







Feux de végétation 1 Comportement du feu

Paul-Antoine Santoni*, Bernard Porterie**

* Université de Corse Pascal Paoli UMR CNRS 6134 SPE

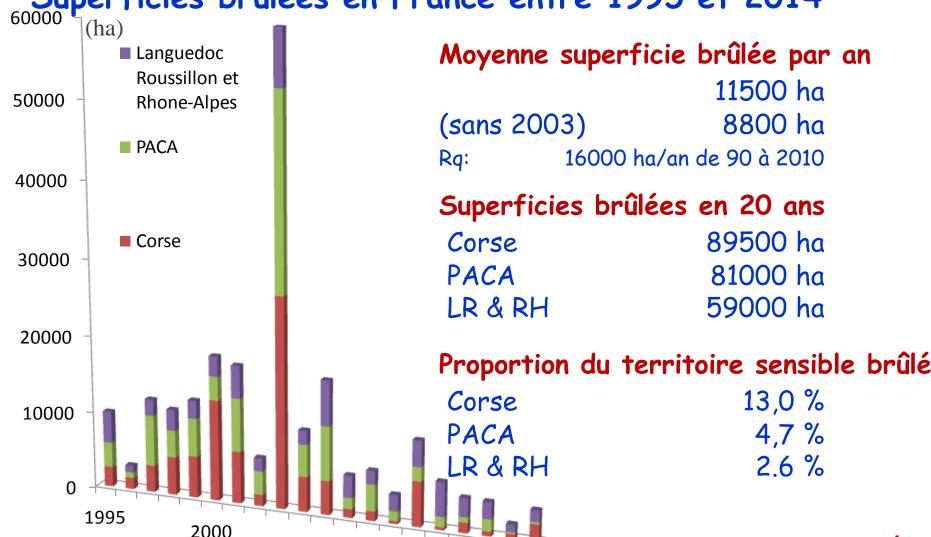
**Aix-Marseille Université
IUSTI UMR CNRS 7343/ETiC







Superficies brûlées en France entre 1995 et 2014



2005

Les incendies de végétation en France et en Italie

Proportion du territoire brûlée (1995-2014)

Sardaigne	14 %
Ligurie	12 %
Corse	10 %

Une similarité entre les régions : grands feux (> 100 ha)

Nb de feux* % de grands feux Grands feux(ha)/Total

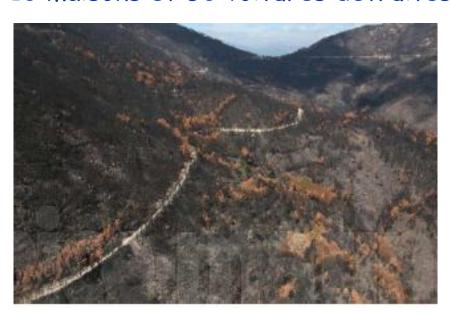
Sardaigne Corse	19500 5000	1% 1%	60 % 84 %

^{*} Données couvrant la période 2003-2009

Les incendies de végétation en France

Exemple de grand incendie

Été 2009 : conditions extrêmes (43°C) 5000 ha en Corse du sud en 2 jours 6 pompiers blessés 10 maisons et 50 voitures détruites





Les facteurs clefs: 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

Les facteurs clefs: 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 5

Les facteurs clefs: 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 6

Les facteurs clefs: l'effet de pente



Le périmètre du front de feu prend souvent une allure elliptique 7

Les facteurs clefs: 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'entrainement d'air favorise la combustion

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

Les facteurs clefs: l'effet de pente



Les facteurs clefs: l'effet du vent



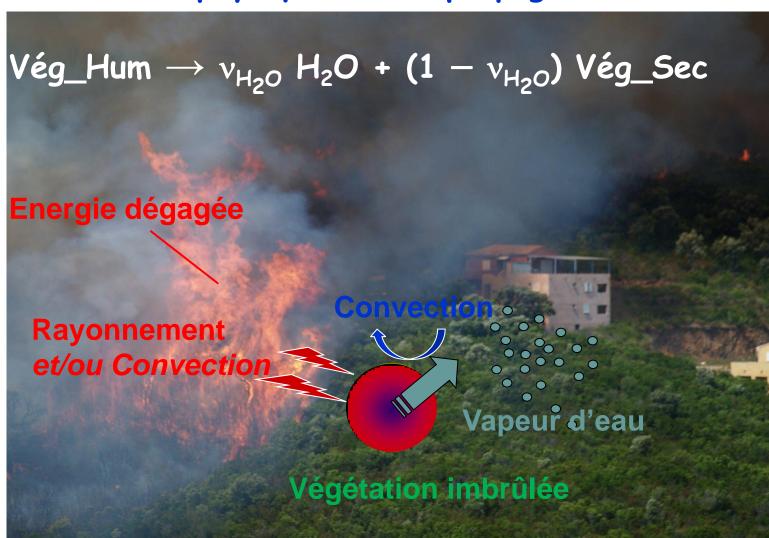
Le périmètre du front de feu prend souvent une allure elliptique 10

Les facteurs clefs: les sautes de feu

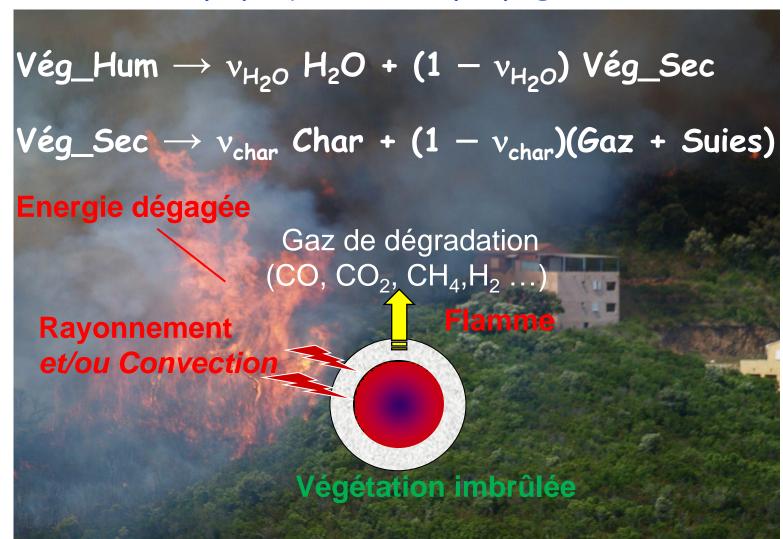


Des sautes > 2400 m ont été observées (source: Projet SALTUS)₁₁

Les mécanismes physiques de la propagation



Les mécanismes physiques de la propagation



Les mécanismes physiques de la propagation

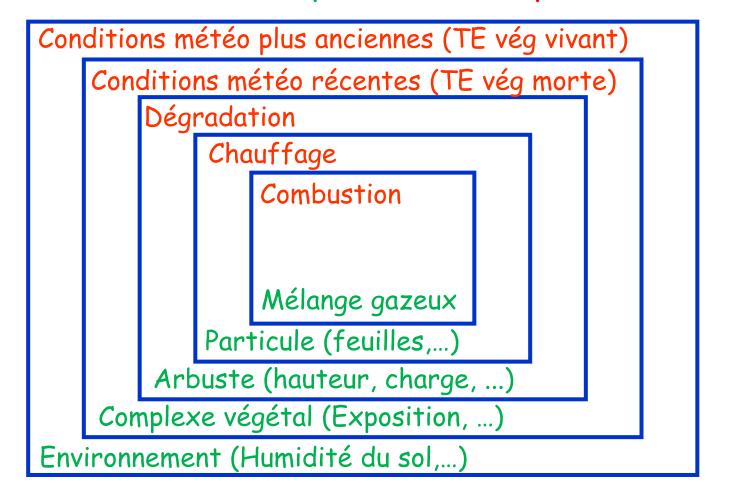
Vég_Hum
$$\rightarrow$$
 v_{H_2O} H_2O + $(1-v_{H_2O})$ Vég_Sec

Vég_Sec \rightarrow v_{char} Char + $(1-v_{char})$ (Gaz + Suies)

Char + sO_2 \rightarrow $(1+s-v_{ash})$ CO_2 + v_{ash} ash

Smolering

Les mécanismes physiques (gazéification, combustion, ...) et les facteurs clefs (relief, vent, végétation) impliquent une multitude d'échelles d'espace et de temps



Plan de la présentation

Introduction générale sur les incendies de végétation

Approche phénoménologique du rôle de la végétation

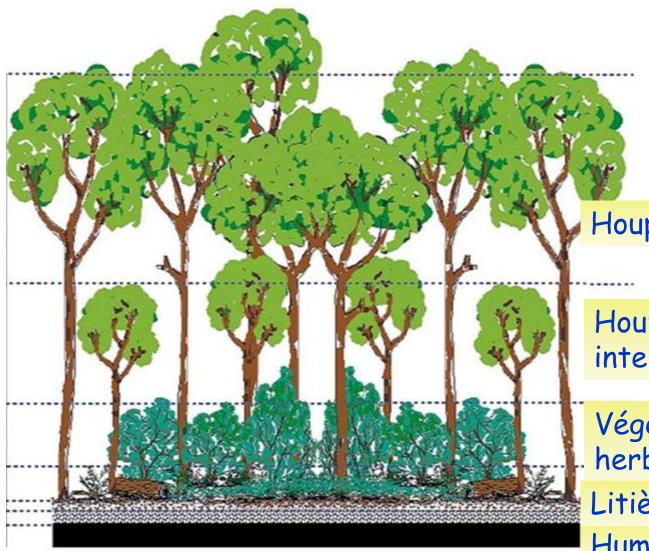
Caractérisation et modélisation de la végétation

