (EA) pour le végétal vivant

La structure des typologies végétales influe sur le régime du feu

Approche phénoménologique

Les facteurs environnementaux : la végétation

Influence de la continuité verticale sur le comportement du feu



Houppier

Végétaux de surface

Litière

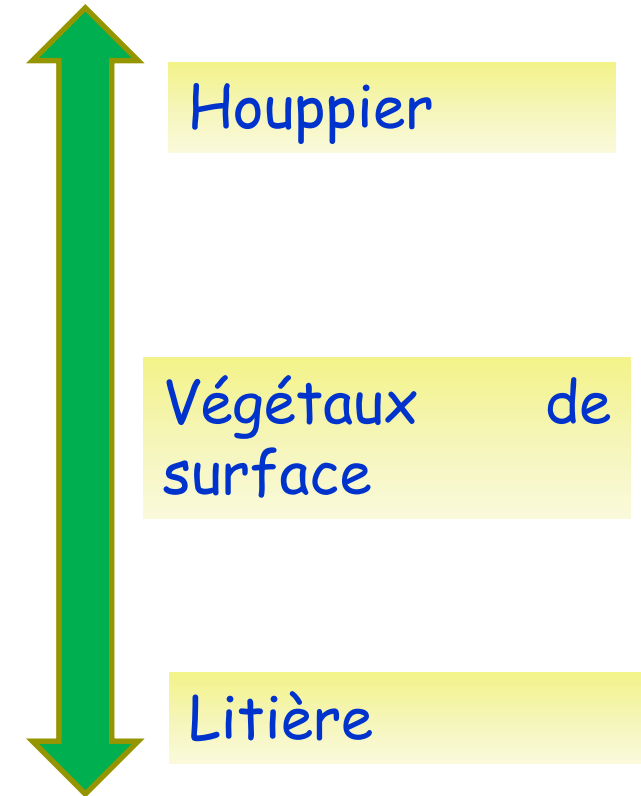
Source Grazia Pellizzaro CNR IBIMET Sassari

Le feu de litière peut se transformer en feu de surface jusqu'à devenir un feu total incluant le houppier des arbres

Approche phénoménologique

Les facteurs environnementaux : la végétation

Influence de la continuité verticale sur le comportement du feu



L'élagage participe à la réduction de la **puissance** des feux en évitant la transition feu de surface - feu total

Approche phénoménologique

Les facteurs environnementaux : la végétation

Influence de la continuité horizontale sur le comportement du feu



Dans une végétation continue, le feu progresse facilement même en l'absence de vent

Approche phénoménologique

Les facteurs environnementaux : la végétation

Influence de la continuité horizontale sur le comportement du feu



Source: Grazia Pellizzaro CNR IBIMET Sassari

Dans une végétation éparse, en l'absence de vent le feu ne progresse pas d'un îlot de végétation à un autre

Approche phénoménologique

Les facteurs environnementaux : la végétation

Influence de la charge de combustible sur le comportement du feu

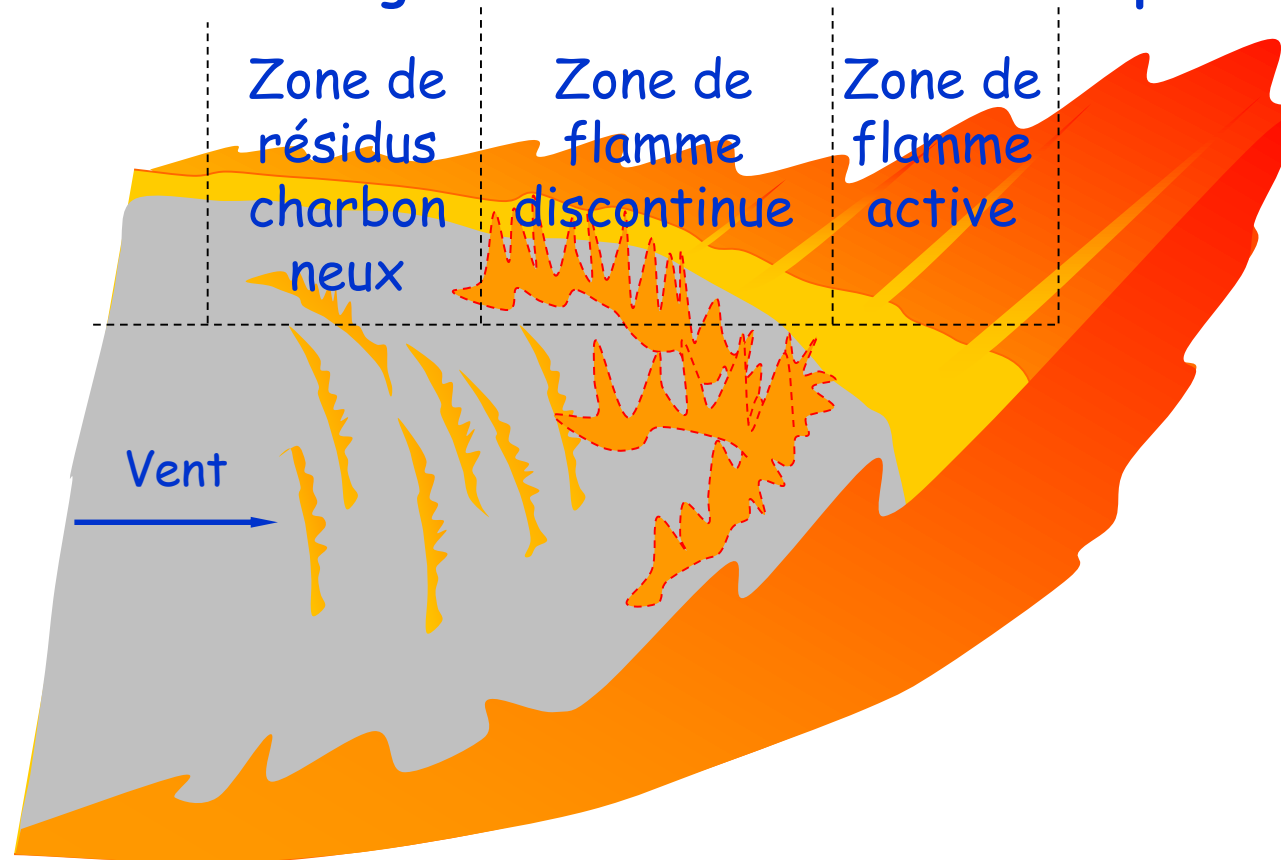


La charge (kg/m²) est la masse sèche (vivante et morte) surfacique.

Approche phénoménologique

Les facteurs environnementaux : la végétation

Influence de la charge de combustible sur le comportement du feu



La charge des éléments végétaux fins qui propagent le feu, permet de déterminer la puissance d'un feu (kW/m)

Approche phénoménologique

Les facteurs environnementaux : la végétation

Influence de la charge de combustible sur le comportement du feu

Certains pays utilisent la puissance d'un feu pour définir l'indice de risque

$$I_B = \sum_k h_k w_k R$$

Classe (mort, vivant, taille) ———— h_k

PCI en kJ/kg d'éléments fins brûlés ———— w_k

charge consommée d'éléments végétaux fins en kg par m² au sol ———— w_k

Vitesse du front de flamme (m/s) ———— R

La puissance représente l'énergie dégagée par unité de temps et par unité de longueur du front de feu

Approche phénoménologique

Les facteurs environnementaux : la végétation

Influence de la charge de combustible sur le comportement du feu



Réduire la charge de combustible et compartimenter le territoire participent à la prévention contre les grands incendies

Approche phénoménologique

Les facteurs environnementaux : l'effet du vent

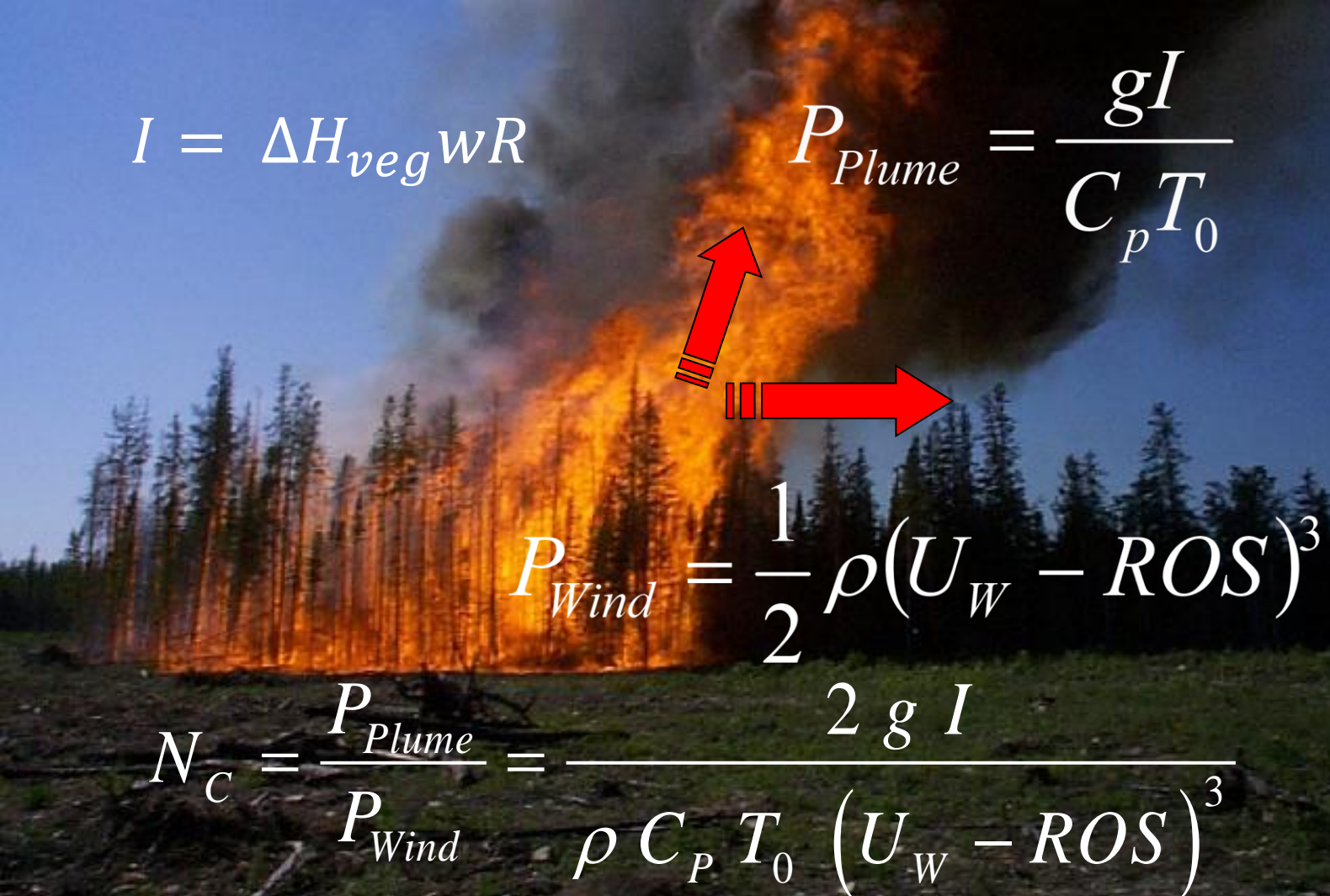


Le périmètre du front de feu prend souvent une allure elliptique

Approche phénoménologique

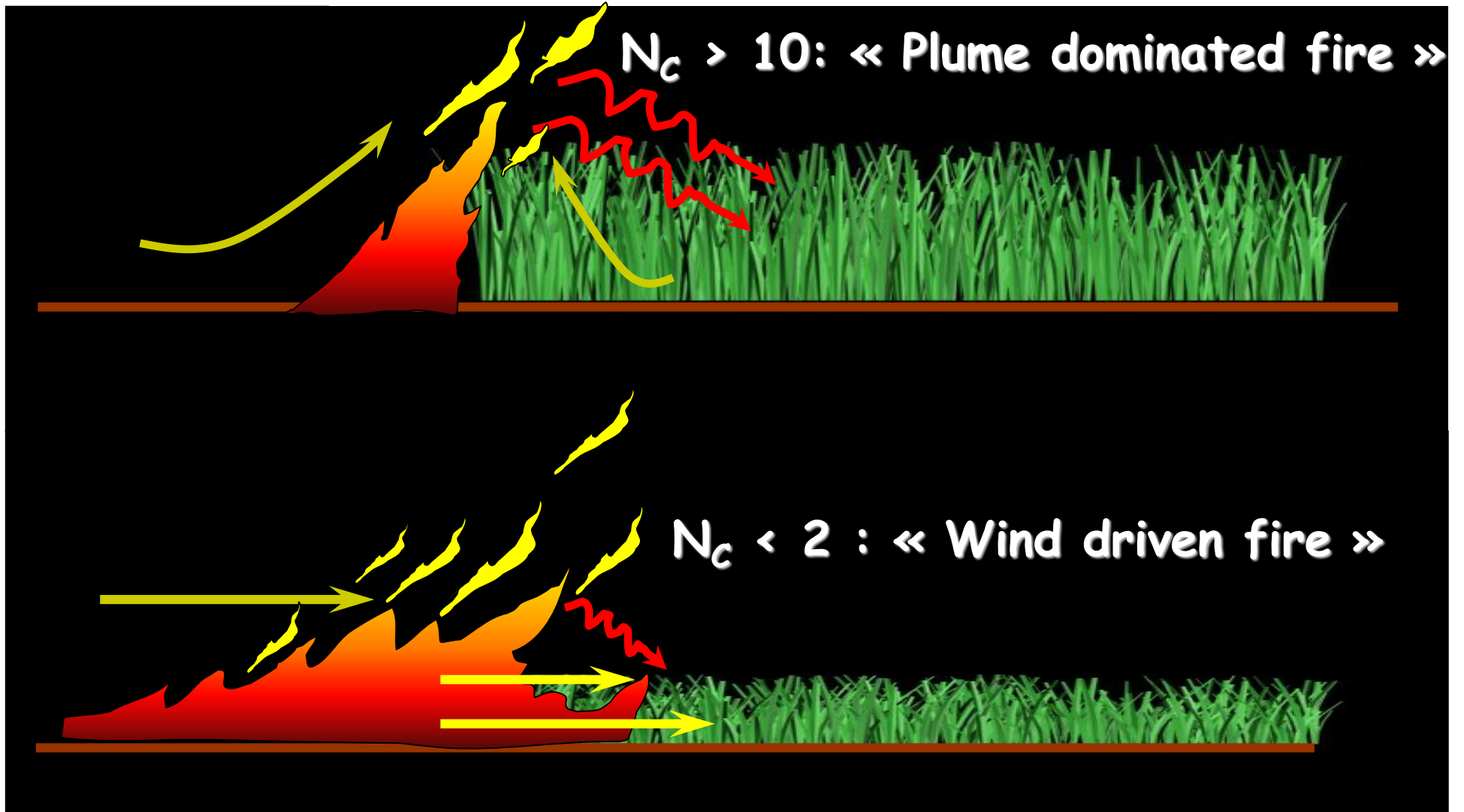
Régimes de propagation, nombre convectif de Byram

Nelson
(2003)
IJWF
Power of the
fire - A
thermodyna
mic analysis


$$I = \Delta H_{veg} w R$$
$$P_{Plume} = \frac{gI}{C_p T_0}$$
$$P_{Wind} = \frac{1}{2} \rho (U_w - ROS)^3$$
$$N_C = \frac{P_{Plume}}{P_{Wind}} = \frac{2 g I}{\rho C_p T_0 (U_w - ROS)^3}$$

Approche phénoménologique

Régimes de propagation, nombre convectif de Byram



Approche phénoménologique

Les facteurs environnementaux : l'effet de pente



Le périmètre du front de feu prend souvent une allure elliptique

Approche phénoménologique

Les facteurs environnementaux : l'effet de pente



Le front de flamme se penche dans le sens de la pente

Les transferts thermiques (rayonnement, convection) en direction du combustible imbrûlé augmentent avec la pente

L'entraînement d'air favorise la combustion

Pour une même végétation, le feu est plus rapide qu'à plat

Approche phénoménologique

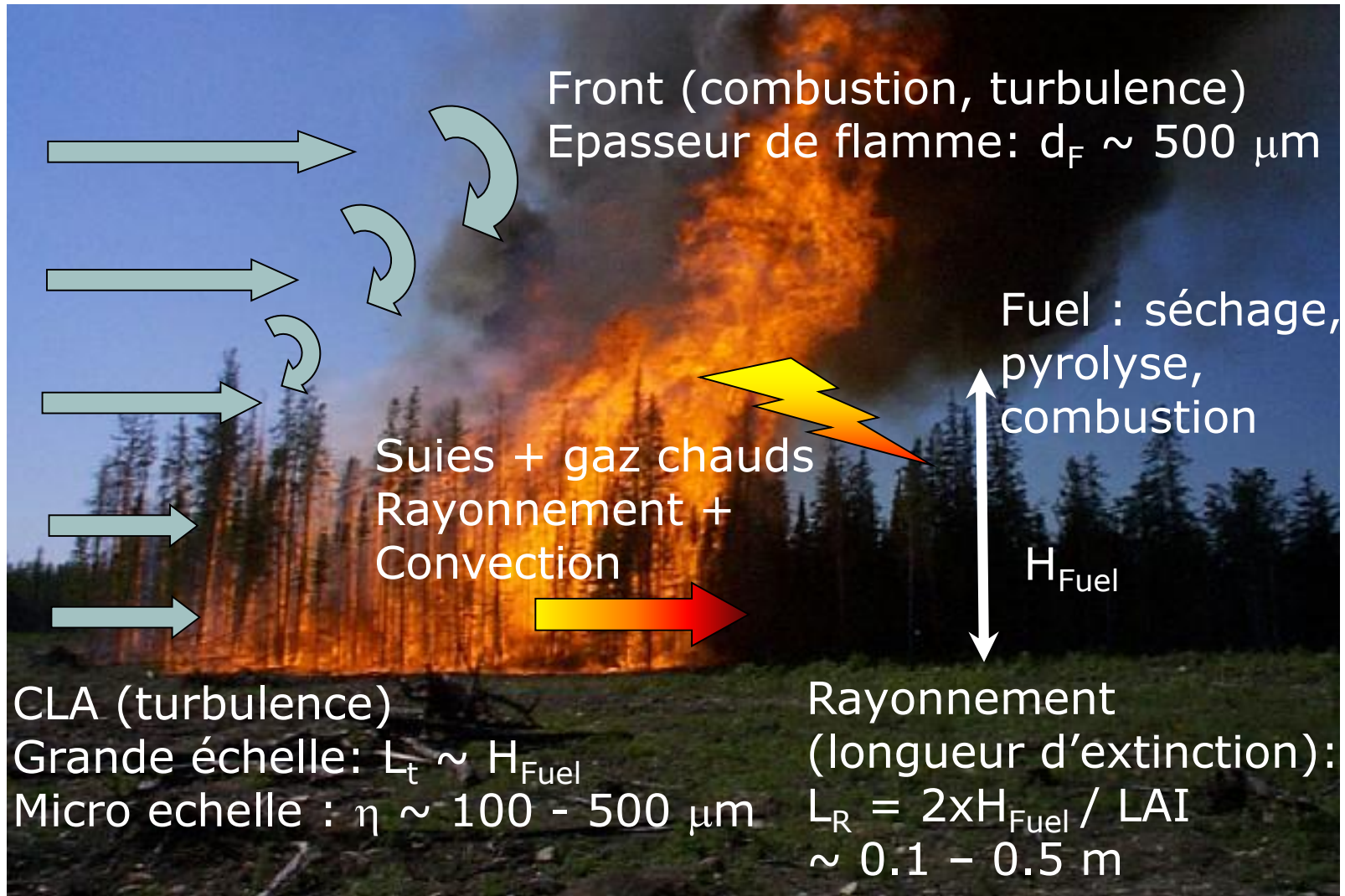
Les sautes de feu (interaction végétation/feu/relief/vent)



