

# Modélisation des incendies dans les écosystèmes

**Christelle Hély**



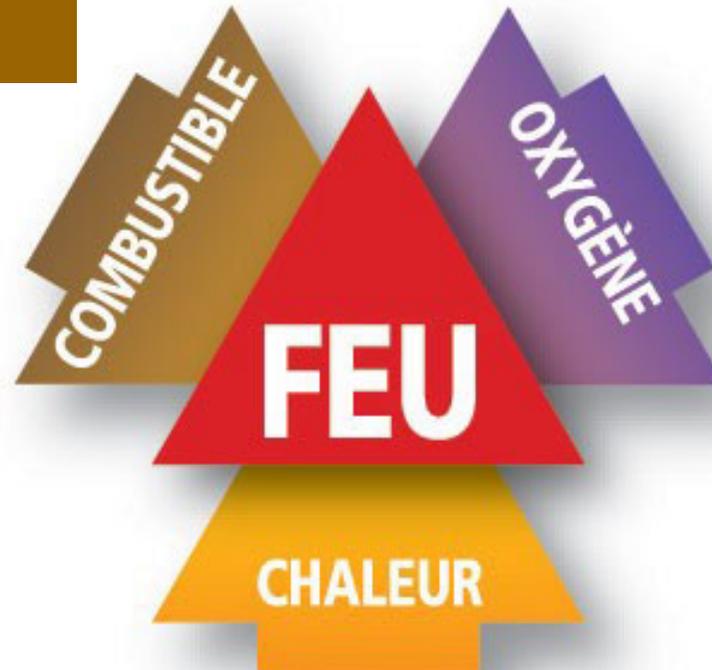
# Plan de l'exposé

1. Quelques définitions
2. Le risque de départ du feu
3. Le comportement du feu
4. Le régime du feu et les types d'incendies
5. Les incendies dans le DGVM LPJ-GUESS

# 1.A. Le triangle du feu

**Combustible**  
gaz, essence  
Bois

**Comburant**  
( $O_2$ )  
(17% minimum,  
air 21%)



**Énergie d'activation**  
(flamme, étincelle, foudre, chaleur)

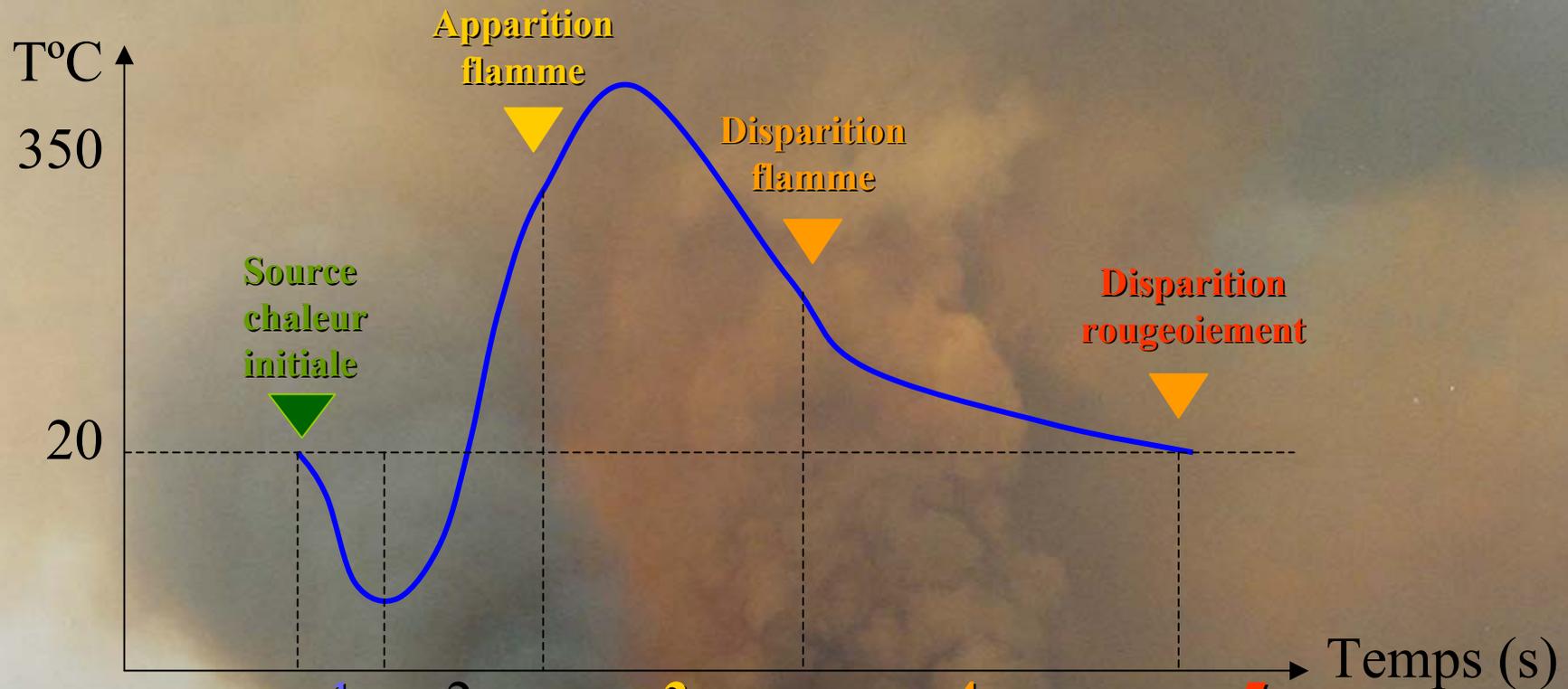
# 1.B. La combustion

1. Oxydation exothermique : l'énergie emmagasinée lors de la photosynthèse est émise sous forme de chaleur



2. La combustion est composée de 5 phases successives

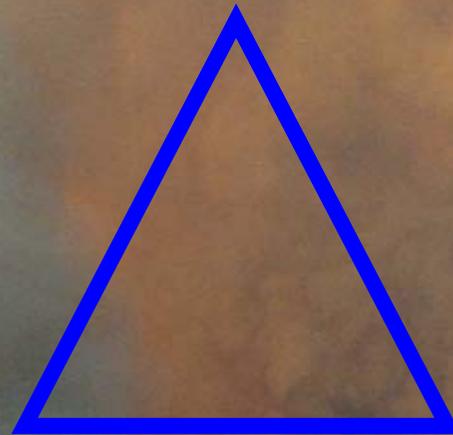
# 1.B. La combustion



1	2	3	4	5
Réaction endothermique	Échauffe	<b>Flamme</b>	Énergie affaiblie	<b>Fin combustion</b>
Évaporation humidité	Pyrolyse cellulose lignine + composés volatiles	<b>Dégage Énergie chaleur</b>	Rougeoiement	
⇒		<b>Combustion efficace</b>	<b>Combustion Incomplète</b>	
Moisture of extinction		max CO <sub>2</sub> émis	CO <sub>2</sub> + CO + CH <sub>4</sub> + ...	

# 1.C. Les facteurs de l'environnement du feu

Climat/Météo



Végétation

Topographie

# 1.C. Les facteurs de l'environnement du feu

## 1. Topographie

- Exposition
- Pente

## 2. Climat / Météorologie

- Vent
- Température,
- Humidité relative,
- Précipitations

## 3. Végétation

- Quantité (charge)
- Qualité (composition et état de dessiccation)
- Arrangement spatial

affectent la dessiccation du combustible (sol et végétation)



# Plan de l'exposé

1. Quelques définitions
2. **Le risque de départ du feu**
3. Le comportement du feu
4. Le régime du feu et les types d'incendies
5. Les incendies dans le DGVM LPJ-GUESS

# 2.A. La modélisation du risque de départ du feu

1. Probabilité de départ d'un feu
2. Début de la « saison des feux »
  - Dernière pluie hivernale et début de l'augmentation des températures (région Méditerranéenne)
  - Quelques jours après la fonte des dernières traces de neige (région boréale)
  - Dernière pluie de la saison des pluies (région tropicale)
3. Un combustible de référence (matière, densité)
4. Influence de la météo des jours précédents et du jour même
5. Suivi de l'humidité du combustible
6. Tentatives d'allumages



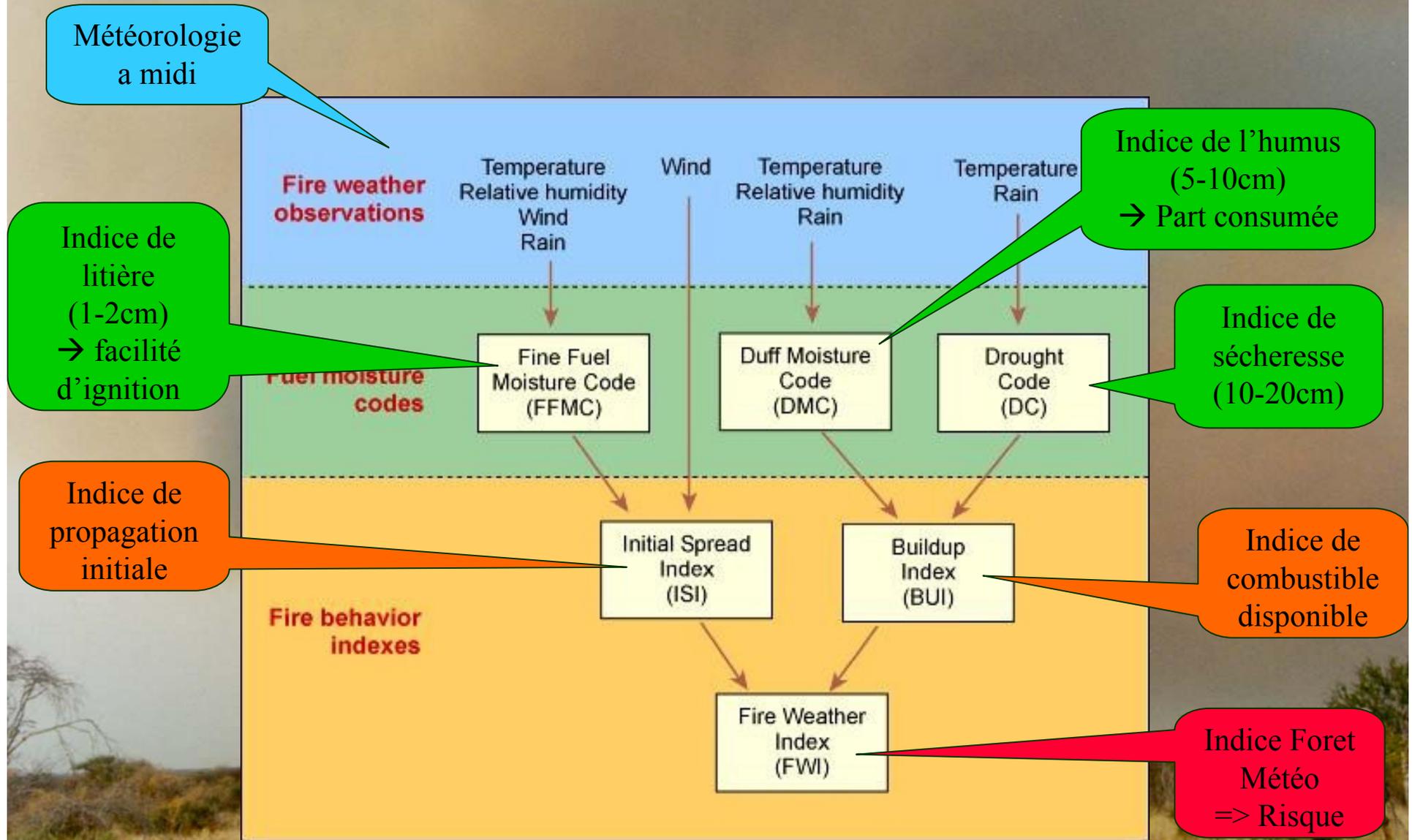
# 2.B. La méthode Canadienne de calcul du risque de départ de feu

Fire Weather Index (FWI)