Réaction au feu des particules végétales

Etude du comportement au feu d'une litière

Conclusion

Influence des strates et structures des typologies



Houppiers élevés

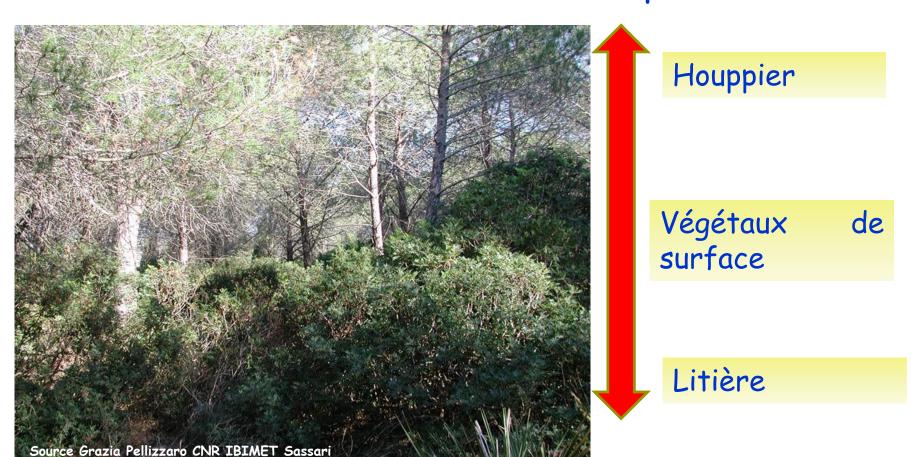
Houppiers intermédiaires

Végétaux de surface herbes, arbustes

Litière

Humus et souches

Influence des strates et structures des typologies Influence de la continuité verticale sur le comportement du feu



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

Influence des strates et structures des typologies Influence de la continuité verticale sur le comportement du feu



Houppier

Végétaux c surface

Litière

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

Influence des strates et structures des typologies

Influence de la continuité horizontale sur le comportement du feu



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

Influence des strates et structures des typologies

Influence de la continuité horizontale sur le comportement du feu



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

Influence des strates et structures des typologies

Influence de la continuité horizontale sur le comportement du feu



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

Influence des strates et structures des typologies Influence de la charge de combustible sur le comportement du feu





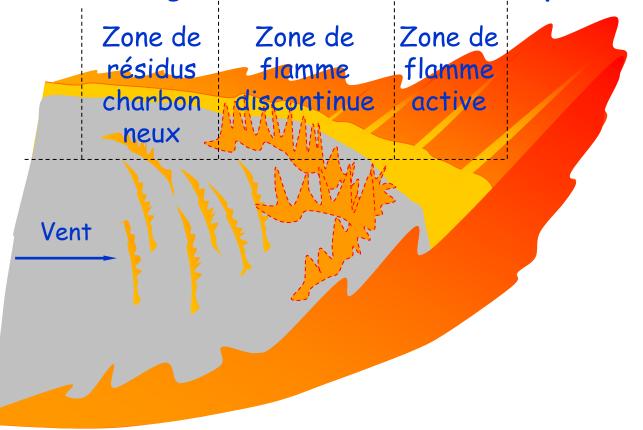




La charge (kg/m²) est la masse sèche (vivante et morte) surfacique.

Influence des strates et structures des typologies

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)

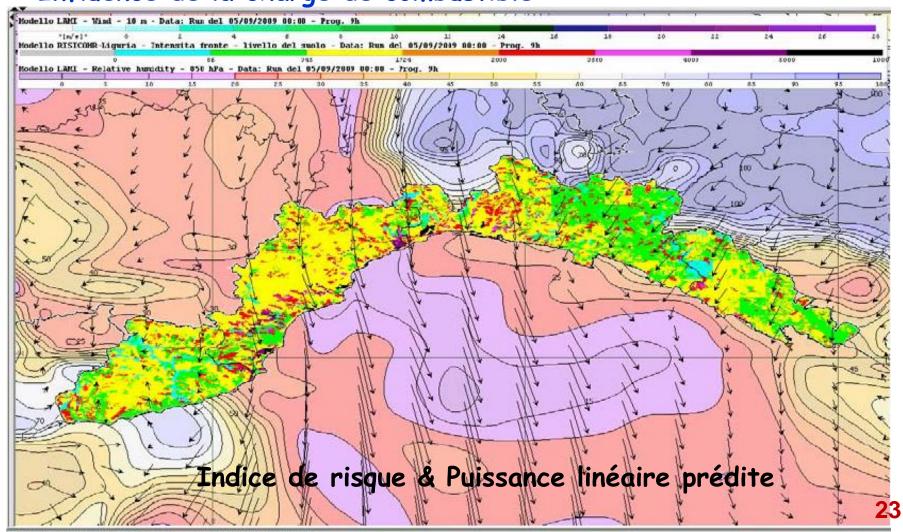
Influence des strates et structures des typologies
Influence de la charge de combustible sur le comportement du feu
Certains pays l'utilisent pour définir l'indice de risque

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

22

Influence des strates et structures des typologies

Influence de la charge de combustible



Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

Le ratio surface volume des particules









Quand le RSV augmente :

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

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

Le ratio surface volume des particules



 $L \approx 8 - 10$ cm

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

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

 $L \approx 15 - 20$ cm

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

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

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

Le ratio surface volume des particules



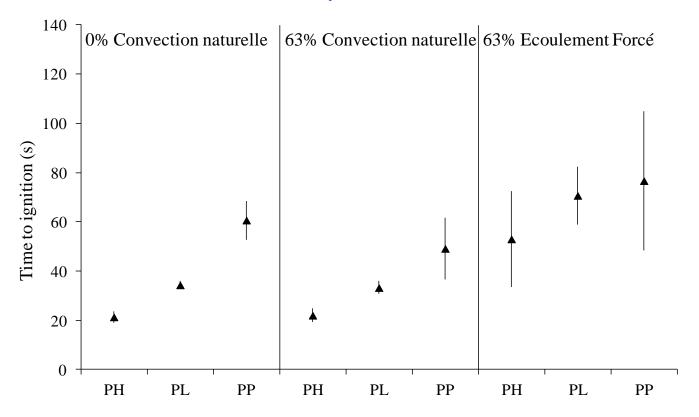
Etude de l'allumage de PP, PH et PL en convection naturelle/forcée

25 kW/m², panier O/F

63% Pinus Pinaster



Influence des paramètres liés à l'espèce végétale Le ratio surface volume des particules



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

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

La porosité (ou la compacité)

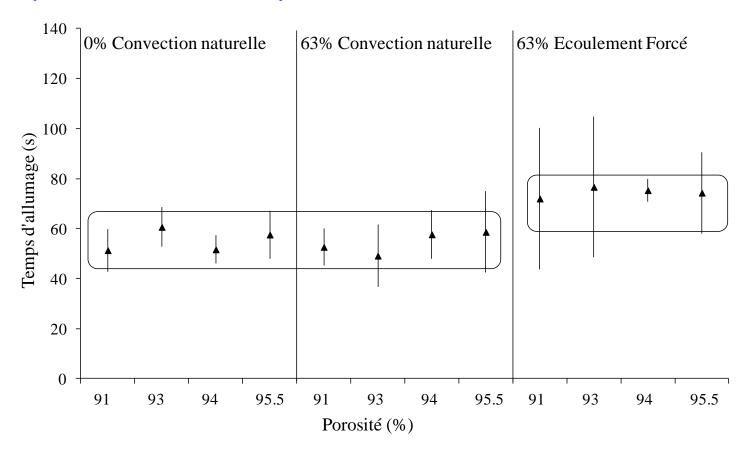




L'espace entre les particules d'une espèce peut être caractérisé par la compacité ($V_{v\acute{e}q\acute{e}tal}/V_{tot}$) ou par la porosité (V_{air}/V_{tot})

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

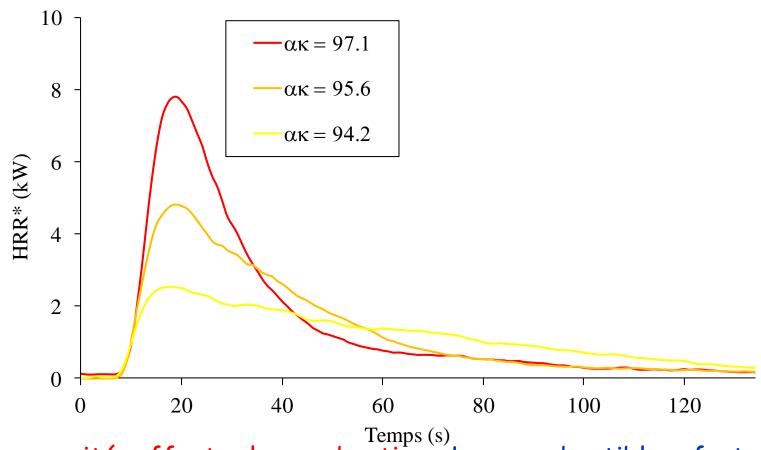
La porosité (ou la compacité)