Des sautes > 2400 m ont été observées (source: Projet SALTUS)

Approche phénoménologique

Un problème multi-échelle complexe



Plan de la présentation

Introduction générale sur les incendies de végétation

Approche phénoménologique des incendies de végétation

Réaction au feu des végétaux et modèles de végétation

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Conclusions

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

Le ratio surface volume des particules



S augmente
V diminue

RSV ↗



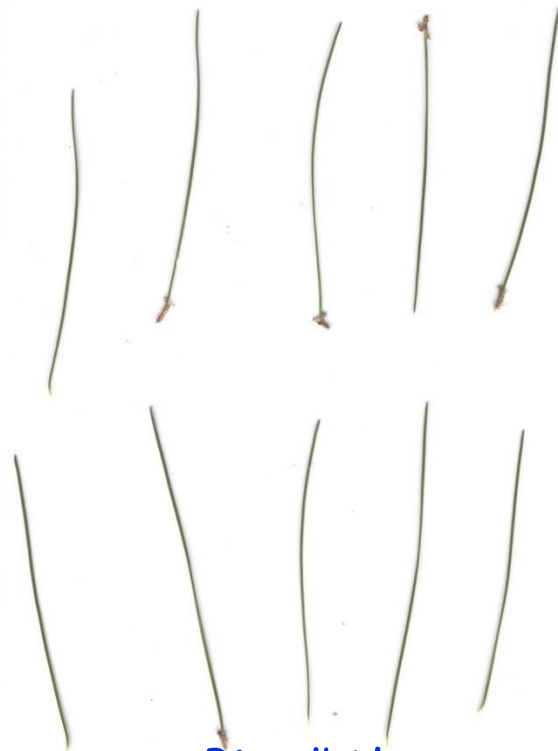
Quand le RSV augmente :

- la surface d'échange augmente ce qui accroît les transferts thermiques, les transferts de masse (dégradation, évaporation)
- la vitesse de chauffe augmente car diminution de l'épaisseur donc de la masse thermique

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

Le ratio surface volume des particules



Pin d'Alep

$L \approx 8 - 10 \text{ cm}$

$\varnothing \approx 1 \text{ mm}$

$RSV \approx 7377 \text{ m}^{-1}$



Pin Maritime

$L \approx 15 - 20 \text{ cm}$

$\varnothing \approx 2 \text{ mm}$

$RSV \approx 3057 \text{ m}^{-1}$

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

Le ratio surface volume des particules



Etude de l'allumage de PH, PL et PP
en convection naturelle/forcée

25 kW/m², panier O/F

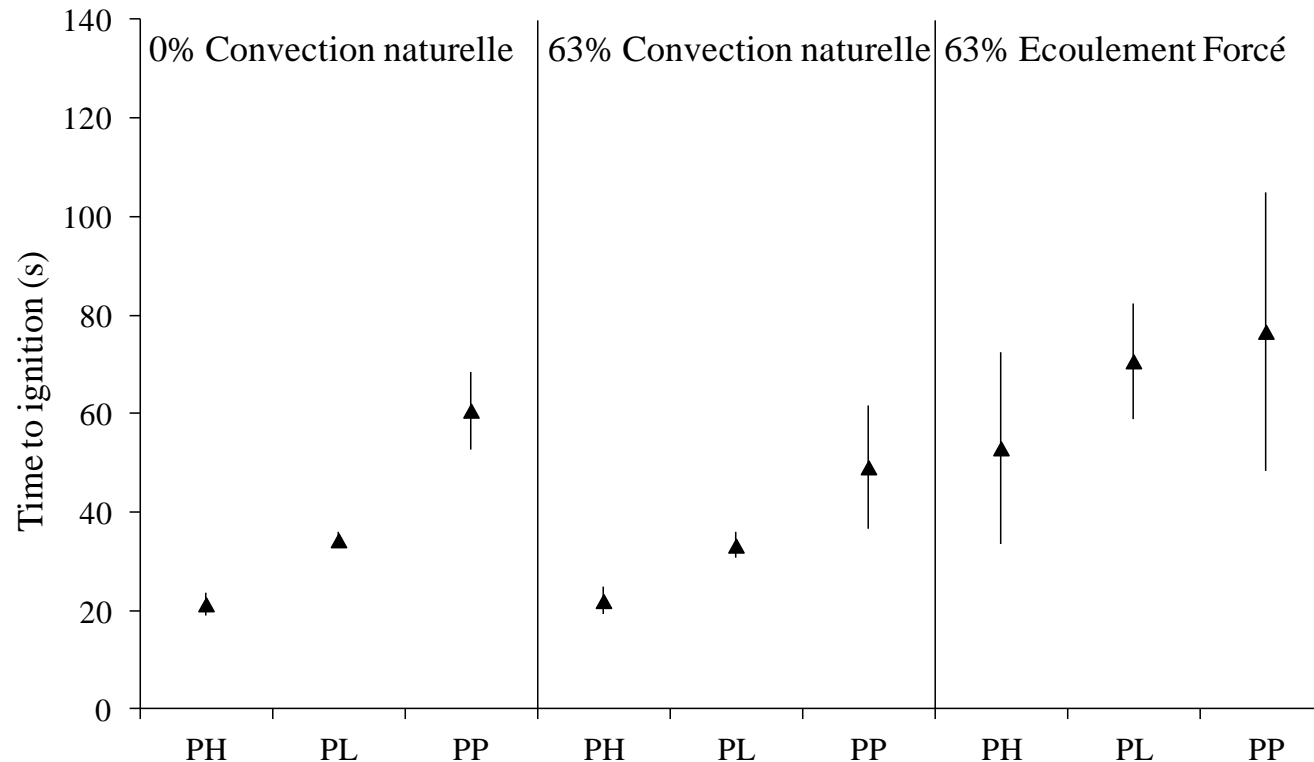
63% Pinus Pinaster



Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

Le ratio surface volume des particules



Le RSV des particules influence l'allumabilité
donc la dynamique (vitesse) des feux

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

La porosité (ou la compacité)

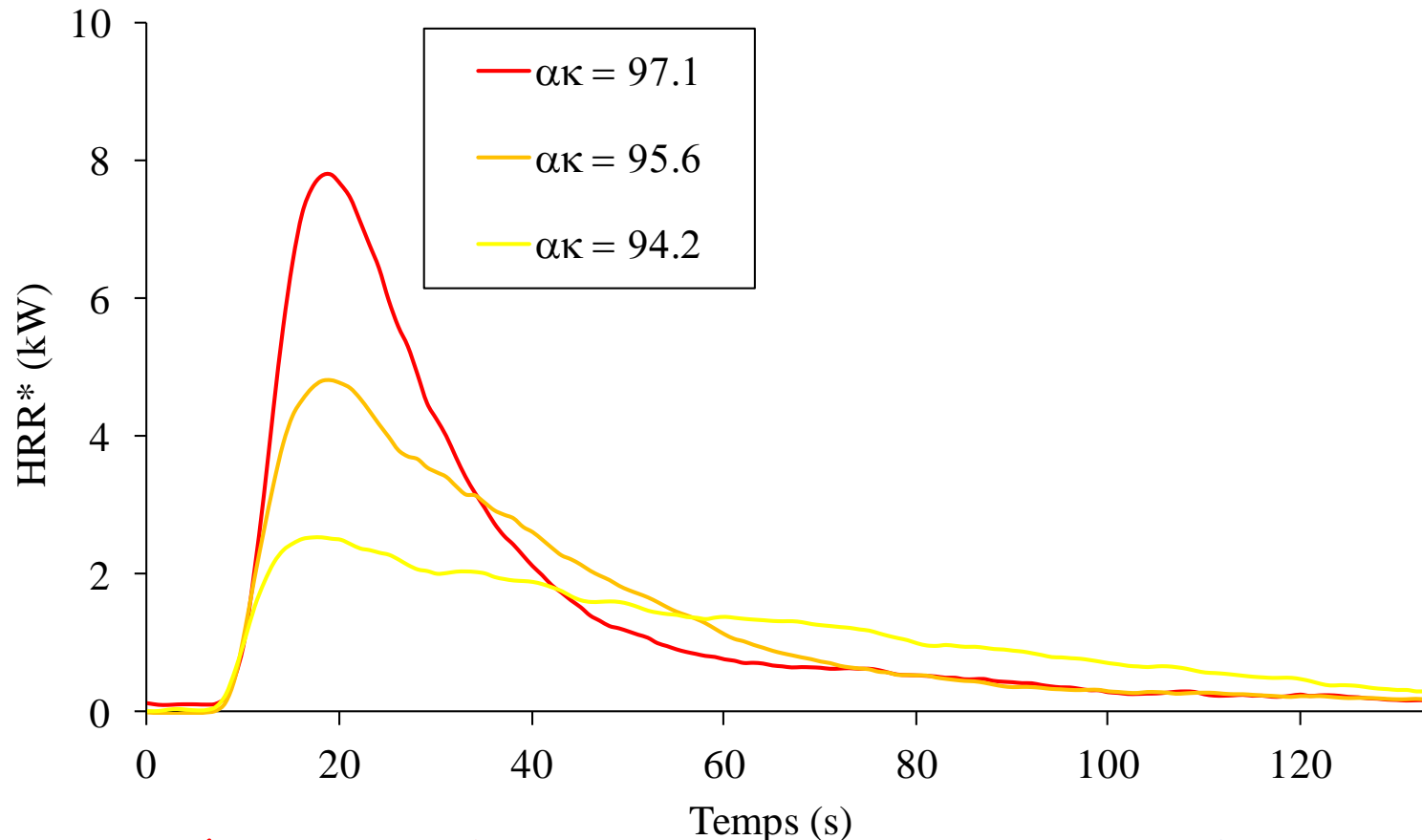


L'espace entre les particules d'une espèce peut être caractérisé par la compacité ($V_{\text{végétal}}/V_{\text{tot}}$) ou par la porosité ($V_{\text{air}}/V_{\text{tot}}$)

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

La porosité (ou la compacité)



La porosité affecte la combustion. Les combustibles fortement poreux offrent plus d'oxygène pour la combustion. (Figure du PH)

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

La teneur en eau des végétaux



Météo

Météo

Cycle Végétal

TE

TE

Espèce

C'est le paramètre le plus important

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

La teneur en eau de la végétation vivante

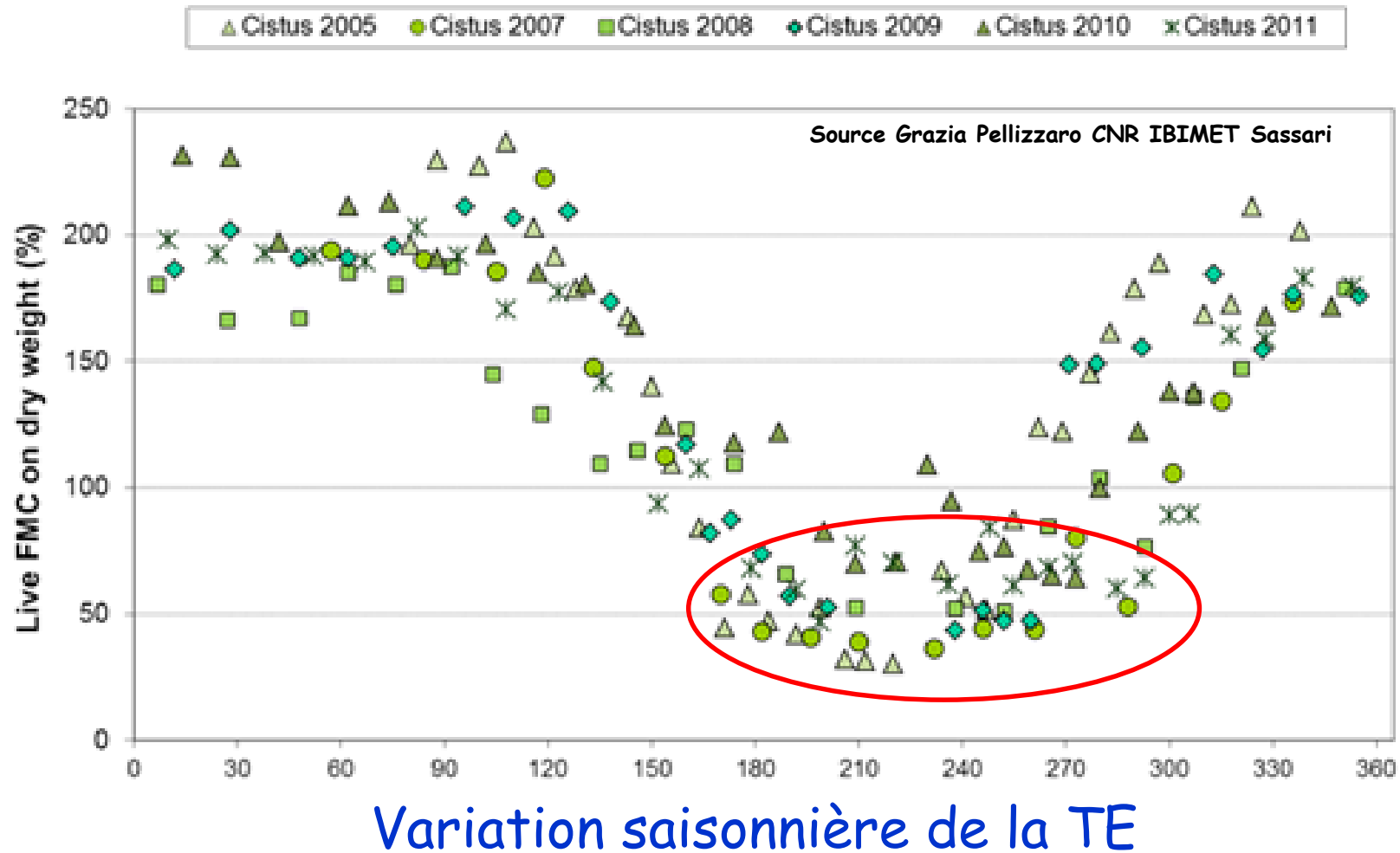


Cistus monspeliensis

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

La teneur en eau de la végétation vivante



Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

La teneur en eau de la végétation morte



Variation journalière
TE varie de 4 à 30%

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

La teneur en eau de la végétation vivante

Les 4 classes de combustibles morts

0-0.6 cm	1 hr	Herbe, Litière, feuilles
0.6-2.5 cm	10 hr	Petites branches et tiges
2.5-7.6 cm	100 hr	Branches et tiges moyennes
> 7.6 cm	1000 hr	Grosses branches

Le temps de réponse est le temps nécessaire pour qu'une particule gagne ou perde environ 63 % de la différence entre sa TE initiale et sa TE d'équilibre (avec l'air ambiant).

Les particules les plus fines sont celles qui réagissent le plus rapidement au changement d'humidité de l'air

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Allumabilité et combustibilité des particules végétales

Nous présentons une étude sur la réaction au feu des particules ayant abouti à une nouvelle classification pour les tailles de particules mortes à prendre en compte dans les modèles de propagation



Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

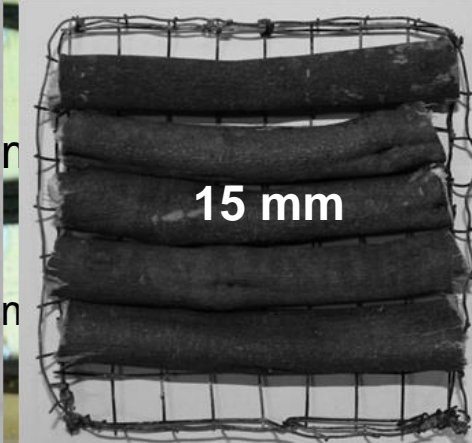
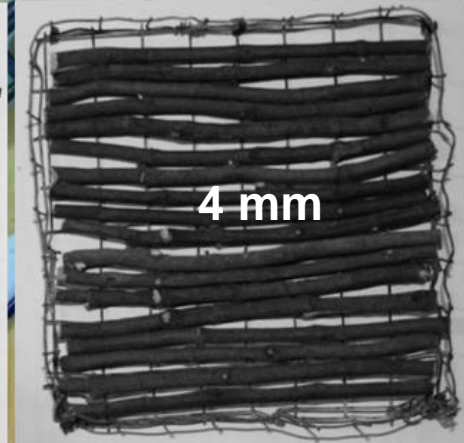
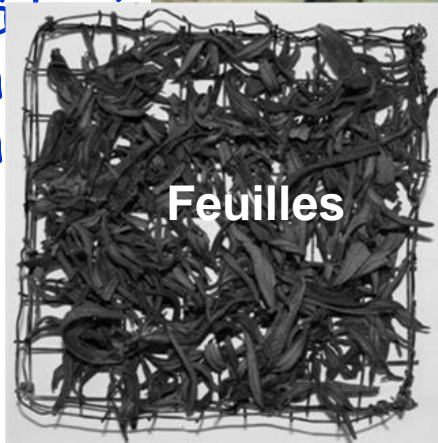
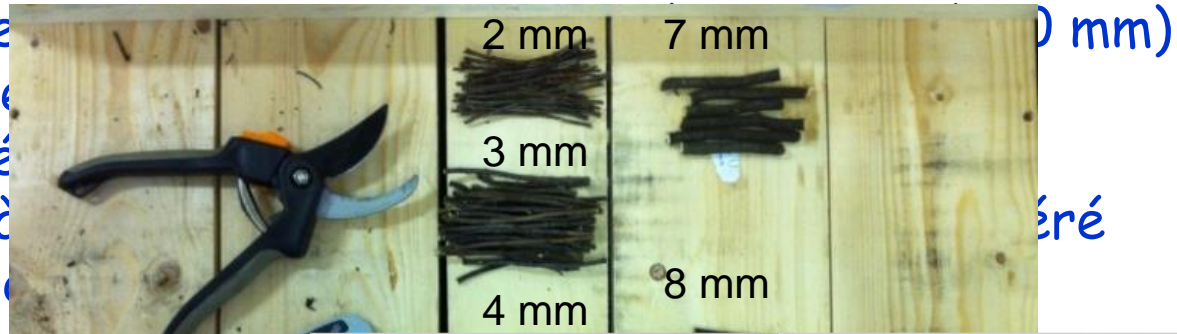
Allumabilité et combustibilité des particules végétales

Nous présentons une étude sur la réaction au feu des particules ayant abouti à une nouvelle classification pour les tailles de particules mortes à prendre en compte dans les modèles de propagation

- Brindilles et feuilles de Ciste de Montpellier

- Triées
- Coupées
- Passées

- Placées à
- Densité
- 3 à 5
- Un
- Un



Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Allumabilité et combustibilité des particules végétales

