

Modélisation de la mortalité des ligneux après perturbations

Thomas Curt

Cemagref Aix en Provence –
Ecosystèmes méditerranéens
et risques



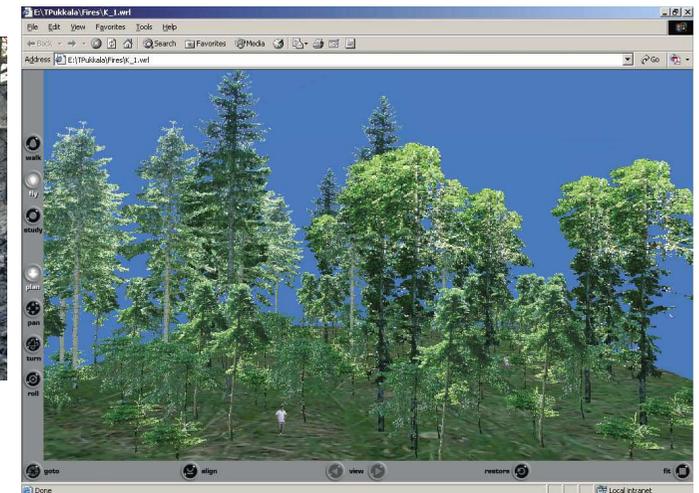
**Journées « modélisation en environnement »
22 février au 26 février 2010**

Plan

- Pourquoi étudier la mortalité des ligneux ?
- Pourquoi les arbres meurent-ils ?
- Deux grands types de mortalité et de modèles
 - La mortalité « naturelle »
 - La mortalité « accidentelle »
- Un exemple de mortalité « accidentelle » : le chêne liège après incendie dans le massif des Maures (Var)

Pourquoi étudier la mortalité des ligneux ?

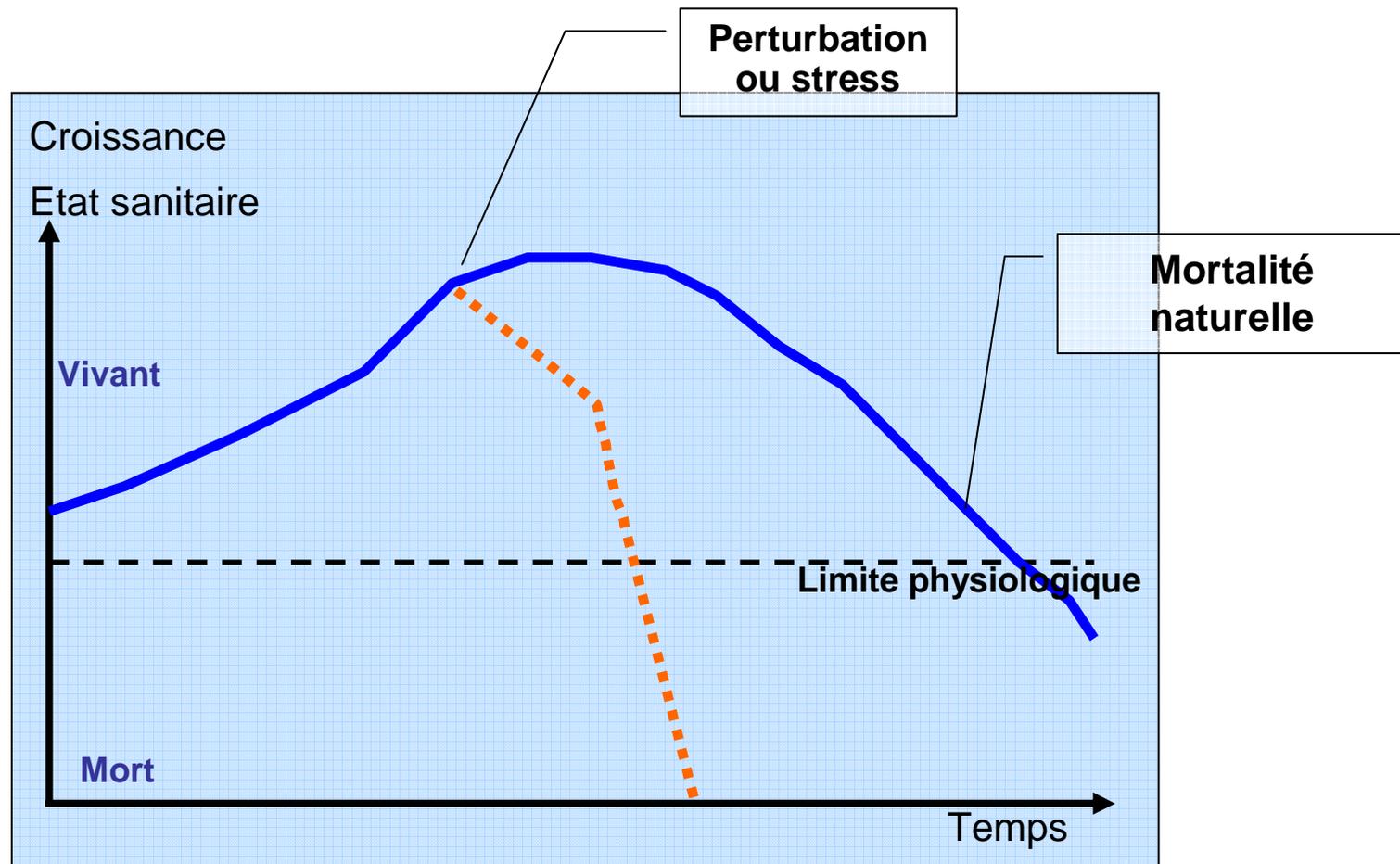
- Evaluer la ressource forestière et la dynamique des peuplements
- Détecter des problèmes sylvicoles, écologiques, sanitaires
- Adapter les techniques de gestion



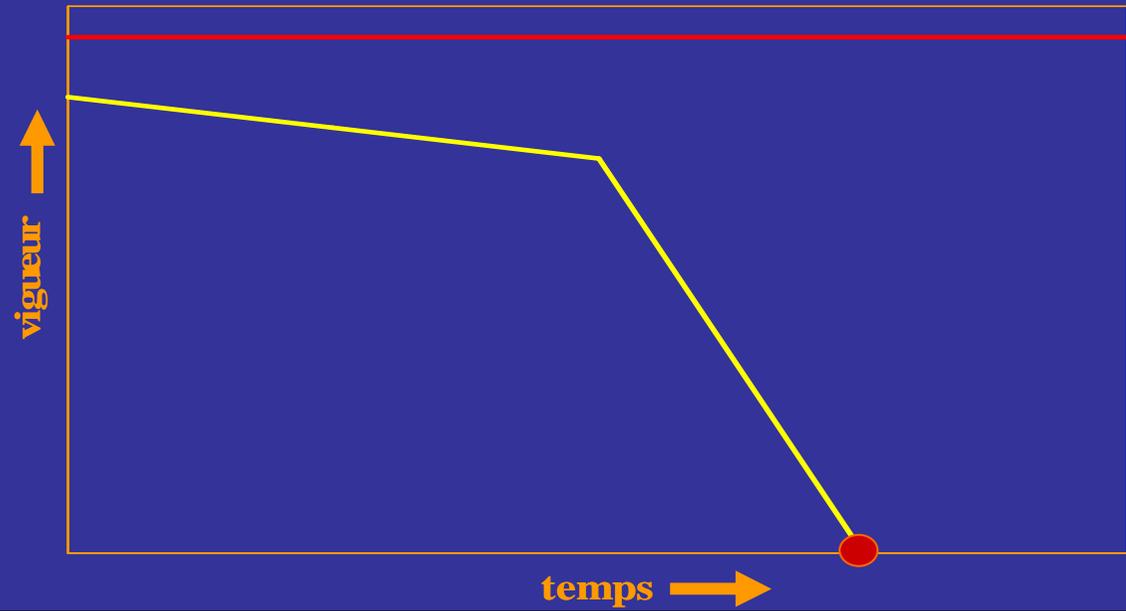
Modèles CAPSIS, MONTE...

Pourquoi les arbres meurent-ils ?

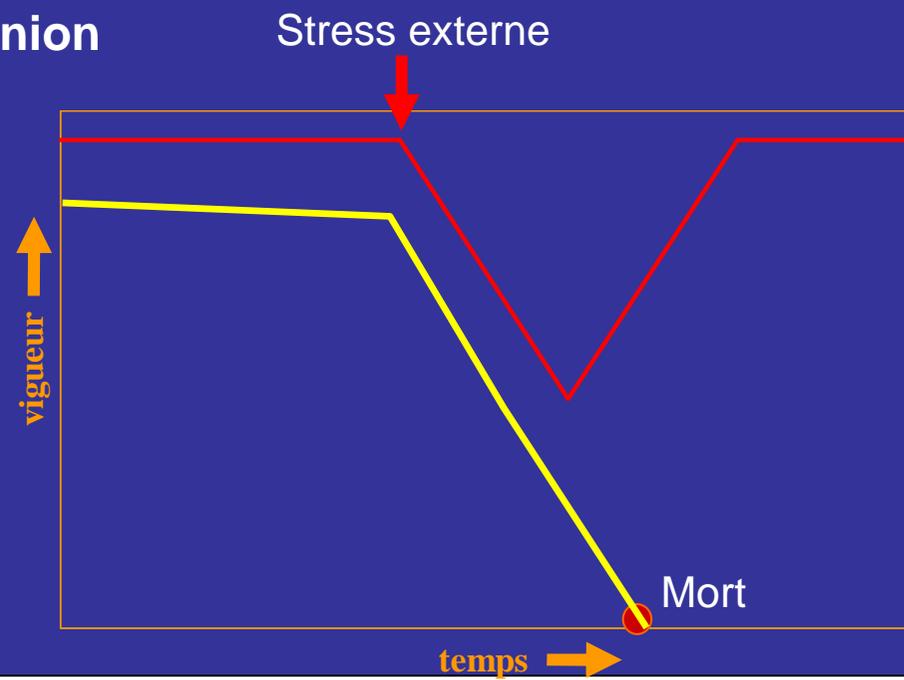
Un processus complexe et multifactoriel :
des facteurs *favorisants*, *déclenchant*, *aggravants*



Modèle de Bossel



Modèle de Manion



Deux grands types de mortalité

1. La mortalité « naturelle »

- Processus progressif et continu
 - lié au vieillissement (lent)
 - lié à la compétition intra- ou inter-spécifique
- Ralentissement de croissance, dépérissement
- Assez « rare »
- Processus d' « auto-éclaircie »
- Très liée à l'âge et à la compétition dans le peuplement

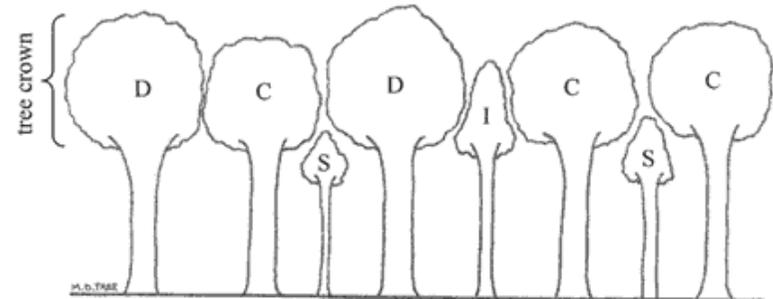
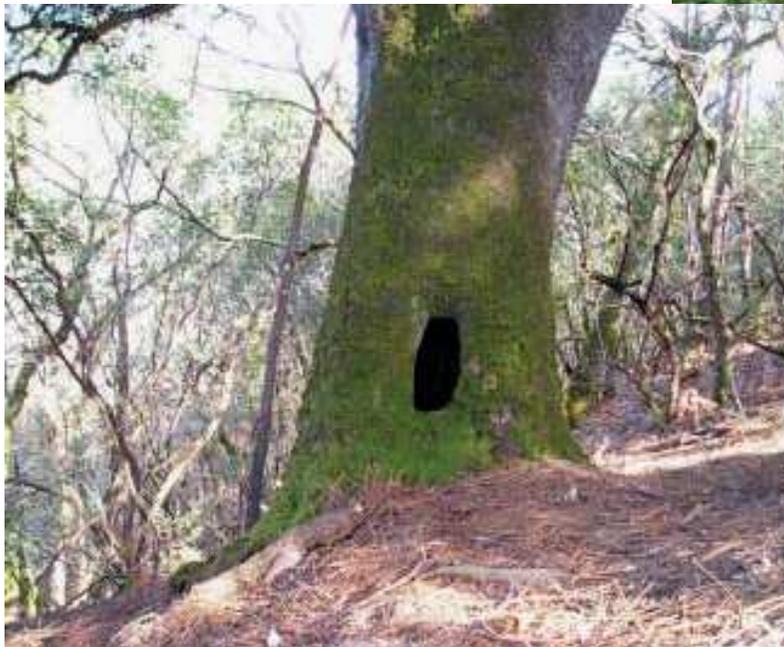