La porosité ne semble pas affecter l'allumage des végétaux

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. 30

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

La forme des particules



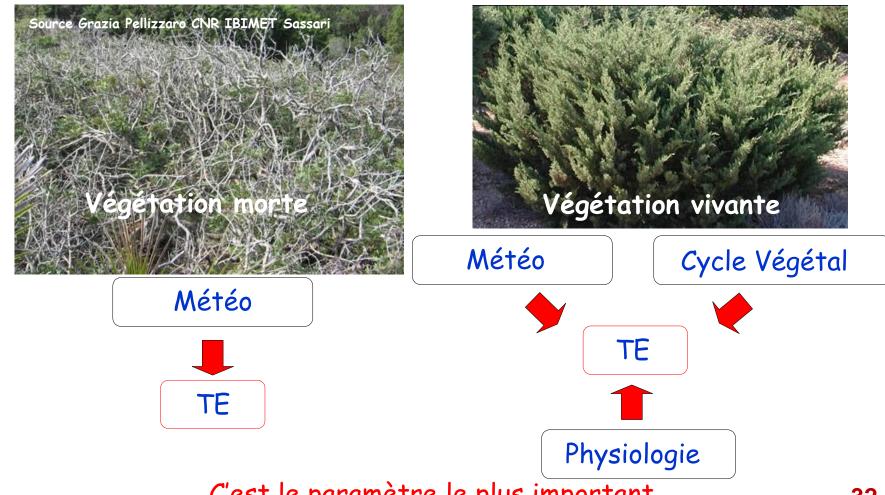


Les cônes de pins peuvent rouler sur des pentes et allumer des feux en contrebas d'un feu principal

Les morceaux d'écorce participent aux sautes de feu

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

La teneur en eau des végétaux

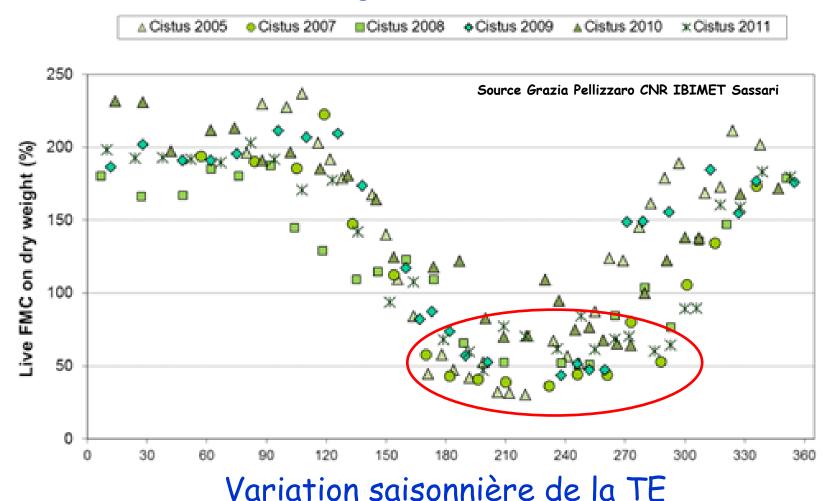


Influence des paramètres liés à l'espèce végétale La teneur en eau de la végétation vivante



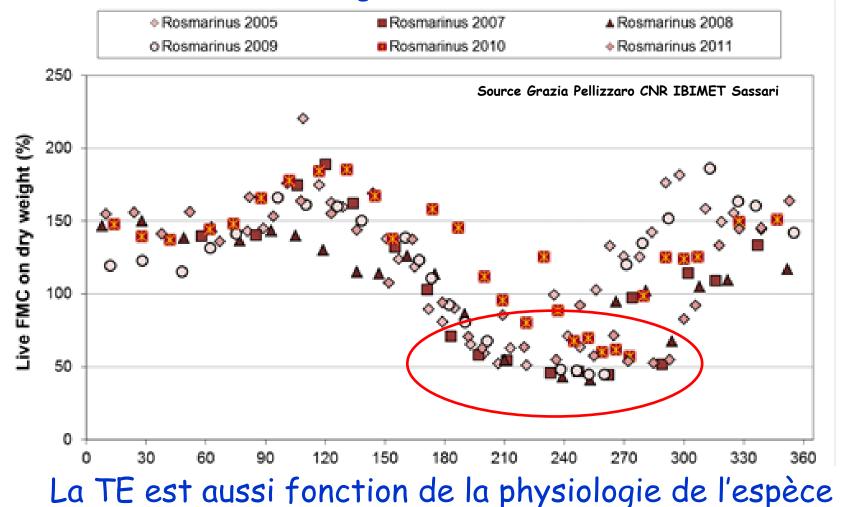
Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

La teneur en eau de la végétation vivante



Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

La teneur en eau de la végétation vivante



Influence des paramètres liés à l'espèce végétale La teneur en eau de la végétation morte



Variation journalière TE varie de 4 à 30%

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

La teneur en eau de la végétation morte

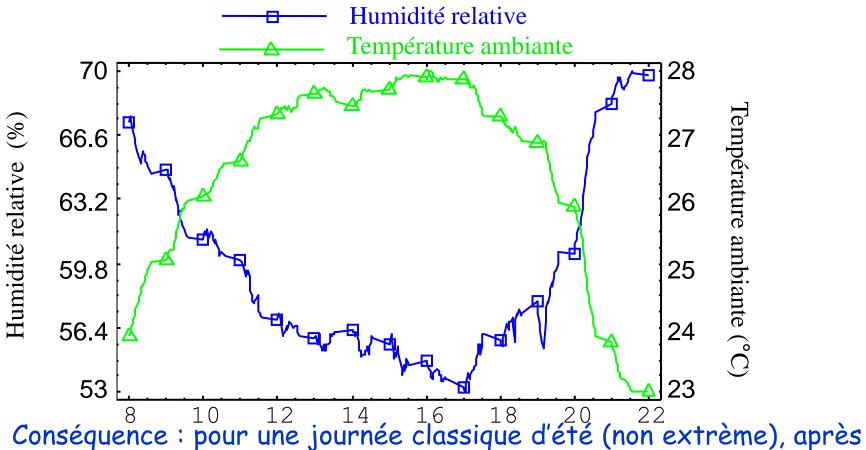
Les 4 classes de combustibles morts			
0-0.6 cm	/1 hr	Herbe, Litière, feuilles	
0.6-2.5 cm	10 hr	Petites branches et tiges	
2.5-7.6 cm	100 hr	Branches et tiges moyennes	
> 7.6 cm	1000 hr	Grosses branches	

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

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

La teneur en eau de la végétation morte



Conséquence : pour une journée classique d'été (non extrème), après 19h00 le taux d'humidité de l'air augmente et les feux sont fortement ralentis

Influence des paramètres liés à l'espèce végétale

Remarque:

Nous avons présenté quelques paramètres. Il y en d'autres...

- Le PCI qui varie de 16 MJ/kg à 23 MJ/kg
- Le Cp qui varie de 1400 à 1900 J/(kg·K)
- La masse volumique qui varie de 300 à 950 kg/m³
- Les paramètres liés aux transferts thermiques : absorptivité, ...
- Les lois de dégradation (et leurs paramètres...)
- Les gaz émis (CO, CH₄, CO₂,...)
- La fraction de char (et son PCI)

Plan de la présentation

Introduction générale sur les incendies de végétation

Approche phénoménologique du rôle de la végétation

Caractérisation et modélisation de la végétation

Réaction au feu des particules végétales

Etude du comportement au feu d'une litière

Conclusion

Modéliser la végétation pour modéliser l'incendie

Des typologies végétales pour lesquelles on veut des modèles

Quelques Paramètres (Géométriques, thermiques,...) Nombreux

Intrants (Relief, Météo, paramètres liés au végétal)

Simple Modèles de propagation / de risque Detaillé

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

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 $w (kg/m^2)$

Paramètres liés aux espèces

Classes de particules 1hr, 10hr...

RSV σ_k (m⁻¹)

Compacité α_k

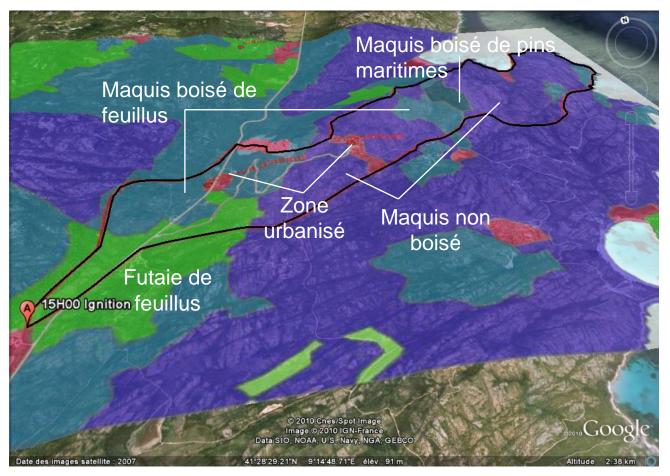
Teneur en eau %

Pouvoir calorifique h (kJ/kg)

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

Comment obtenir ces paramètres?