Les moyennes des temps d'allumage \implies 4 comportements

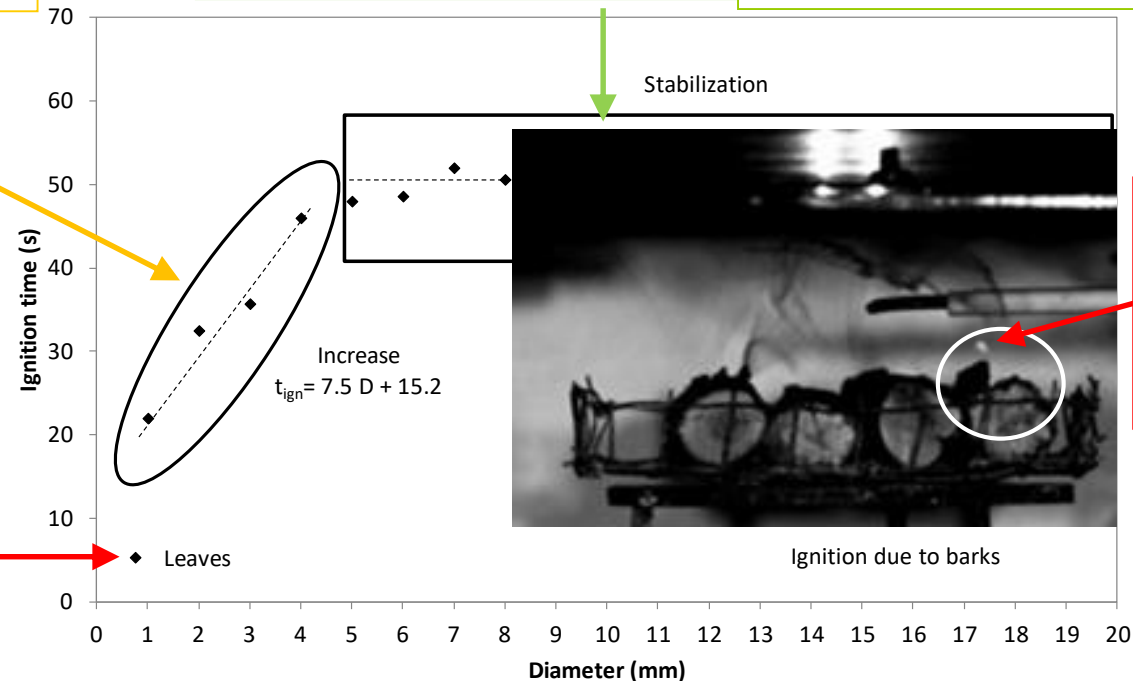
$$t_{ign} \approx \frac{\rho_{tw} c_{p,tw} D (T_{ign} - T_{\infty})}{\dot{q}''}$$

Brindilles
 $\delta \leq 4$ mm (3 ?)
 Comportement
 thermiquement
 fin

Brindilles $\delta \geq 5$ mm
 Thermiquement épais

$$t_{ign} \approx \frac{\pi \lambda_{tw} \rho_{tw} c_{p,tw}}{4} \left(\frac{T_{ign} - T_{\infty}}{\dot{q}''} \right)^2$$

Feuilles
 $\delta \approx 0.75$ mm
 $t_{ign} = 5.3$ s

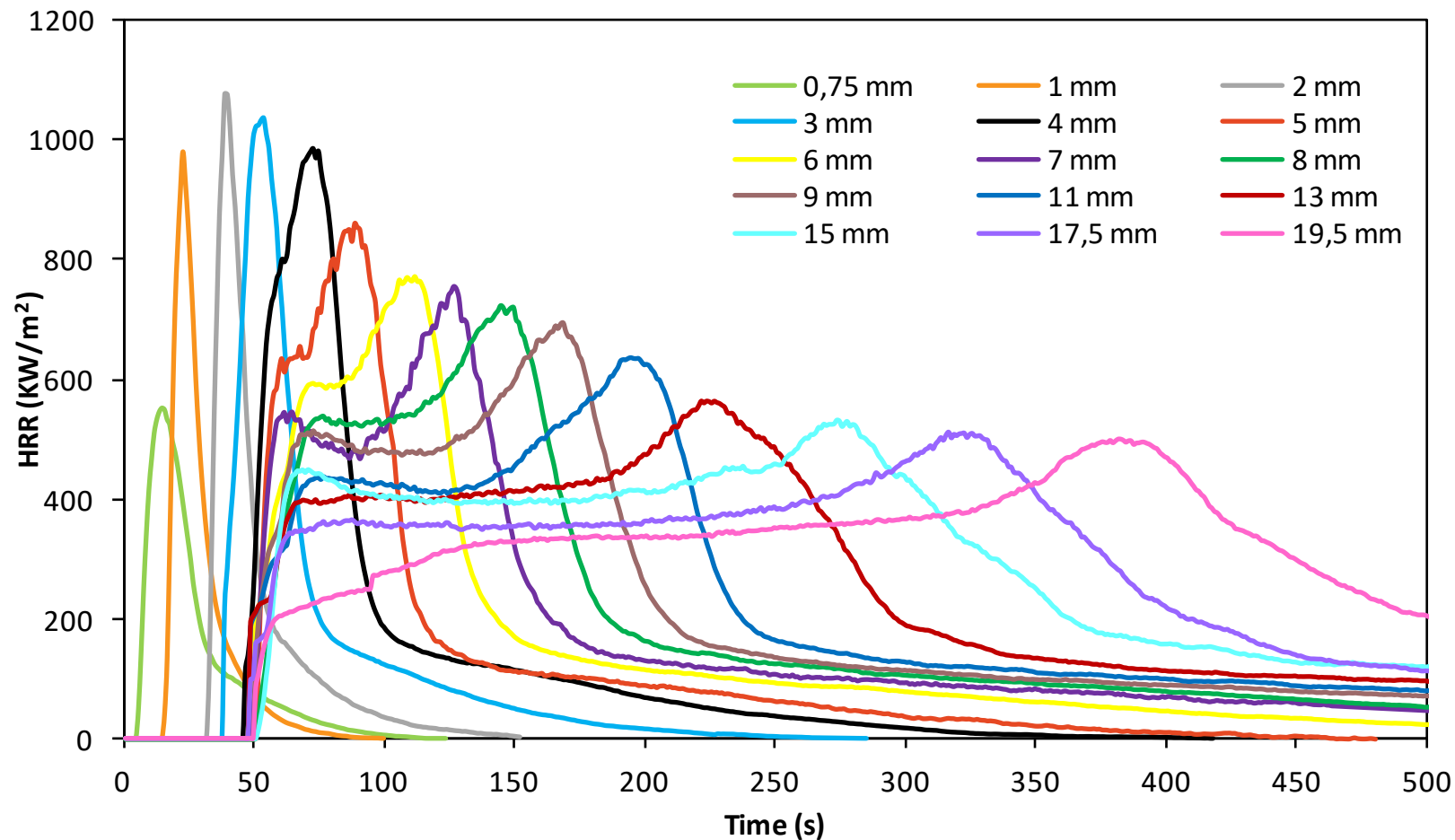


Allumage
 de l'écorce
 $\delta \geq 13$ mm
 30%

Temps d'inflammation moyen en fonction de l'épaisseur caractéristique

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Allumabilité et combustibilité des particules végétales



HRR (kW/m²) en fonction de l'épaisseur caractéristique

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Allumabilité et combustibilité des particules végétales

Le temps de résidence des flammes dans les feuilles est de 30 s
Quelle est la perte de masse des autres particules durant ce temps ?

Pourcentage de perte de masse après 30 s d'exposition					
83 %	Feuilles	2.3 %	4 mm	1.0 %	8 mm
72 %	1 mm	1.5 %	5 mm	0.7 %	9 mm
10 %	2 mm	1.3 %	6 mm	0.6 %	11 mm
5 %	3 mm	1.3 %	7 mm	0.3 %	14 mm

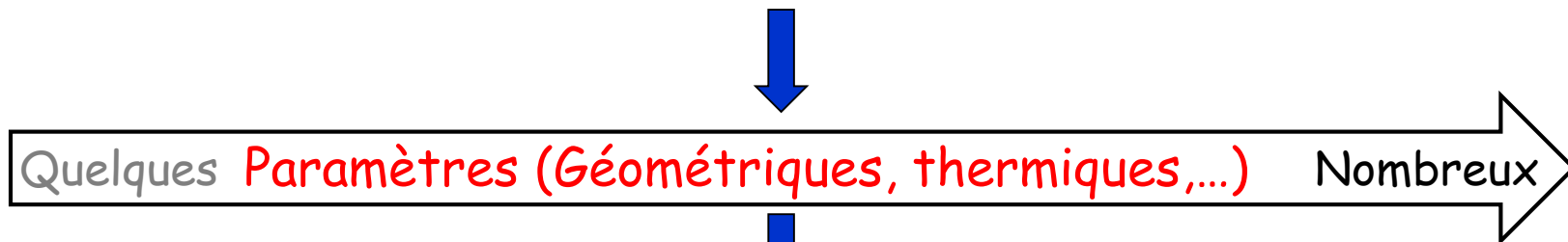
$t_{\text{ign}} \leq 35 \text{ s}$ $t_{\text{ign}} \approx 50 \text{ s}$

Pour $\delta \geq 4 \text{ mm}$, les particules émettent essentiellement de l'eau pendant 30 s
Pour $\delta \leq 3 \text{ mm}$, les particules sont susceptibles de s'enflammer avant 30 s
Car le temps moyen d'allumage est de 30 s mais peut être de 23 s pour 3 mm

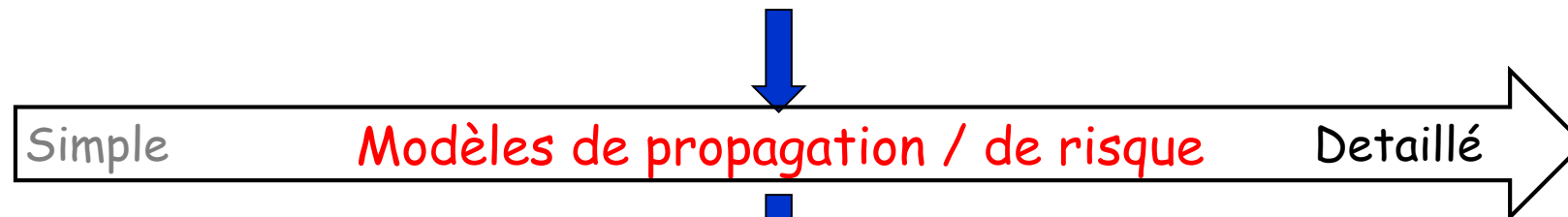
Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Modéliser la végétation pour modéliser l'incendie

Des typologies végétales
pour lesquelles on veut
des modèles



Intrants (Relief, Météo, paramètres liés au végétal)



Sortie (Vitesse, puissance, indice de risque, impacts, pollution...)

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Modéliser la végétation pour modéliser l'incendie

Les paramètres "minimum" de la végétation à prendre en compte

Paramètres liés aux typologies

Nombre de strates

Hauteur des strates

Couvert végétal

Charge des strates w (kg/m²)

Paramètres liés aux espèces

Classes de particules 1hr, 10hr...

RSV σ_k (m⁻¹)

Compacité α_k

Teneur en eau %

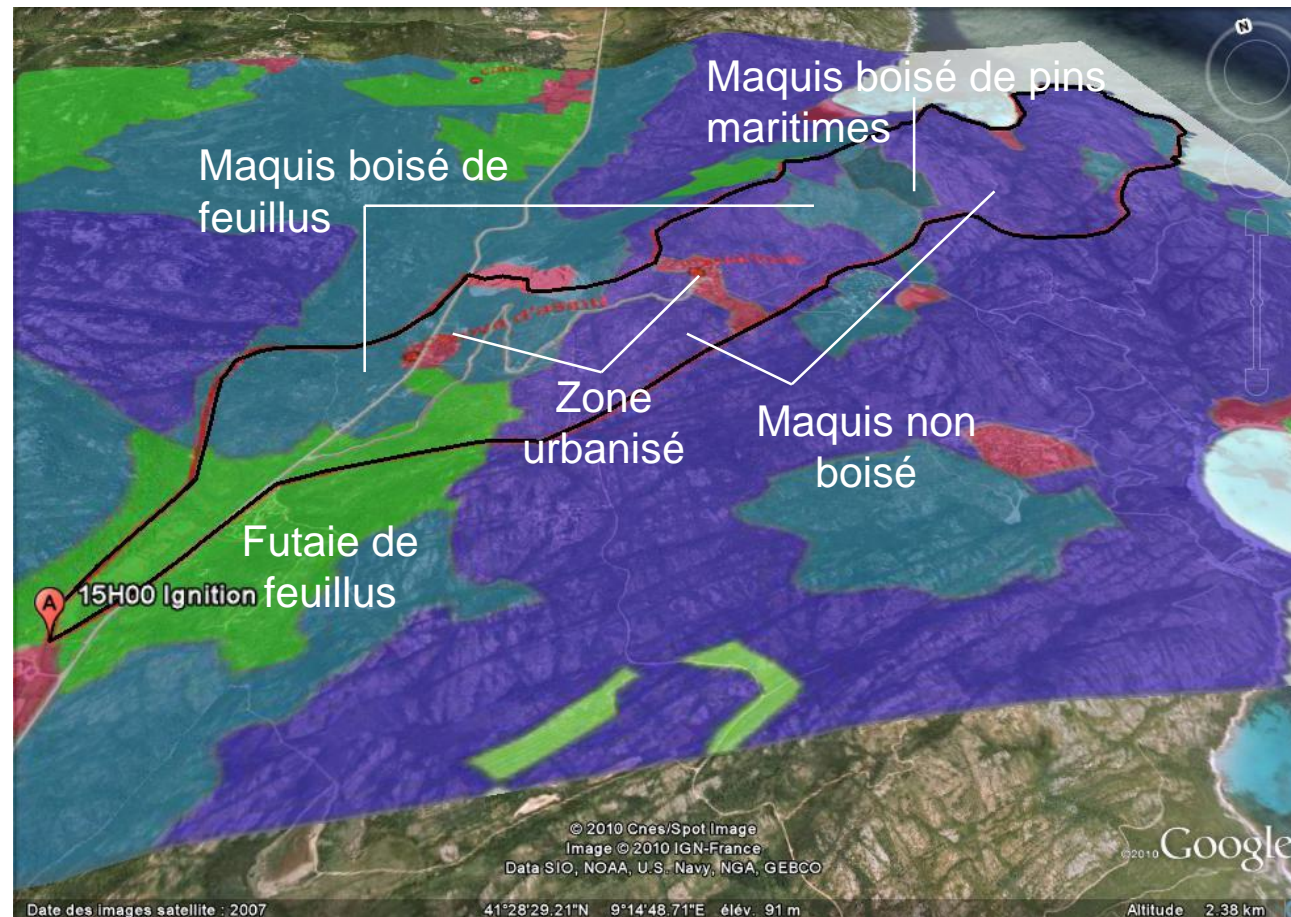
Pouvoir calorifique h (kJ/kg)

Nous verrons d'autres paramètres par la suite ...

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Comment obtenir ces paramètres ?

Classification et cartographie des typologies (IGN + Vérité terrain)

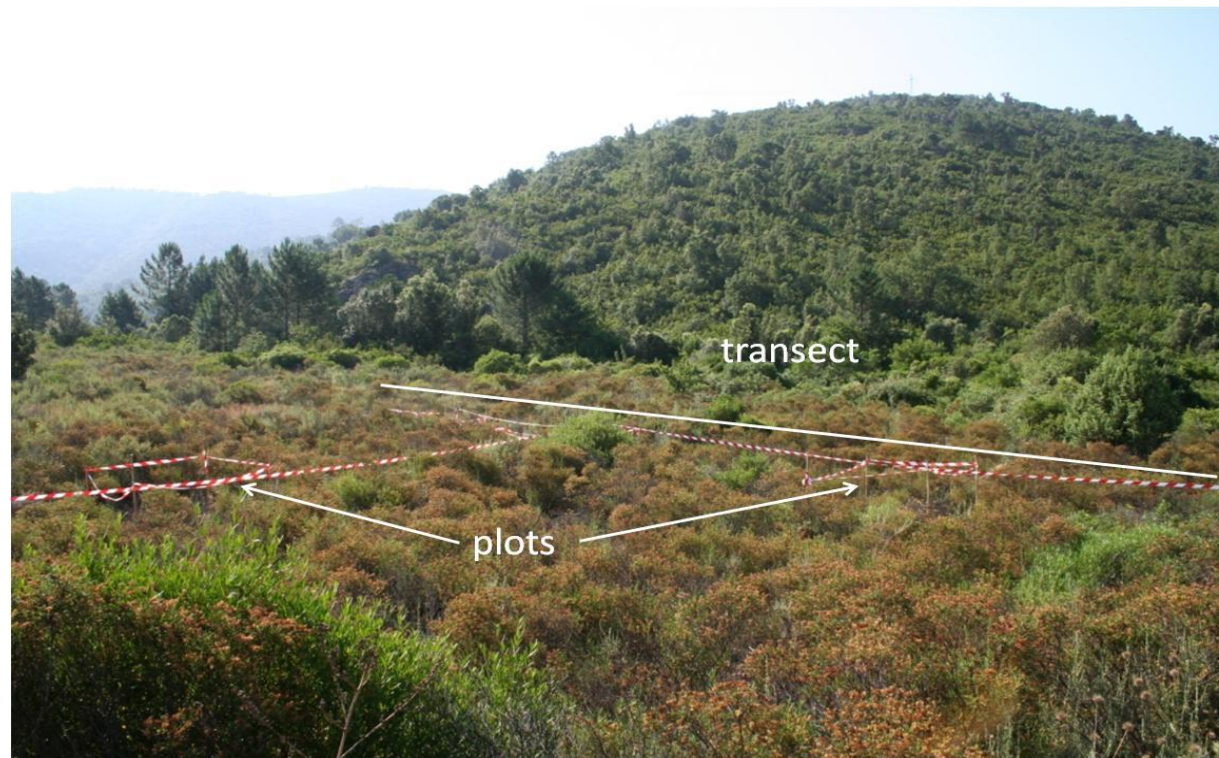


Identifier les typologies pertinentes pour le feu et les localiser !

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Comment obtenir ces paramètres ?

Caractérisation du couvert et de la hauteur de la strate



Couvert et hauteur sont mesurés suivant des transects

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Comment obtenir ces paramètres ?

Détermination des familles de particules et de la charge



Les familles de particules et la charge sont déterminées par des mesures destructrices

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Comment obtenir ces paramètres ?

Détermination des familles de particules et de la charge

La végétation est collectée, triée (espèce, vivant, mort), coupée par taille de particules, pesée, séchée, pesée.



Plusieurs quadrats sont ainsi traités pour avoir des valeurs moyennes représentatives

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Comment obtenir ces paramètres ?

Détermination des familles de particules et de la charge

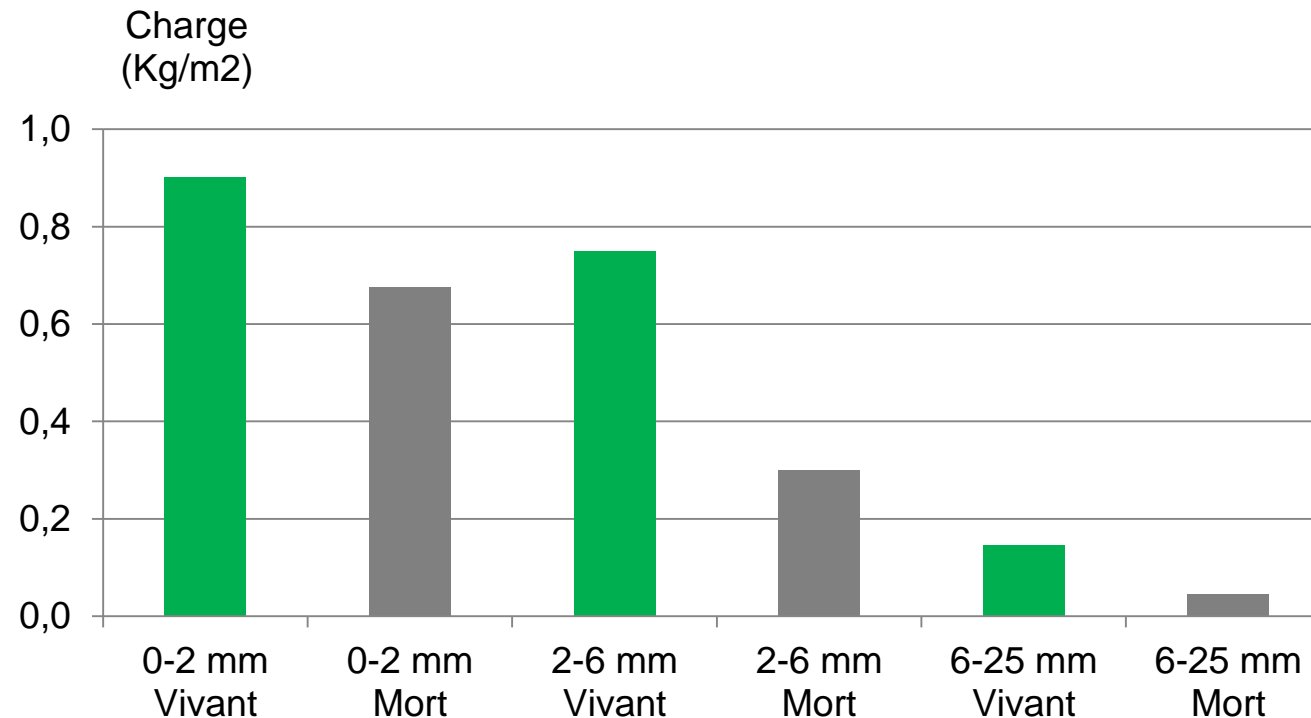


Exemple du genêt : quadrats de 4 m²

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Comment obtenir ces paramètres ?