Figure 1. Tree crown position as it relates to dominance in a forest stand.
D = Dominant, C = Codominant, I = Intermediate, S = Suppressed



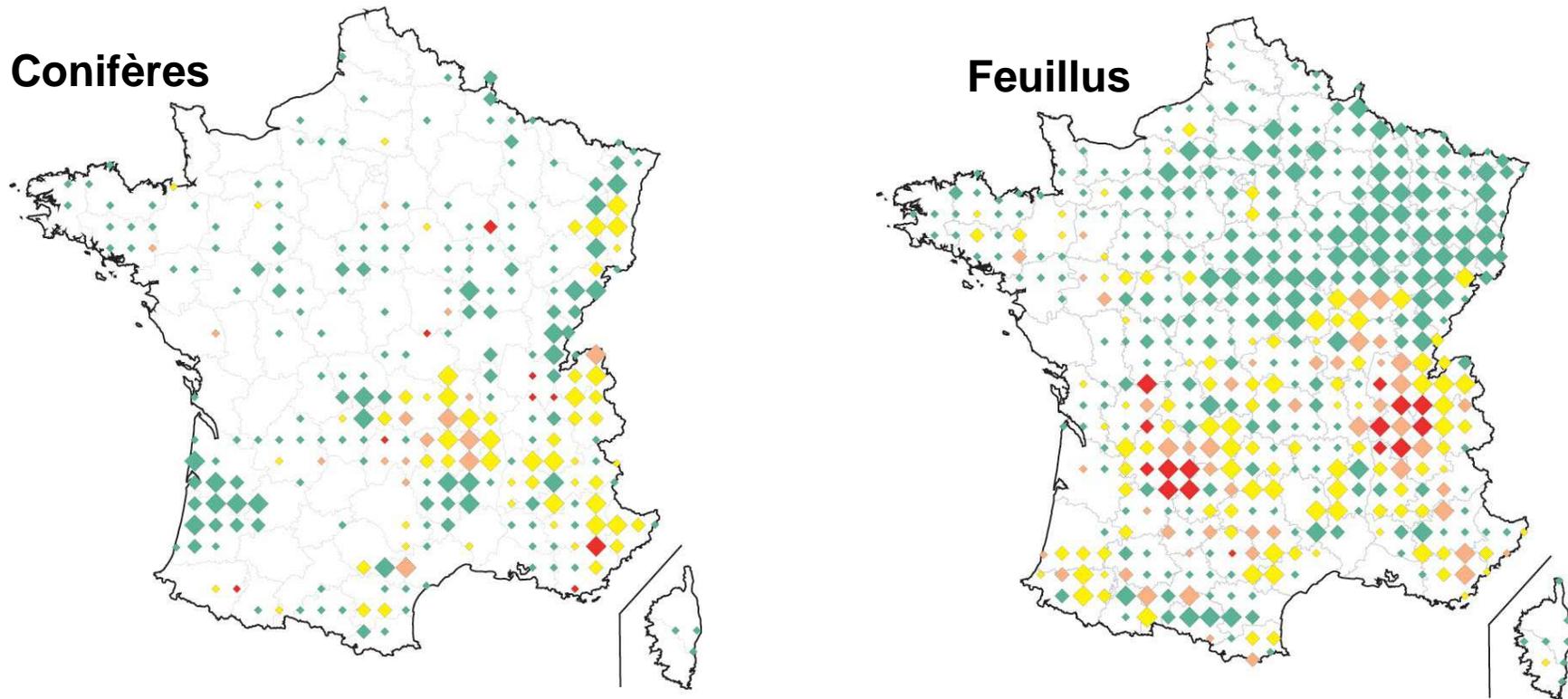
1. La mortalité « naturelle »

- Processus écologique « normal » et valeur écologique et patrimoniale des vieux arbres

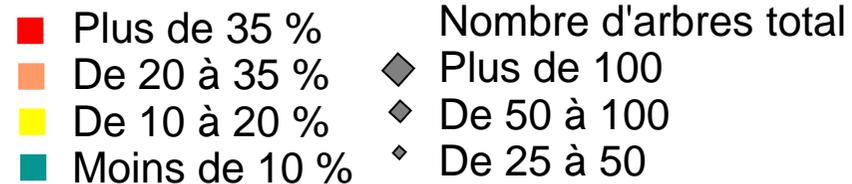


1. La mortalité « naturelle »

Une mortalité « naturelle » permanente dans les forêts françaises



Proportion d'arbres morts rapportés au nombre d'arbres total

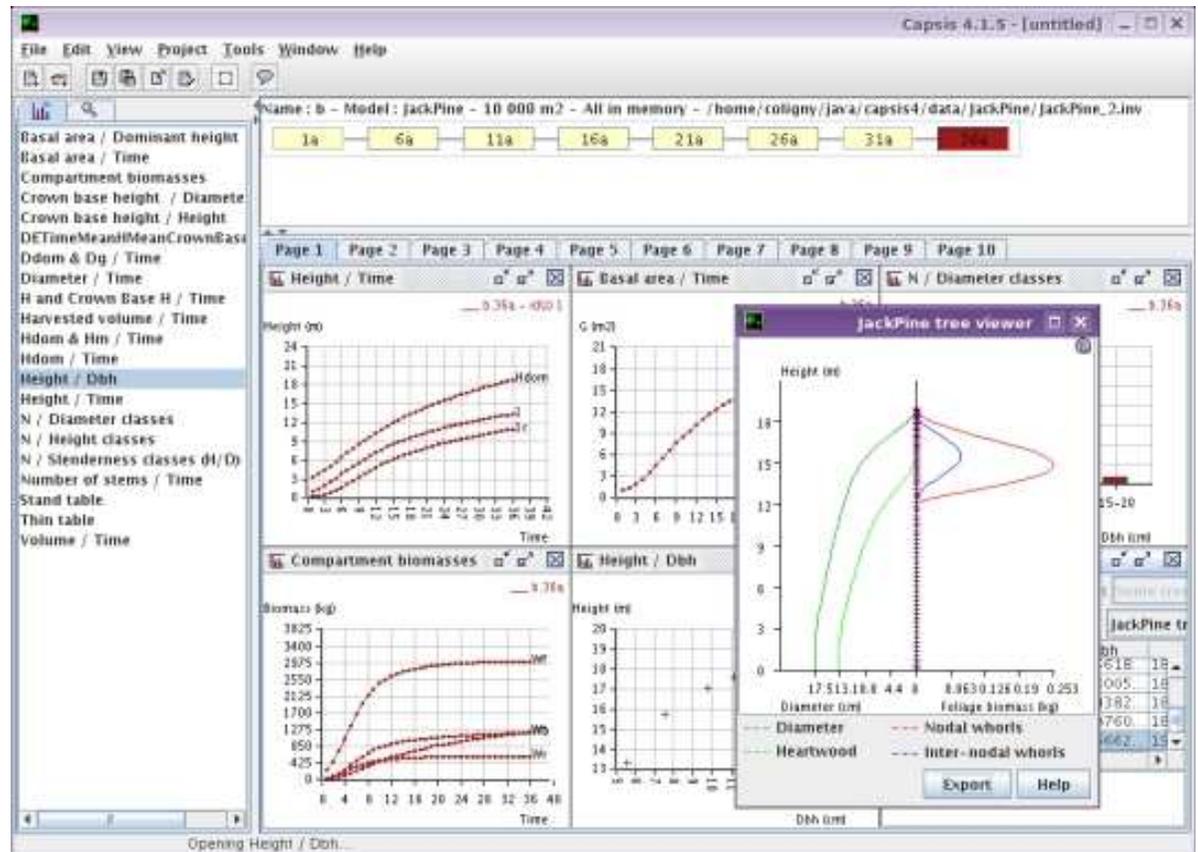


(source Inventaire Forestier National et Département de la Santé des Forêts, 2006)

1. La mortalité « naturelle »

Des modèles prenant en compte la compétition et la sylviculture...

... et permettant de tester des scénarios sylvicoles



Deux grands types de mortalité

2. La mortalité « accidentelle »

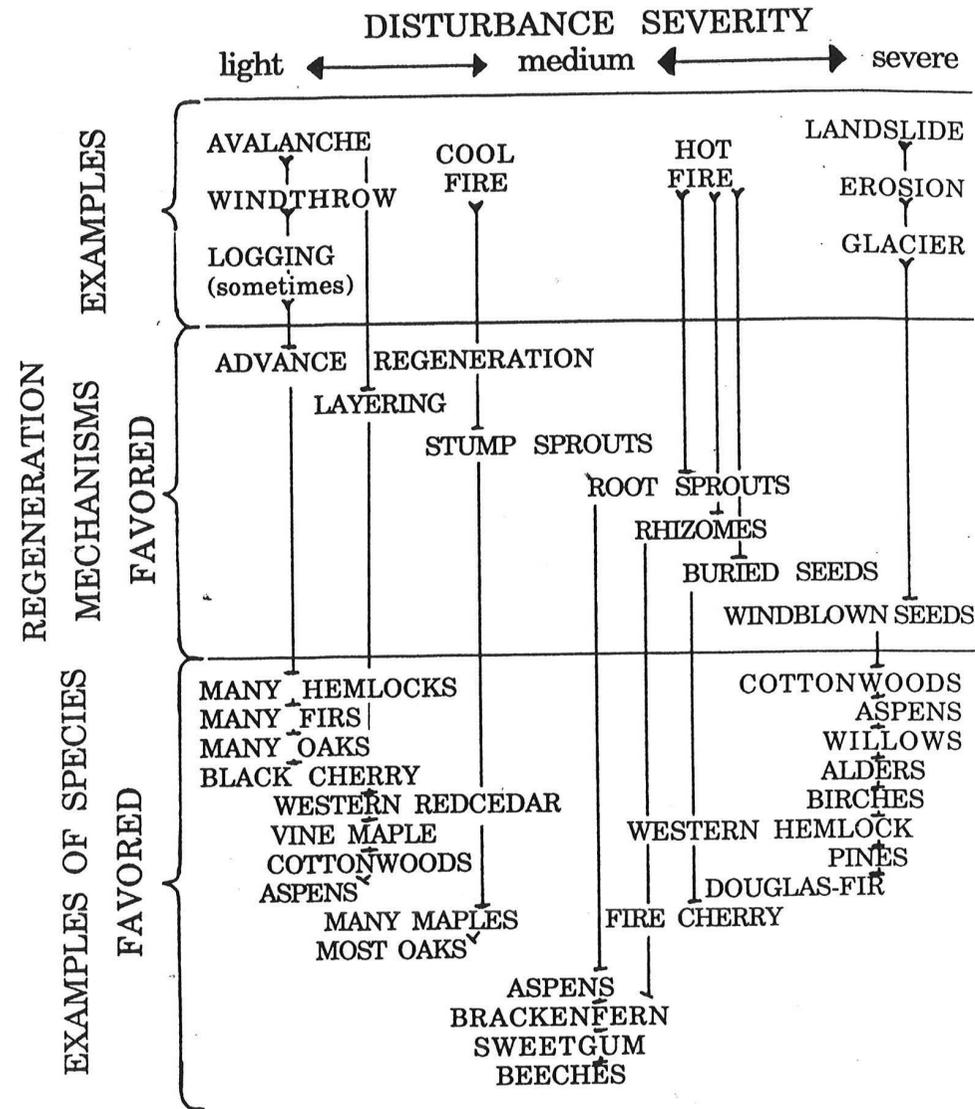
- Soudaine et peu prévisible
- Touche les arbres de tous les rangs sociaux (peu/pas liée à la compétition intra-spécifique)
- Liée à des stress intenses ou des perturbations : maladie, tempêtes, incendies, sécheresses, etc.
- Très liée au régime de perturbation (type, récurrence, sévérité, étendue spatiale)
- Liée à l'intensité des dommages subis



2. La mortalité « accidentelle »

Une large gamme de régimes de perturbations...