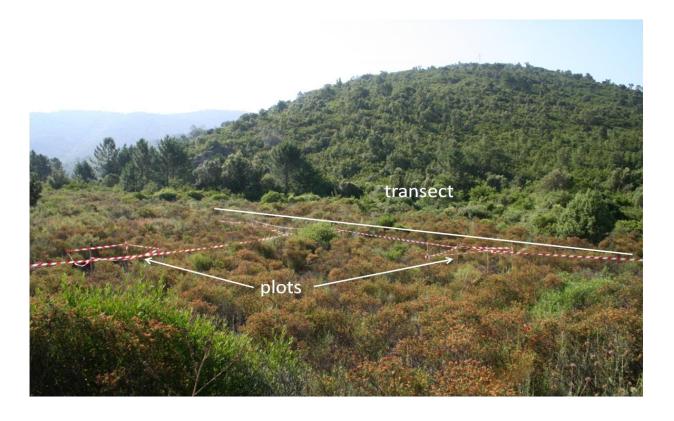
Classification et cartographie des typologies (IGN + Vérité terrain)



Identifier les typologies pertinentes pour le feu et les localiser! 42

Comment obtenir ces paramètres?

Caractérisation du couvert et de la hauteur de la strate



Couvert et hauteur sont mesurés suivant des transects

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 destructrives

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

Comment obtenir ces paramètres?

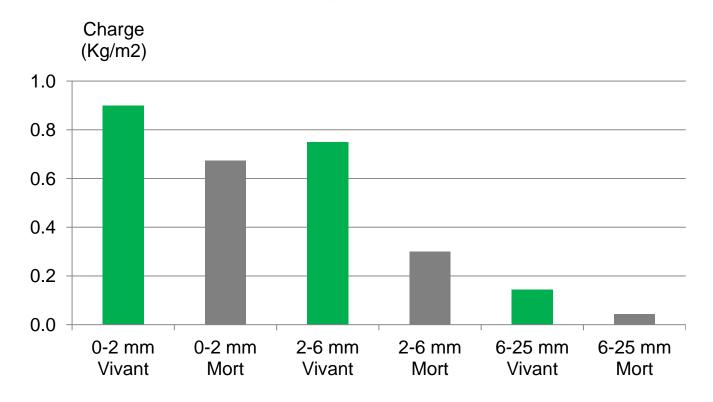
Détermination des familles de particules et de la charge



Exemple du genêt : quadrats de 4 m²

Comment obtenir ces paramètres?

Détermination des familles de particules et de la charge



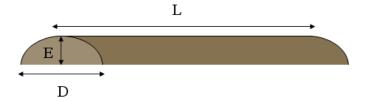
Répartition de la charge par famille de particules pour du genêt

Exemple du genêt : quadrats de 4 m²

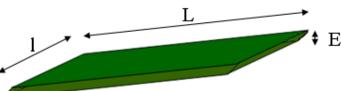
Comment obtenir ces paramètres?

Méthode pour déterminer σ_k (le RSV)

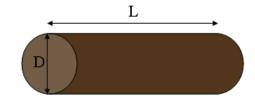
> Aiguilles de pin



> Feuilles d'Erica Arborea



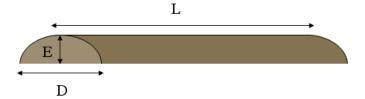
Brindilles de Ciste



Comment obtenir ces paramètres?

Méthode pour déterminer σ_k (le RSV)

> Aiguilles de pin



$$P_{i} = \pi \sqrt{\frac{E_{i}^{2} + D_{i}^{2}/4}{2}} \quad A_{i} = \frac{1}{2} \pi E_{i} (D_{i}/2)$$



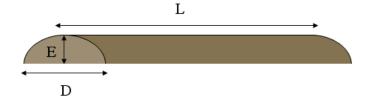
$$s_k = \sum_{i=1}^{10} s_i \text{ et } v_k = \sum_{i=1}^{10} v_i \quad \Longrightarrow \quad \sigma_k = \frac{s_k}{v_k}$$



Comment obtenir ces paramètres?

Méthode pour déterminer σ_k (le RSV)

> Aiguilles de pin



On vérifie la cohérence de la mesure en déterminant également le volume avec un pycnomètre





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

Comment obtenir ces paramètres?

Méthode pour déterminer $lpha_k$ 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

$$V_k = rac{M_k}{
ho_k}$$
 et $lpha_k = rac{V_k}{V}$

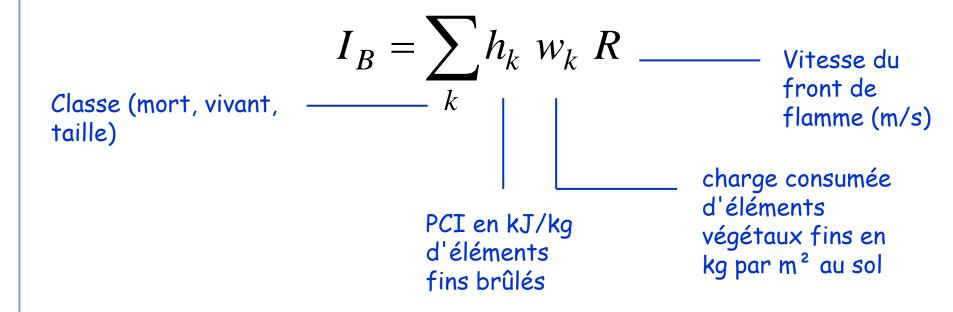


Exemple de "modèle simple" de végétation (input Farsite)

Cas d'étude	Favone	Cas d'étude	Favone
Typologie Végétal	Maquis		
Espèces dominantes	Arbutus unedo	•	
Hauteur (m)	4	PCI végétation morte (kJ.kg ⁻¹)	18620
Charge (kg.m ⁻²)		PCI végétation vivante (kJ.kg ⁻¹)	19735
– 1-h	0.40	TE sur base sèche (%)	
– 10-h	0.40	– 1-h	8
– 100-h	0.20	 Herbes sèches 	_
Litière	0.50	– Litière	8
 Herbes sèches 	_	Feuilles vivantes	100
 Feuilles vivantes 	1.79	Capacité calorifique (J.kg ⁻¹ .K ⁻¹)	1900
$RSV(m^{-1})$		Masse volumique (kg.m ⁻³)	720
– 1-h	5544	1 (6)	
 Herbes sèches 	_	+	
Litière	5544		CTC
Feuilles vivantes	4766	Description spatiale po	ir 516 52

Exemple d'utilisation d'un modèle de végétation

Rappel

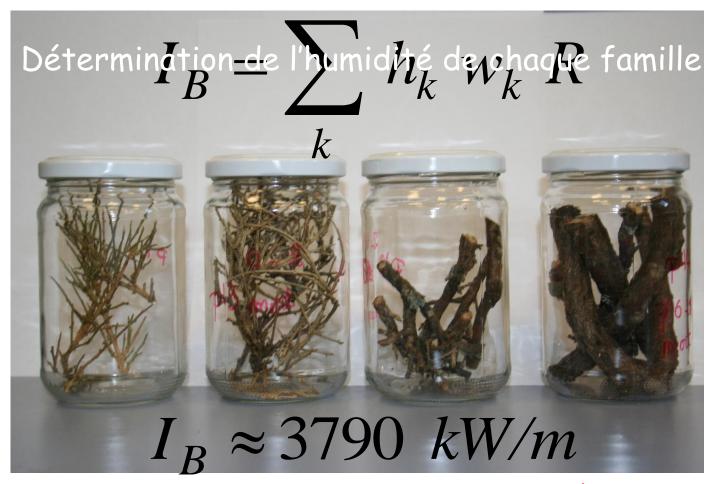


Exemple d'utilisation d'un modèle de végétation



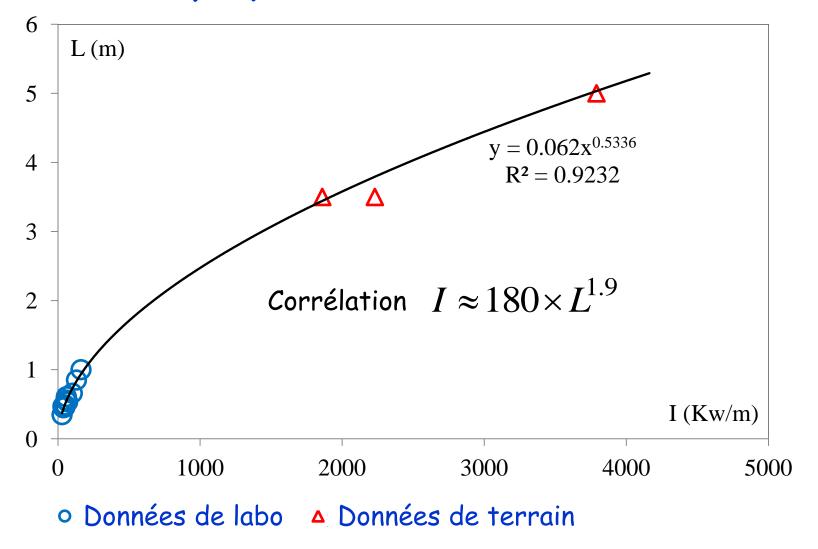
Mesure de la puissance d'un feu de genêt

Exemple d'utilisation d'un modèle de végétation

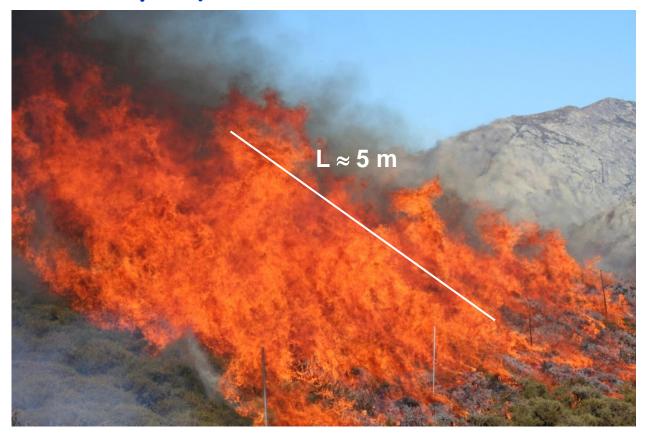


Mesure de la puissance d'un feu de genêt

Exploitation empirique du résultat



Exploitation empirique du résultat



 $I_{mesuré} = 3790 \text{ kW/m}$

 $I_{corrélation} = 3830 \text{ kW/m}$

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 m

 $h_{\mathcal{G}}$ = 16000 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 m

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

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

 $R_{5} = 0.5 \text{ km/h}$

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

Même puissance! Comportement différent! Même effet?