Détermination des familles de particules et de la charge



Répartition de la charge par famille de particules pour du genêt

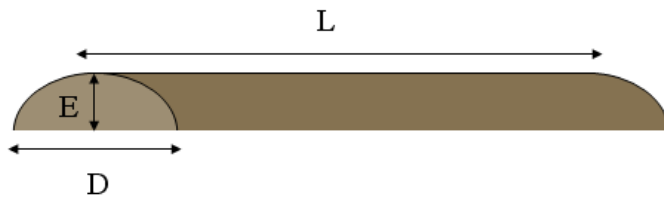
Exemple du genêt : quadrats de 4 m²

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Comment obtenir ces paramètres ?

Méthode pour déterminer σ_k

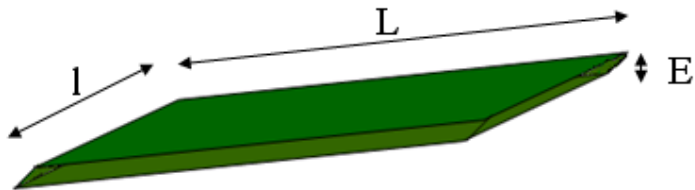
➤ Aiguilles de pin



➤ Brindilles de Ciste



➤ Feuilles d'Erica Arborea



Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

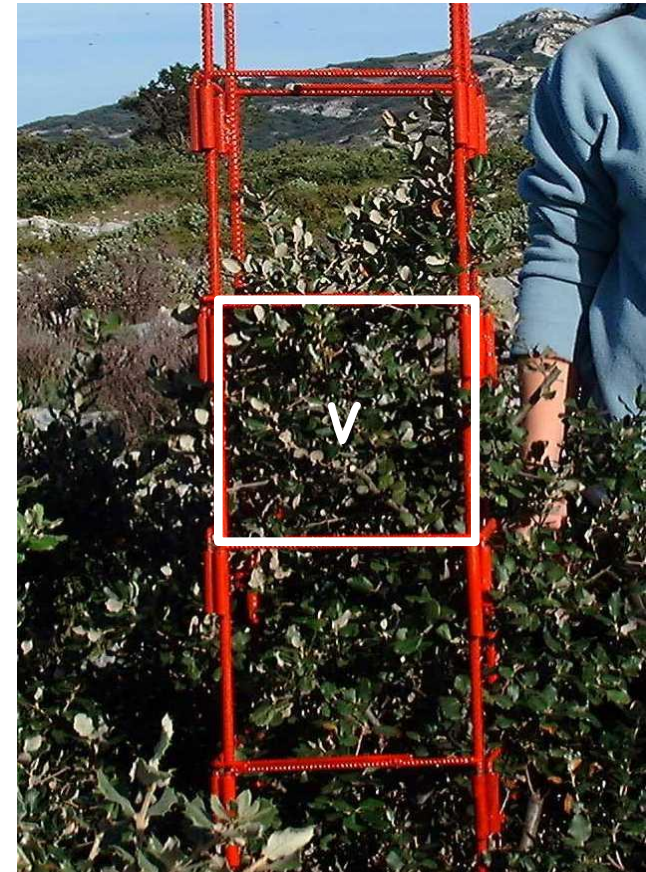
Comment obtenir ces paramètres ?

Méthode pour déterminer α_k la compacité

Nous pesons la masse de particules de classe k situées dans le volume V, M_k

V comprend à la fois des particules et du gaz

$$V_k = \frac{M_k}{\rho_k} \quad \text{et} \quad \alpha_k = \frac{V_k}{V}$$

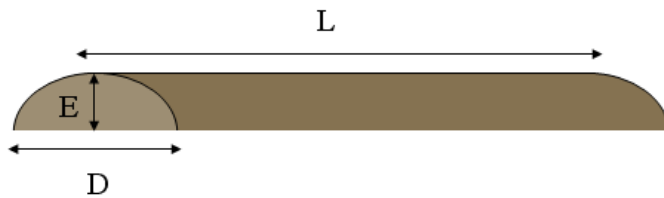


Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Comment obtenir ces paramètres ?

Méthode pour déterminer ρ_k (le RSV)

➤ Aiguilles de pin



On détermine la masse volumique

$$\rho_k = \frac{m_k}{v_k}$$



Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Exemple d'utilisation d'un modèle de végétation

Rappel

$$I_B = \sum_k h_k w_k R$$

Classe (mort, vivant, taille) ———— k ————

PCI en kJ/kg d'éléments fins brûlés ———— h_k ————

charge consommée d'éléments végétaux fins en kg par m² au sol ———— w_k ————

Vitesse du front de flamme (m/s) ———— R ————

Mesure de la puissance d'un feu de genêt

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

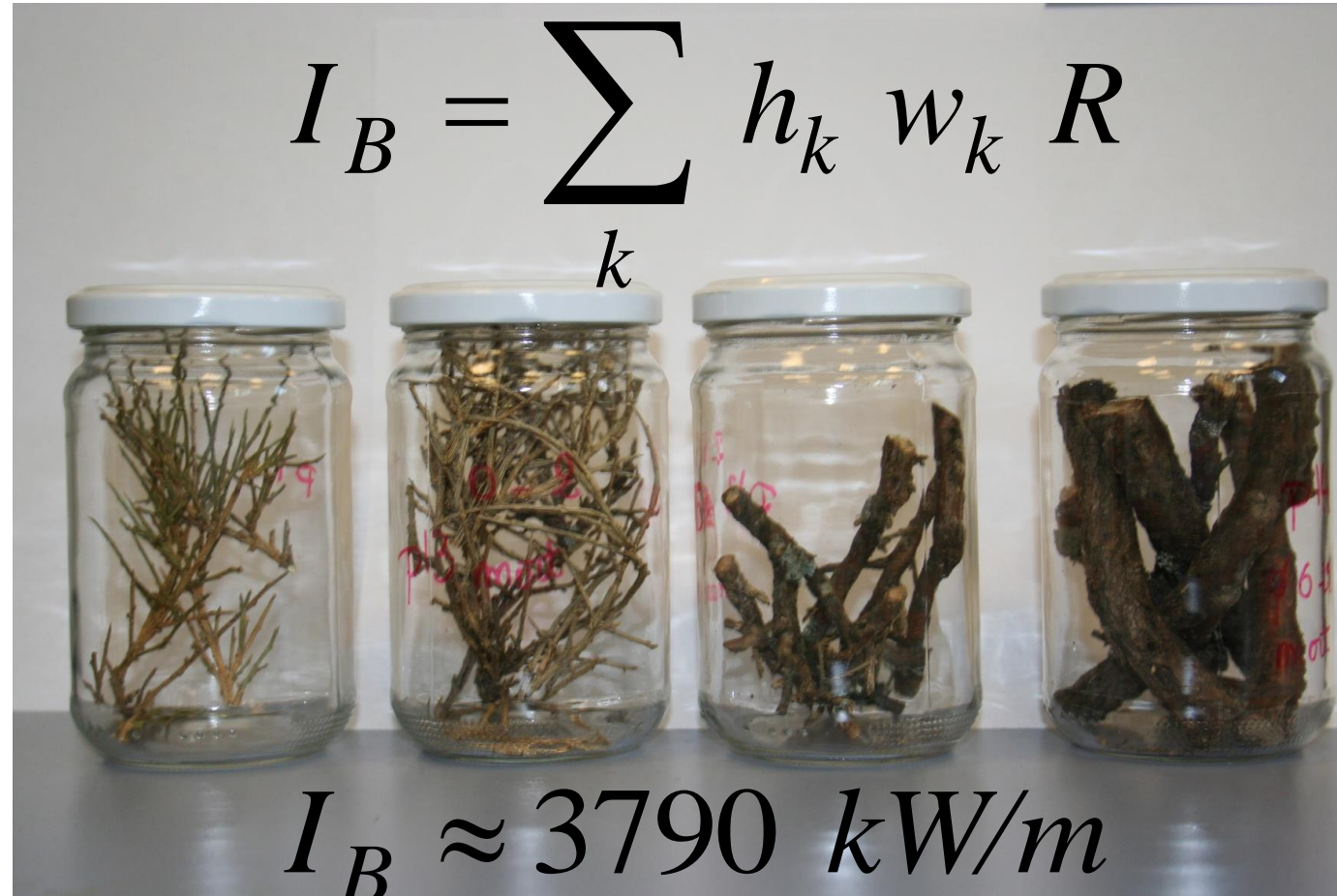
Exemple d'utilisation d'un modèle de végétation



Mesure de la puissance d'un feu de genêt

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Exemple d'utilisation d'un modèle de végétation



Mesure de la puissance d'un feu de genêt

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

Remarque sur l'utilisation de la puissance

Certains modèles de risque (Canada, Italie,...) utilisent la puissance pour calculer un indice de risque. Attention, car à puissance égale, deux incendies dans des typologies végétales différentes peuvent avoir des comportements et des effets très différents.

Considérons un feu d'herbe :

$$Hauteur = 0.35 \text{ m}$$

$$h_G = 16000 \text{ kJ/kg}$$

$$w_G = 0.3 \text{ kg/m}^2$$

$$R_G = 2 \text{ km/h}$$

$$I_G = h_G w_G R_G = 2666 \text{ kW/m}$$

Considérons un feu de maquis:

$$Hauteur = 1.3 \text{ m}$$

$$h_S = 19000 \text{ kJ/kg}$$

$$w_S = 1 \text{ kg/m}^2$$

$$R_S = 0.5 \text{ km/h}$$

$$I_S = h_S w_S R_S = 2638 \text{ kW/m}$$

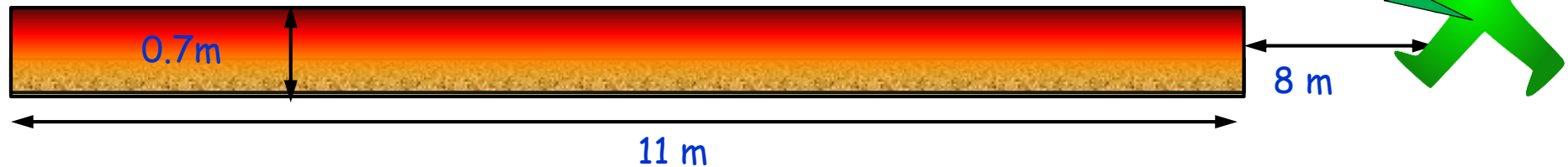
Même puissance ! Comportement différent ! Même effet ?

Réaction au feu des végétaux / modèles de végétation

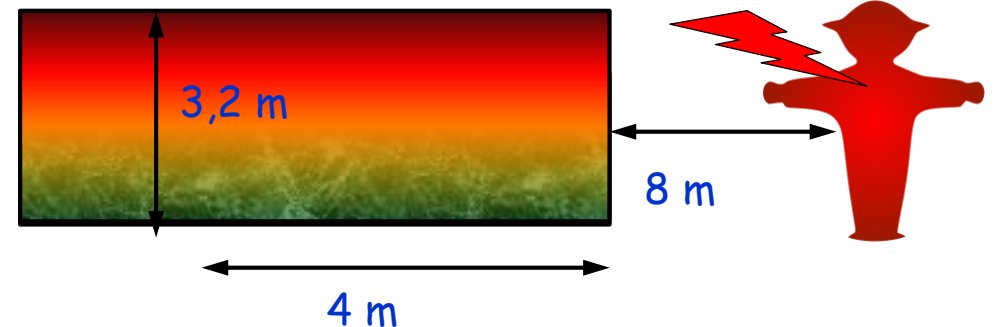
Remarque sur l'utilisation de la puissance

Considérons des fronts de 10 m de large et un temps de résidence de flamme de 20s pour le feu d'herbe et 30 s pour le feu de maquis

En 20s, le feu d'herbes parcourt 11 m et la vitesse de consommation de la végétation est de 1.7 kg/s



En 30s, le feu de maquis parcourt 4 m et la vitesse de consommation de la végétation est de 1.4 kg/s



L'impact du feu dépend de la structure de la végétation
il faut un modèle de rayonnement

Plan de la présentation

Introduction générale sur les incendies de végétation

Approche phénoménologique des incendies de végétation

Réaction au feu des végétaux et modèles de végétation

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Conclusions

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Le rêve du chercheur !

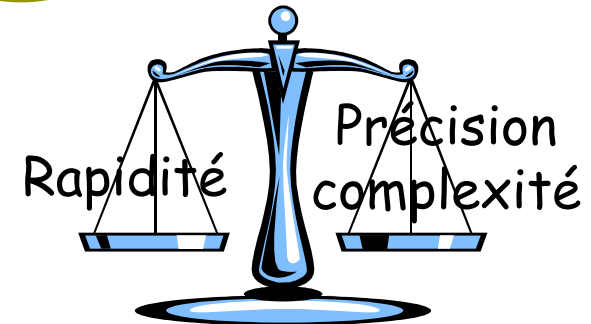


Simuler un incendie de façon précise
en quelques minutes (avec un PC !)

Modéliser

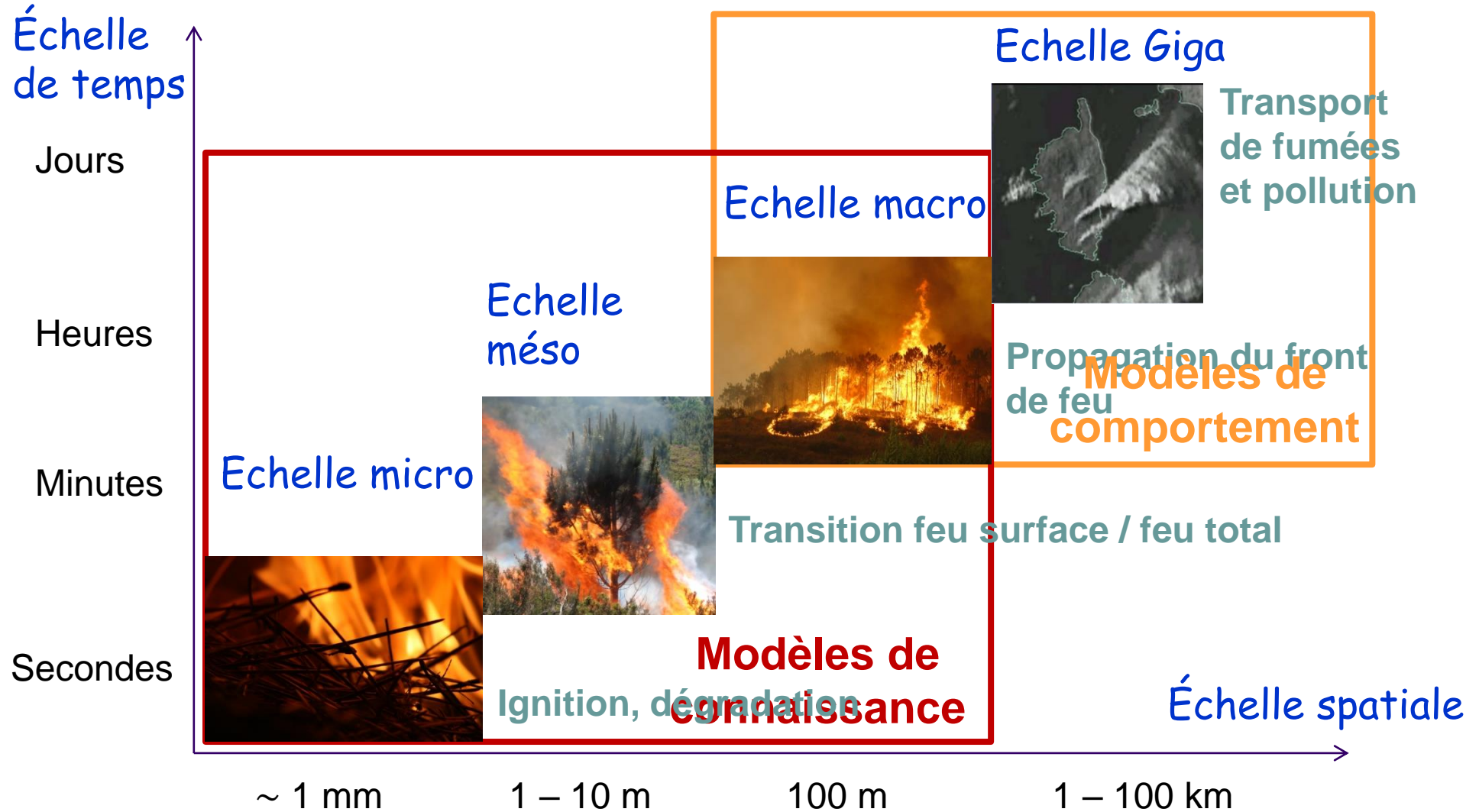
- la dégradation thermique
- la combustion
- la formation des suies
- le rayonnement
- la convection
- la turbulence
- Les émissions

Tenir compte du vent et du relief



Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les différentes approches de modélisation



Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de connaissance (ou modèles détaillés)

On écrit les équations ponctuelles associées « au niveau le plus bas »

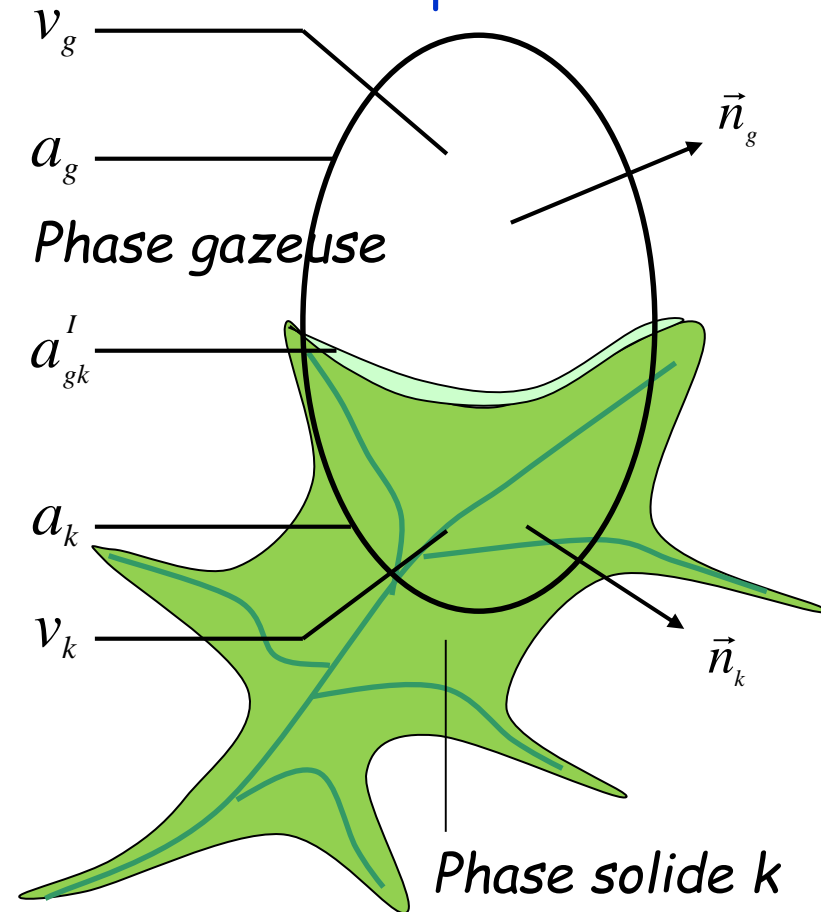
Ex : conservation de la masse

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho_g}{\partial t} + \vec{\nabla} \cdot (\rho_g \vec{V}_g) = 0 \\ \frac{\partial \rho_k}{\partial t} = -\Omega_k^{pr} \\ \dot{m}_g = \dot{m}_k^{pr} + \dot{m}_k^{surf} \end{array} \right.$$