...et de stratégie de réponse des arbres



2. La mortalité « accidentelle »



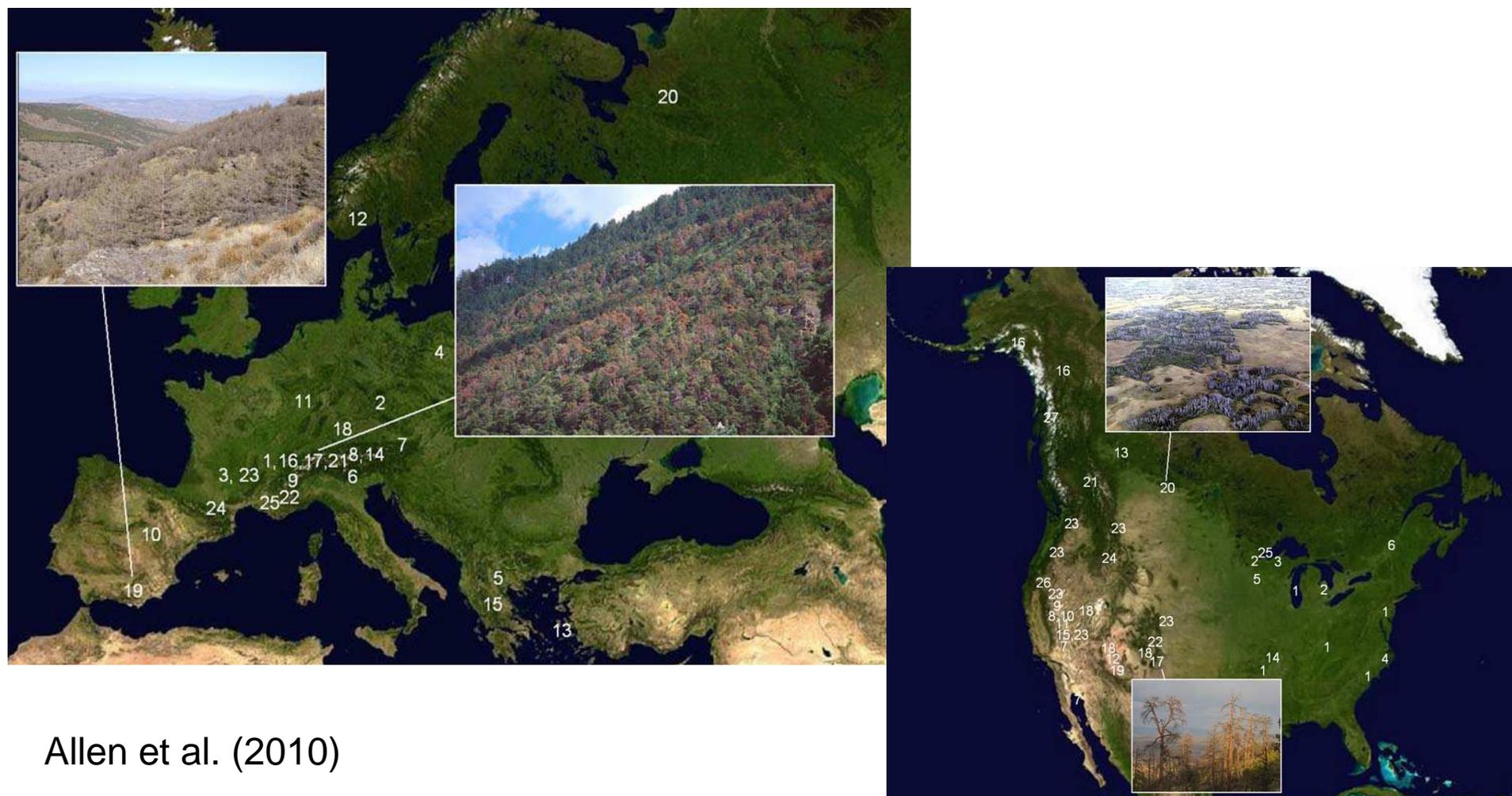
2. La mortalité « accidentelle »

Des infestations et des maladies fréquentes après perturbation



2. La mortalité « accidentelle »

L'augmentation globale des dépérissements et des mortalités liés aux sécheresses et aux périodes de fortes températures



Allen et al. (2010)

2. La mortalité « accidentelle »

L'augmentation probable des mortalités liés aux incendies (fréquence, sévérité)



2. La mortalité « accidentelle »

Le cas de mortalité après incendie

Mécanisme physiologique =
dépassement de la température létale
pendant une durée donnée

- dans toute la plante
- pour certains organes

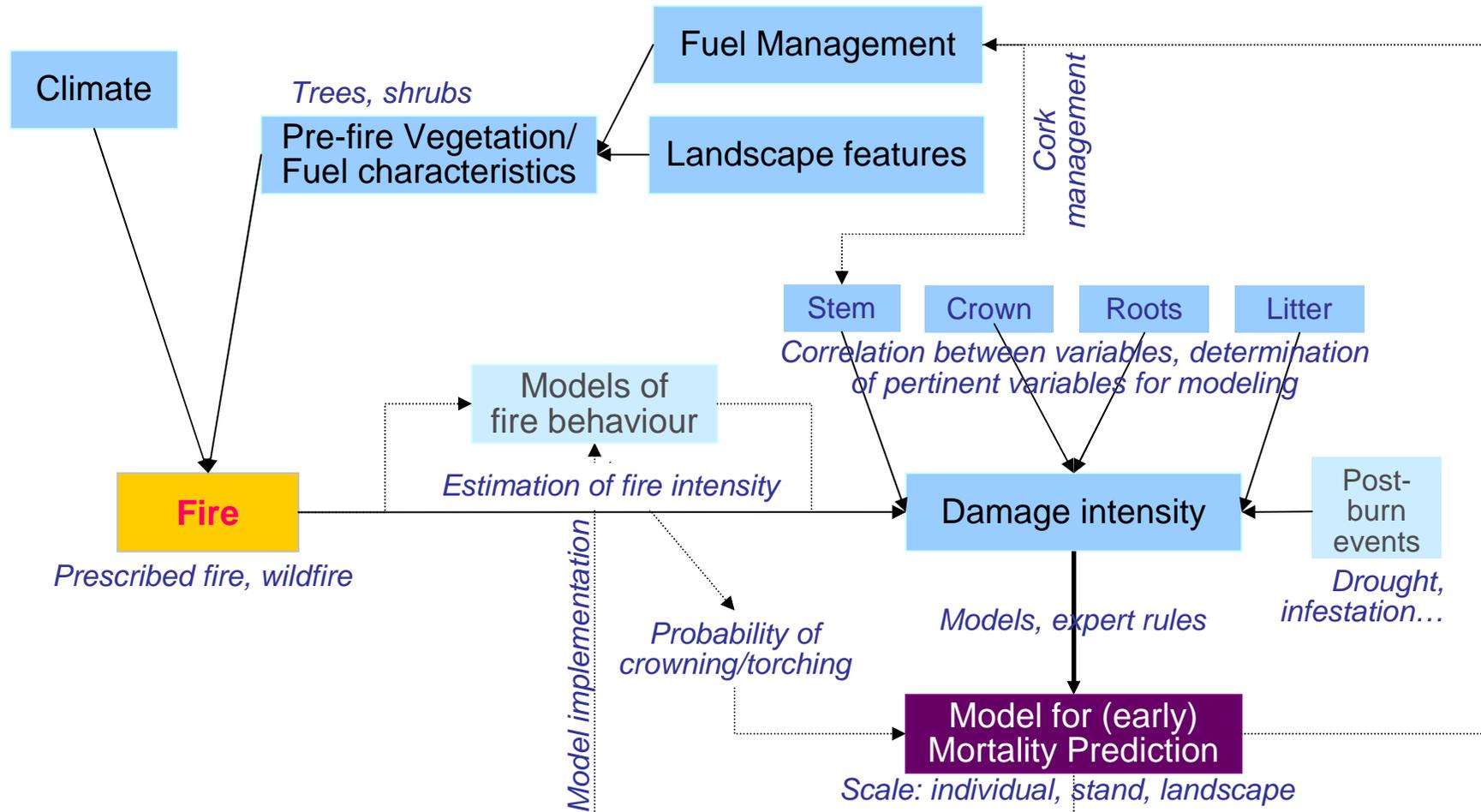
Exemple : aubier du pin maritime =

- 60°C pendant une minute : dommages réparables
- 60°C pendant deux minutes : mortalité probable

Comment évaluer la sévérité /
l'intensité du feu sur le terrain à
posteriori ?



2. La mortalité « accidentelle »

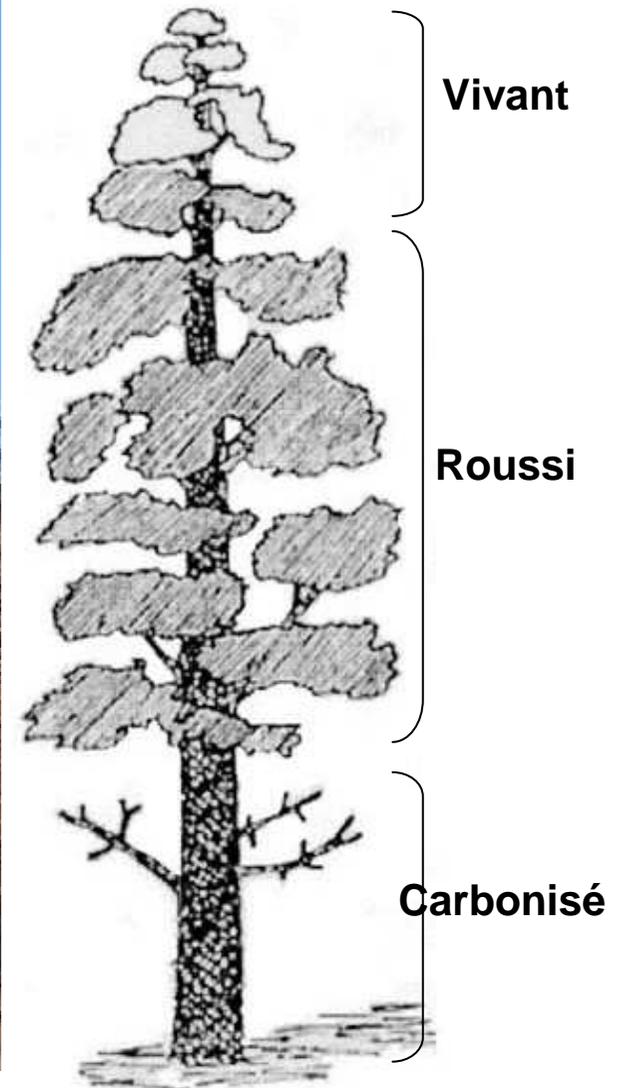


2. La mortalité « accidentelle »

Des modèles basés sur l'analyse de l'intensité des dommages subis par les arbres

- dans le houppier
- sur le tronc
- au sol/dans le sol

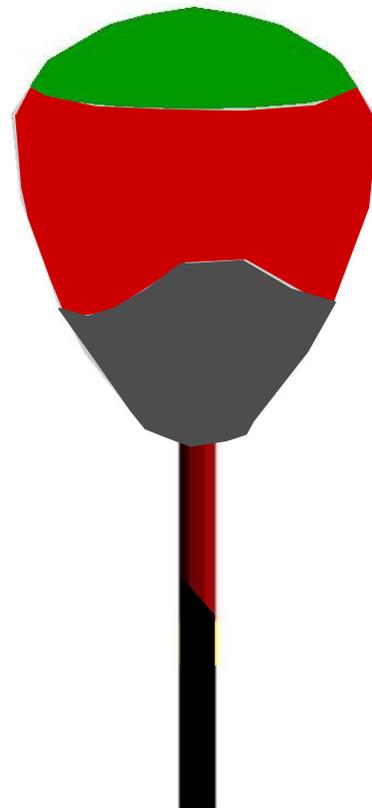
Probabilité de survie = $f(\text{dommages subis})$