Remarque sur l'utilisation de la puissance

Considérons des fronts de 10 m de large et un temps de résidence de flamme de 30 s 1.6 kW/m^2

En 30s, le feu d'herbes parcourt 16 m et consomme 25 kg d'herbe

0.7m

11 m

En 30s, le feu de maquis parcourt 4 m et consomme 21 kg de végétation

2 m

5 m

L'impact dentreuc déparent de le sprédire ce de de frégétation il faut un modèle de rayonnement

10.6 kW/m²

Plan de la présentation

Introduction générale sur les incendies de végétation

Approche phénoménologique du rôle de la végétation

Caractérisation et modélisation de la végétation

Réaction au feu des particules végétales

Etude du comportement au feu d'une litière

Conclusion

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 emissions

Tenir compte du vent et du relief





Le rêve du chercheur!

Pas à notre porté aujourd'hui avec un modèle de connaissance

Echelle d'une vallée un modèle de comportement

Echelle d'une parcelle un modèle de connaissance

Pour ces deux modèles, les expériences de terrain ne permettent pas d'accéder aux grandeurs nécessaires à la compréhension des mécanismes fins :

- ne représentent pas les incendies d'été : météo, TE, vitesse,...
- ne fournissent que quelques données : le plus souvent la vitesse et la forme du front de feu. La mesure de la puissance est rare (caractériser la végétation!)
- comme les feux sont peu puissants, les flux radiatifs mesurés sont souvent dus à une « source locale » (la végétation au voisinage du capteur)
- sont coûteuses et non reproductibles

Le rêve du chercheur!

Pour améliorer les connaissances en accédant aux grandeurs associées aux mécanismes fins, on réalise de façon complémentaire (mais indispensable) des expériences de laboratoire

Comme pour les feux confinés on étudie le comportement au feu des végétaux en ayant à l'esprit deux concepts :

- La réaction au feu des particules du végétal. On étudie le végétal comme aliment du feu par son allumabilité et sa combustibilité.
- La « résistance au feu » du végétal. Il s'agit alors d'étudier le rôle du végétal dans la propagation (comment il la limite ou la favorise en fonction de sa structure, charge,...) au travers de sa sustainability et de sa consummability.

Exemple d'étude de réaction au feu des particules

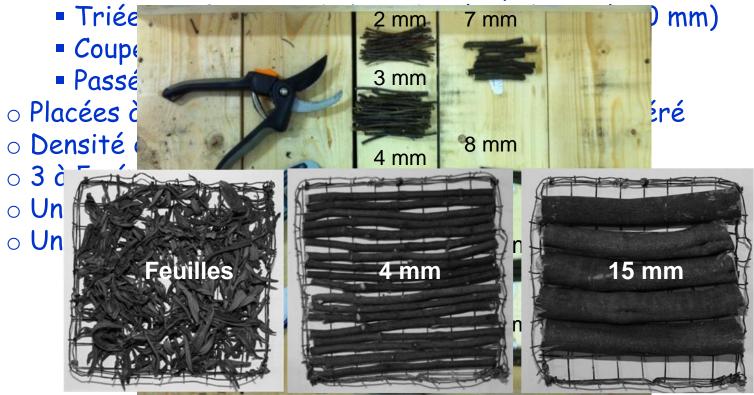
Nous présentons une étude sur la réaction au feu des particules ayant abouti à une nouvelle classification pour les tailles de particules mortes à prendre en compte dans les modèles de propagation



Exemple d'étude de réaction au feu des particules

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

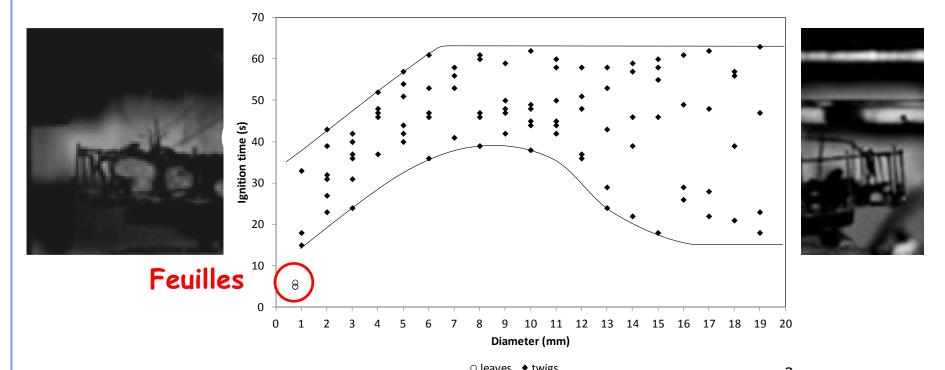
o Brindilles et feuilles de Ciste de Montpellier



Effets de l'épaisseur caractéristique sur le temps d'allumage

99 expériences une auto-inflammation en phase gazeuse.

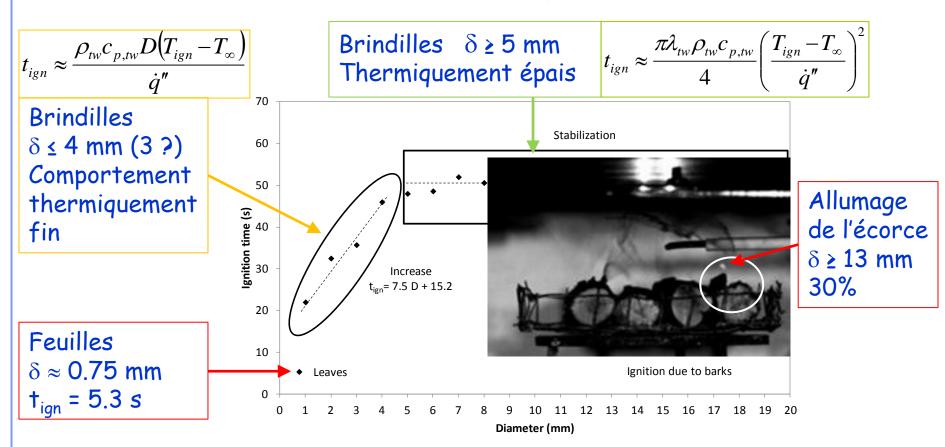
3 expériences inflammation du rougeoiement des particules



Temps d'inflammation en fonction de l'épaisseur caractéristique

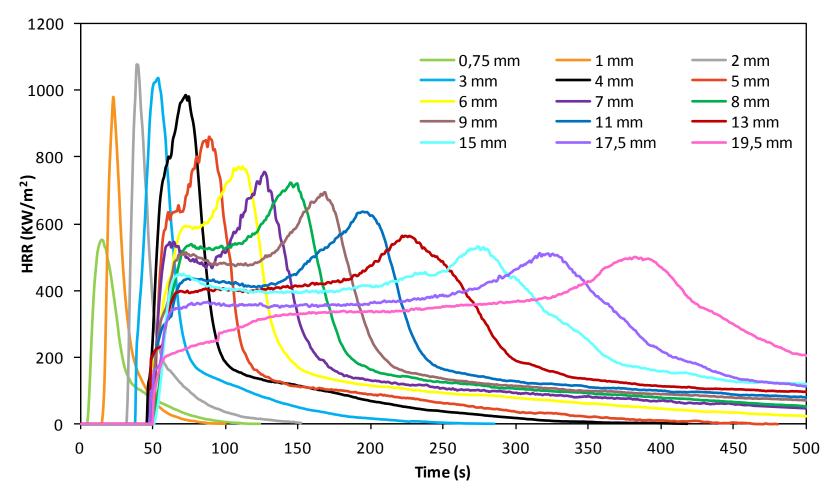
Effets de l'épaisseur caractéristique sur le temps d'allumage