Taux de gazeification dans le solide

Masse échangée par le gaz

Masse perdue par le solide : gazeification et régression de surface



Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de connaissance (ou modèles détaillés)

On écrit les équations ponctuelles associées « au niveau le plus bas »

Ex : conservation de la masse

conservation des espèces

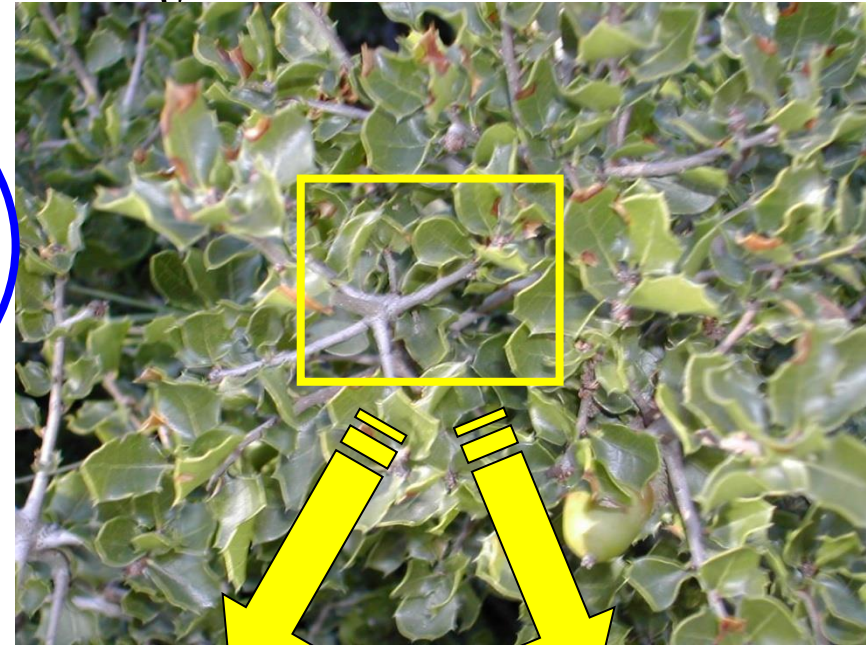
conservation de l'énergie

conservation de la QDM



On ne peut pas rester à l'échelle de la particule. Il faut d'autres équations :

- **équations moyennes**



Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de connaissance (ou modèles détaillés)

On écrit les équations moyennées « à un niveau plus haut »

Dans le volume V , on distingue :

- 1 phase gazeuse

Fraction volumique :

$$\alpha_g = \frac{V_g}{V}$$

- 1 phase solide comprenant 2 familles
feuilles et petites branches

Fraction volumique :

$$\alpha_k = V_k/V$$

Rapport surface/volume :

$$\sigma_k = sk/vk$$

Masse par unité de volume :

$$m_k = \alpha_k \rho_k$$

$$\alpha_g + \sum_k \alpha_k = 1$$



Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de connaissance (ou modèles détaillés)

Conservation des espèces pour le solide de volume V_k dans V

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d(\alpha_k \rho_k Y_k^{H_2O})}{dt} = -\dot{M}_k^{H_2O} \quad \text{Dessiccation} \\ \frac{d(\alpha_k \rho_k Y_k^{dry})}{dt} = -\dot{M}_k^{pyr} \quad \text{Gazeification} \\ \frac{d(\alpha_k \rho_k Y_k^{Char})}{dt} = v_{Char} \dot{M}_k^{pyr} - (1 + v_{ash}) \dot{M}_k^{Char} \quad \text{Comb RC} \\ \frac{d(\alpha_k \rho_k Y_k^{ash})}{dt} = v_{ash} \dot{M}_k^{Char} \quad \text{Cendres} \\ \frac{d(\alpha_k \rho_k)}{dt} = -\dot{M}_k^{H_2O} + (v_{char} - 1) \dot{M}_k^{pyr} - (1 + v_{ash}) \dot{M}_k^{Char} \end{array} \right.$$



Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de connaissance (ou modèles détaillés)

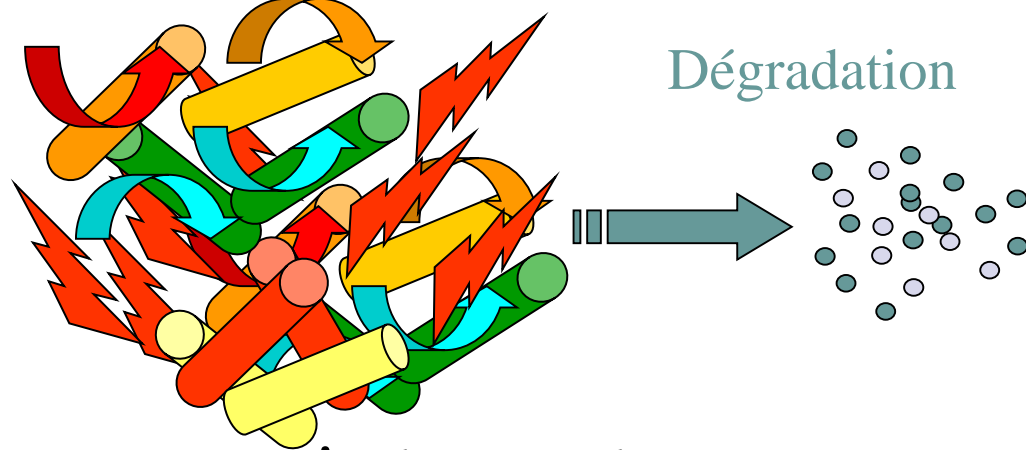
Conservation de l'énergie pour le solide de volume V_k dans V

$$\alpha_k \rho_k C_{pk} \frac{dT_k}{dt} = Q_k^{chimie} + Q_k^{conv} + Q_k^{ray}$$

$$Q_k^{conv} = \alpha_k \sigma_k h_k (T_g - T_k)$$

$$Q_k^{ray} = \frac{\alpha_k \sigma_k}{4} (G - 4\sigma T_k^4)$$

$$Q_k^{chimie} = -\dot{M}_k^{H_2O} L_k^{H_2O} - \dot{M}_k^{pyr} L_k^{pyr} - \dot{M}_k^{Char} \Delta H_k^{char}$$



h_k est un paramètre de transfert convectif

G est le rayonnement incident obtenu à partir de l'ETR (luminance)

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de connaissance (ou modèles détaillés)

Equation de transfert radiatif

$$\frac{d\alpha_g I}{ds} = \underbrace{\alpha_g \sigma_a \left(\frac{\sigma T^4}{\pi} - I \right)}_{\text{Gaz + suies}} + \sum_k \underbrace{\left[\frac{\alpha_k \sigma_k}{4} \left(\frac{\sigma T_k^4}{\pi} - I \right) \right]}_{\text{Phase solide}}$$

Coefficient d'absorption du mélange gaz+suies

Coefficient d'absorption de la classe végétale k

$$\delta_R = \frac{4}{\alpha_k \sigma_k} \text{ est une longueur caractéristique d'absorption du rayonnement}$$

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

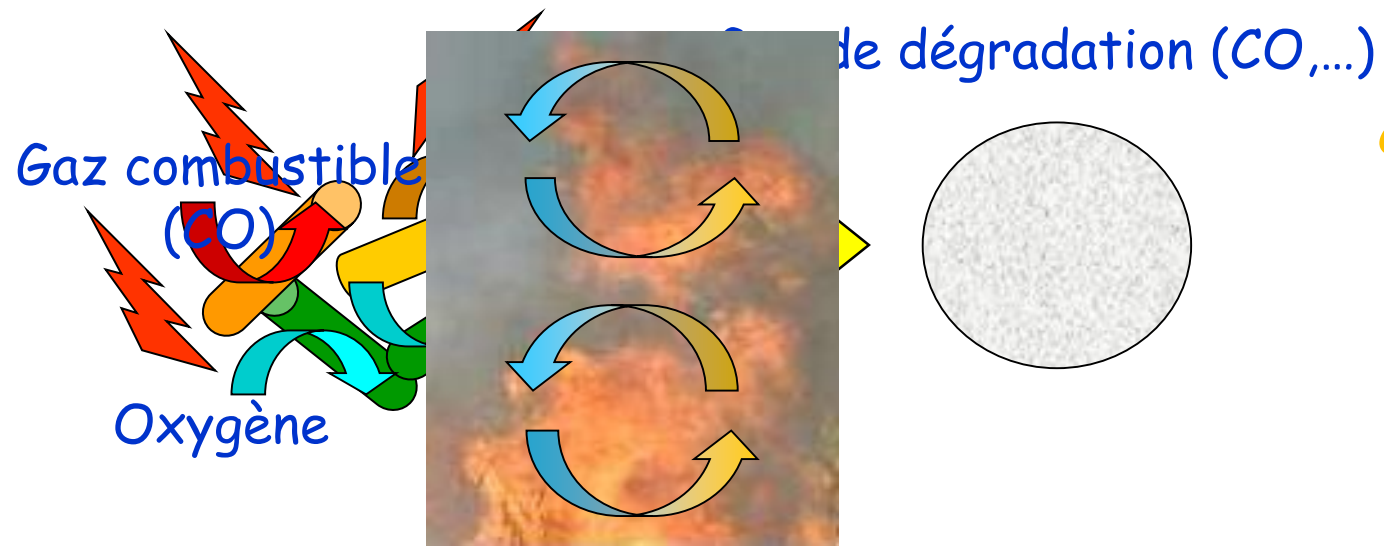
Les modèles de connaissance (ou modèles détaillés)

Equation de conservation de l'espace gazeuse i

$$\frac{\partial(\alpha_g \rho Y_{gi})}{\partial t} + \frac{\partial(\alpha_g \rho u_j Y_{gi})}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\alpha_g \rho D_i \frac{\partial Y_{gi}}{\partial x_j} \right) + \dot{\omega}_{gi} + \dot{M}_k^i$$

Taux de production chimique

Terme source chimique provenant de la dégradation de la classe végétale k



Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de connaissance (ou modèles détaillés)

Equations du modèle multiphasique multiclasse

Pour une phase gazeuse à 5 espèces (CO , CO_2 , O_2 , H_2O , N_2) et 3 classes solides (aiguilles, feuilles, petites branches), le problème requiert la résolution de

Gaz

Masse : 1

Espèces : 4

Qdm : 3

Energie : 1

Suies : 1

Turbulence: 2

ETR gris: 1

Classe végétale k

Masse : 1

Espèces : 3

Qdm: 0

Energie: 1

×3 classes



...28 équations couplées

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Simulations avec modèles de connaissance (ou modèles détaillés)

$\delta_R = \frac{4}{\alpha_k \sigma_k}$ est la longueur pour laquelle $\approx 37\%$ du rayonnement sera absorbé

$\Delta_{\text{maillage}} \approx \delta_R / 5$ au voisinage du front de feu dans le végétal

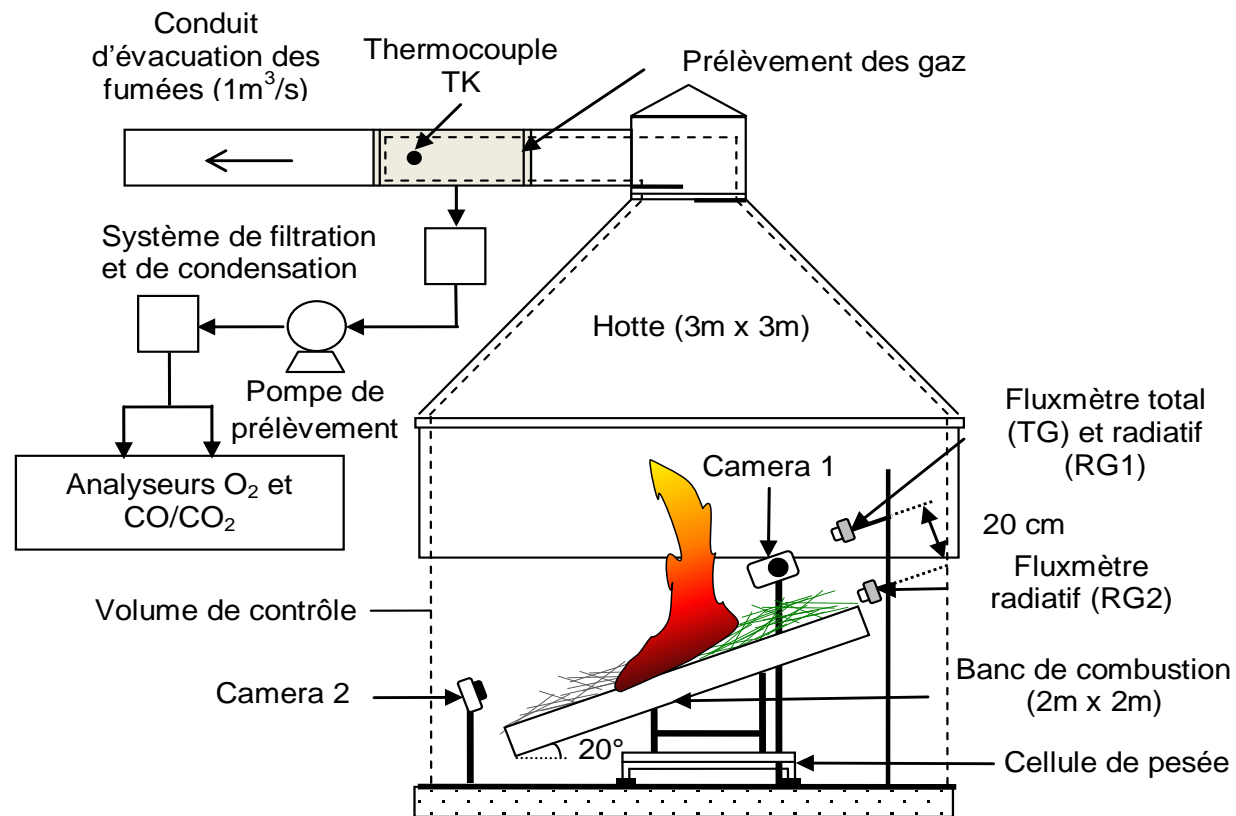
Végétal	Maquis (Cistus mons.)	Prairie (Brach. ramosum.)	Lande montagnarde (Genista)	Litière (Pinus pinaster)
σ_k (m ⁻¹)	2080	10000	3000	3060
α_k (%)	0.24	0.1	0.5	3
δ_R (m)	0,8	0.4	0,26	0,044
$\Delta_{\text{maillage},R}$ (m)	0,16	0.08	0,05	$\approx 0,01$

On a des contraintes de maillage fortes pour de grands domaines

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Simulations avec modèles de connaissance (ou modèles détaillés)

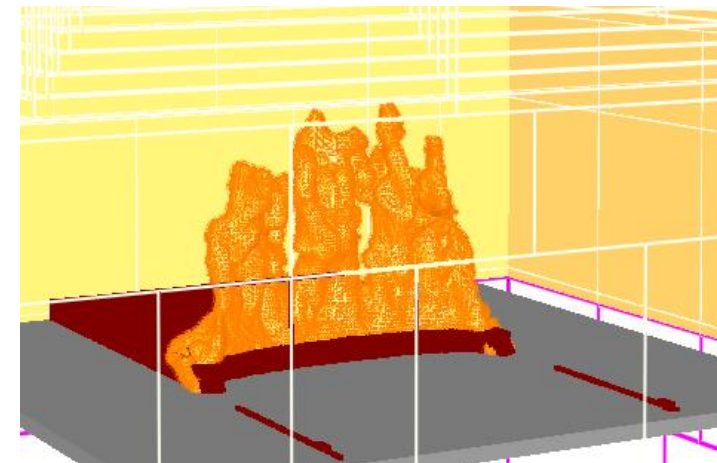
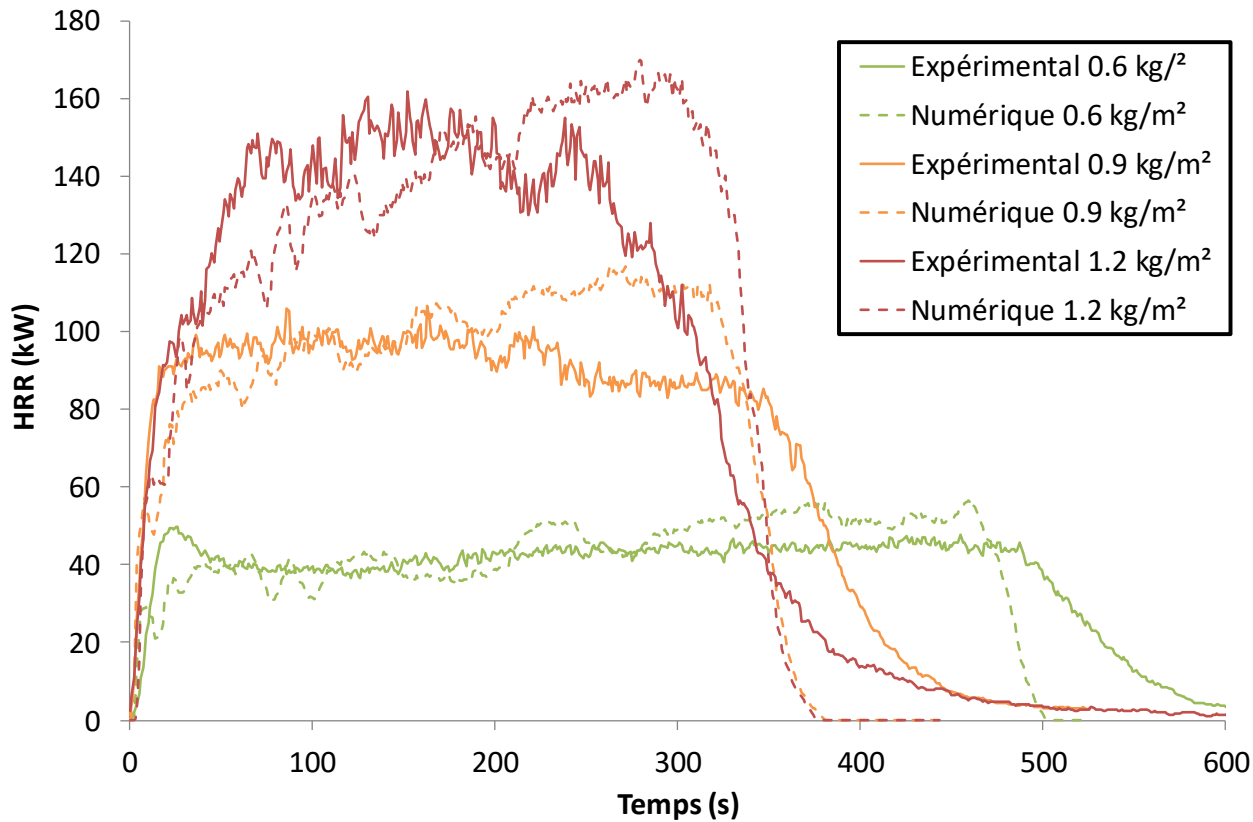
Exemples (WFDS)



Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Simulations avec modèles de connaissance (ou modèles détaillés)

Exemples (WFDS)



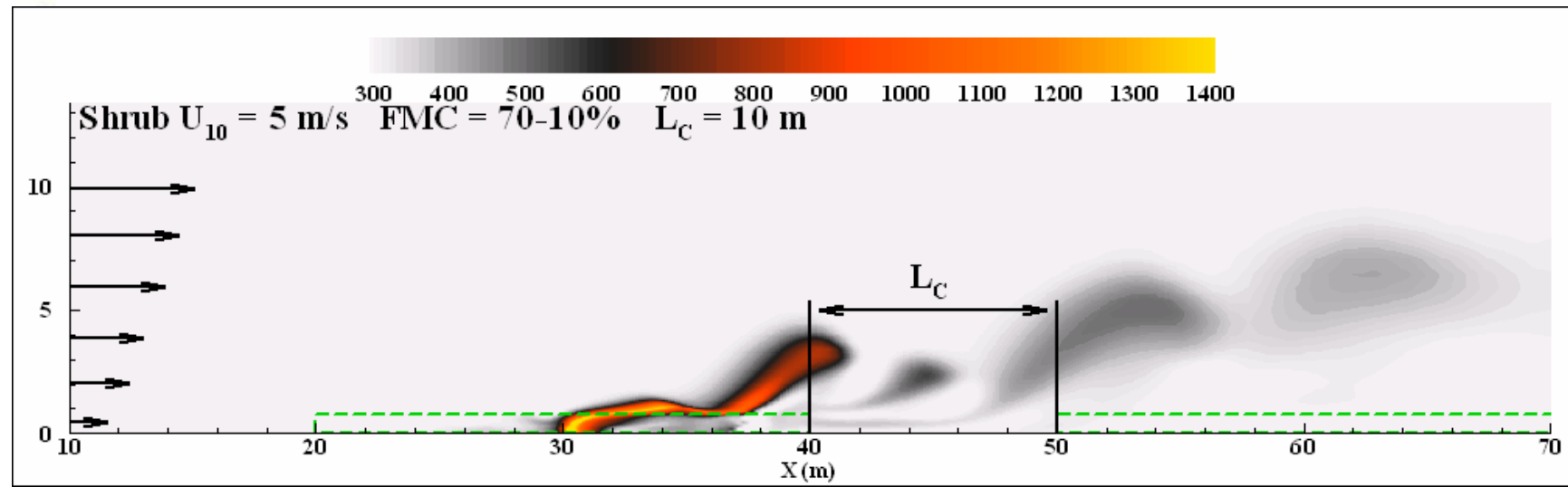
Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Simulations avec modèles de connaissance (ou modèles détaillés)

Exemples (FireStar2D)



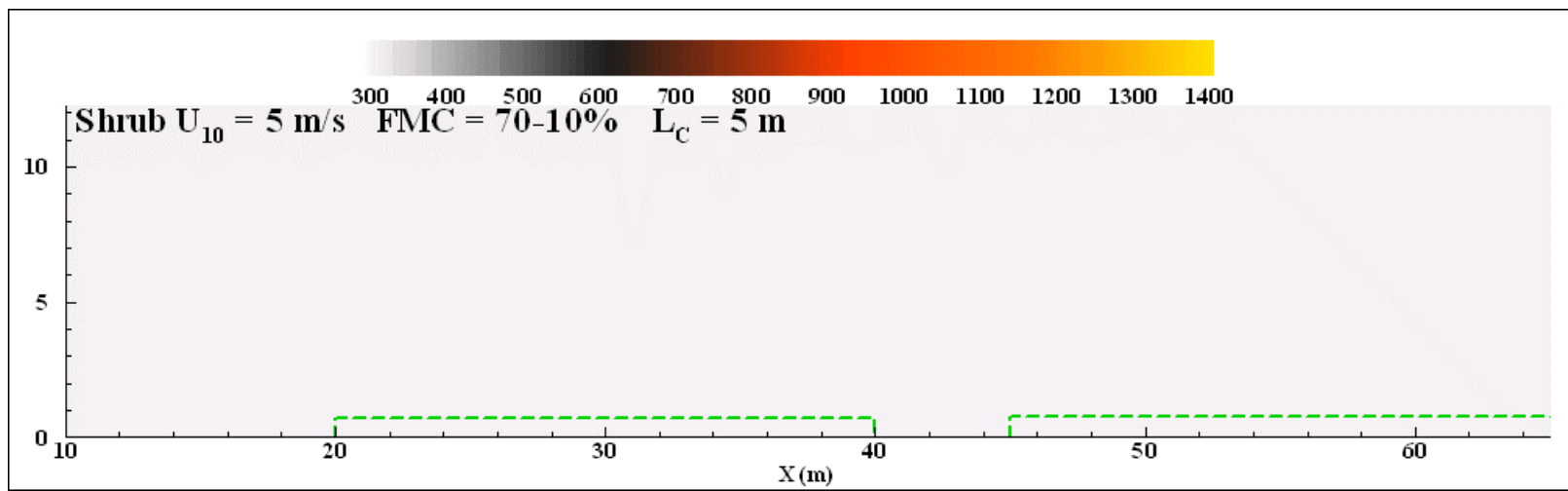
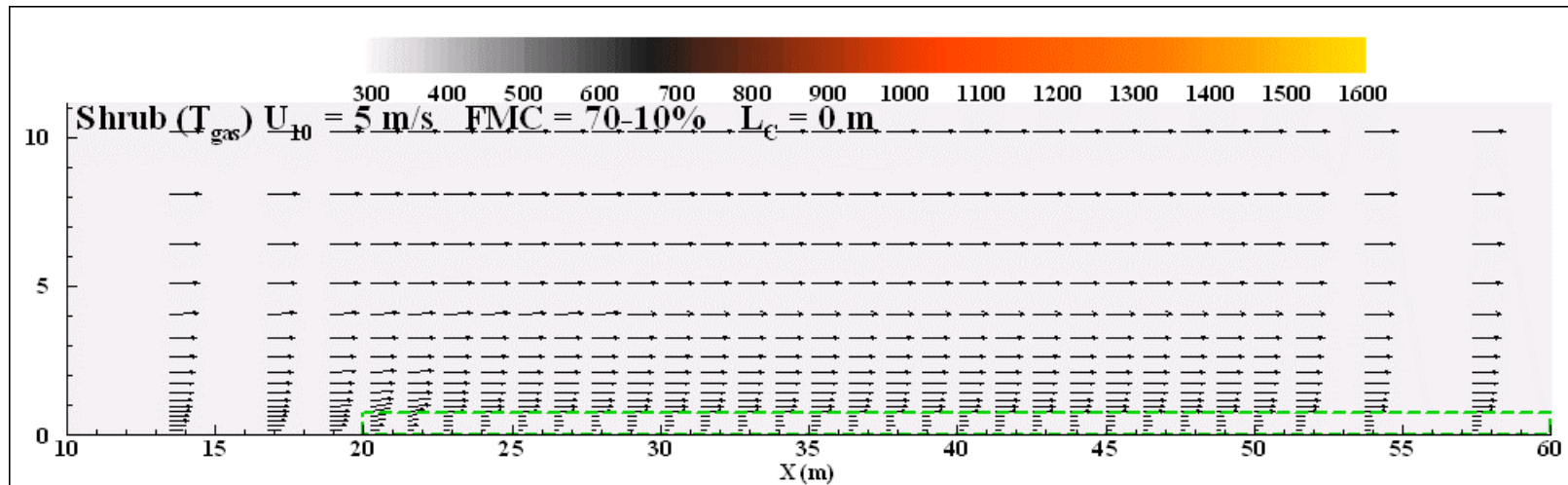
Brachypode
Chêne Kermes (3 familles)



Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Simulations avec modèles de connaissance (ou modèles détaillés)

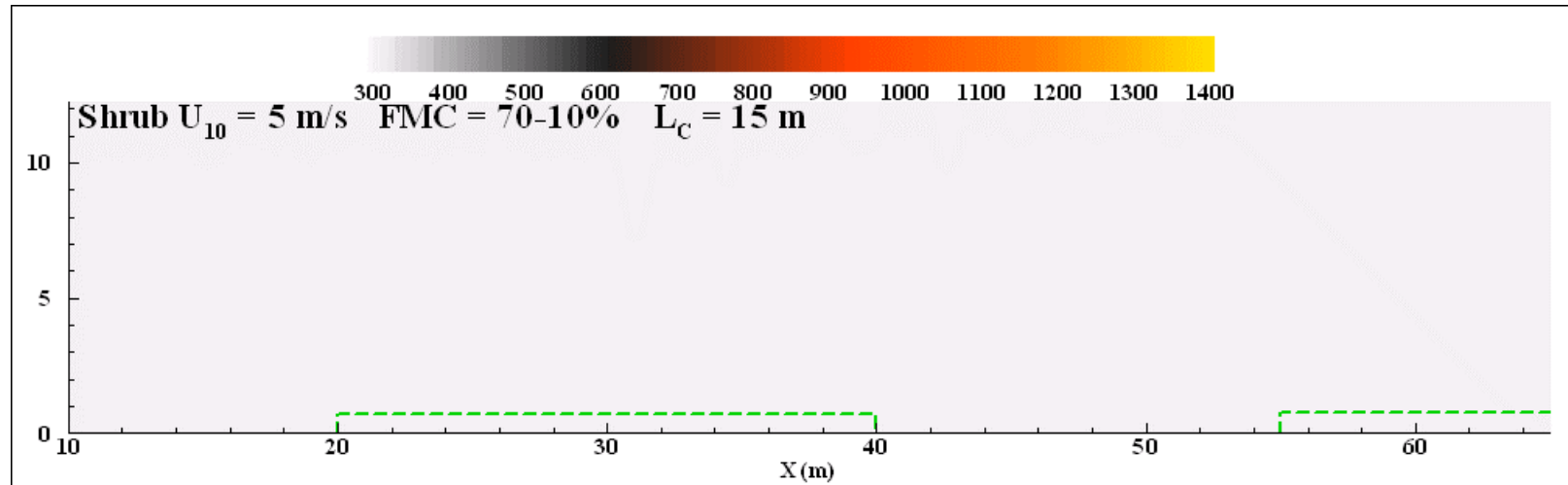
Exemples (FireStar2D)



Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

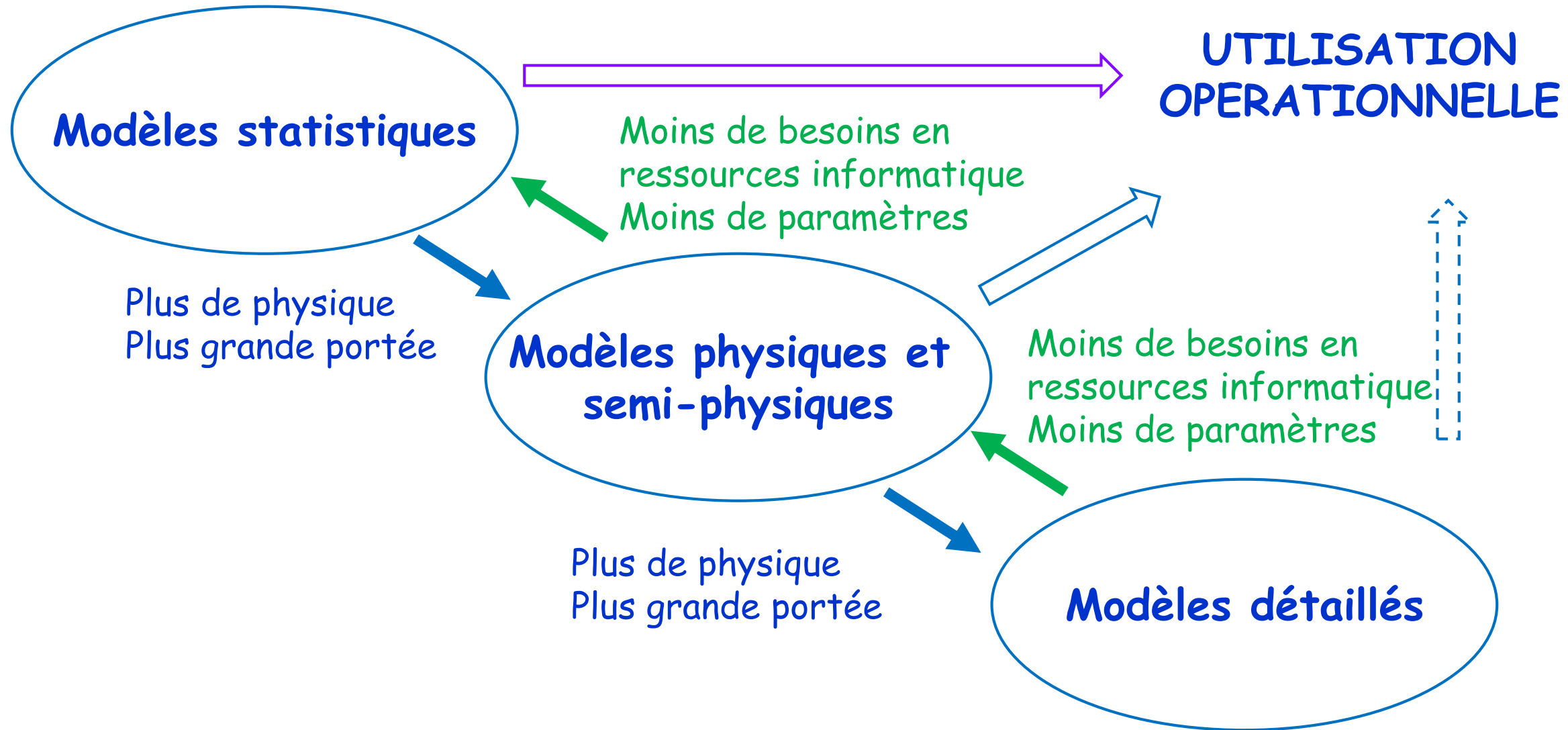
Simulations avec modèles de connaissance (ou modèles détaillés)

Exemples (FireStar2D)



Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

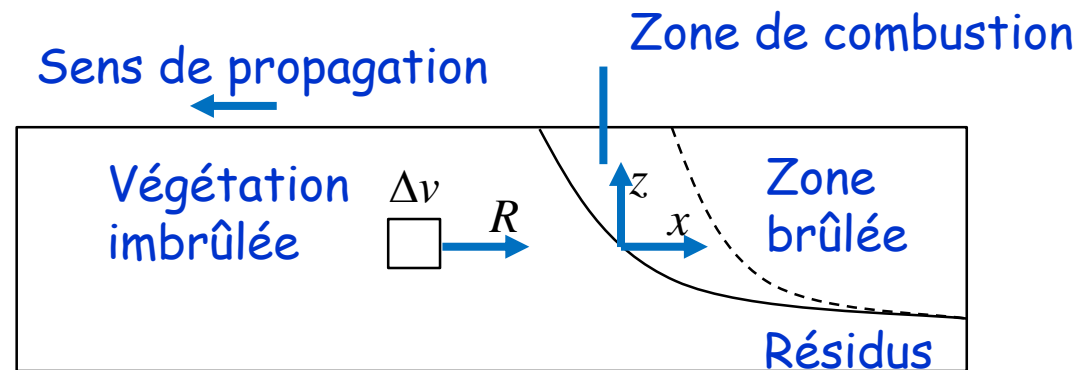
Les modèles de comportement (modèles physiques et semi-physiques)



Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de comportement (modèles physiques et semi-physiques)

Approche de Frandsen-Rothermel



$$R_f = \frac{\dot{q}_{x,ig}'' + \int_{-\infty}^0 \left(\frac{\partial \dot{q}_z''}{\partial z} \right)_{z_c} dx}{\rho_{be} Q_{ig}}$$

Frandsen



$$R_f = \frac{\xi I_r}{\varepsilon \rho_{be} Q_{ig}}$$

Partie empirique

Partie physique

Rothermel

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de comportement (modèles physiques et semi-physiques)

Approche de Frandsen-Rothermel

Rothermel, R. C. (1972)
 A mathematical model
 for predicting fire
 spread in wildland fuels.
 Res. Pap. INT-115.
 Ogden, UT: U.S.
 Department of
 Agriculture, Forest
 Service, Intermountain
 Forest and Range
 Experiment Station. 40 p

$$I_R = \Gamma' w_{RH} h \eta_M \eta_S \quad \text{Reaction intensity, B.t.u./ft.}^2 \text{ min.} \quad (27)$$

where:

$$\Gamma' = \Gamma'_{\max} (\beta/\beta_{Op})^A \exp[A(1-\beta/\beta_{Op})] \quad \text{Optimum reaction velocity, min.}^{-1} \quad (38)$$

$$\Gamma'_{\max} = \sigma^{1.5} (495 + .0594\sigma^{1.5})^{-1} \quad \text{Maximum reaction velocity, min.}^{-1} \quad (36)$$

$$\beta_{Op} = 3.348\sigma^{-.8189} \quad \text{Optimum packing ratio} \quad (37)$$

$$A = 1/(4.774\sigma^{.1} - 7.27) \quad (39)$$

$$\eta_M = 1 - 2.59 \frac{M_f}{M_x} + 5.11 \left(\frac{M_f}{M_x}\right)^2 - 3.52 \left(\frac{M_f}{M_x}\right)^3 \quad \text{Moisture damping coefficient} \quad (29)$$

$$\eta_S = 0.174 S_e^{-.19} \quad \text{Mineral damping coefficient} \quad (30)$$

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de comportement (modèles physiques et semi-physiques)

Le modèle de Rothermel et le logiciel Farsite

$$R = \frac{\xi (1 + \phi_W + \phi_S) I_r}{\varepsilon \alpha_k \rho_k Q_{ig}} \quad \phi_W = CU^B \left(\frac{\alpha_k}{\alpha_k^0} \right)^{-E} \quad \phi_S = 5.275 (\alpha_k)^{-0.3} (\tan \phi)^2$$

Le rayonnement n'est pas modélisé

- Loi empirique ξ liant intensité de réaction et flux radiatif

La combustion est "modélisée"

- I_r est l'intensité de la réaction, fonction de α_k et σ_k

Le vent est pris en compte

- Une loi empirique ϕ_W et des champs de vents précalculés

➤ Entrées : Modèles de végétation ($\alpha_k, \sigma_k, w, MC, \Delta H...$), champ de vent

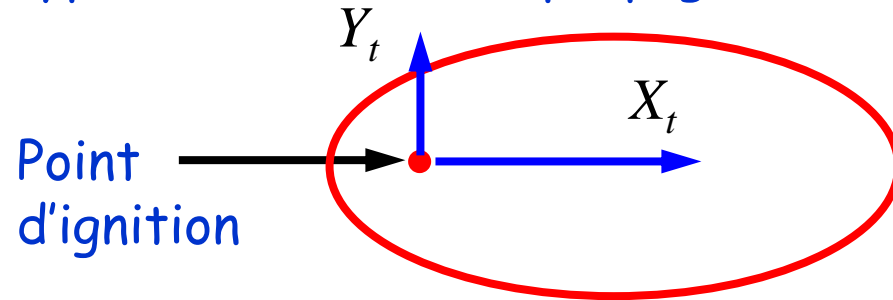
➤ Sorties : Vitesse de propagation, Périmètre du feu,
Puissance linéaire ($I_B = I_r R \tau_r$)