2. La mortalité « accidentelle »

Les principales variables mesurées sur le terrain



Houppier

- Hauteur/volume houppier roussi ou brûlé
(= $f(\text{hauteur flamme}) = f(\text{intensité feu} \times \text{vent} \times \text{pente})$)

- Classe de dommage
= $f(\text{degré de brûlure} \times \text{degré de régénération})$

- Hauteur/surface/circonférence carbonisée
(= $f(\text{hauteur flamme}) = f(\text{intensité feu} \times \text{vent} \times \text{pente})$)

Tronc

- Profondeur de carbonisation du liège
(= $f(\text{intensité feu})$)

- Epaisseur du liège

- Etat du cambium

- Problèmes sanitaires

+ Mesures dendrométriques classiques (hauteur, C130, diamètre houppier)

2. La mortalité « accidentelle »

Des modèles qui doivent prendre en compte à la fois :

la mortalité directe

- fréquente chez les résineux
 - stress très fort
- pas de capacité de régénération végétative



la mortalité différée

- fréquente chez les feuillus (capacité de régénération végétative)
 - stress moins fort
 - maladies post-feu



2. La mortalité « accidentelle »

Des modèles principalement basés sur la régression logistique

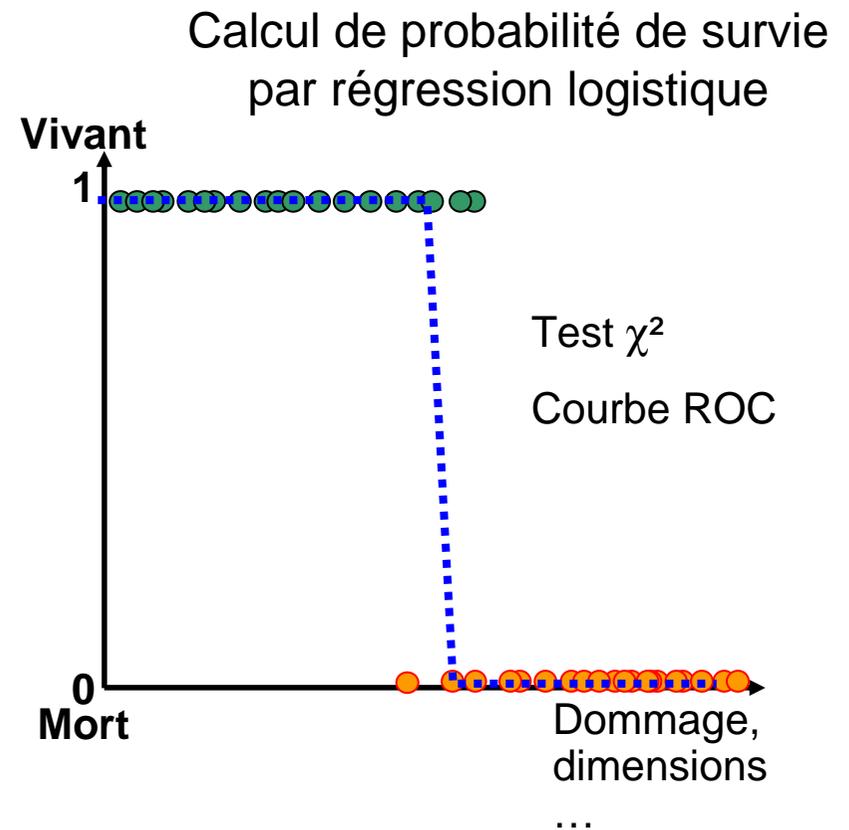
Observation de terrain (n années)



Classement vivant ou mort

Analyse des dommages

Analyse dendrométrique



2. La mortalité « accidentelle »

Chaque espèce montre un comportement spécifique...

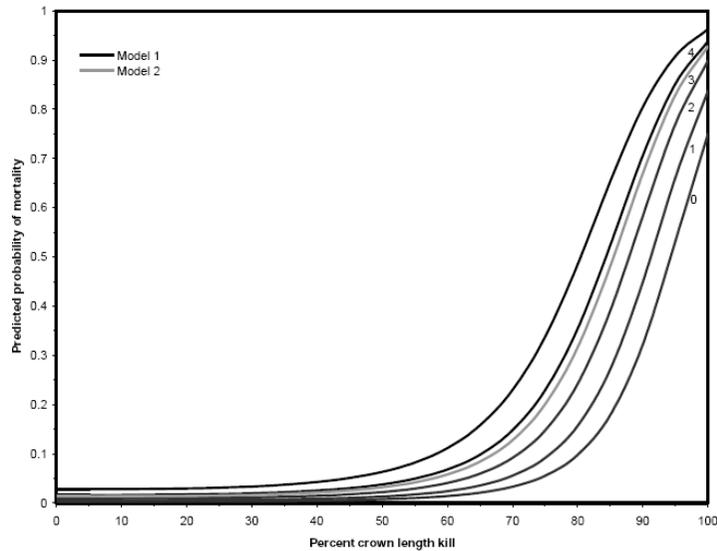


Figure 5—Year 2 incense-cedar mortality curves by cambium kill rating and dbh of 51.5 cm. Solid black lines indicate optimal mortality model (model 1). Grey line following CKR=3 line is model 2 mortality curve.

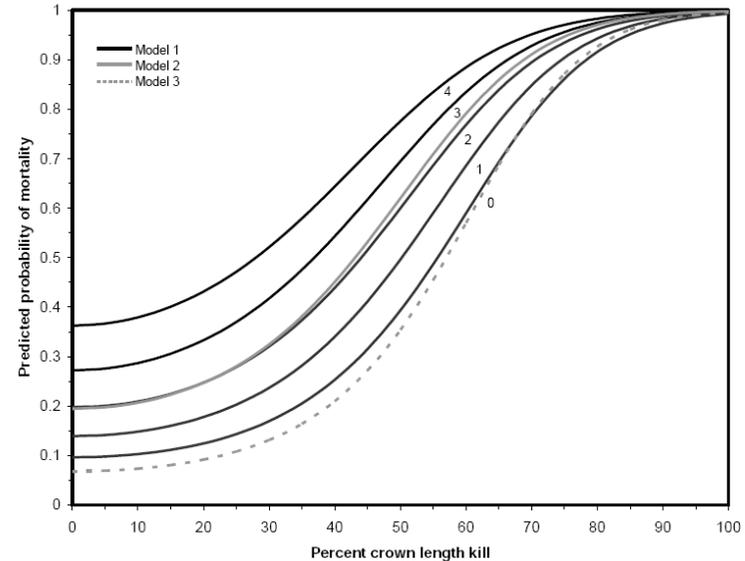


Figure 10—Year 2 yellow pine mortality curves for trees with red turpentine beetle pitch tubes and a dbh of 62.6 cm. Solid black lines indicate optimal mortality model (model 1). Grey line is model 2 mortality curve. Dashed line is model 3 mortality curve.

2. La mortalité « accidentelle »

... qui traduit la résistance à la température et les traits de vie associés

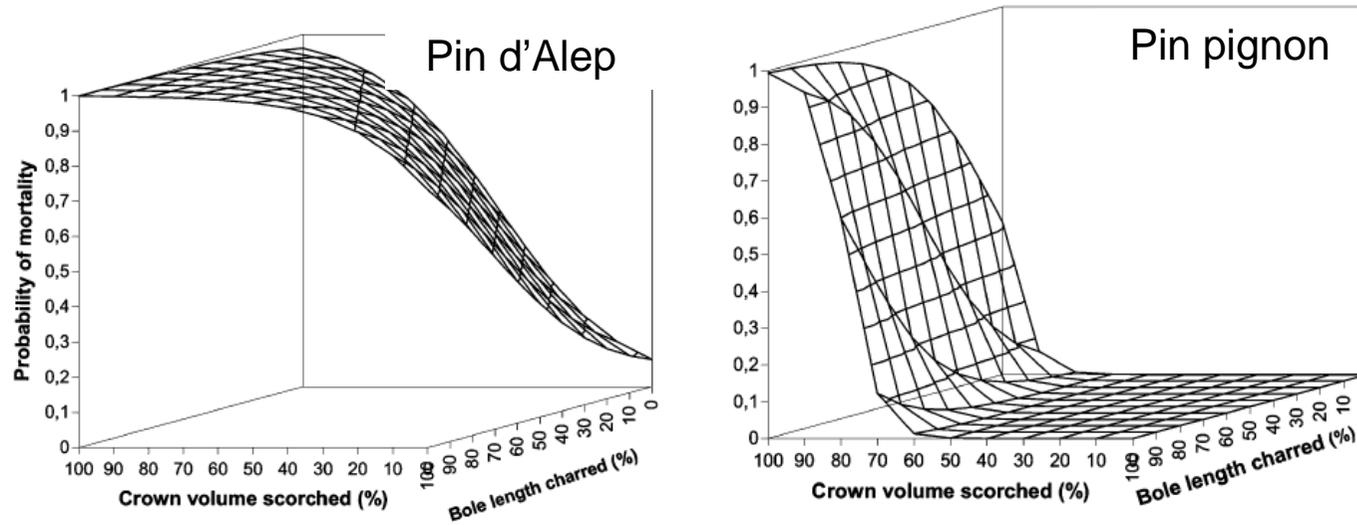
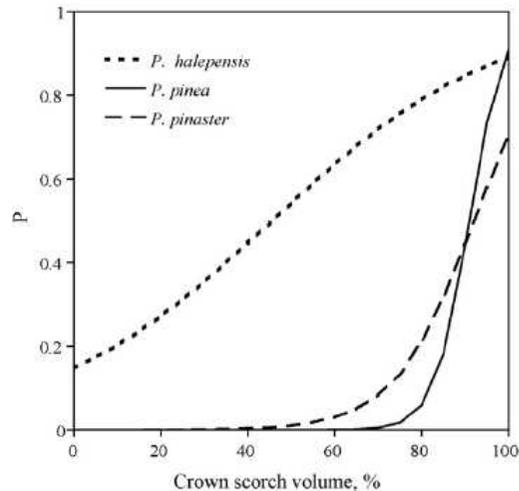


Figure 2. Surface response for post-fire mortality models as a function of crown volume scorched and bole length charred for *P. halepensis* and *P. pinea* (models ph2 and pp2).