Les moyennes des temps d'allumage ______ 4 comportements



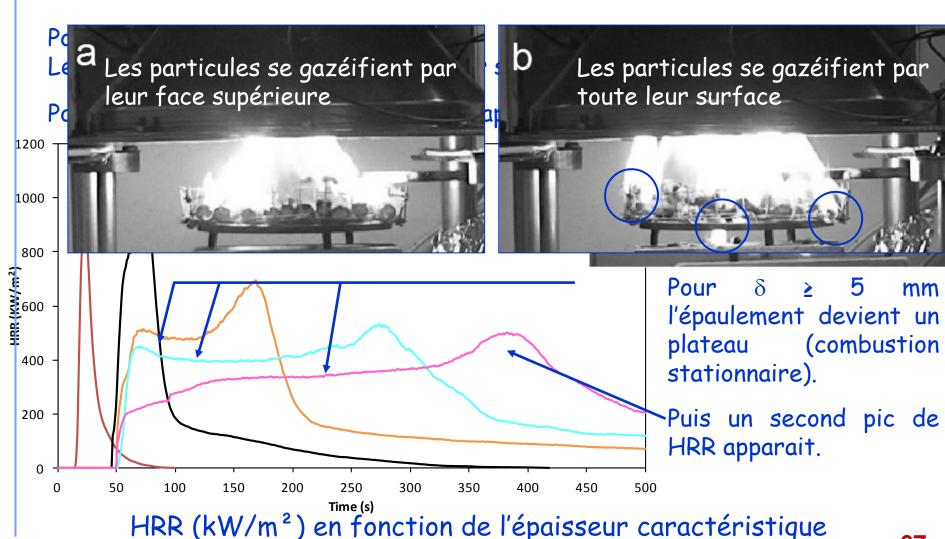
Temps d'inflammation moyen en fonction de l'épaisseur caractéristique

Effets de l'épaisseur caractéristique sur le HRR, la perte de masse



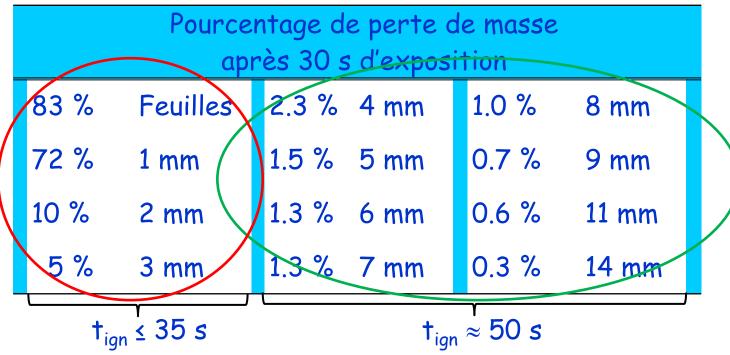
HRR (kW/m²) en fonction de l'épaisseur caractéristique

Effets de l'épaisseur caractéristique sur le HRR, la perte de masse



Effets de l'épaisseur caractéristique sur le HRR, la perte de masse

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 ?



Pour $\delta \ge 4$ mm, les particules émettent essentiellement de l'eau pendant 30 s Pour $\delta \le 3$ 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

Effets de l'épaisseur caractéristique sur le HRR, la perte de masse

Cette étude nous a montré que pour modéliser la dynamique de l'incendie, la réaction au feu du combustible mort est telle que :

- Les particules de diamètre ≥ 4 mm seraient négligeables
- Les feuilles porteraient la dynamique avec un allumage en 5 s

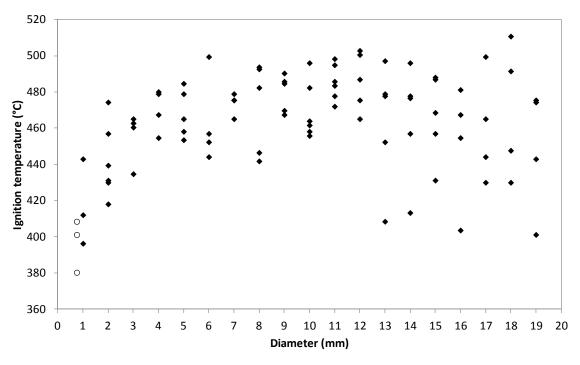
Remarques:

- (1) Pour prédire les émissions, les autres tailles de particules sont à prendre en compte.
- (2) Cette étude a été réalisée avec une densité de flux de 50 kW/m². Il faudrait vérifier ces résultats pour d'autres densités

Peut-on établir un critère d'allumabilité pour ces particules. Ce critère serait utile pour les modèles de comportement d'incendie?

Effets de l'épaisseur caractéristique sur la température d'allumage

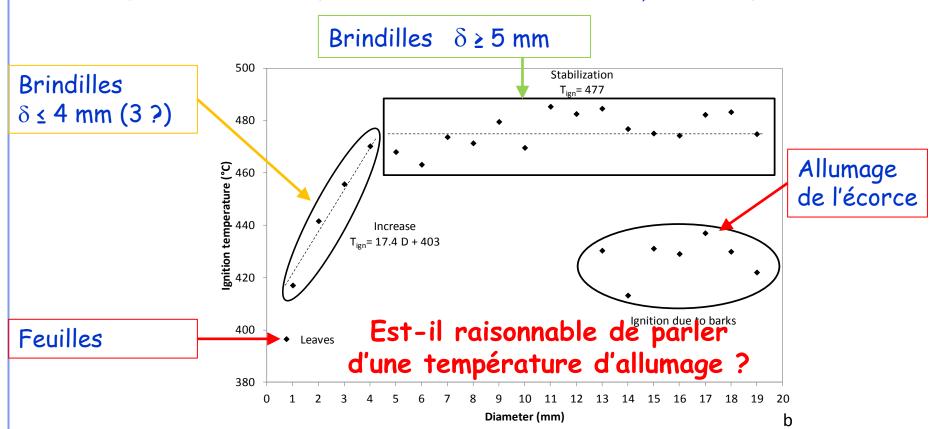
La température de surface à l'allumage dépend du diamètre des particules



Température de surface à l'allumage en fonction du diamètre

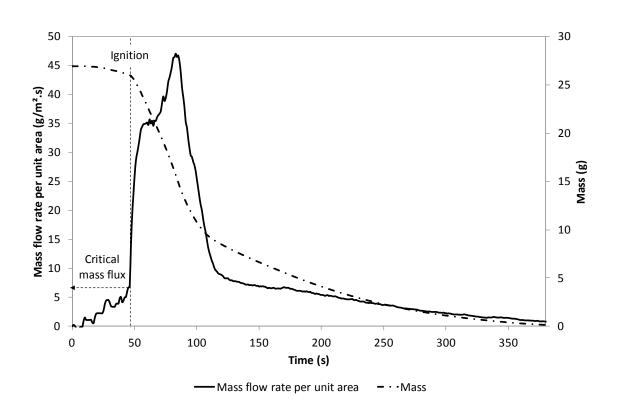
Effets de l'épaisseur caractéristique sur la température d'allumage

Les moyennes des températures d'allumage _____ 4 comportements



Température moyenne de surface à l'allumage en fonction du diamètre

Effets de l'épaisseur caractéristique sur le débit d'allumage

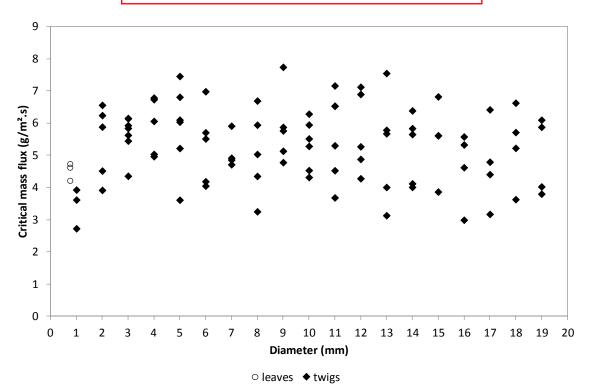


Débit massique à l'allumage pour les brindilles de diamètre 5 mm

Effets de l'épaisseur caractéristique sur le débit d'allumage

Le débit massique à l'allumage « semble constant »

$$\dot{m}'' = 5.3 \pm 1.1 \ g/(m^2 s)$$



Débit massique à l'allumage en fonction du diamètre

Plan de la présentation

Introduction générale sur les incendies de végétation

Approche phénoménologique du rôle de la végétation

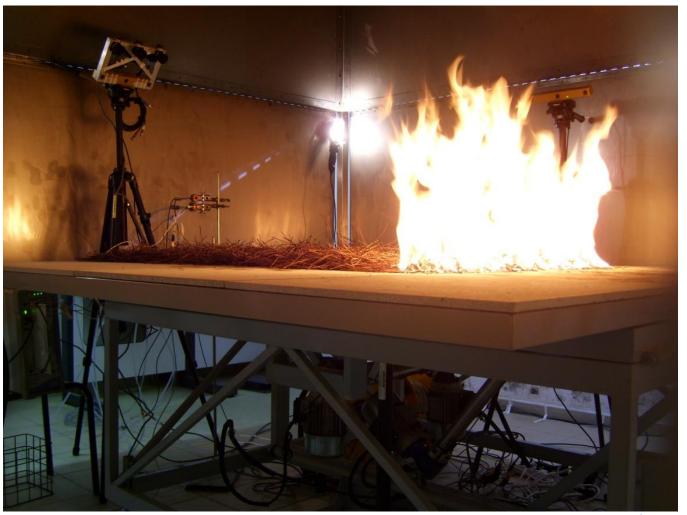
Caractérisation et modélisation de la végétation