Utilise au Canada, Florida, New Zeland, Fiji  
CEREGE – FR ECCOREV, 20 mai 2008

# 2.B.1. Structure du FWI



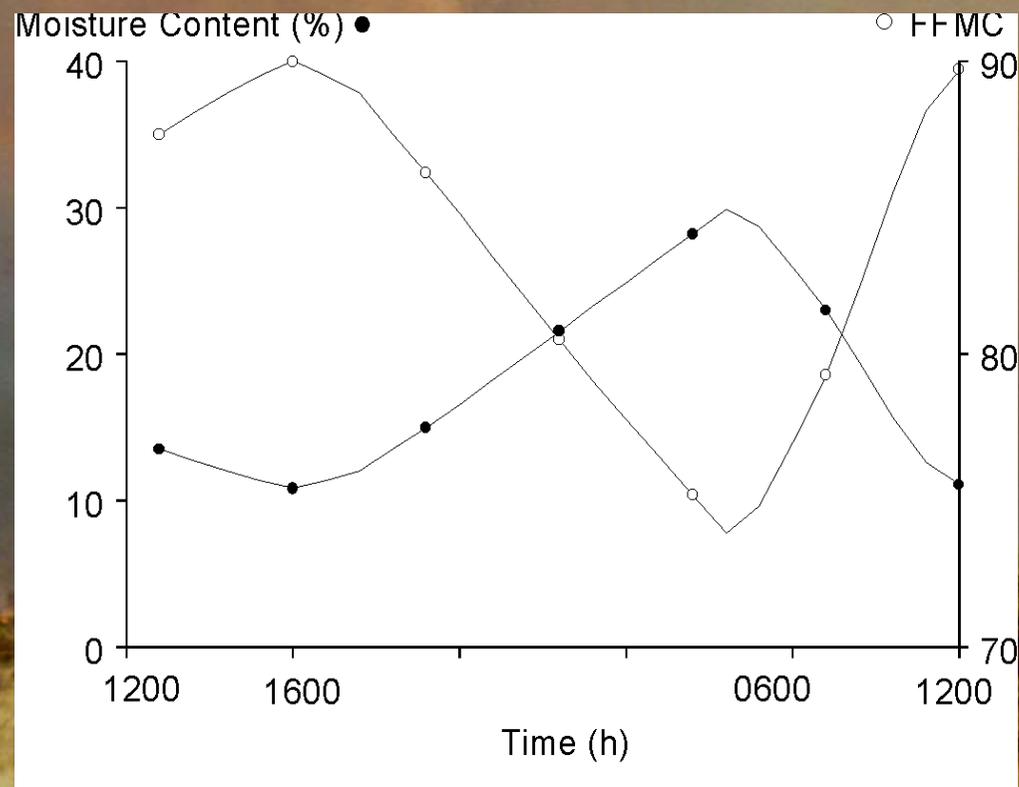
# FFMC Scale



1. FFMC has scale of 0-99
2. Fires seldom start when  $FFMC < 70$
3. Fire starts increase dramatically when FFMC reaches 86-89
4.  $FFMC > 90$  is explosive burning conditions

# Diurnal FFMC Changes

1. 12:00 weather used for 16:00 forecast
2. can make hourly FFMC calculations with hourly weather data



# Underlying Principle for FWI

Each of the behavior indices corresponds to a variable in Byram's line fire intensity equation:

$$I = HWR$$

where

FWI estimates:  $I$  = energy output per unit length of fire front (kw/m)

BUI estimates:  $W$  = weight of available fuel (kg/m<sup>2</sup>)

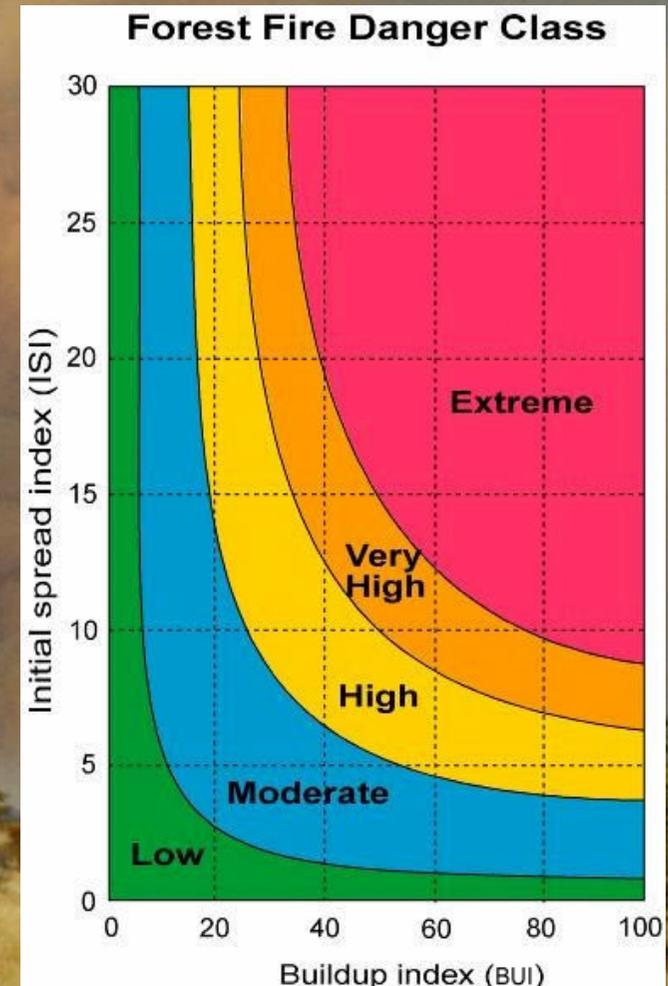
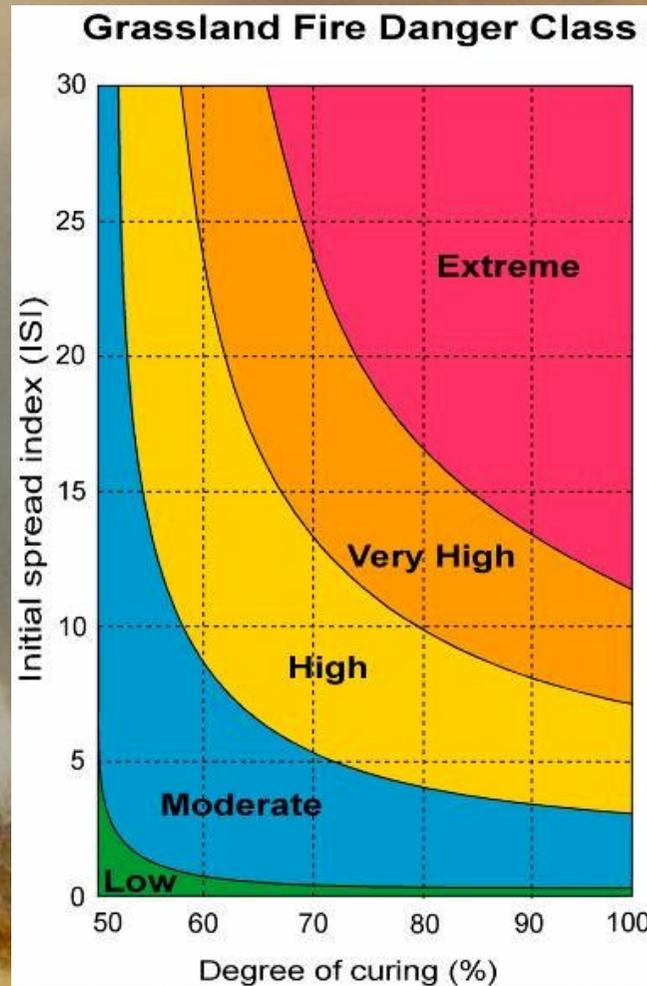
ISI estimates:  $R$  = rate of spread (m/min)

and

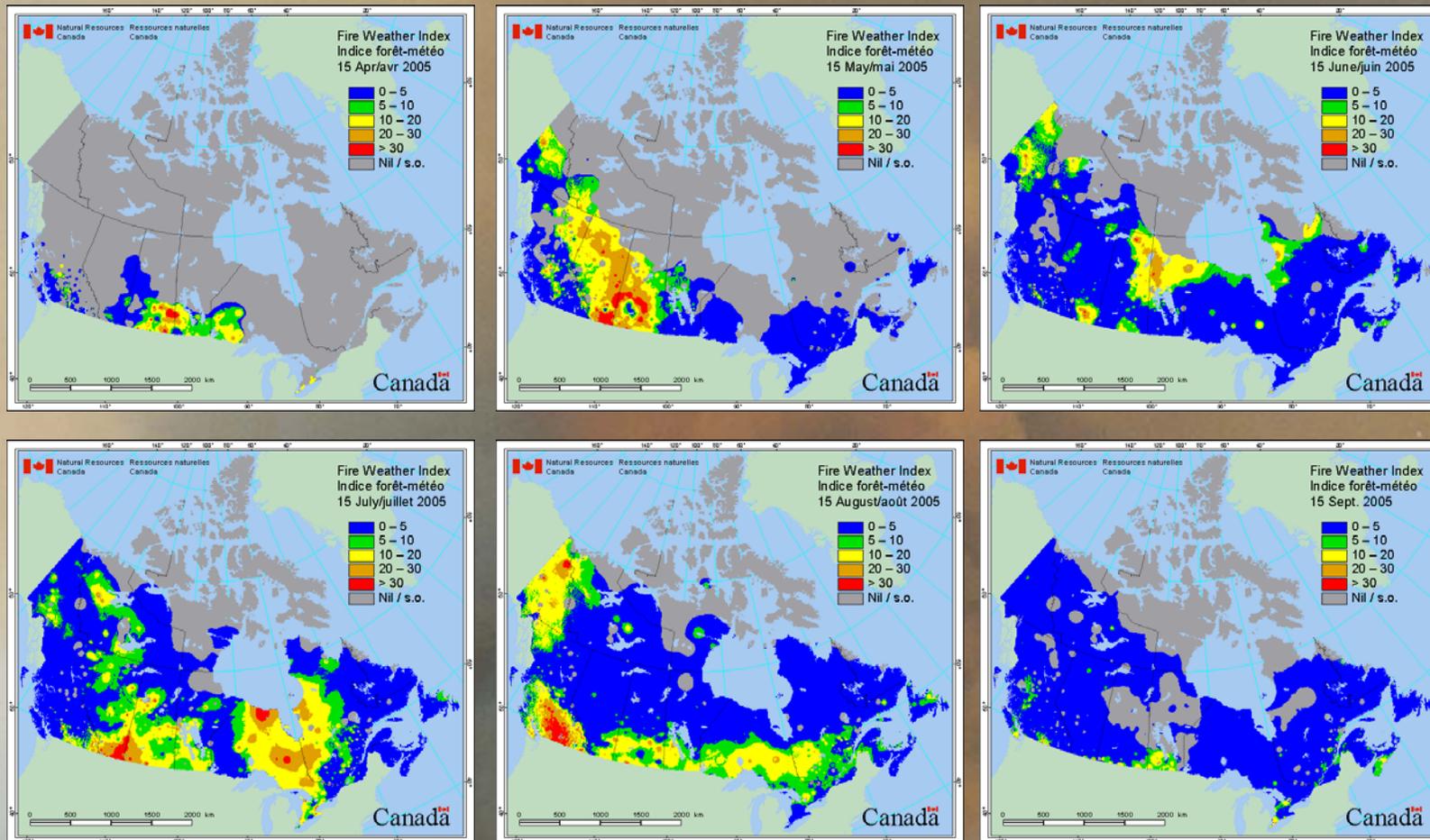
$H$  = heat of combustion, (considered constant)

# 2.B.2. Calibration du ISI

Ici pour La Nouvelle Zélande



# 2.B.3. Utilisation du FWI



Évolution du FWI pour la saison 2003

# Plan de l'exposé

1. Quelques définitions
2. Le risque de départ du feu
3. **Le comportement du feu**
4. Le régime du feu et les types d'incendies
5. Les incendies dans le DGVM LPJ-GUESS

# 3.A.Introduction

- Un incendie peut être considéré comme une suite d'ignitions successives
- Le comportement du feu représente l'évolution spatiale et temporelle du feu
- Le comportement du feu est influencé par l'état de la végétation, la topographie, et la météorologie



# 3.A. Les facteurs

1. La végétation
2. La topographie
3. La météorologie



# 3.A.1. La végétation

## 1. Les types de combustibles

- mort *versus* vivant et couché *versus* dressé

1. la litière et l'humus
2. Les herbacées
3. Les brindilles et les petits buissons  
Les branches et les troncs
4. Le feuillage des arbres



- Classification d'après leur capacité de dessiccation
  - 1H = 1 heure pour perdre 2/3 du poids en eau après saturation
  - 10H = 10 heures pour perdre 2/3 du poids en eau après saturation
  - 100H = 100 heures pour perdre 2/3 du poids en eau après saturation