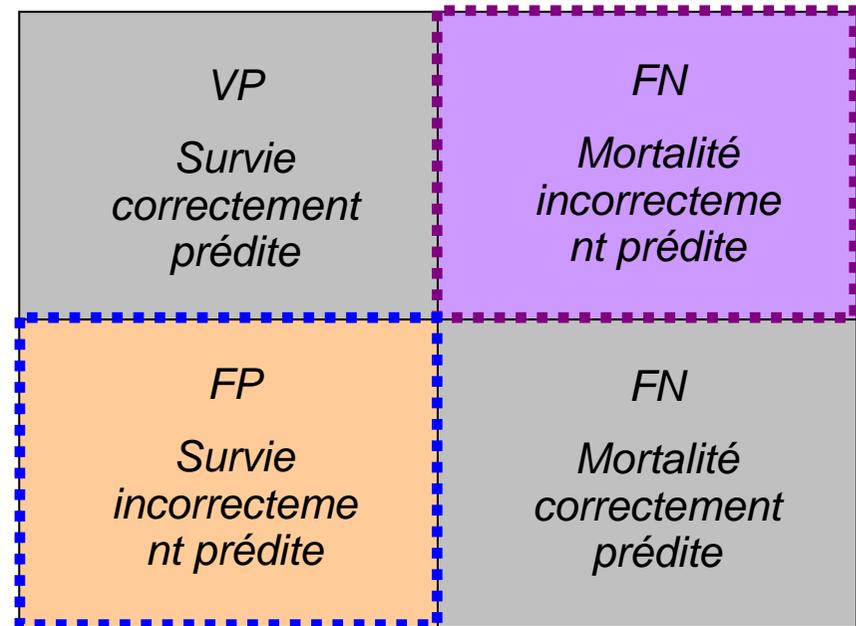
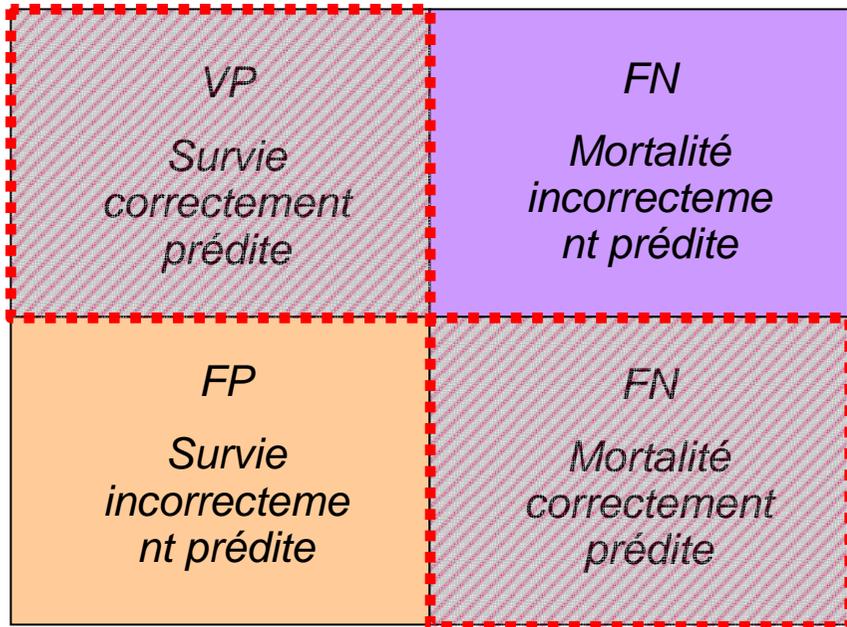


E. Rigolot (2002)

2. La mortalité « accidentelle »

L'analyse de la qualité de prédiction par matrice de confusion (surtout dans le cas de mortalité différée)

		Prédit	
		Vivant	Mort
Observé	Vivant	<i>VP</i> Survie correctement prédite	<i>FN</i> Mortalité incorrectement prédite
	Mort	<i>FP</i> Survie incorrectement prédite	<i>FN</i> Mortalité correctement prédite



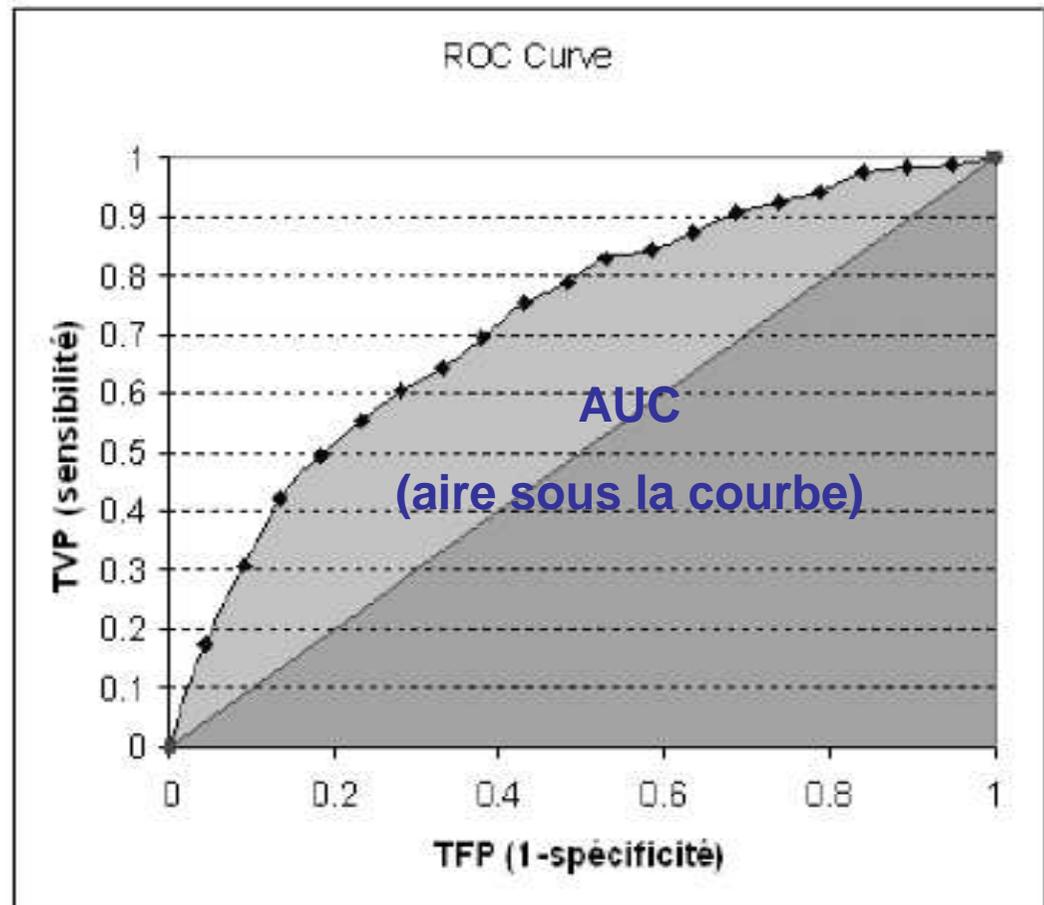
2. La mortalité « accidentelle »

L'analyse de la qualité de prédiction par la courbe ROC
(Receiving Operating Characteristics)

TVP = Sensibilité = VP/Positifs

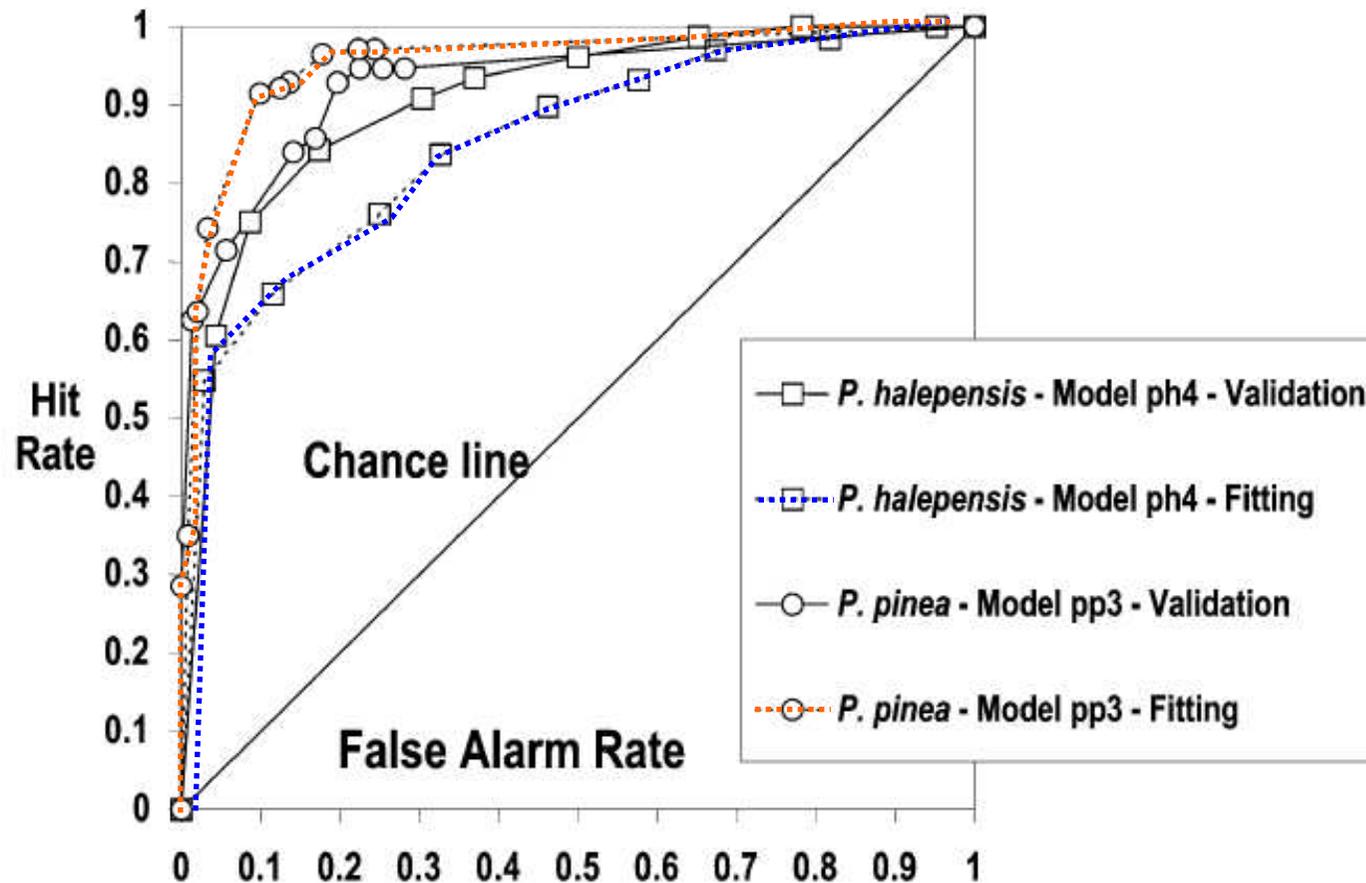
TFP = 1 – Spécificité = FP/Négatifs

- AUC indique la probabilité pour que la fonction SCORE place un positif devant un négatif
 - dans le meilleur des cas AUC = 1
 - si SCORE classe au hasard les individus (= le modèle de prédiction ne sert à rien) AUC = 0.5 (symbolisée par la diagonale)