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de comportement (modèles physiques et semi-physiques)

Le modèle de Rothermel et le logiciel Farsite

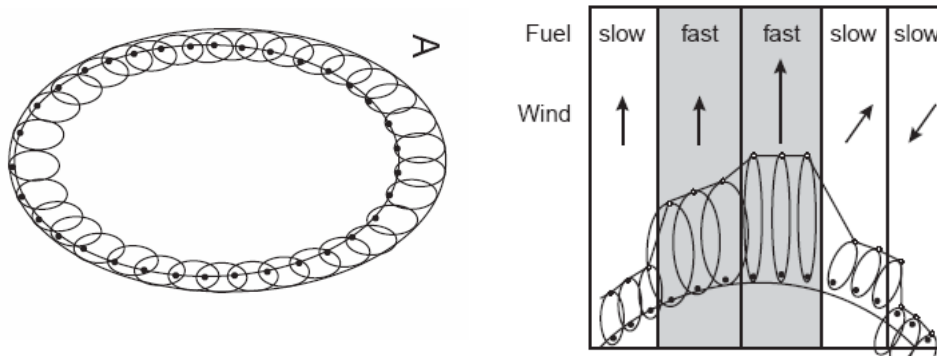
Hypothèse : le feu se propage suivant une ellipse



Principes de construction du périmètre

Modèle de Rothermel \rightarrow Vitesses orthogonales (X_t , Y_t)

On associe un ensemble de points d'allumage au front



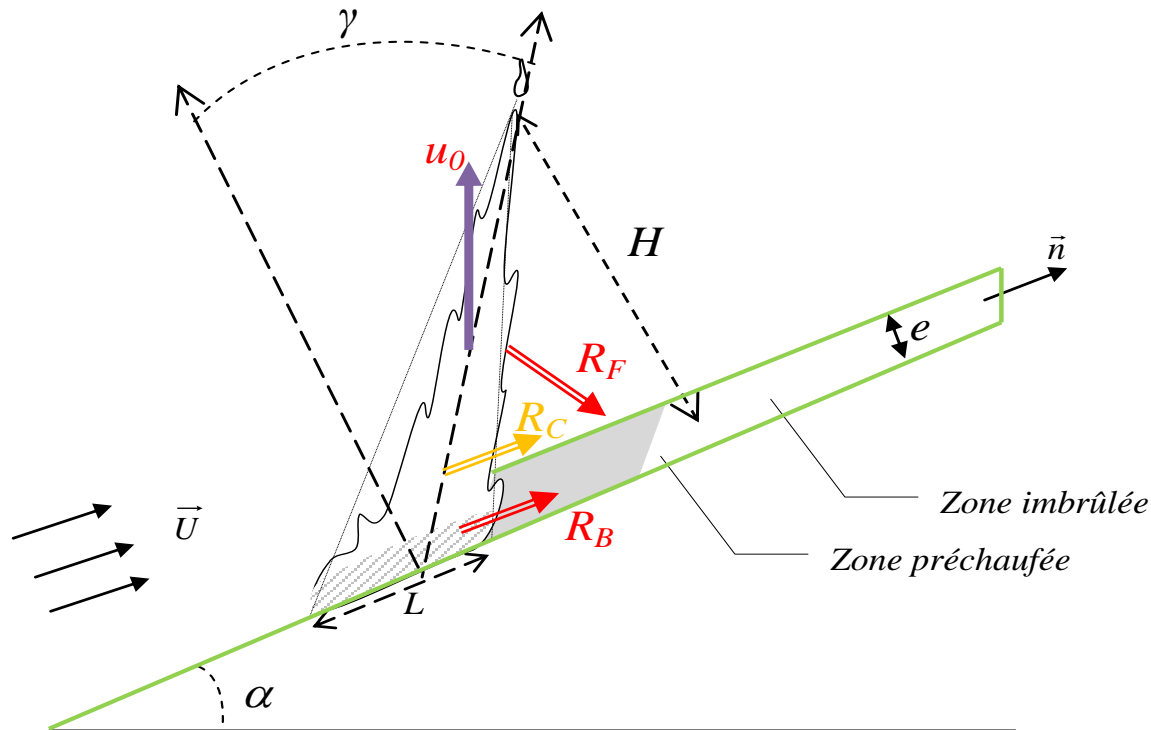
L'hétérogénéité locale induit la déformation du front

➤ **Remarque** : des sous-modèles complètent le logiciel : brandons, transition feu de surface-feu de cîme,...

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de comportement (modèles physiques et semi-physiques)

Le modèle du SPE et le logiciel Forefire



Equations et hypothèses de base

H1 On néglige l'écoulement en-dessous de la flamme

H2 On assimile la flamme à un panneau radiant

H3 Rayonnement de la flamme : uniquement sous la flamme

H4 Loi de décroissance linéaire de la masse

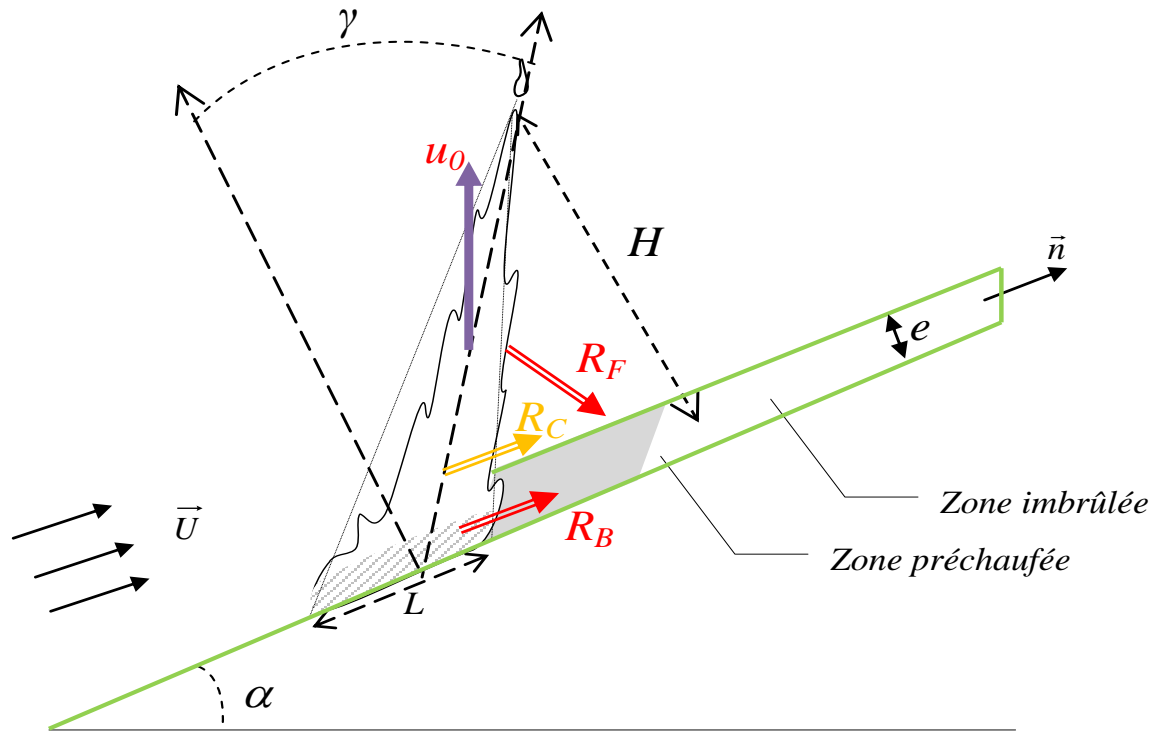
$$\dot{w} = \frac{w}{\tau}$$

⋮
etc...

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de comportement (modèles physiques et semi-physiques)

Le modèle du SPE et le logiciel Forefire



Equations et hypothèses de base

Un bilan d'énergie est effectué dans la végétation devant le front de flamme

$$\sigma_{veg} C_{p,veg} \frac{dT_{veg}}{dt} = \phi_B + \nu \phi_F - \Delta h_{vap} \frac{d\sigma_{H_2O}}{dt}$$

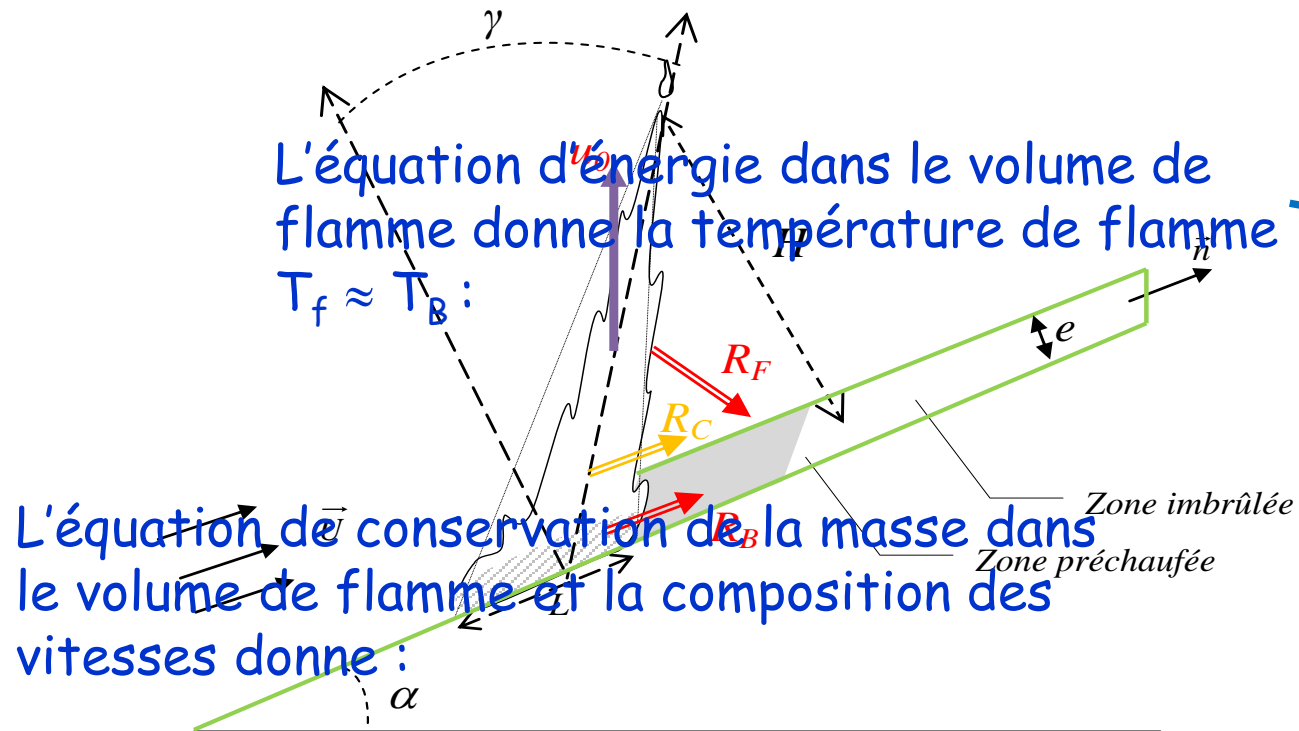
On suppose la vitesse du front constante « localement »

$$dt = \frac{dx}{R}$$

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de comportement (modèles physiques et semi-physiques)

Le modèle du SPE et le logiciel Forefire



$$R = R_B + R_F$$

$$R_B = \frac{D_{veg}}{\sigma_{veg}} \frac{BT_B^4}{(C_{p,veg} \Delta T + m_{veg} \Delta h)}$$

$$R_F = AR \frac{1 + \sin \gamma - \cos \gamma}{1 + (R \cos \gamma)/r_0}$$

$$\tan \gamma = \tan \alpha \cos \phi + \frac{U}{u_0} \cos \psi$$

$$u_0 = 8\nu \frac{s_t + 1}{\tau_0 / \rho_{veg}} \frac{T_B}{\rho_a T_a}$$

$$A_0 = \frac{\chi_0 \Delta H}{4(C_{p,veg} \Delta T + m_{veg} \Delta h)}$$

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de comportement (modèles physiques et semi-physiques)

Le modèle du SPE et le logiciel Forefire

Le rayonnement est modélisé

- Le rayonnement des braises
- Le rayonnement de la flamme (MFS et facteur de forme)

La combustion n'est pas modélisée

- Loi empirique pour le temps de résidence

Le vent est pris en compte

- Champ de vent précalculé et composition des vitesses pour l'angle d'inclinaison de la flamme

- Entrées : Modèles de végétation ($\alpha_k, \sigma_k, w, MC, \Delta H...$), champ de vent
- Sorties : Vitesse de propagation, Périmètre du feu, Puissance linéaire ($I_B = hwR$)

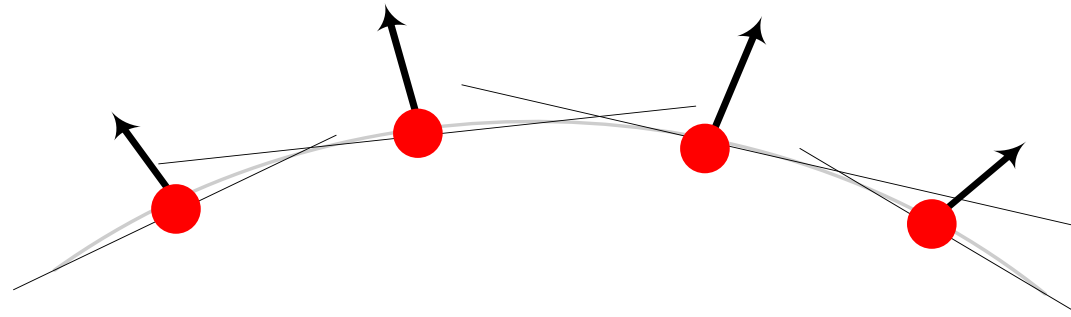
Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de comportement (modèles physiques et semi-physiques)

Le modèle du SPE et le logiciel Forefire

➤ Principes de construction du périmètre

- Front discrétisé en segments avec des marqueurs ●
- Chaque segment décrit une portion du panneau radiant
- Simulation à événements discrets sur le suivi du front
- Ajout et suppression dynamique des marqueurs de front
- Pas de maillage

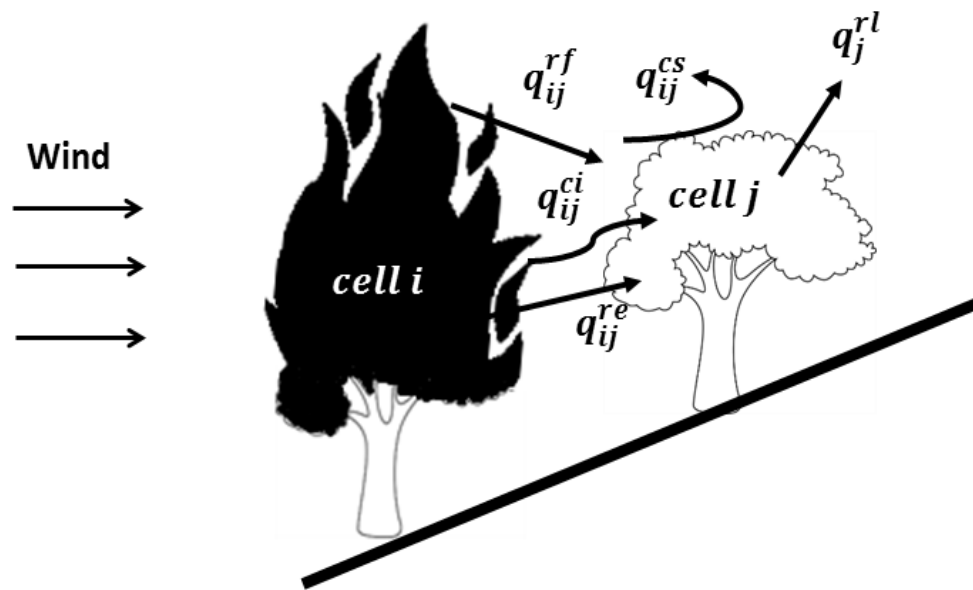


➤ **Remarque** : algorithme de calcul très rapide (< temps réel)

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de comportement (modèles physiques et semi-physiques)

Le modèle de l'IUSTI et le logiciel SWIFFT Equations et hypothèses de base



H.1/ Cellule j de forme cylindrique de hauteur H_j et diamètre D_j . Le volume élémentaire chauffé est représenté par une couche d'épaisseur $\delta_j = \min\left(\frac{4}{\alpha_j \sigma_j}; H_j\right)$

H.2/ La réponse thermique du combustible comprend trois étapes : chauffage ($T_{\text{vap}} = 373\text{K}$), évaporation, chauffage ($T_{\text{ign}} = 560\text{K}$)

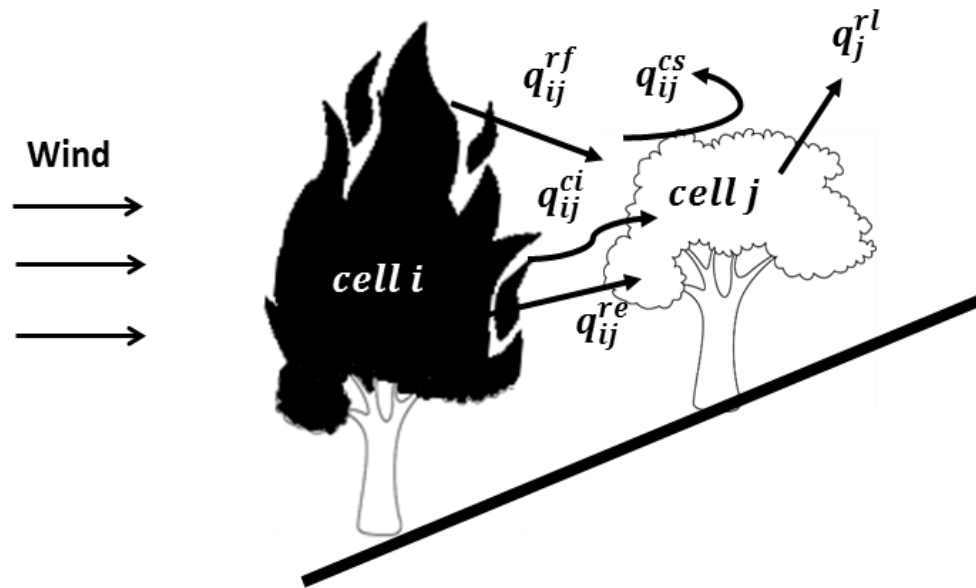
H.3/ Emissivité des braises égale à 1. $T_{\text{braises}} = T_{\text{flamme}}$

⋮
etc...