Réaction au feu des particules végétales

Etude du comportement au feu d'une litière

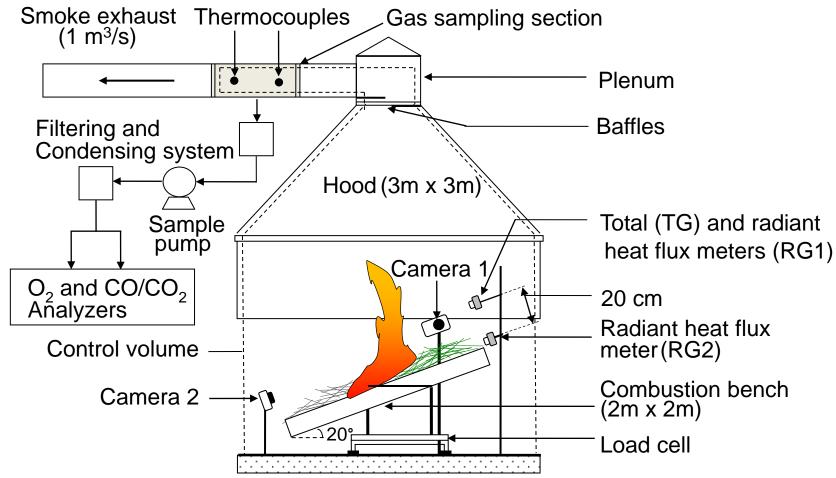
Conclusion

Approche expérimentale



Litière $(1 \text{ m} \times 2 \text{ m})$; Charges $0.6, 0.9, 1.2 \text{ kg/m}^2$

Approche expérimentale



Géométrie du front de feu Données thermodynamiques Vitesse, longueur de flamme, inclinaison, ...

HRR, puissance convective, masse, ...

Principaux résultats pour une charge de 0.9 kg/m²

- Propagation à plat
 Forme du front quasi-linéaire
 Longueur des flammes ≈ 44 cm
 Flammes inclinées vers l'arrière ≈ 14.1°
- Propagation sur une pente de 20°
 Forme du front en V
 L_h représente 28 % du front
 Flammes inclinées vers l'avant ≈ 5.5°
 Longueur des flammes ≈ 70.4 cm
 Les flammes les plus courtes sont sur les Flancs, inclinées en vers la surface brulée

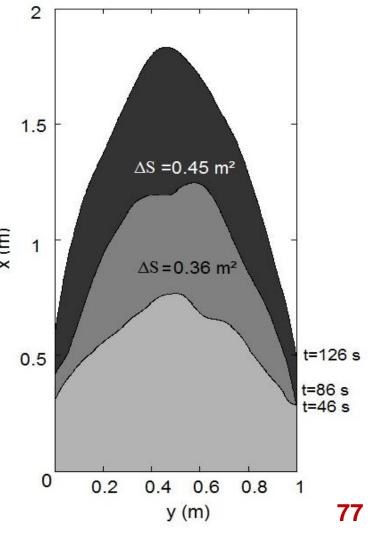




Principaux résultats pour une charge de 0.9 kg/m²

Propagation à plat
 HRR quasi-constant ≈ 87 kW
 Vitesse constante ≈ 5 mm/s

Propagation sur une pente de 20°€
 Vitesse constante ≈ 15 mm/s
 HRR croissant
 HRR courte période stationnaire
 Moyenne Pics de HRR ≈ 290 kW



Modèle détaillé

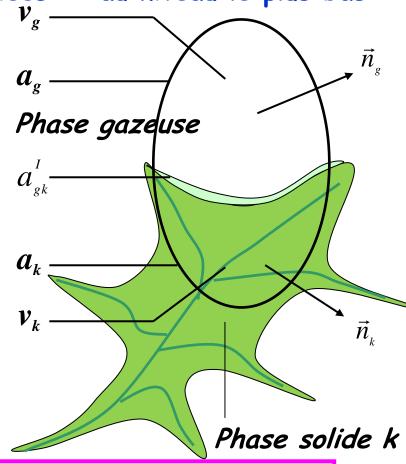
On écrit les équations ponctuelles associées « au niveau le plus bas »

Ex: conservation de la masse

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

Taux de gazeification dans le solide

Masse échangée par le gaz



Masse perdue par le solide : gazeification et régression de surface

Modèle détaillé

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

Exiconservation de la masse

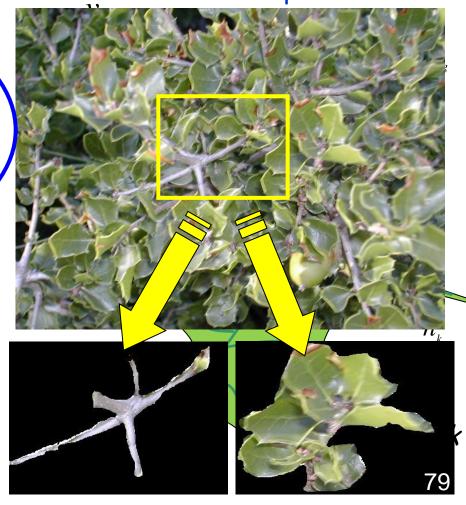
conservation des espèces

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
- équations globales



Modèle détaillé

On écrit les équations moyennées « à un niveau plus haut » Conservation des espèces pour le solide de volume V_k dans V

$$\frac{d\left(\alpha_{k}\rho_{k}Y_{k}^{H_{2}O}\right)}{dt} = -\dot{M}_{k}^{H_{2}O} \quad \text{Dessication}$$

$$\frac{d\left(\alpha_{k}\rho_{k}Y_{k}^{CO}\right)}{dt} = -v_{CO}\dot{M}_{k}^{pr} \quad \text{Gazeification}$$

$$\frac{d\left(\alpha_{k}\rho_{k}Y_{k}^{CO}\right)}{dt} = v_{Char}\dot{M}_{k}^{pr} - \dot{M}_{k}^{Char}$$

$$\frac{d\left(\alpha_{k}\rho_{k}Y_{k}^{Char}\right)}{dt} = v_{Char}\dot{M}_{k}^{pr} - \dot{M}_{k}^{Char}$$

$$\frac{Combustion des RC}{}$$

Besoins : compacité $\alpha_{k} = \frac{V_{k}}{V}$ teneur en eau, modèle de dégradation



Modèle détaillé

On écrit les équations moyennées « à un niveau plus haut » Conservation de l'énergie pour le solide de volume V_k dans V_k

$$\alpha_k \rho_k C_{pk} \frac{dT_k}{dt} = Q_k + R_k - \sum_{i=1}^n \dot{M}_k^i h_{ki}$$

$$Q_k = \alpha_k \sigma_k H_k (T_g - T_k) \qquad R_k = \frac{\alpha_k \sigma_k}{4} (J - 4\sigma_B T_k^4)$$

On retrouve le RSV σ_k

 H_k est un paramètre de transfert convectif J est le rayonnement incident obtenu à partir de l'ETR (luminance) \dot{M}_k^i est la loi de dégradation de l'espèce gazeuse i issue de la phase k

Modèle détaillé

On écrit les équations moyennées « à un niveau plus haut » Equation de transfert radiatif

$$\frac{d\alpha_{g}I}{ds} = \alpha_{g}\sigma_{a}\left(\frac{\sigma T^{4}}{\pi} - I\right) + \sum_{k}\left[\frac{\alpha_{k}\sigma_{k}}{4}\left(\frac{\sigma T_{k}^{4}}{\pi} - I\right)\right]_{k}$$

$$Gaz + suies \qquad Phase solide$$

- $\succ \sigma_a$ Coefficient d'absorption du mélange gaz+suies
- $\rightarrow \frac{\alpha_k \sigma_k}{4}$ Coefficient d'absorption de la végétation (phase k)

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

Simulation de l'approche détaillée de modélisation

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

$$\Delta_{maillage} \approx \delta_R/5$$
 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	≈ 0,01

On a des contraintes de maillage fortes pour de grands domaines

Simulation de l'approche détaillée de modélisation

Contraintes liées au "calcul de la combustion"? $D_a = \tau_T / \tau_C$?

L'échelle de temps de la turbulence est donnée par τ_T = l_T/u u est la fluctuation des vitesses et l_T l'échelle intégrale de la turbulence. $l_T \approx 0.1$ à 0.3 m.

$$l_{T} = \left(\frac{\dot{q}'}{\rho_{\infty}c_{p}T_{\infty}\sqrt{g}}\right)^{\frac{2}{3}}$$

Dans le panache $U\approx$ 2 à 3 ms⁻¹ et l'intensité de la turbulence de l'ordre de 30%, $u\approx$ 0.6 à 0.9 ms⁻¹. $\tau_{T,min}\approx$ 0.1/0.9 \approx 0,1 s

L'ordre de grandeur du temps chimique de réaction $\tau_{\mathcal{C}} \approx 10^{-4} \mathrm{s}$

$$D_a = 1000 >> 1$$

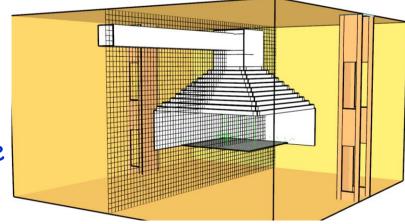
Le taux de réaction est contrôlé par le processus de mélange Inutile de calculer la cinétique chimique.