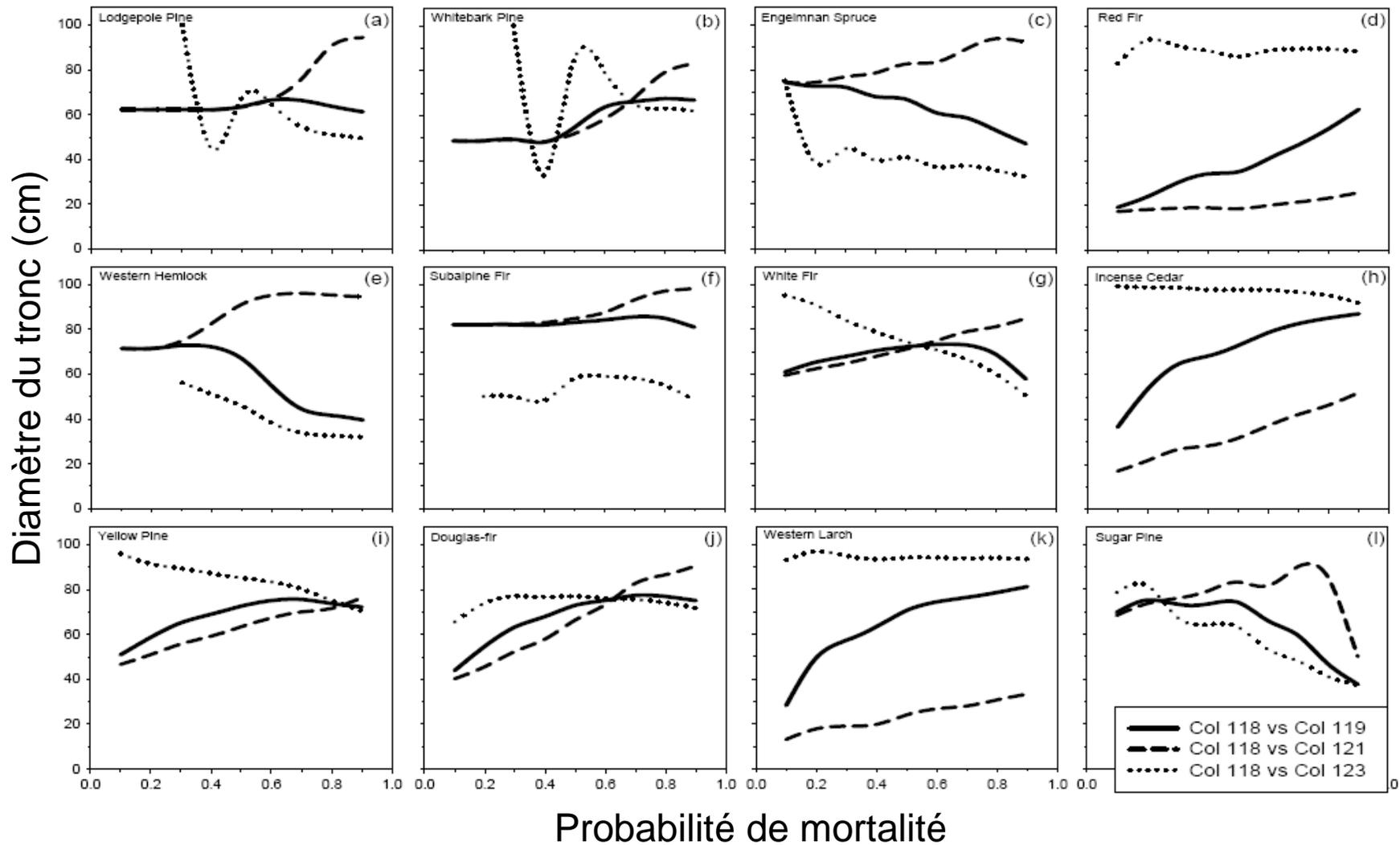
2. La mortalité « accidentelle »

Une comparaison pour deux pins communs en France méditerranéenne



2. La mortalité « accidentelle »

Une forte variabilité spécifique (12 espèces nord-américaines)





Direction de la
Nature et des
Paysages



Aix-en-Provence
UR Ecosystèmes méditerranéens et risques



Etude de l'impact des régimes d'incendie sur les habitats de *Quercus suber* en Provence cristalline



Thomas Curt, Romain Bertrand,
Laurent Borgniet, Roland Estève,
Thibault Ferrieux, Elodie Marini,
Alice Schaffhauser
Octobre 2007

Convention pluriannuelle d'objectifs
2006-2008

Gestion des territoires, SU0000381
Programme 153 : Gestion des milieux
et biodiversité

Les enjeux / les objectifs



Pourquoi étudier la mortalité et la régénération des espèces ligneuses après incendie ?

- ▶▶ Pour prédire la mortalité à l'échelle individuelle / du peuplement *aussi précocement que possible* pour intervenir après des feux de forêts :
gestion des peuplements incendiés : coupes, recépage, dégagements, enrichissements
- ▶▶ Pour estimer *l'impact de la gestion* préventive par le feu (feux dirigés) ou de modes de gestion (élagage, extraction du liège, débroussaillage) sur leur survie et leur régénération

Etat de l'art :

- Peu d'études sur les processus de mortalité / dommages
 - Etudes principalement sur les pins
- Manque de référence pour les feux naturels modérés et sévères
- Manque de connaissance sur la mortalité différée (problèmes sanitaires...)
 - Manque de connaissance sur les espèces réputées résistantes

Contexte et enjeux

- Chêne liège : forte capacité de résistance supposée mais mortalité post-feu mal connue (nécessité d'un modèle prédictif)
- Importance pour la dynamique et la régénération des peuplements (échelle individuelle, échelle paysage)
- Multiplicité des facteurs expliquant la mortalité / difficulté d'évaluer la survie et la capacité de régénération (souche vivante, drageons, etc.)

→ Bâtir un modèle prédictif (précoce) de la mortalité post-incendie prenant en compte :

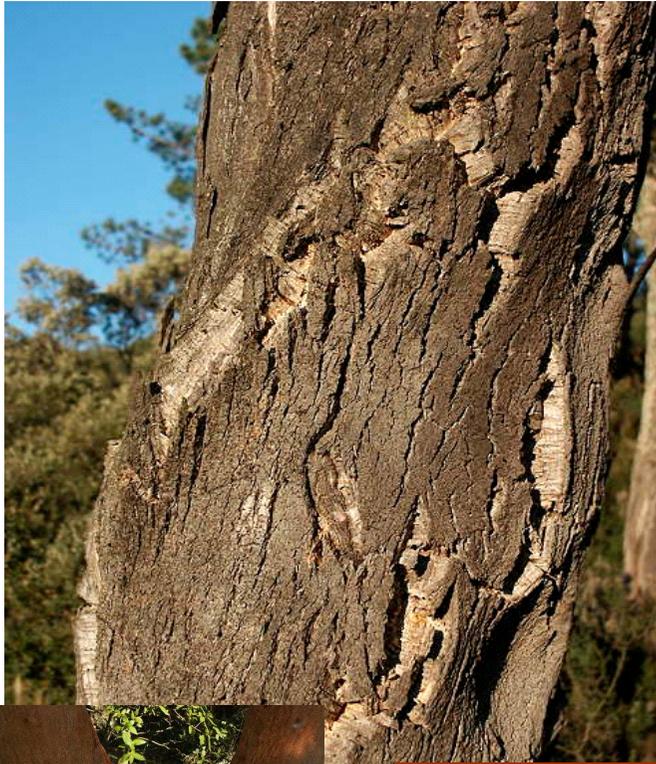
- l'intensité des dommages
- l'intensité supposée du feu
- la répétition des feux
- le contexte stationnel et paysager

Les habitats à chêne liège dans les Maures

- ❑ Forte valeur écologique et patrimoniale (Directive Habitats code 9330; code Corine 45.2)
- ❑ Une mosaïque d'habitats : forêts de chêne liège, chêne liège sur maquis hauts et bas, maquis et pelouses (connexion spatiale et dynamique)



Une espèce réputée **résistante** au feu



Une espèce réputée **résiliente** après incendie :

- ❑ régénération par voie sexuée
- ❑ régénération post-feu par voie végétative

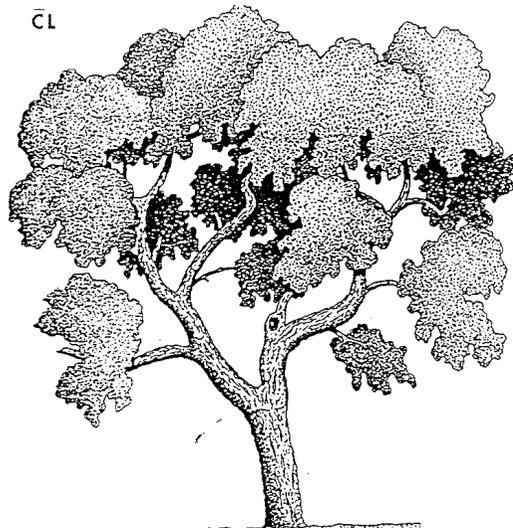


La stratégie de régénération du chêne liège par voie végétative après feu

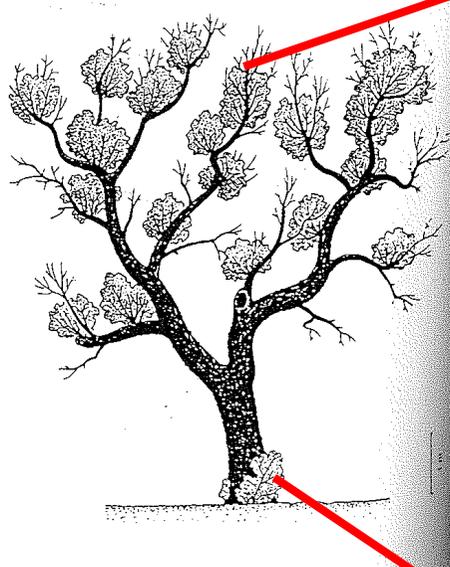


Bougeons
épïcormiques
sous l'écorce
(sur le tronc ou
sur les
branches)

Rejets
aériens



Dessin R. Prodon

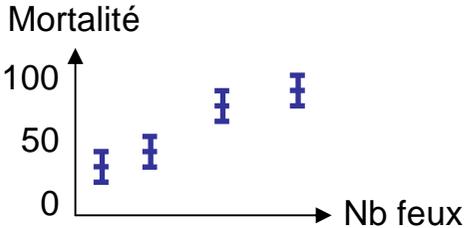
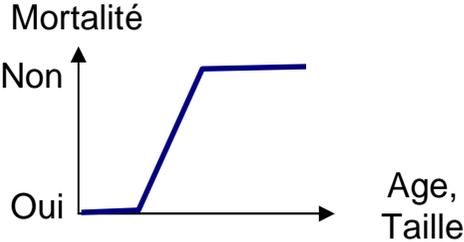
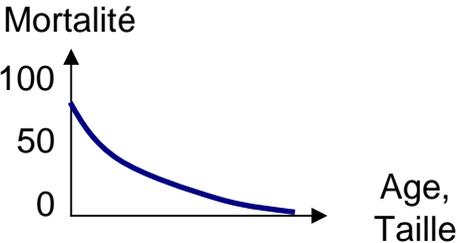
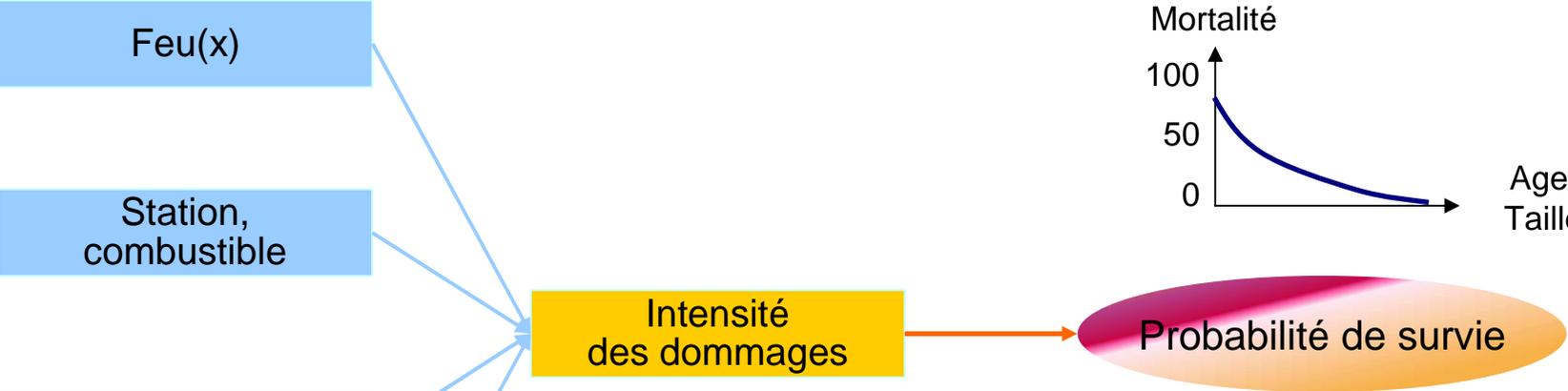