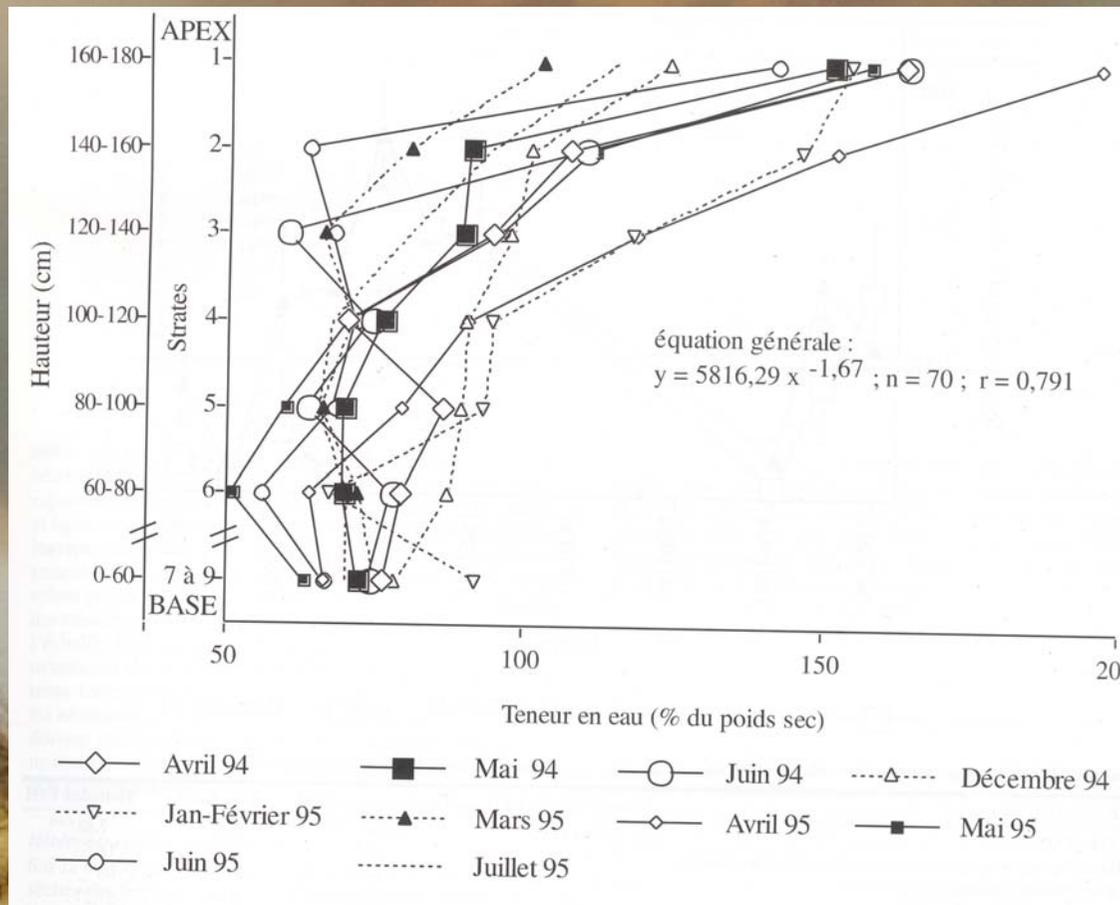
# 3.A.1. La végétation

1. Les types de combustibles
2. La charge des combustibles ( $\text{g}/\text{m}^2$  ou tonnes/ha)



# 3.A.1. La végétation

1. Les types de combustibles
2. La charge des combustibles (g/m<sup>2</sup> ou tonnes/ha)
3. La teneur en eau (% du poids sec)



# 3.A.1. La végétation

1. Les types de combustibles
2. La charge des combustibles ( $\text{g/m}^2$  ou tonnes/ha)
3. La teneur en eau (% du poids sec)
4. **L'arrangement spatial des combustibles**
  - La connectivité horizontale
  - Le continuum vertical



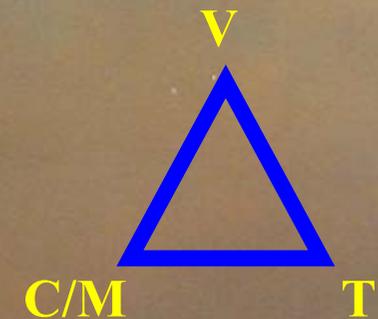
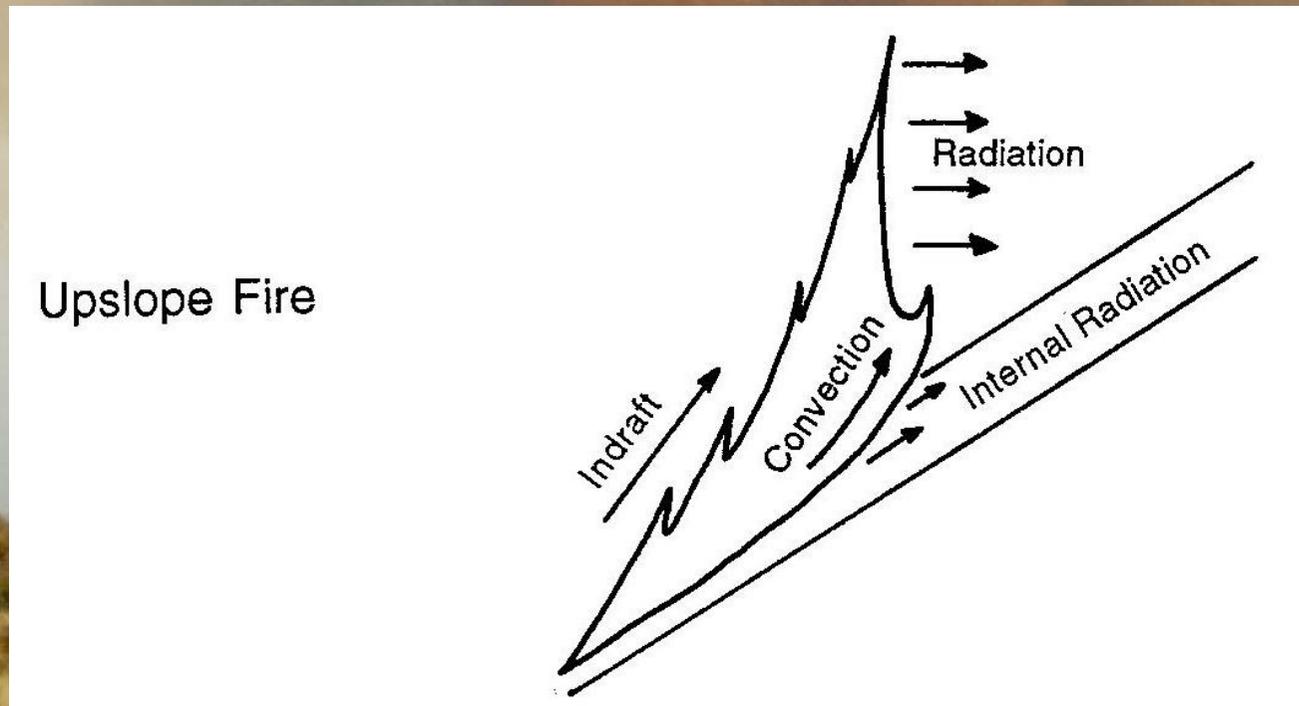
# 3.A.2. La topographie

## 1. L'altitude

- attire les impacts de foudre

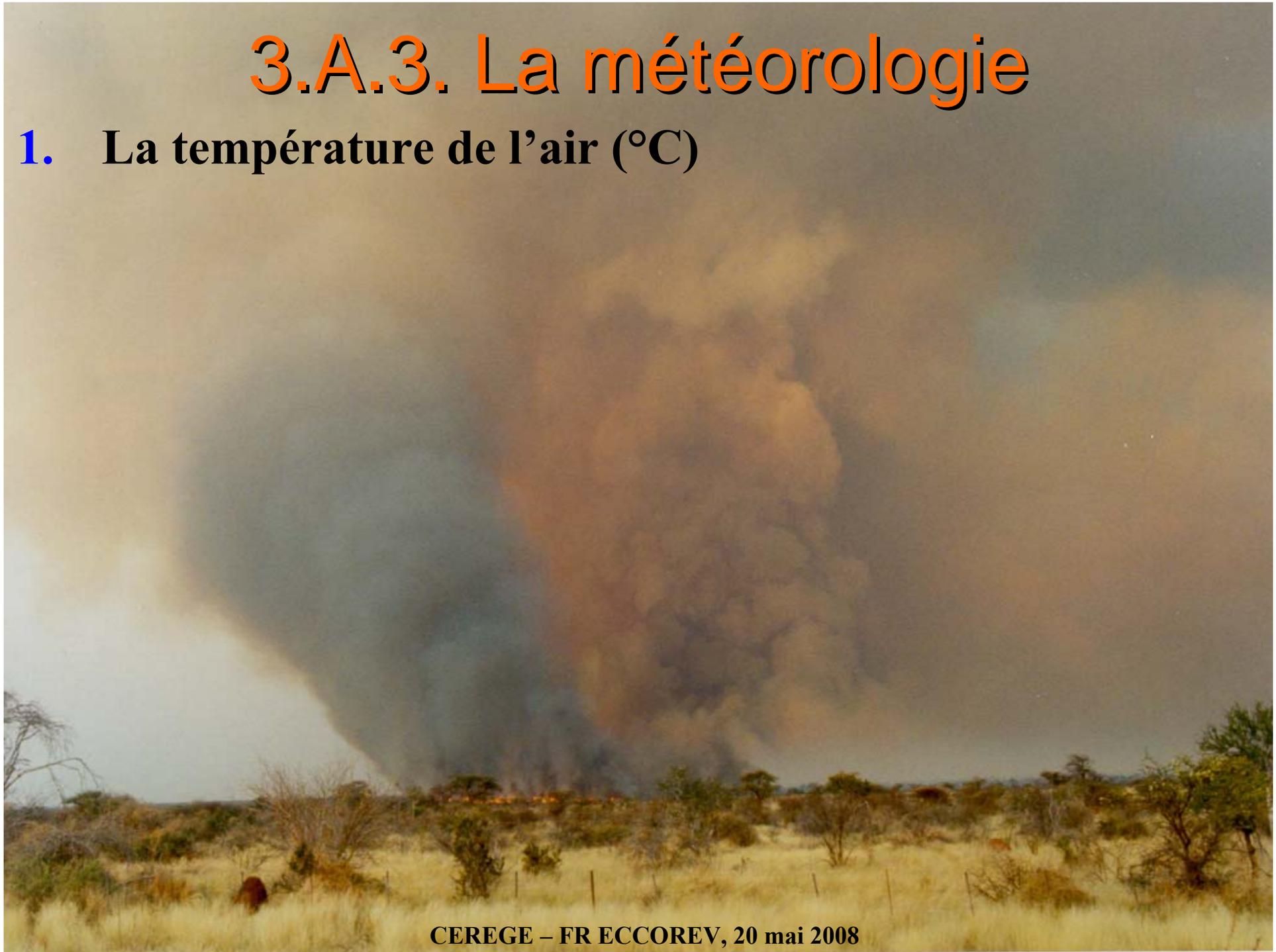
## 2. La pente

- draine donc dessèche en amont
- favorise la propagation vers le haut de pente



# 3.A.3. La météorologie

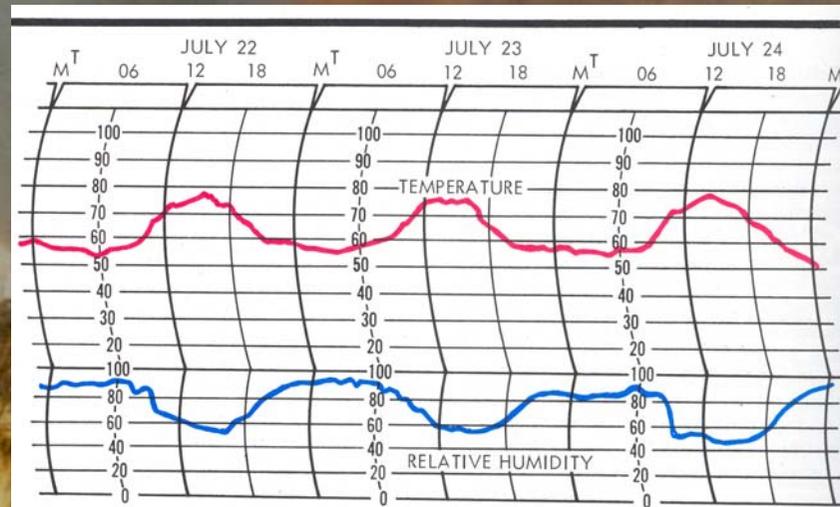
## 1. La température de l'air (°C)