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de comportement (modèles physiques et semi-physiques)

Le modèle de l'IUSTI et le logiciel SWIFFT Equations et hypothèses de base



Phase de chauffage du combustible humide
($T_j < 373 \text{ K}$, $m_j^{w'''} = m_{0j}^{w''}$)

$$\alpha_j \rho_j^{WFF} \frac{d(c_{p_j}^{WFF} T_j)}{dt} = S_q$$

Phase de dessiccation ($T_j = 373 \text{ K}$)

$$-\frac{L_{vap}}{H_j} \frac{dm_j^{w''}}{dt} = S_q$$

Phase de chauffage ($373 \text{ K} < T_j < T_{ign}$, $m_j^{w'''} = 0$)

$$\alpha_j \rho_j^{DFF} \frac{d(c_{p_j}^{DFF} T_j)}{dt} = S_q$$

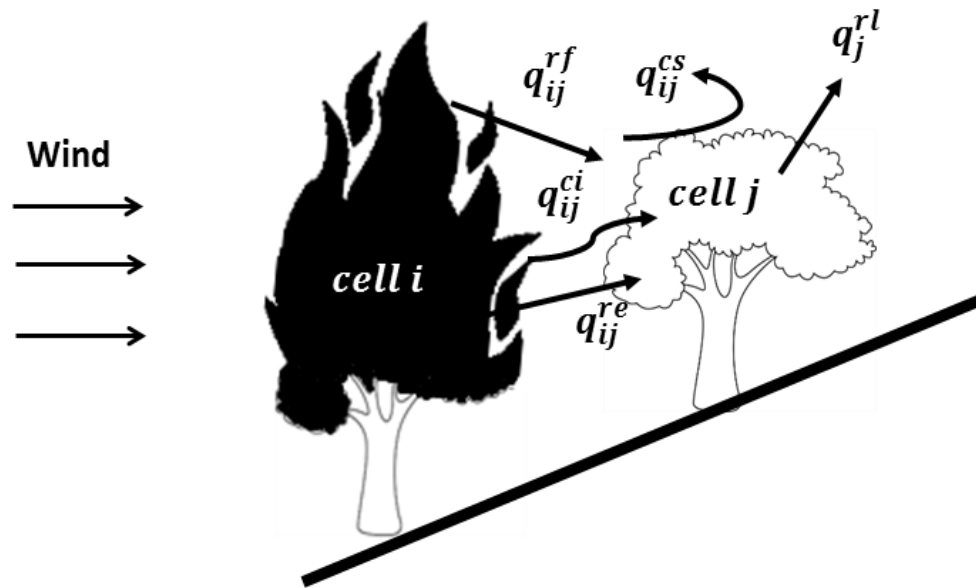
$$S_q = \sum_{i=1}^{N_{bc}} (q_{ij}^{rf} + q_{ij}^{re} + q_{ij}^{ci} + q_{ij}^{cs}) - q_j^{rl}$$

$$\rho_j^{WFF} c_{p_j}^{WFF} = \rho_j^{DFF} c_{p_j}^{DFF} + \rho_j^{DFF} \frac{m_j^{w''}}{m_j^{DFF''}} c_p^w$$

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de comportement (modèles physiques et semi-physiques)

Le modèle de l'IUSTI et le logiciel SWIFFT Equations et hypothèses de base



$$q_{ij}^{cs} = \frac{h^{cs}}{\delta_j} (T_i^f - T_j) \exp\left(-\frac{d_{ij}}{3.33L_i^f}\right)$$

$$q_{ij}^{ci} = \sigma_j \alpha_j h^{ci} (T_i^e - T_j) \exp(-0.25\sigma_j \alpha_j d_{ij})$$

$$q_{ij}^{re} = \frac{1}{\delta_j} E_i^e \exp(-0.25\sigma_j \alpha_j d_{ij})$$

$$q_{ij}^{rf} = a_j P_i^f S_i^f F_{ij} / V_j$$

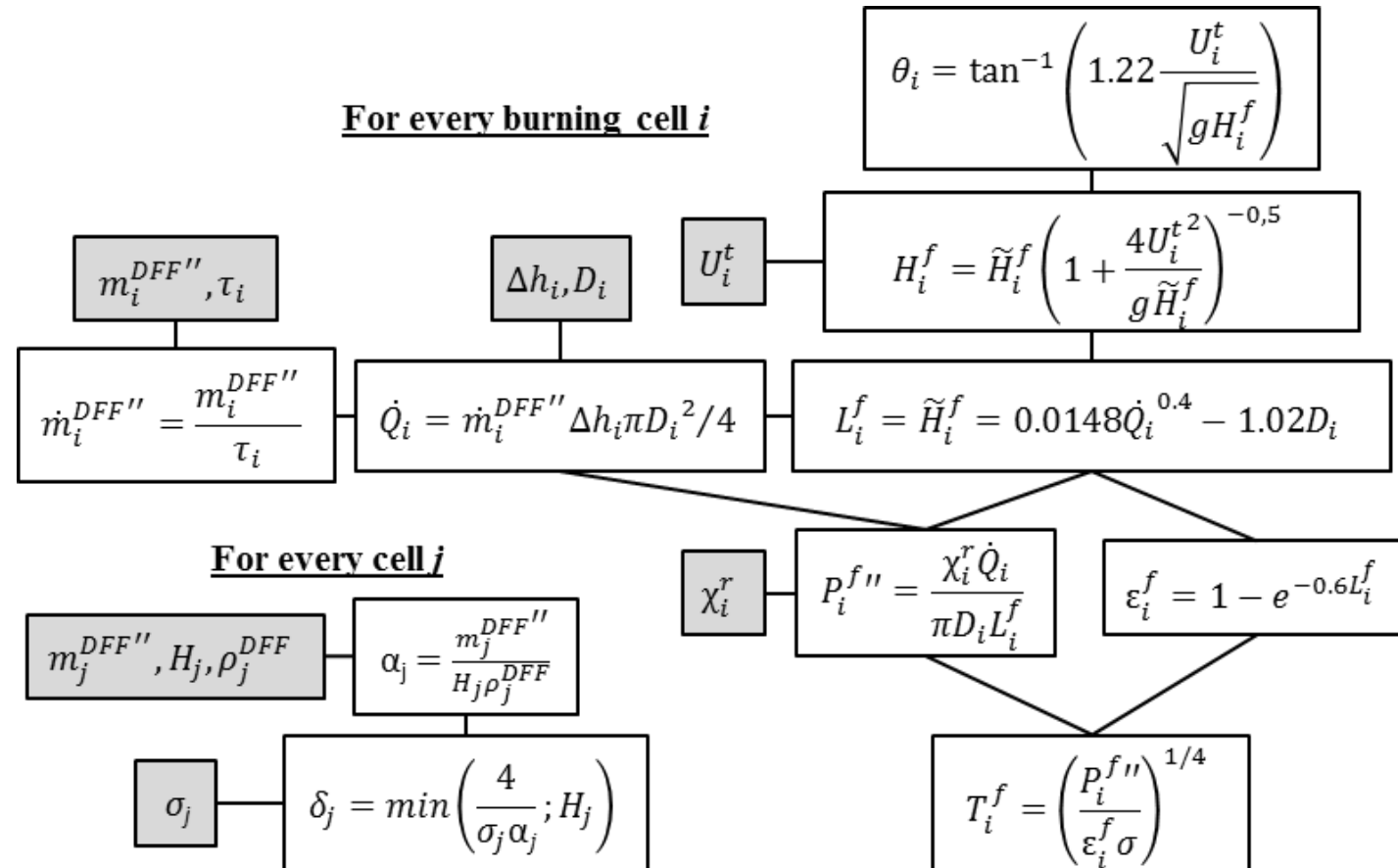
$$q_j^{rl} = \frac{1}{\delta_j} \varepsilon_j \sigma (T_j^4 - T_\infty^4)$$

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Les modèles de comportement (modèles physiques et semi-physiques)

Le modèle de l'IUSTI et le logiciel SWIFFT

Obtention de la hauteur de flamme, de l'angle d'inclinaison et de l'émittance



Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Résumé des caractéristique des trois modèles

	Farsite	Forefire	Petit Monde
Rayonnement	Empirique	Modèle MFS-FV	Modèle MFS-FV
Inclinaison de flamme	Empirique	Composition des vitesses	Empirique
Convection	Empirique	Pas implanté	Modélisé
Combustion	"Modélisée"	Temps de résidence	Temps de résidence
Propagation	"Vecteur"	Vecteur	Raster

Même intrants concernant la végétation

Des approches différentes pour simuler un incendie
à l'échelle d'une vallée

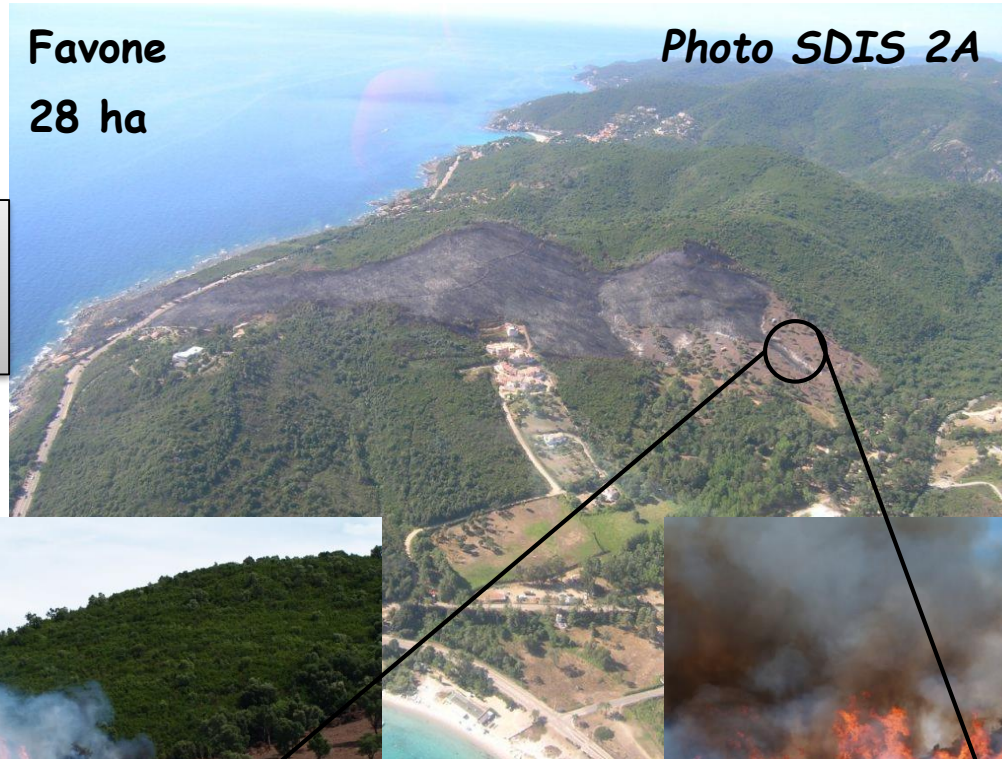
Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Un exemple d'utilisation de ces simulateurs

Favone
28 ha

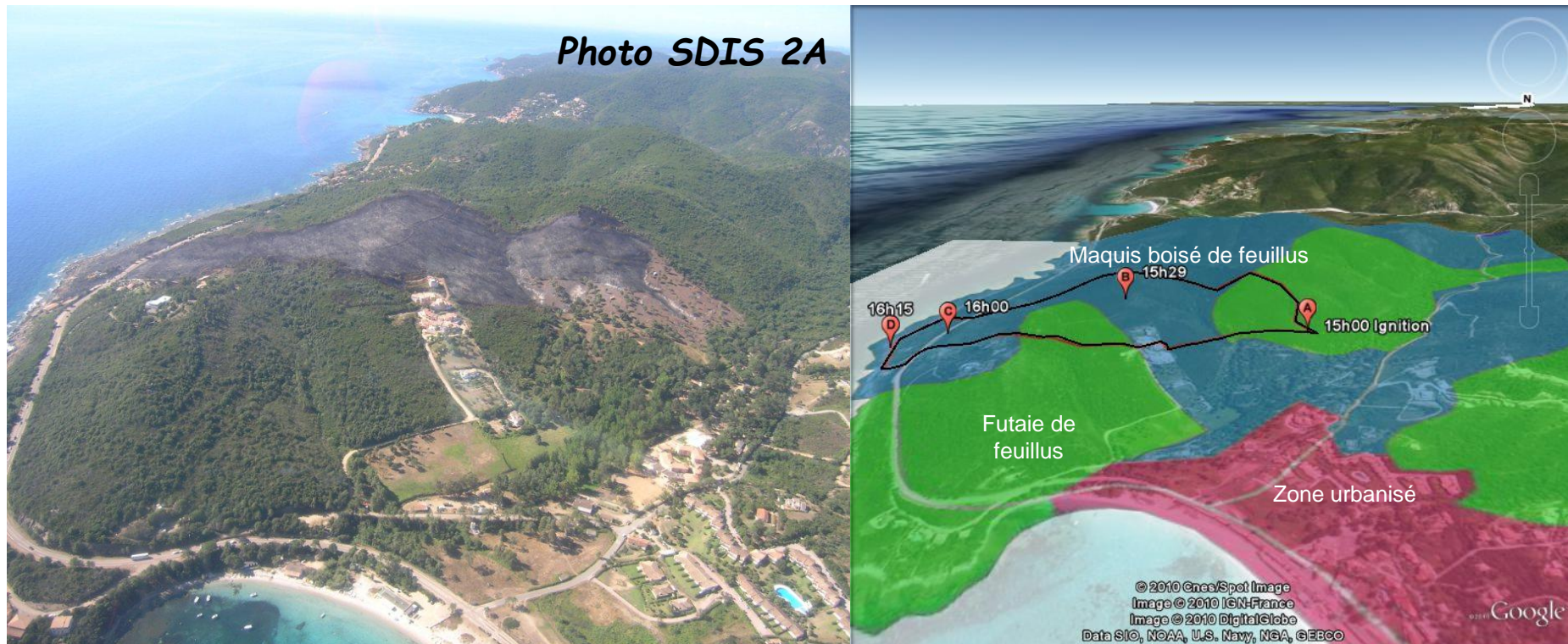
Photo SDIS 2A

Vent: W 25 km/h
T : 26°C
HR: 41%



Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

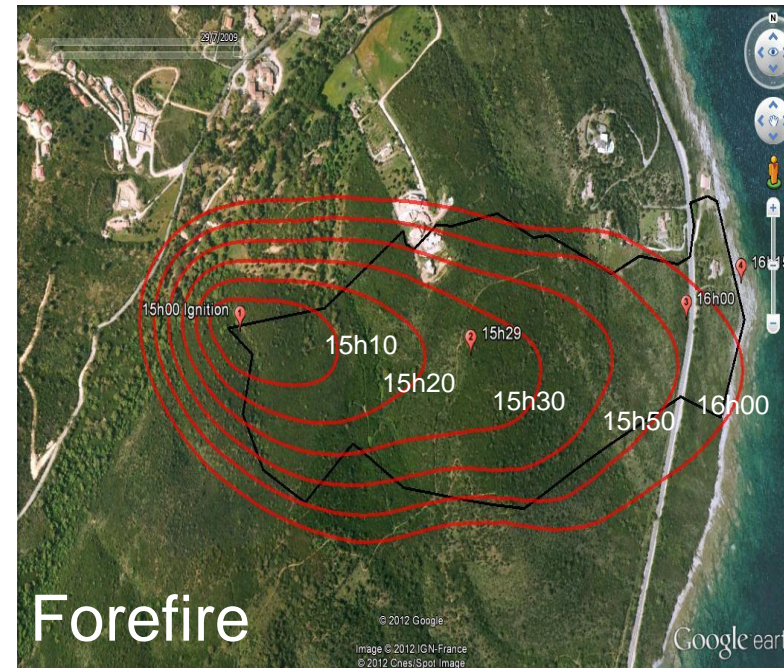
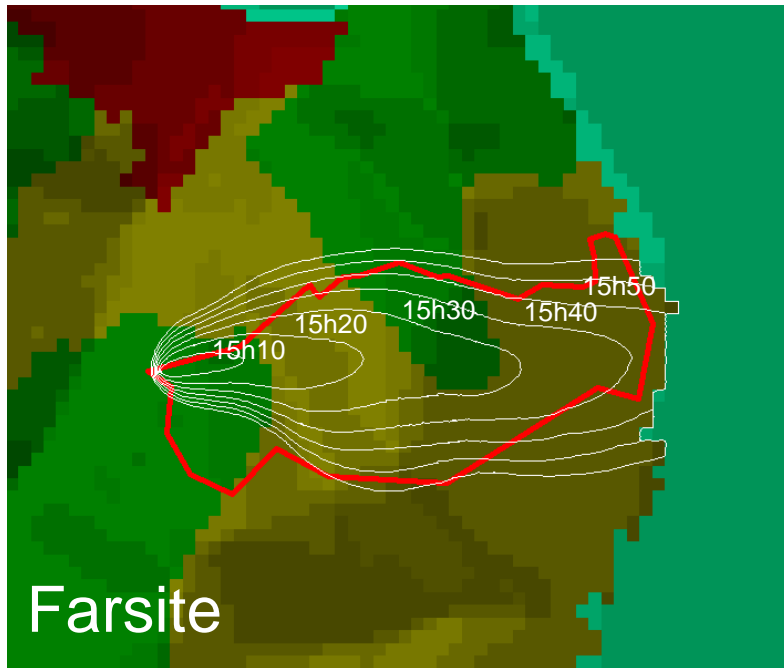
Un exemple d'utilisation de ces simulateurs



Chaque cas nécessite un important travail de collectes de données

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

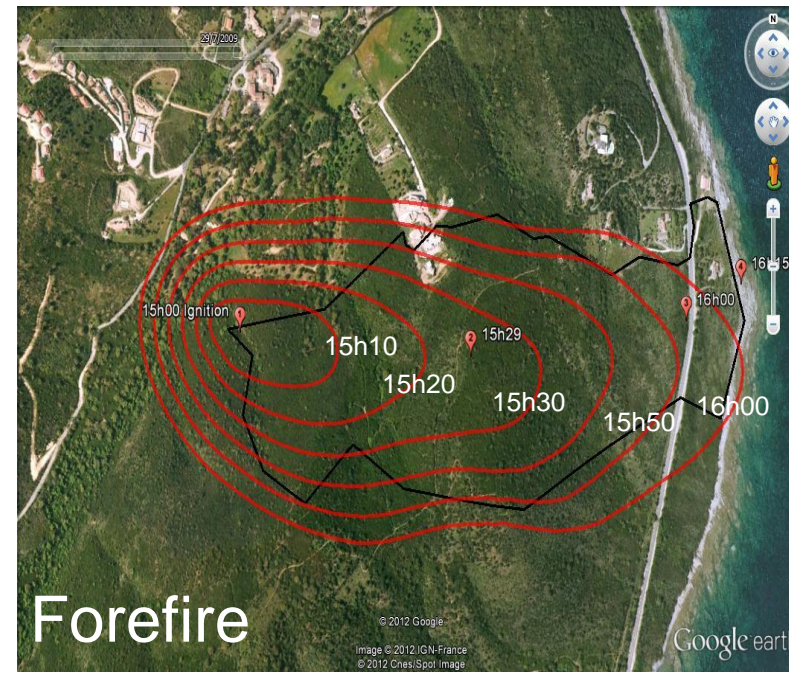
Un exemple d'utilisation de ces simulateurs



Simulation des périmètres obtenus par Farsite et Forefire avec des intervalles de temps de 10 min

Modélisation et simulation de la propagation d'un incendie

Un exemple d'utilisation de ces simulateurs



Simulation des périmètres obtenus par Petit monde et Forefire avec des intervalles de temps de 10 min

Conclusions

Les principaux mécanismes gouvernant la propagation des incendies de végétation sont maintenant connus.

Des mécanismes fins restent à explorer (dégradation, suies, émissions)

Le rapprochement avec les chercheurs sur les feux confinés à beaucoup apporté (outils expérimentaux, CFD)

La qualité des modèles (détaillés et de comportement) se renforce grâce aux approches couplées expérience-théorie

Les modèles de comportement commencent à être utilisés par les services opérationnels

Les modèles de connaissance pourraient être utilisés à moyen terme (formation des utilisateurs)

Approches expérimentale et de modélisation pour la compréhension du comportement et de l'impact des incendies de végétation

Paul-Antoine Santoni^{*}, Bernard Porterie[‡] Dominique Morvan[§]

^{*} Université de Corse Pascal Paoli / CNRS UMR 6134 SPE

[‡] Aix-Marseille Université / CNRS UMR 7343 IUSTI

[§] Aix-Marseille Université / CNRS UMR 7340 M2P2