Rejets au
pied

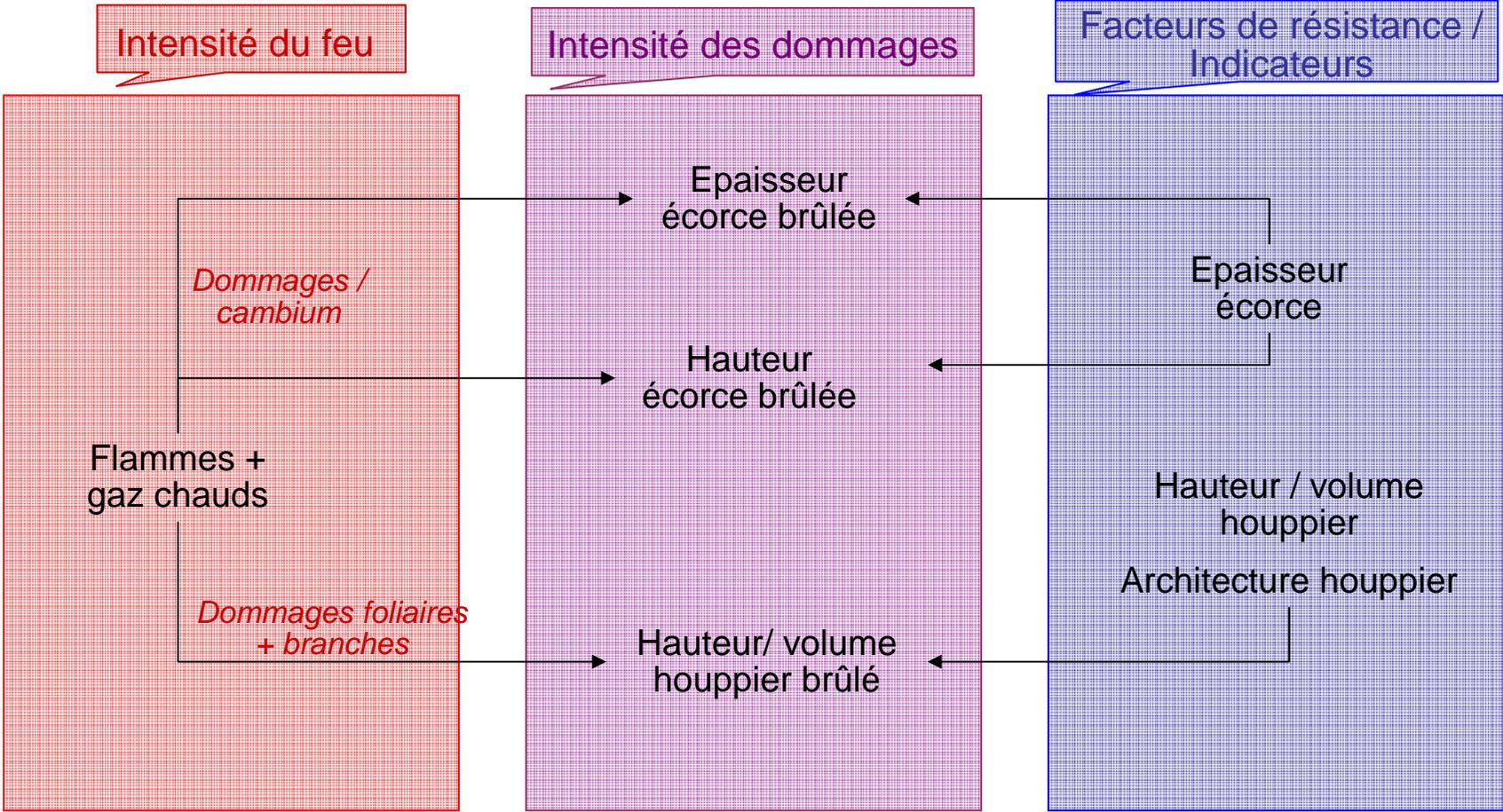
Matériels et méthodes



Les variables prises en compte pour étudier la mortalité / survie post-incendie



Variables et *indicateurs* de la mortalité post-incendie : quelle signification ?



Variables indicatrices

Attributs vitaux
(adaptations ?
Trade-off ?)