CEREGE – FR ECCOREV, 20 mai 2008

# 3.A.3. La météorologie

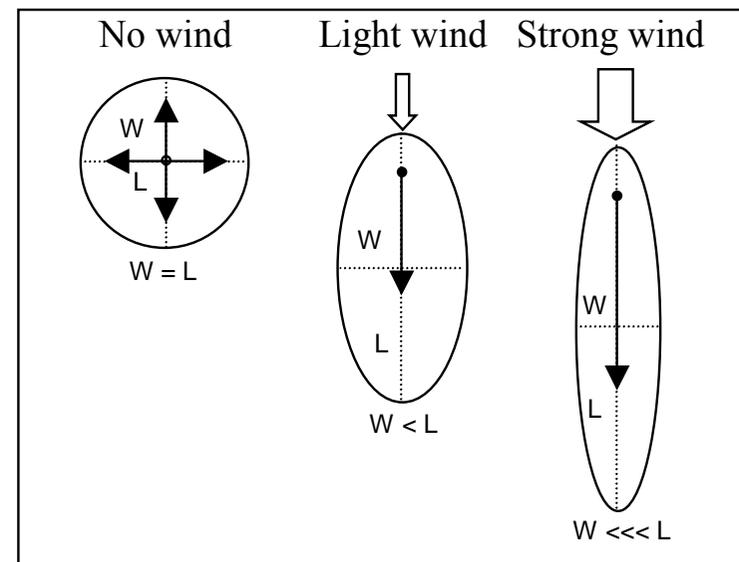
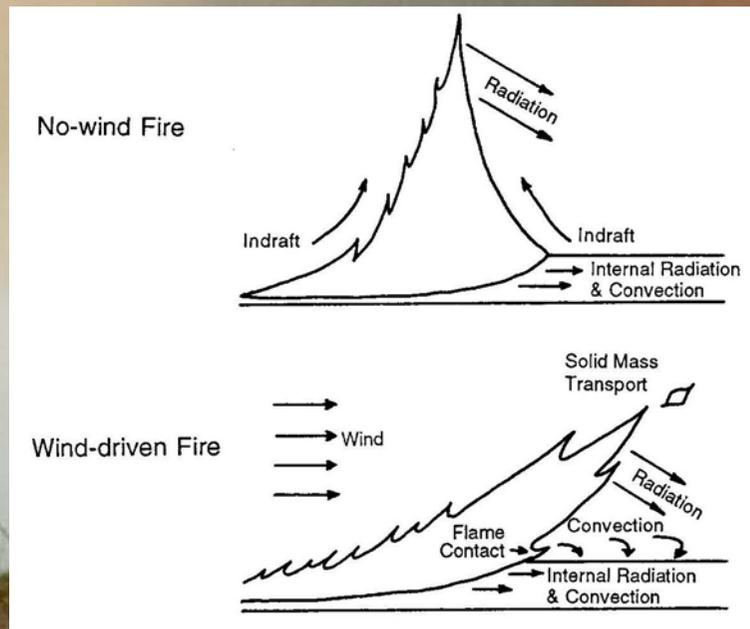
1. La température (°C)
2. L'humidité relative (%)



CEREGE – FR ECCOREV, 20 mai 2008

# 3.A.3. La météorologie

1. La température (°C)
2. L'humidité relative (%)
3. Le vent (m/s ou km/h)



# 3.A.3. La météorologie

1. La température (°C)
2. L'humidité relative (%)
3. Le vent (m/s ou km/h)
4. **Les précipitations (mm/jour)**
  - Elles diminuent le risque de départ de feu
  - Si très faibles (<0.5mm), n'affectent que la couche superficielle de litière et pendant très peu de temps

# 3.A.3. La météorologie

1. La température (°C)
2. L'humidité relative (%)
3. Le vent (m/s ou km/h)
4. Les précipitations (mm/jour)
5. **Les orages accompagnés de foudre**

# 3.B. Les variables du comportement du feu

1. La vitesse de propagation
2. La quantité de combustible consommée
3. L'intensité du front de flamme
4. La hauteur / longueur des flammes
5. La surface brûlée
6. La température

# 3.B. Les variables du comportement du feu

1. La vitesse de propagation
2. La quantité de combustible consommée
3. L'intensité du front de flamme
4. La hauteur / longueur des flammes
5. La surface brûlée
6. La température

Vitesse  
(m/min)  
Intensité  
(kW/m)



Temps depuis allumage (min)

CEREGE – FR ECCOREV, 20 mai 2008

# 3.C. La méthode Canadienne de calcul du comportement du feu

1. Recherche durant les années 70 - Version de 1984
2. Méthode empirique basée sur des données prises pendant les incendies (naturels ou dirigés)
3. Méthode basée sur les relations qui lient les différentes variables du comportement du feu (vitesse, intensité, part consommée....) pour des peuplements forestiers types

# 3.C.1. Présentation des types

## 16 types de peuplements caractéristiques du pays

- 7 types de peuplements conifères purs ou mixtes (C1 a C7)
- 1 type de peuplement décidu avec deux saisons (printemps = pas de feuille et été = canopée feuillue)
- 4 types de peuplements mixtes conifères/décidus avec deux saisons et deux stades de mortalité due aux insectes
- 3 types de peuplements exploites par l'industrie forestière
- 1 type de prairie – herbacées, avec deux saisons

## Description qualitative de leur composition, charge, structure horizontale et verticale (ex C2: épinettes)

- Tapis continu de mousse avec ou sans lichen.
- Buissons très présents, débris ligneux peu ou modérément présents.
- Houppiers des épinettes descendent jusqu'au sol, présence de lichens sur les branches des arbres, écorce plucheuse.
- Densité arborée modérée a élevée



M-1



M-2



M-3



M-4



S-1



S-2



S-3



O-1



C-1



C-2



C-3



C-4



C-5



C-6



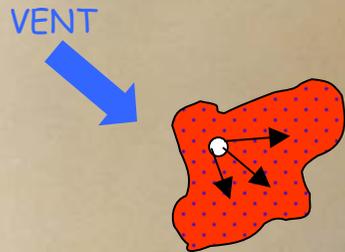
C-7



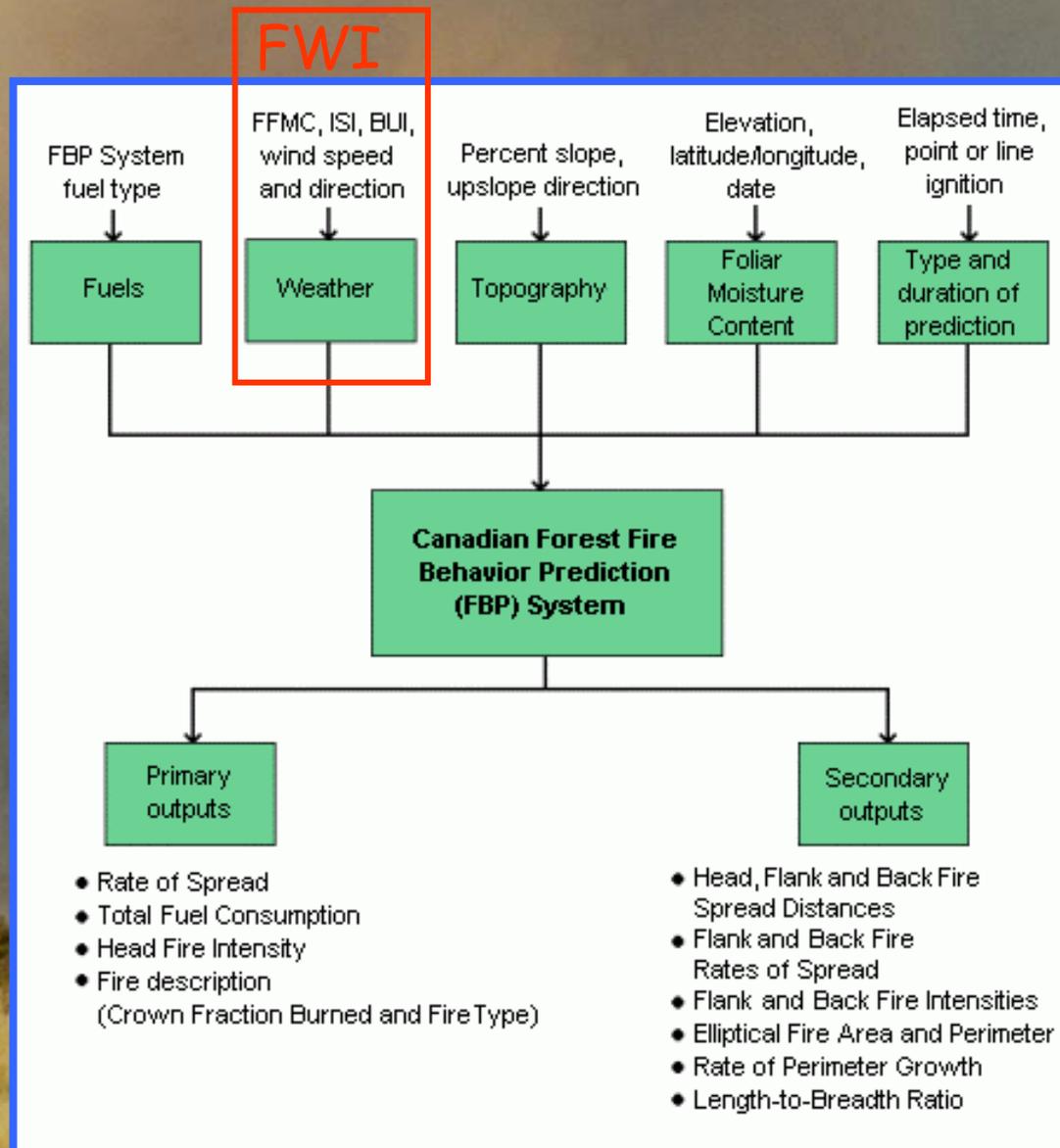
D-1

# 3.C.3. Structure du FBP

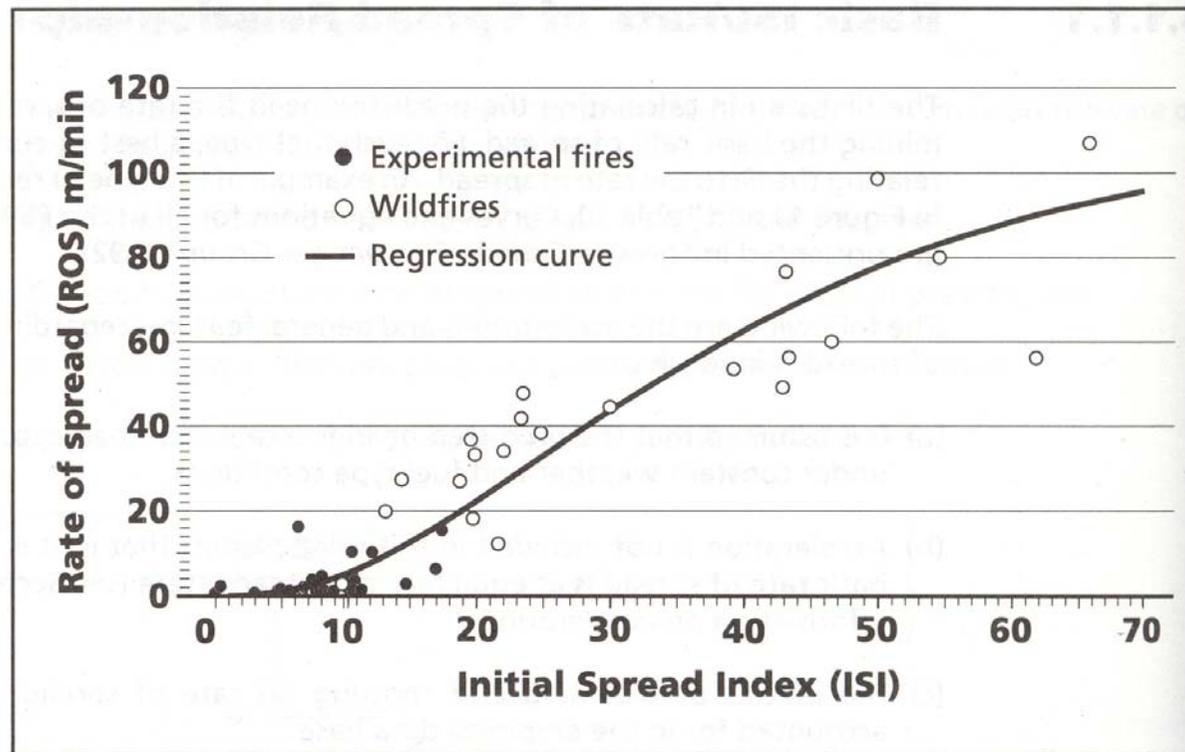
A l'échelle du peuplement



Canadian  
Fire Behavior  
Prediction  
system  
(FBP)