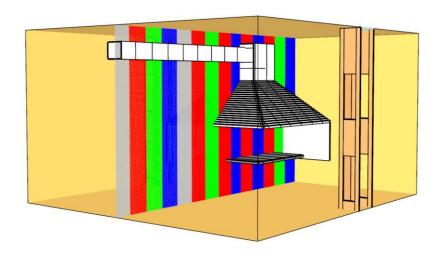
84

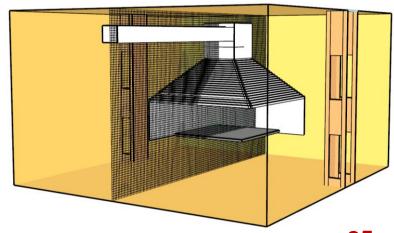
Simulation de l'approche détaillée de modélisation

Domaine de calcul, taille des mailles

- Taille du domaine (le labo?)
- Analyser les effets de la hôte
- Analyse de sensibilité au maillage $\delta_{\rm x}$ = 10 cm, 5 cm et 2.5 cm



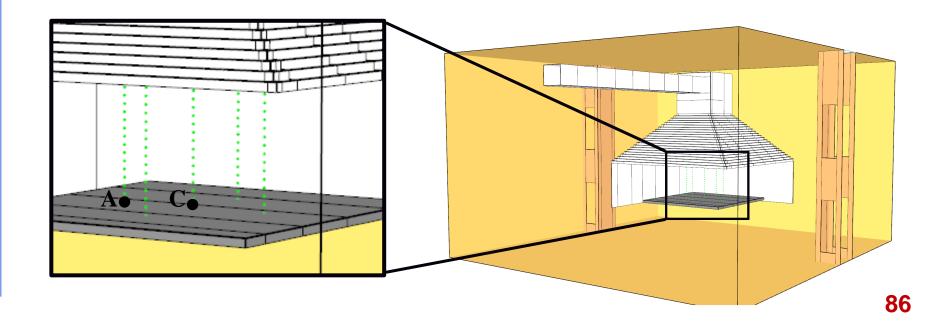




Simulation de l'approche détaillée de modélisation

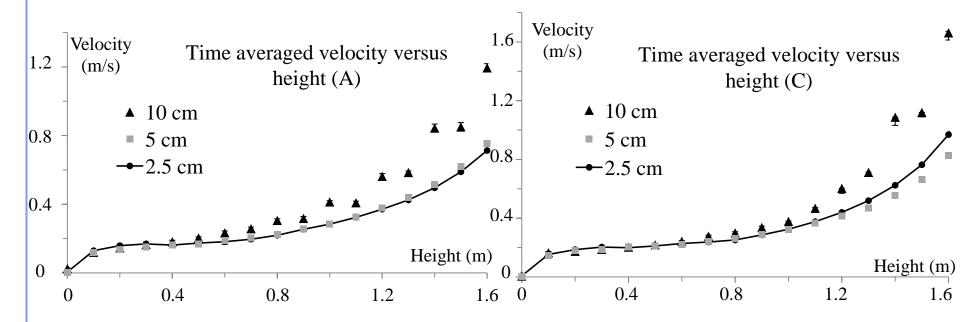
Domaine de calcul, taille des mailles

- Plusieurs critères de comparaison
- Vitesses au dessus du banc
- Confrontation numérique/expérience



Simulation de l'approche détaillée de modélisation

Vitesses au dessus du banc



Nous observons que la vitesse au dessus du banc est faible.
 (inférieure à 0.35 m/s pour une hauteur de 1 m)

L'effet de l'écoulement sur le feu est négligéable

Simulation de l'approche détaillée de modélisation

Vitesses au dessus du banc

- Des mailles de 5 cm suffiraient pour modéliser l'écoulement
- Mais pour la combustion ?

$$z_{c,line} = \left(\frac{\dot{q}'}{\rho_{\infty}c_{p}T_{\infty}\sqrt{g}}\right)^{\frac{2}{3}}$$

et	$4 \le \frac{z_{c,line}}{\delta_x} \le 16$
----	--

Charge	δ_{xmin}	δ_{xmax}
(Kg/m ²)	(cm)	(cm)
0.6	0.7	2.8
0.9	1.1	4.6
1.2	1.5	6.0

⇒ La taille de maille dépend de la puissance donc de la charge

Simulation de l'approche détaillée de modélisation

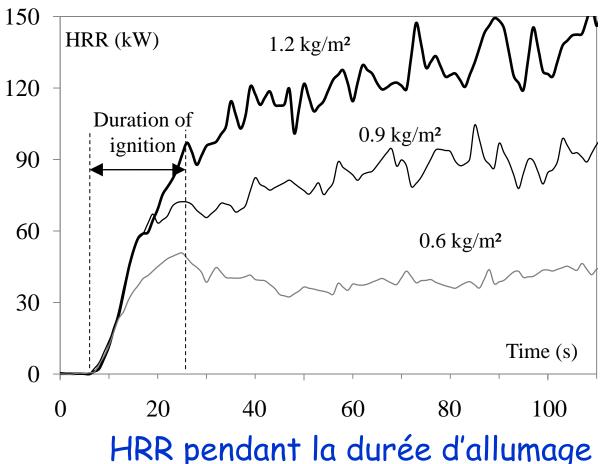
Calibration de l'allumage numérique

- · L'allumage a été réalisé avec 6 ml d'ethanol
- La durée de l'allumage a été déterminée par le temps de résidence de la flamme ≈ 24 sec
- La masse d'aiguille impliquée dans l'allumage a été déterminée pour chaque charge

$$m_{needles} = \frac{\int\limits_{0}^{t_{ig}} \dot{q} \, dt - V_{ethanol} \times \Delta H_{c,ethanol}}{\Delta H_{c,needles}}$$

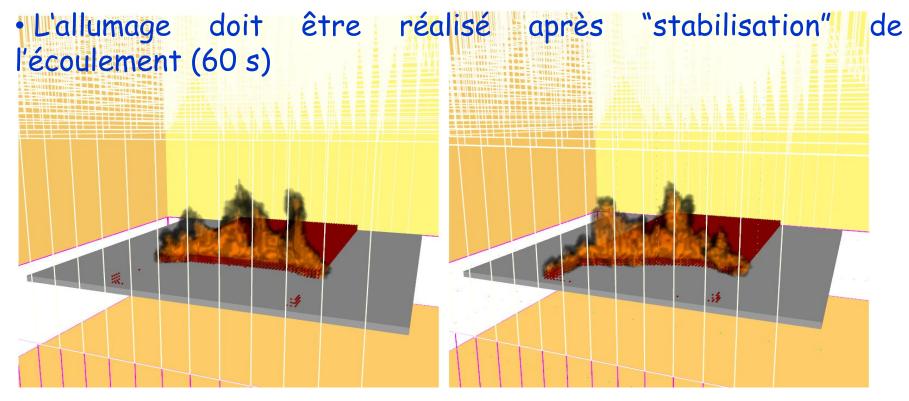
Simulation de l'approche détaillée de modélisation

Calibration de l'allumage numérique



Simulation de l'approche détaillée de modélisation

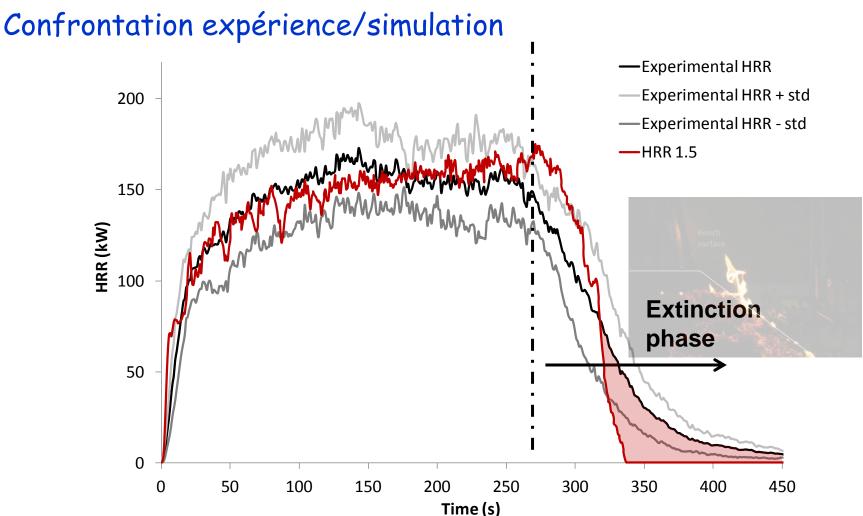
Calibration de l'allumage numérique



Bon allumage après 60 s

Mauvais allumage avant 60 s

Simulation de l'approche détaillée de modélisation



Plan de la présentation

Introduction générale sur les incendies de végétation

Approche phénoménologique du rôle de la végétation

Caractérisation et modélisation de la végétation

Réaction au feu des particules végétales

Etude du comportement au feu d'une litière

Conclusion

Conclusion

Des avancées considérables en France ces 10 dernières années

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

Les mécanismes fins ne sont pas suffisamment explorés

Les approches expérimentales en laboratoire demeurent incontournables

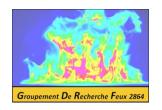
Le rapprochement avec les chercheurs sur les feux confinés à beaucoup apporté (outils expérimentaux)

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















Feux de végétation 1 Comportement du feu

Paul-Antoine Santoni*, Bernard Porterie**

* Université de Corse Pascal Paoli UMR CNRS 6134 SPE

**Aix-Marseille Université
IUSTI UMR CNRS 7343/ETiC