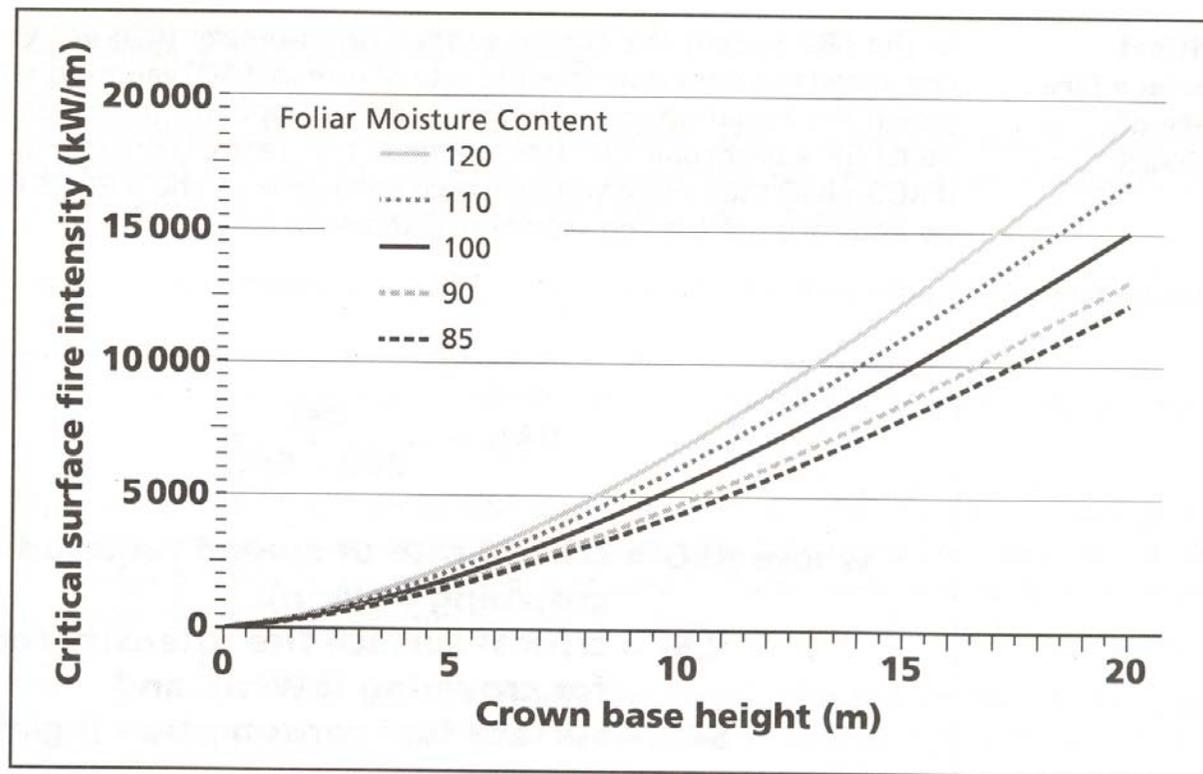


# 3.C.3. Exemples de relations



**Figure 11.** Basic rate of spread curve for the Mature Jack or Lodgepole Pine (C-3) fuel type.

# 3.C.3. Exemples de relations



**Figure 33.** Selected critical surface fire intensity (CSI) values based on crown base height (CBH) and foliar moisture content (FMC).

# 3.C.3. Exemples de relations

## 1. Part consommée dans le peuplement C2

- $SFC = 5 * [1 - e^{(-0.0115 * BUI)}]$

## 2. Vitesse de propagation pour C2

- $ROS = RSI * BE$

- $RSI = a * [1 - e^{(-b * ISI)}]^c$

- Avec  $a=110$  ;  $b=0.0282$  ;  $c=1.5$

- $BE = e^{[50 * \ln(q) * (1/BUI - 1/BUI_0)]}$

- Avec  $q=0.7$  ;  $BUI_0=64$

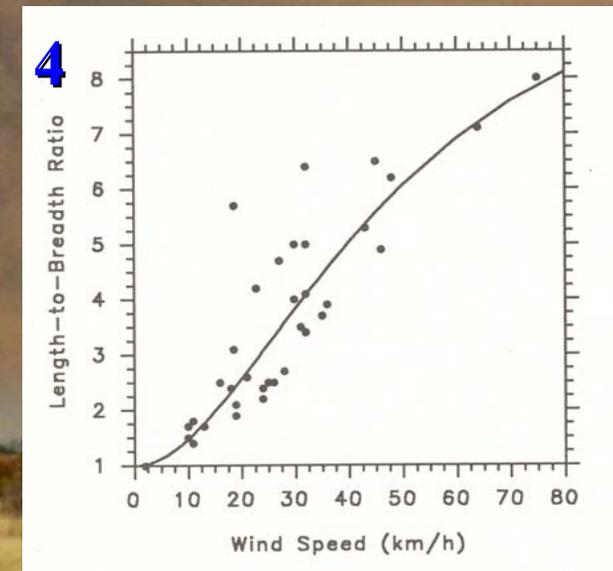
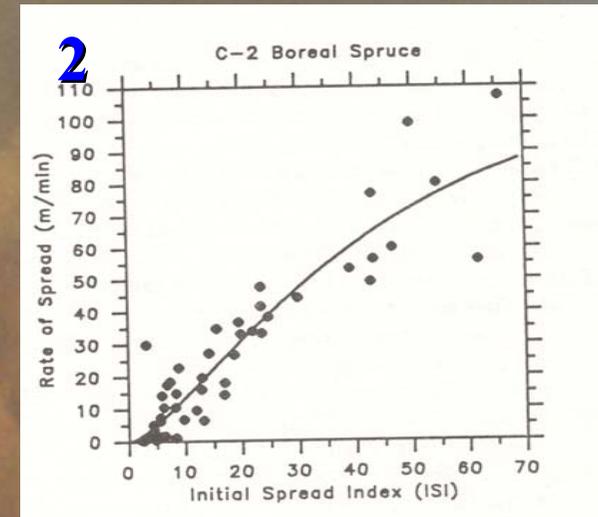
## 3. Intensité

- $I = SFC * H * ROS$

- Avec  $H=18000 \text{kJ/kg}$

## 4. Surface brûlée

- $Surface = \frac{\pi}{10\ 000} \times Dist.tot. \times \left(\frac{Lo}{la}\right)$



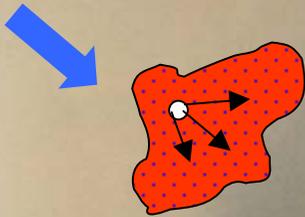
# 3.C.3. Comparaisons **simulations** versus **observations**

Variable du comportement du feu	Site 1 Mixte Conifère	Site 2 Conifère	Site 3 Mixte Conifère
Vitesse de propagation (m/min)	<b>8.84</b>	<b>12.86</b>	<b>3.72</b>
	<b>8.51</b>	<b>11.65</b>	<b>7.17</b>
Surface brûlée (ha)	<b>1</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
	<b>1.04</b>	<b>0.99</b>	<b>4.94</b>

# 3.C.2 La structure de la méthode Canadienne

A l'échelle du peuplement

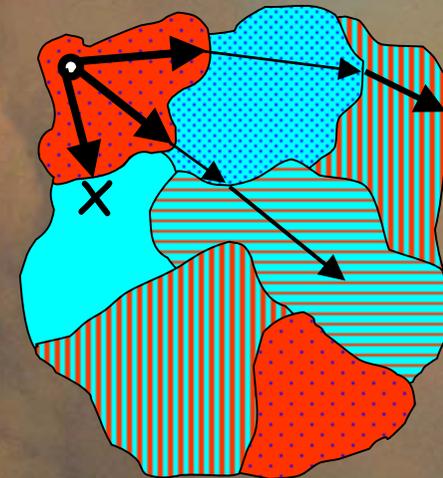
VENT



Canadian  
Fire Behavior  
Prediction  
system  
(FBP)

A l'échelle du paysage

VENT



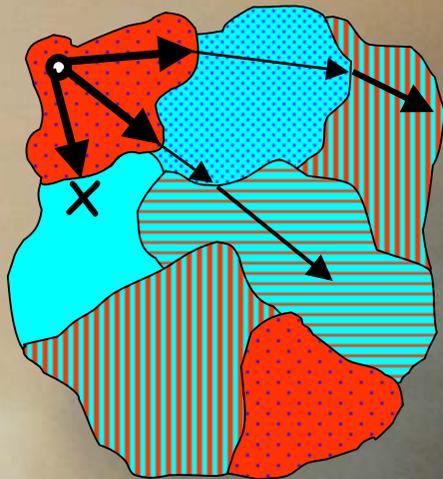
Canadian fire  
Growth model  
(Prometheus)

Approches  
empiriques

# 3.C.4. Structure de Prometheus

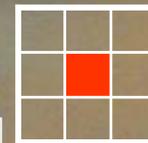
A l'échelle du paysage

VENT



Calculs du FWI sur la mosaïque et des seuils d'extinction ( $DMC < 20$ )

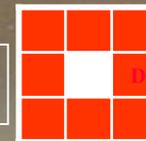
Pixel  $(i,j)$  d'ignition dans la mosaïque  $(n,m)$



Calculs des variables du FBP au pixel  $(i,j)$

Si surface brûlée en 24 heures > taille pixel

8 Pixels voisins



Calculs des seuils d'extinction si  $DMC > 20$

# 3.C.4. Structure de Prometheus

Objectif: Analyser l'effet des changements de la composition de la mosaïque sur la taille des feux en forêt boréale

## Scénarios de mosaïques

- Dominance Feuillus
- Mixte
- Dominance Conifères

## Climat actuel

(normales climatiques)

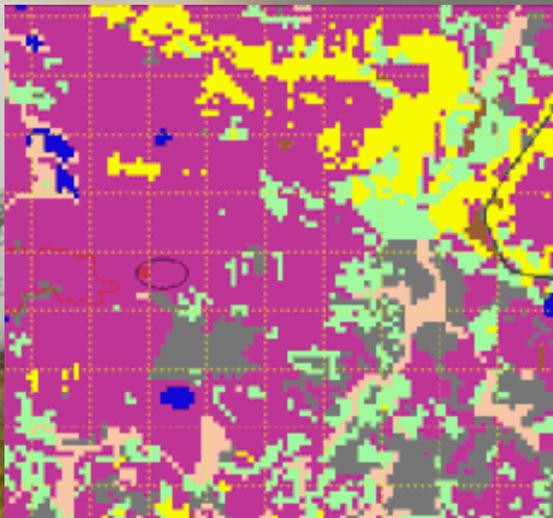
300 points d'ignition

## Système Prometheus

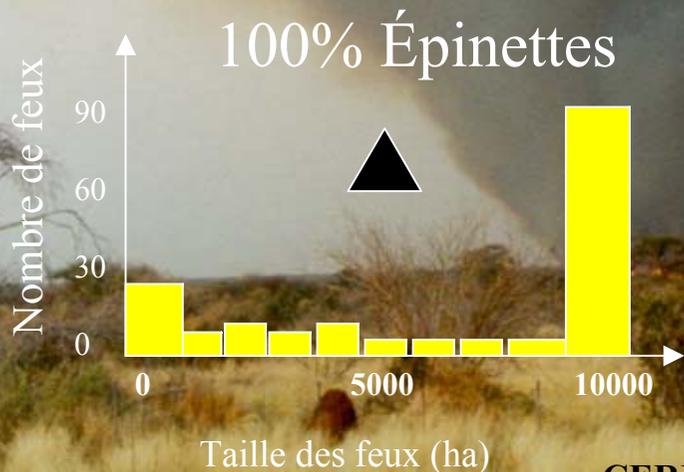
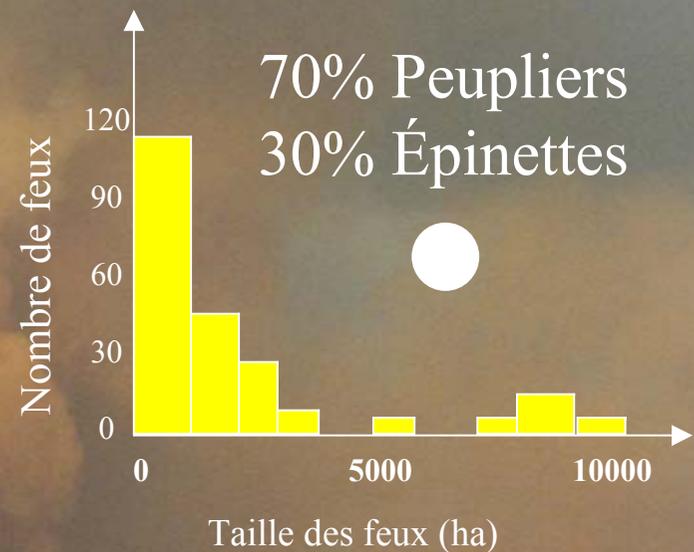
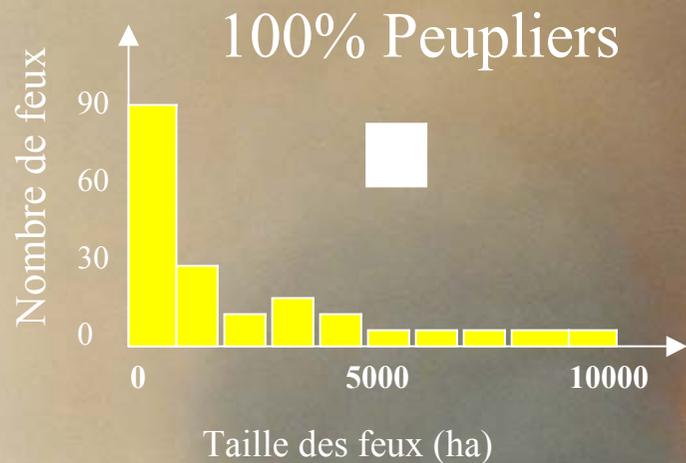
Surface brûlée par feu

Statistiques mosaïques

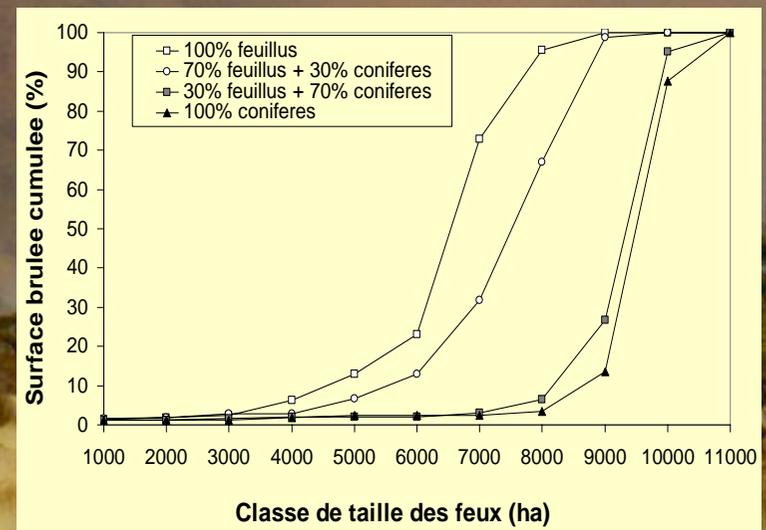
CEREGE – FR ECCOREV, 20 mai 2008



# 3.C.4. Structure de Prometheus



**La proportion des grands feux augmente avec le pourcentage de conifères dans la mosaïque**



## 3.D. La méthode Américaine de calcul du comportement du feu

1. Recherche durant les années 60-70 - Version de 1984
2. Méthode mécanistique basée sur les processus physico-chimiques du feu (combustion, transfert de chaleur....)
3. Méthode basée sur la théorie du feu.
4. Un incendie est une succession d'ignition et les variables du comportement du feu (vitesse, intensité, part consommée....) résultent des processus décrits et ce, pour des peuplements forestiers types
5. Le feu est supposé se propager dans un environnement homogène (phase d'équilibre atteinte)

# 3.D.1. Présentation des types

## 1. 13 types de peuplements caractéristiques du pays

- 3 types d'herbacees (courte, haute, en presence de tronx d'arbres)
- 4 types de buissons genre garrigue avec hauteur et composition differentes
- 3 types de peuplements forestiers (coniferes, decidus, avec sous bois)
- 3 types de peuplements exploites par l'industrie forestiere (debris legers moderes ou importants)

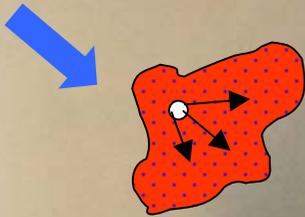
## 2. Description quantitative de leur composition, charge, structure horizontale et verticale (ex: Chaparral ..2m de haut)

- 1H fuel load=11.23 ton/ha ; 10H fuel load=8.99 ton/ha ; 100H fuel load=4.48 ton/ha ; live herbaceous = 0 ; Live woody=11.23 ton/ha;
- Rapport surface/volume : 1H fuel load=6562; live wood =4921.
- Epaisseur du lit de combustible 1.83 m
- Teneur en eau maximum=20%
- Chaleur de combustion materiel mort 18622kJ/kg .....

# 3.D.2 La structure de la méthode Américaine

A l'échelle du peuplement

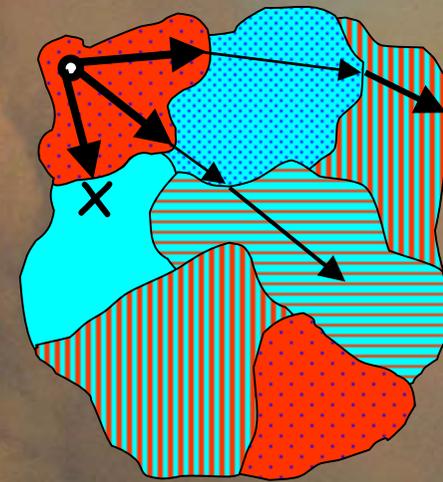
VENT



BEHAVE

A l'échelle du paysage

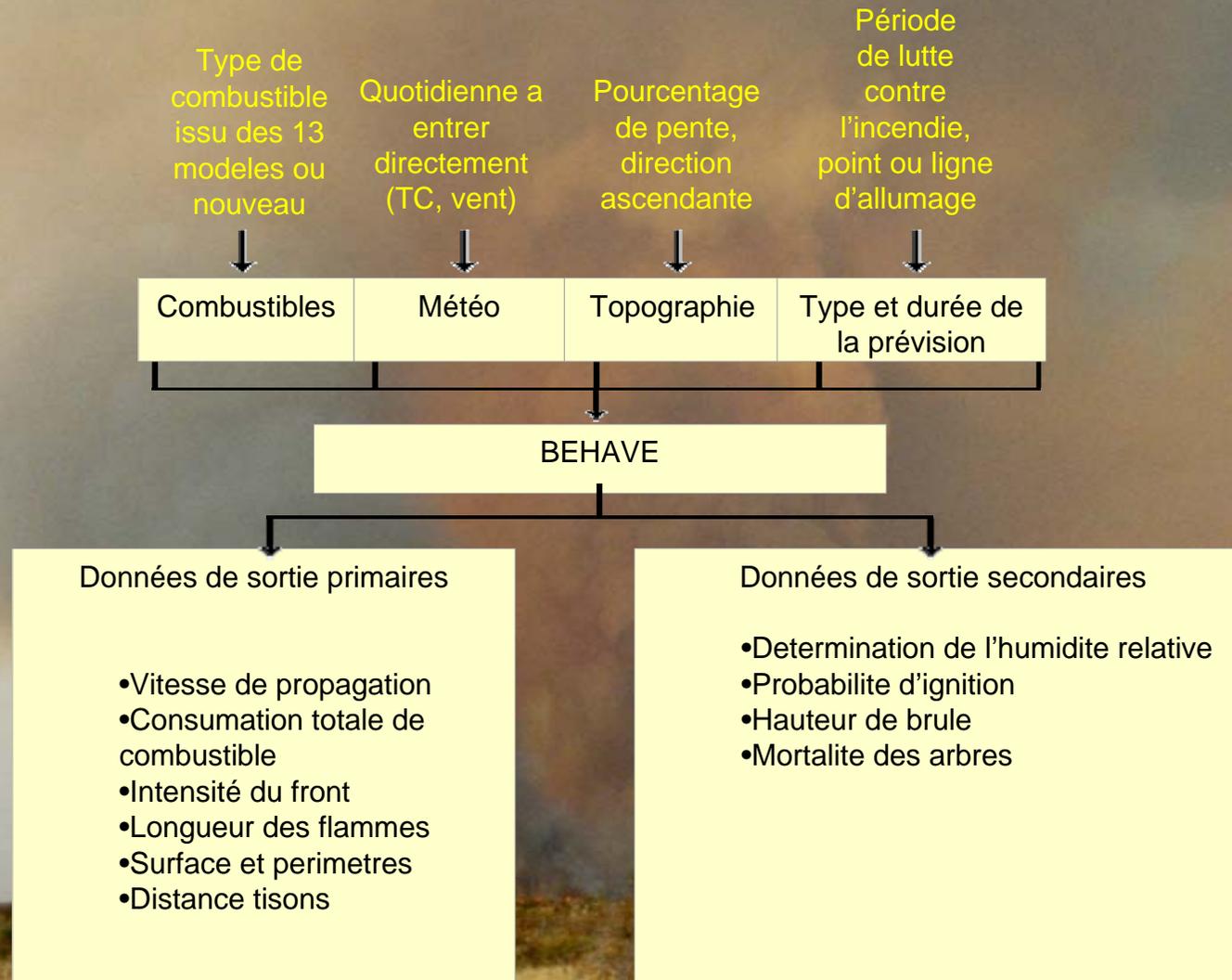
VENT



FARSITE

Approches  
mecanistiques

# 3.D.2. Structure de BEHAVE



# 3.D.3. Exemples de relations

## A l'échelle d'une particule de bois

1. Temps de residence de la flamme ( $T_r$  en min/m)
  - $T_r = 384 / \sigma$  [avec  $\sigma$  le rapport surface/volume (en  $m^2 / m^3$ )]
2. Energie degagee par unite de surface ( $H_a$  en  $kJ/m^2$ )
  - $H_a = T_r * I_r$  [avec  $I_r$  l'intensite de reaction (en  $kJ/m^2/min$ )]
3. Vitesse propagation
  - $V = S / (T_r \times FL)$
4. Intensite du front de flamme ( $I$  en  $kJ/s/m$ )
  - $I = (H_a * Vitesse) / 60$
5. Longueur de flamme ( $F_l$  en m)
  - $F_l = 0.45 * I^{(0.46)}$
6. Hauteur de flamme ( $D$  en m)
  - $D = T_r * Vitesse$

# Plan de l'exposé

1. Quelques définitions
2. Le risque de départ du feu
3. Le comportement du feu
4. **Le régime du feu et les types d'incendies**
5. **Les incendies dans le DGVM LPJ-GUESS**

# 4.A. Définition du régime du feu

Pour une région donnée, le régime du feu décrit les caractéristiques des incendies qui surviennent généralement dans cette région :

1. La saison des feux : période où surviennent la majeure partie des feux
2. Le ou les types de feux : naturels / anthropiques ; souterrain, surface, couronne
3. La fréquence : nombre d'années entre 2 feux successifs au même endroit
4. Le cycle : nombre d'années pour qu'une surface équivalente au paysage étudié brûle entièrement
5. Taille des feux
6. Comportement du feu

# 4.B. Comparaison des régimes en

## Savanne

- Activités humaines
- Feux de surface
- Litière, Herbacées et buisson
- Feux à propagation rapide, mais peu intenses
- Retour fréquent des incendies (1-4 ans) dépend des précipitations

## Forêt boreale

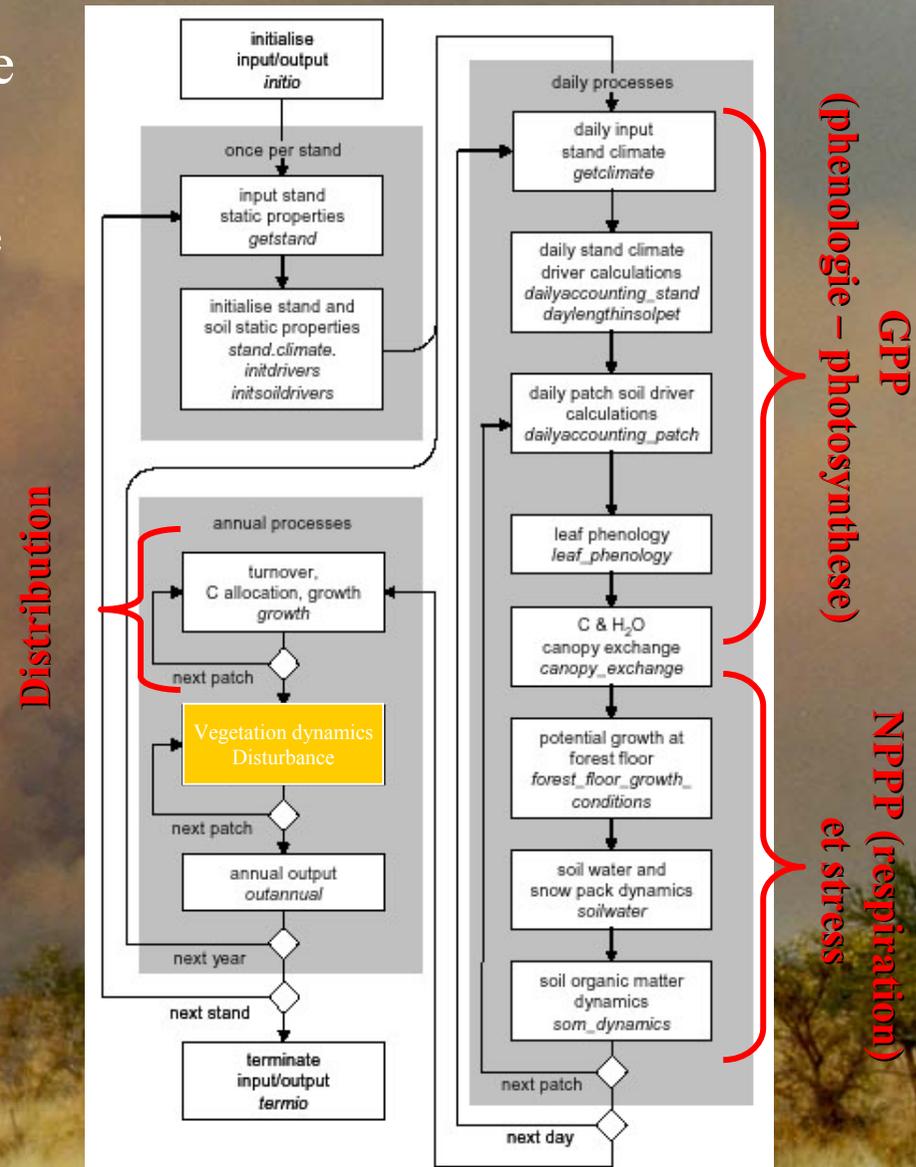
- Foudre
- Feux de couronne
- Toutes les strates de végétation (arbres, sous-bois, litière et humus)
- Feux à propagation variable mais généralement très intenses
- Retour des feux lent (50 à des centaines d'années), dépend de la composition de la forêt et de la production de combustible

# Plan de l'exposé

1. Quelques définitions
2. Le risque de départ du feu
3. Le comportement du feu
4. Le régime du feu et les types d'incendies
5. **Les incendies dans le DGVM LPJ-GUESS**

# 5.A. Présentation de LPJ-GUESS

- General Ecosystem Simulator =  
 Modèle de trouee (gap model) developpe  
 par *Smith et al.* (2001)
- Conçu pour échelle régionale et globale
- CLIMAT (0.5 ° x 0.5 °)  
 Précipitations mensuelles (mm)  
 Jours avec pluie  
 Température mensuelle (T°C)  
 Couvert nuageux
- POSITION GEOGRAPHIQUE  
 Latitude  
 Longitude  
 Altitude
- UTILISATION DES PFT



# 5.B. Le module perturbations

Perturbation générique vs incendie

Générique → input : fréquence = x années  
effet : substitue biomasse aérienne

Incendie = Glob-FIRM

→ input : seuil fuel load ( $>200$  g/m<sup>2</sup>)

litter moisture (30% du poids sec)

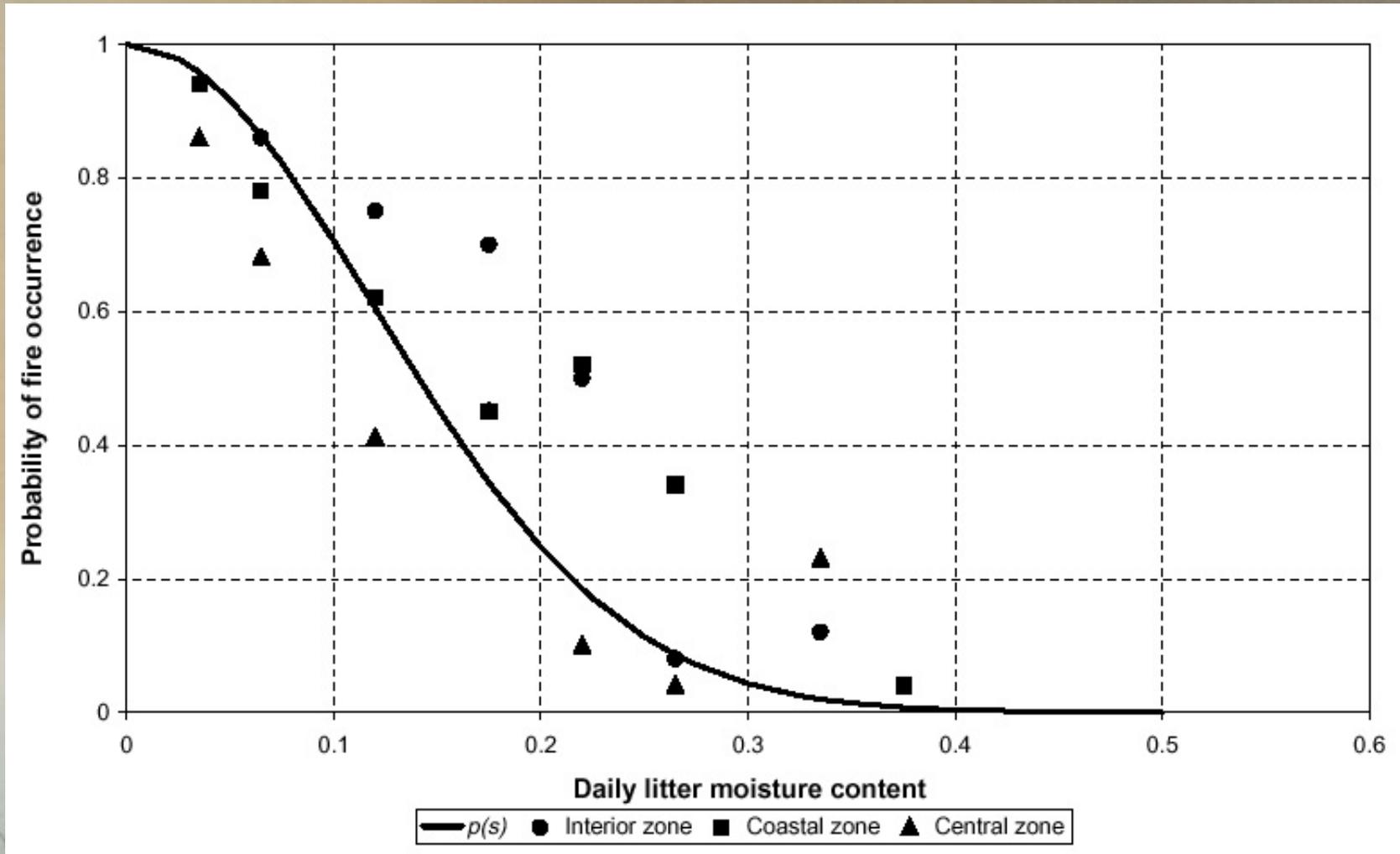
resistances au feu des PFT

effet = calcul proba quotidienne départ feu

calcul saison = cumul jours feu

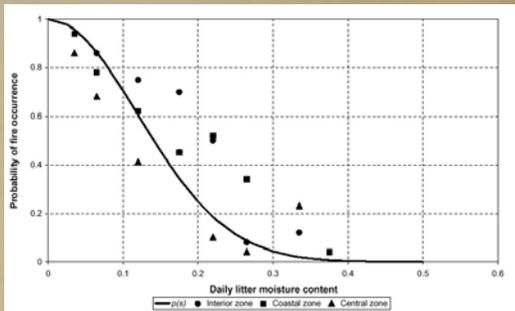
calcul fraction pixel brûlée

# 5.C. Les equations de l'incendie



$$P(m) = e^{-\pi/(Me)^2}$$

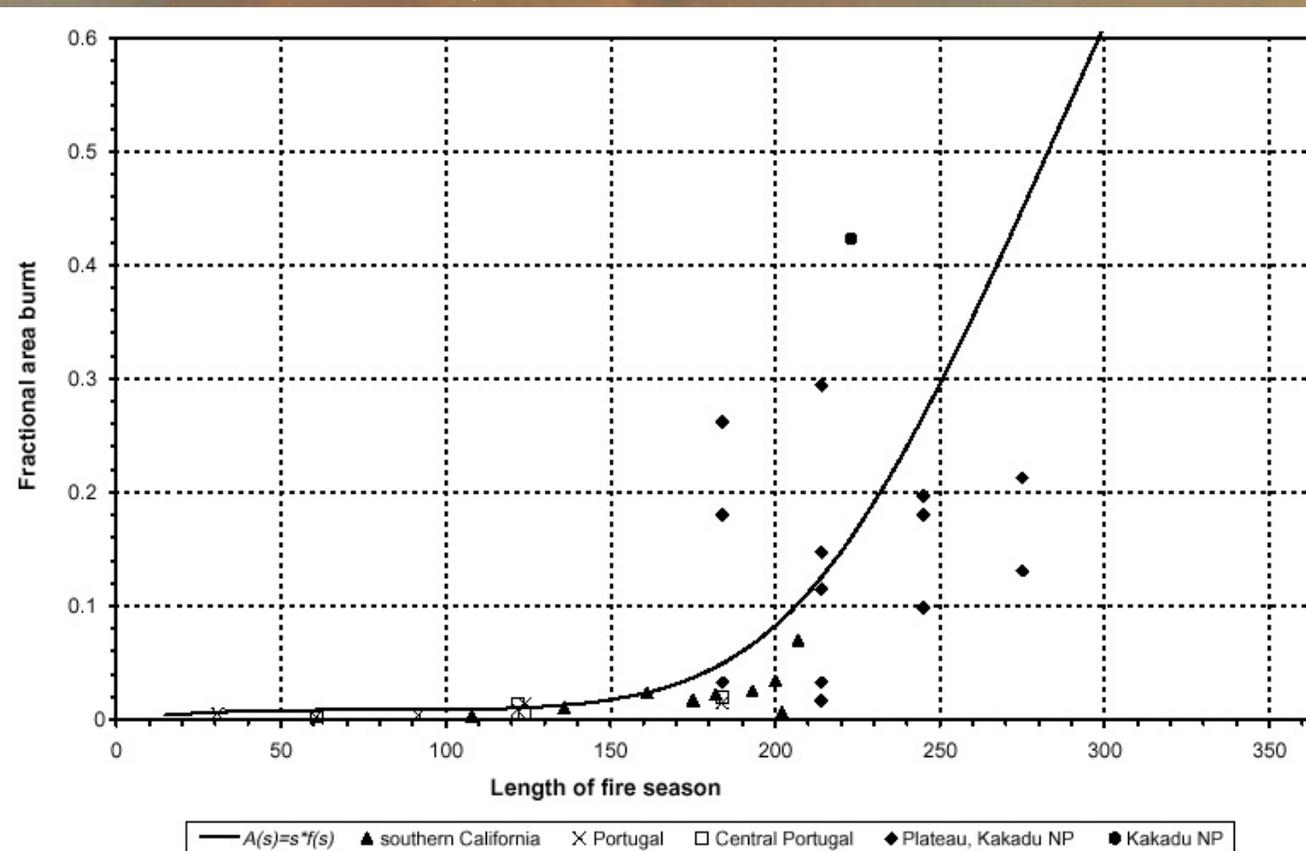
# 5.C. Les equations de l'incendie



$$P(m) = e^{-\pi(m/Me)^2}$$

$$A(s) = s * e^{(x/[0.45x^3+2.83x^2+2.96x+1.04])}$$

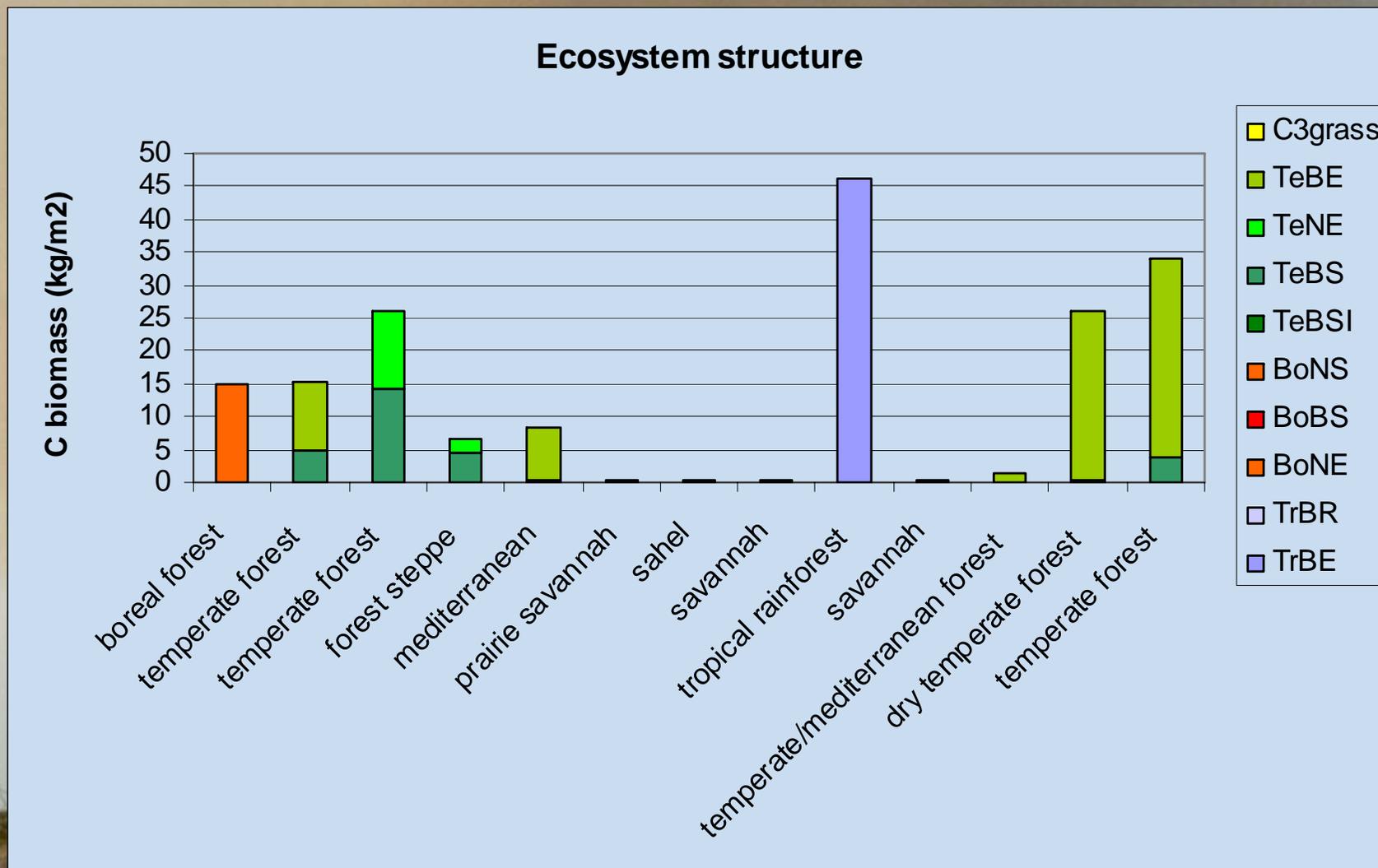
Avec  $x=s-1$



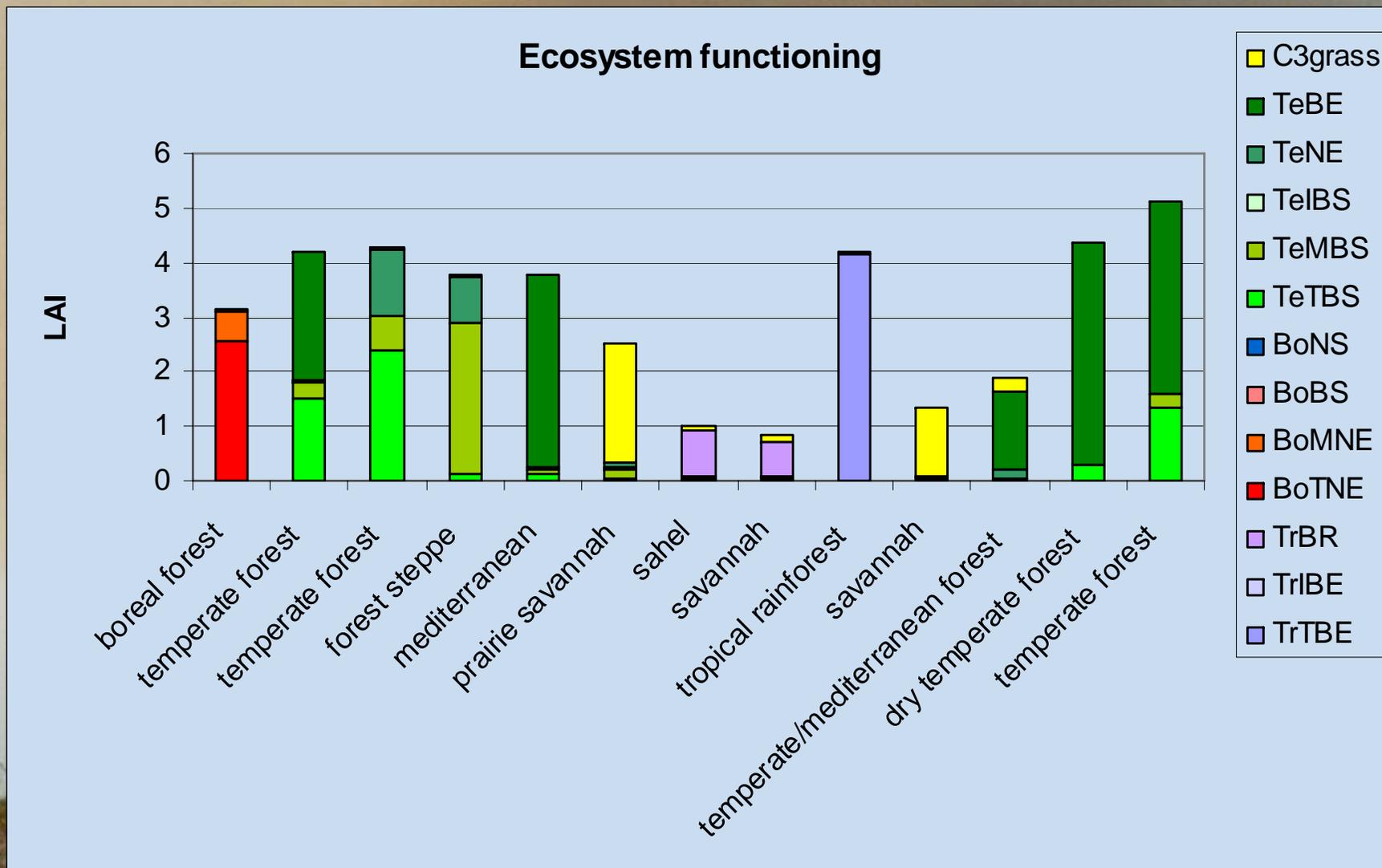
## 5.D. Regime et consequences post-incendies

- Cycle du feu =  $1 / \text{fraction brûlée annuelle}$
- Réduction des PFT proportionnellement a leur représentativité
- C brule  $\rightarrow$  flux émis vers atmosphère
- Dynamique post-incendie selon résistance PFT

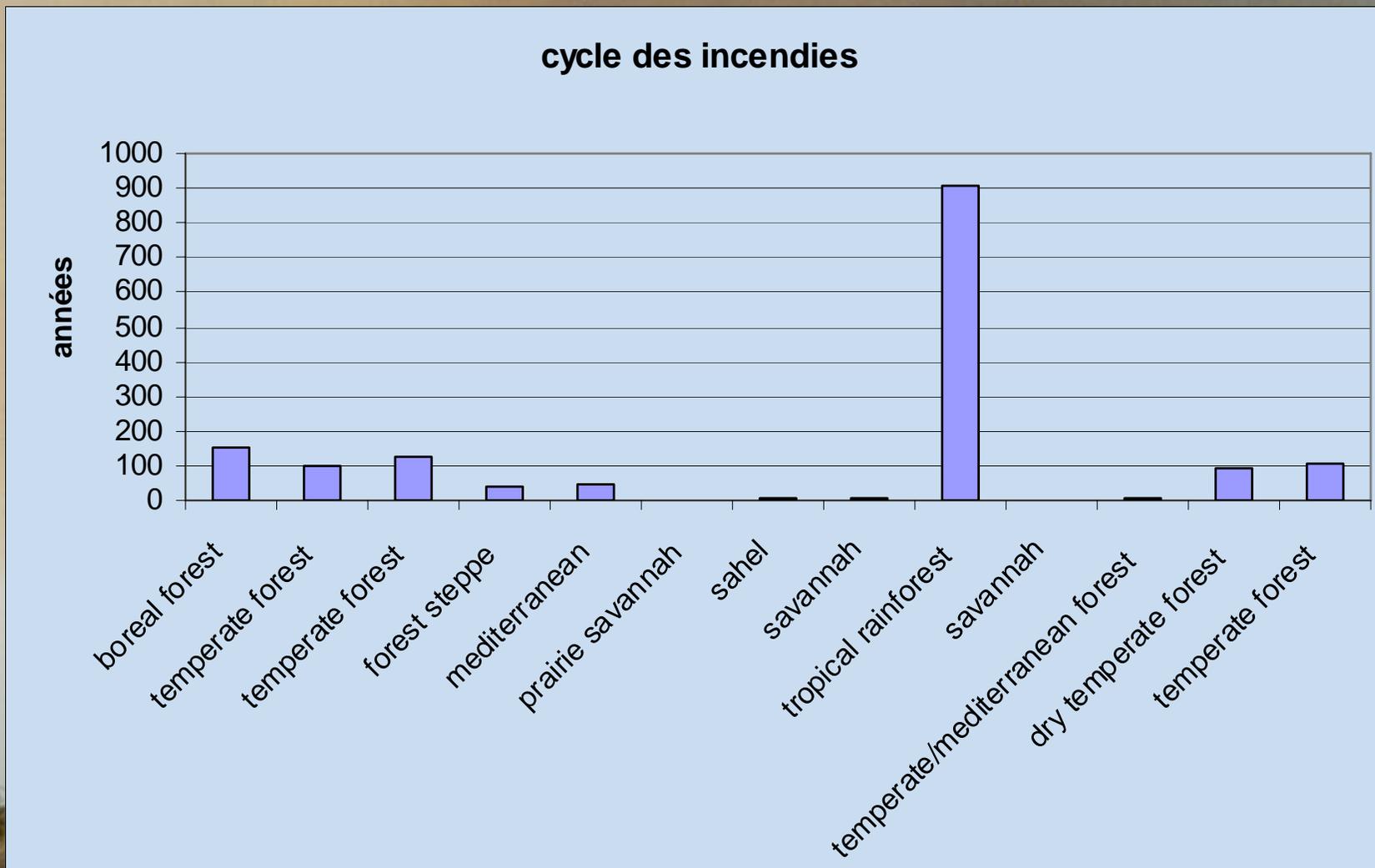
# 5.E. Illustrations



# 5.E. Illustrations



# 5.E. Illustrations



# 5.F. Perspectives

Peut on faire mieux?

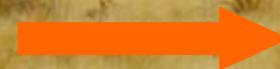
Oui, améliorer le module incendie de LPJ-GUESS en incluant les processus mécanistiques

- du risque de départ,
- du comportement,
- du régime réel des incendies (part anthropique)

Pour mieux estimer les émissions (efficacité combustion)

$E = \text{Surface} \times \text{biomasse} \times \text{efficacite} \times \text{facteur emission}$

Pour mieux estimer la mortalité et la dynamique post-incendie



**SPITFIRE**

# SPITFIRE

1. L'index de Nesterov calcule le départ de feu dans LPJ
2. L'allumage par distribution des impacts de foudre et par la densité des routes
3. Le comportement du feu par l'équation de Byram et Rothermel  $I=HWR$
4. La surface brûlée en 1 jour transformée en % du pixel
5. Impact écosystème : diminution des PFT selon leur résistance au feu et émissions C vers atmosphère

# SPITFIRE: L'index de Nesterov calcule le départ de feu dans LPJ

$$N = \sum_{i=1}^W (t_1 - D_i) * t_i$$

P = index de départ du feu

W = nb de jours depuis le dernier jour ou il est tombé plus de 3 mm

t = T°C

D = T°C du point de rosée.

# SPITFIRE: L'index de Nesterov calcule le départ de feu dans LPJ

$$N = \sum_{i=1}^W (t_1 - D_i) * t_i$$

- 1)  $N < 300$  no fire risk,
- 2)  $301 < N < 1\ 000$  low risk,
- 3)  $1\ 001 < N < 4\ 000$  medium risk,
- 4)  $4\ 001 < N < 10\ 000$  high risk,
- 5)  $N > 10\ 000$  extremely high risk



**CEREGE – FR ECCOREV, 20 mai 2008**