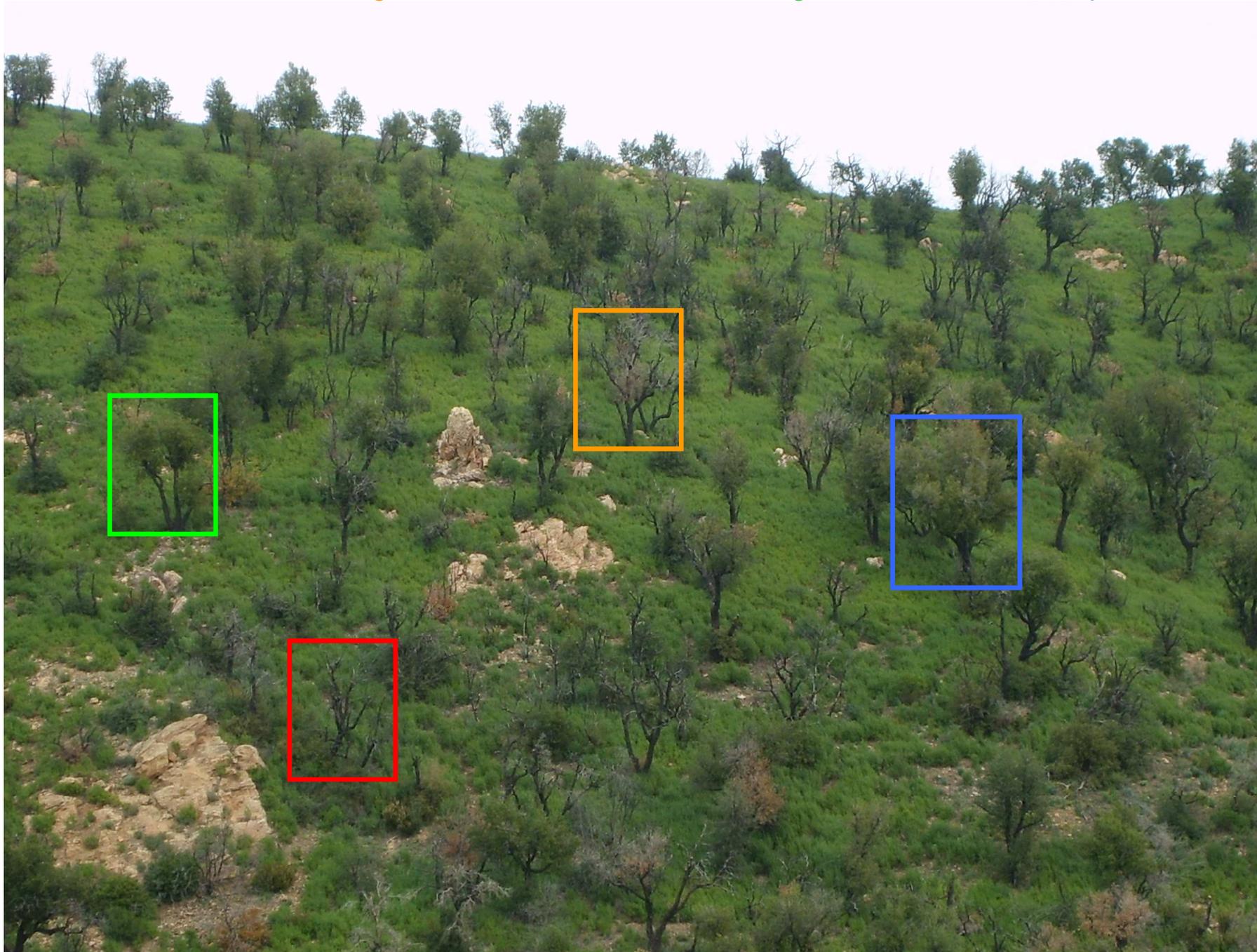
Variables causales

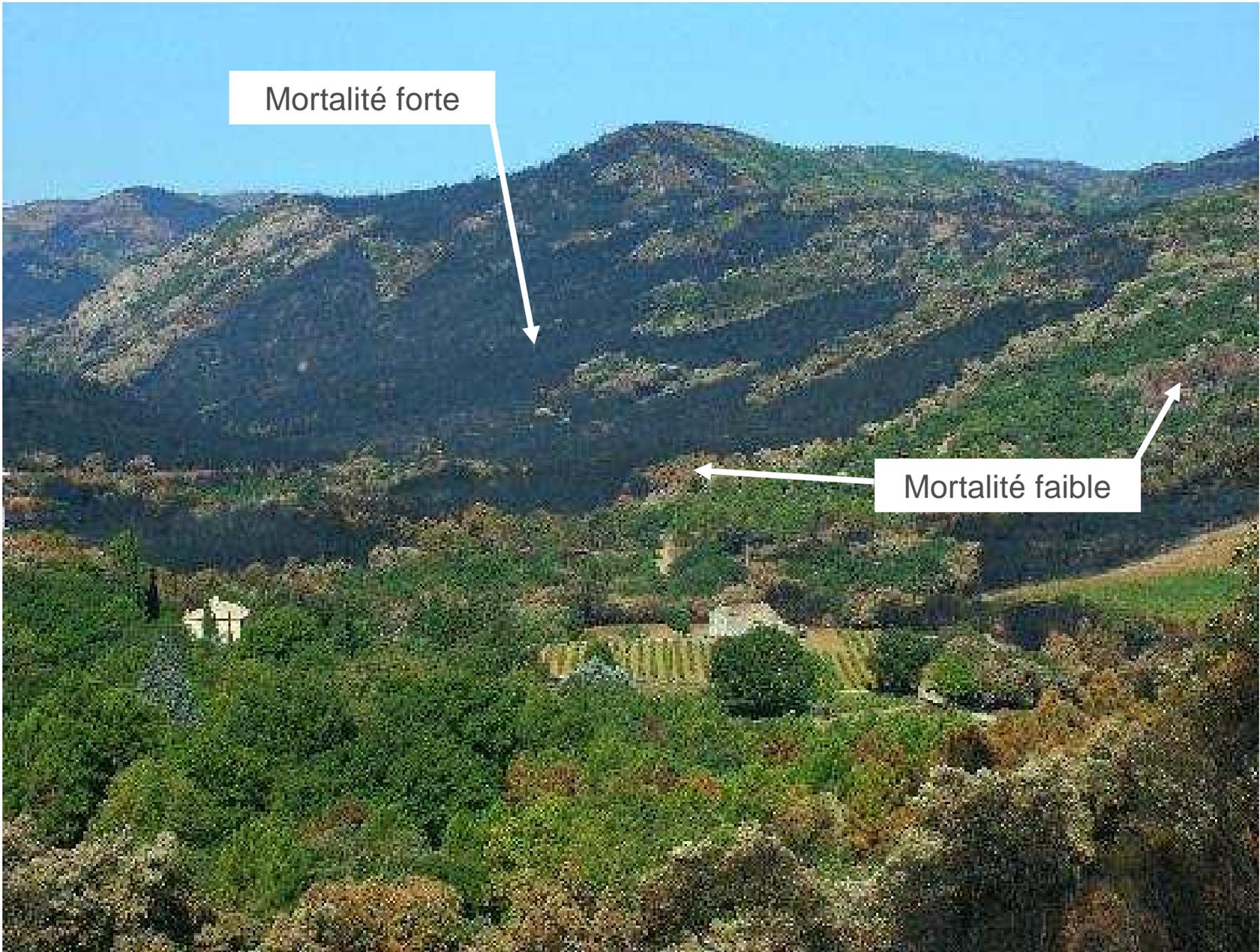
Mort

Brûlé – faible régénération

Brûlé – forte régénération

Vivant – peu brûlé

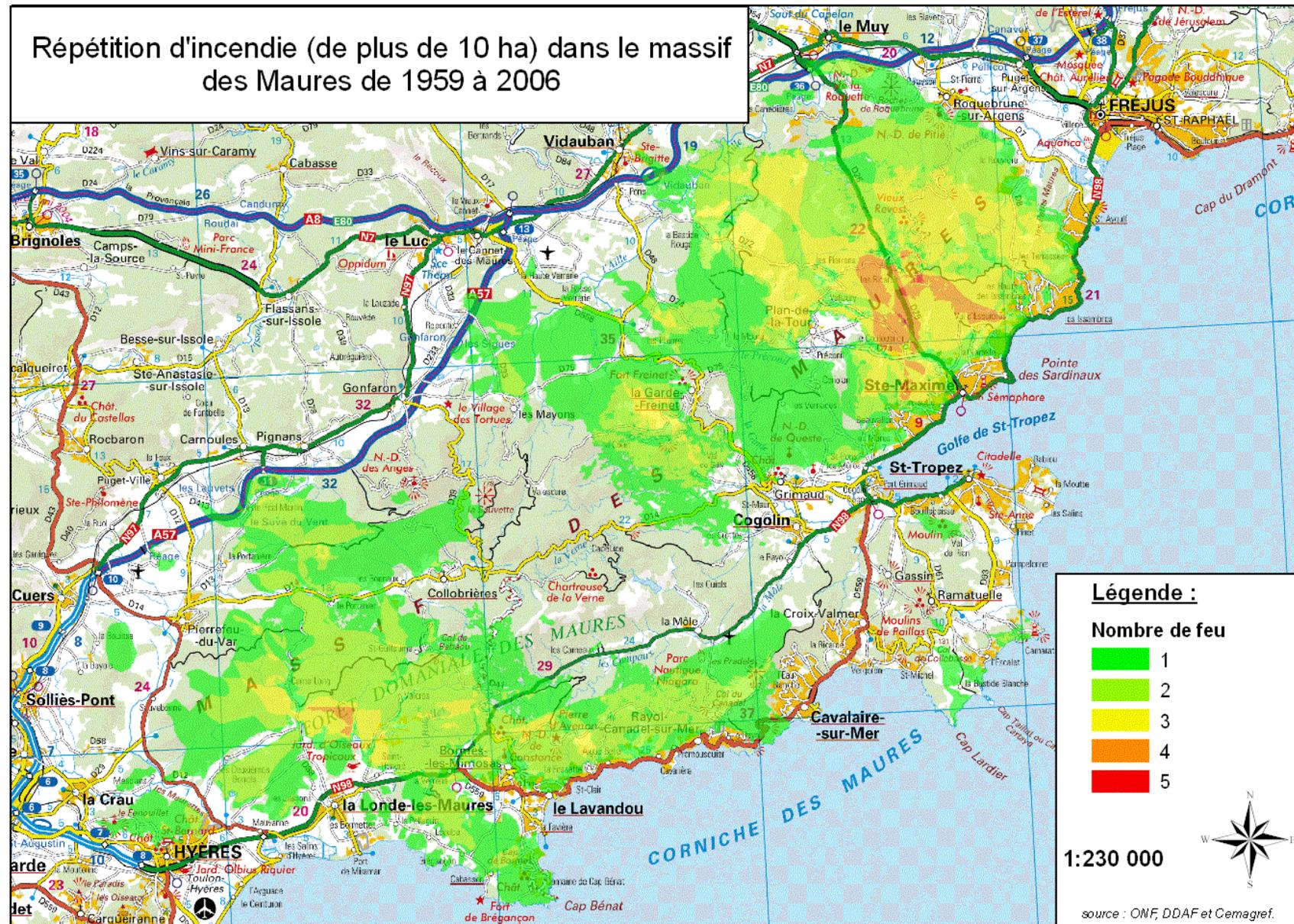




Mortalité forte

Mortalité faible

Répétition d'incendie (de plus de 10 ha) dans le massif des Maures de 1959 à 2006



La mortalité directe

Liée aux dommages subis par le cambium (seuil létal : $\theta > 60^{\circ}\text{C}$ pendant au maximum quelques minutes)

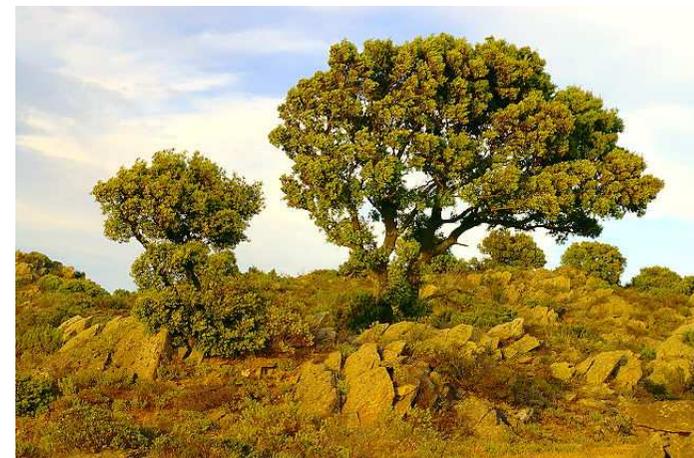
- 1) **Mortalité complète** = houppier complètement calciné et tronc/branches sévèrement brûlés (pas de rejets apparents après quelques mois)



- 2) **Mortalité de la tige principale** (rejets au pied / sur tronc et branches / partout)



- 3) **Vivant** (houppier et tronc en bon état, rejets)



La mortalité différée (suivis pendant au moins 4 ans après feu)

Existence d'une mortalité différée jusqu'à 4 ans après le feu :

- ❑ d'origine "physiologique" (arrières-effets du feu et/ou sécheresse)
- ❑ liée à des problèmes sanitaires après feu (*Phytophthora cinnamomi*; *Platypus*; *Porthetria dispar*)



Régénération de fin 2003 ayant séché à l'automne 2006

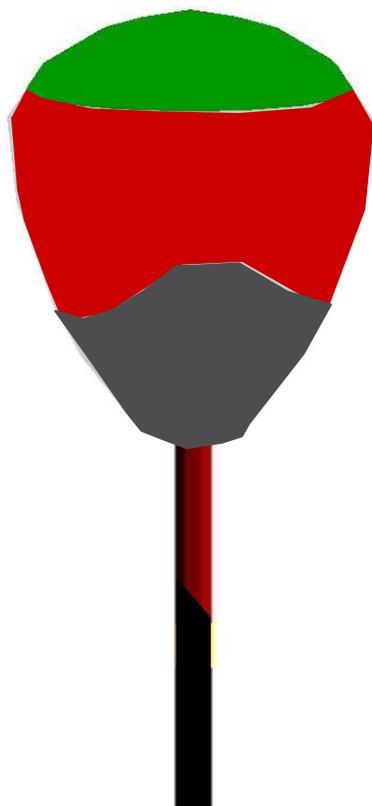
(allocation des réserves vers les rejets puis épuisement : souvent sur axes non «photosynthétiquement actifs»)

NB : La plupart des suberaies du bassin méditerranéen occidental connaissent des problèmes sanitaires

Analyse des dommages après feu

Estimation de la mortalité

Distinguer la survie par souche vivante (possibilité de recéper) de la régénération directe (branches ou base du tronc, voire drageons)

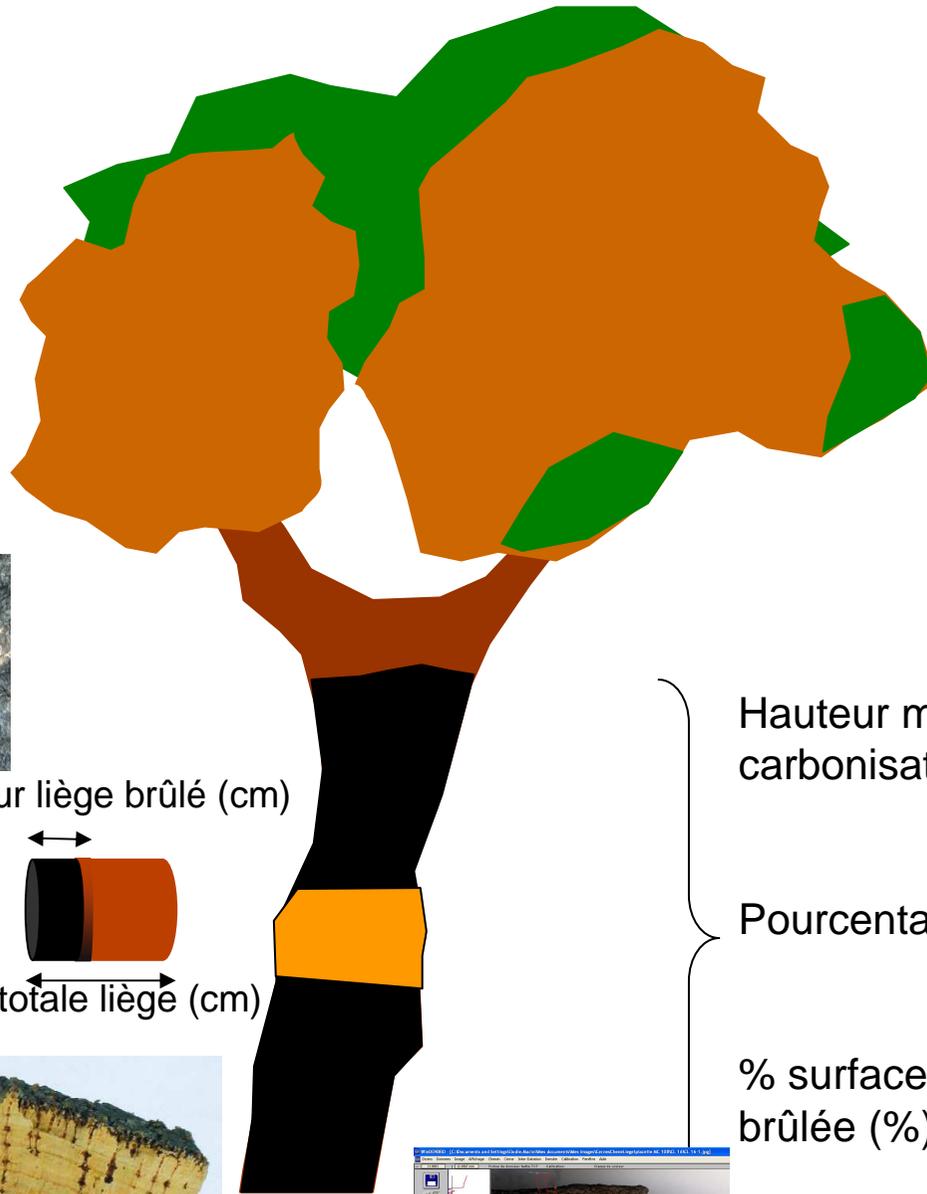


Houppier

Tronc

- ❑ Hauteur/volume houppier roussi ou brûlé
(= $f(\text{hauteur flamme}) = f(\text{intensité feu} \times \text{vent} \times \text{pente})$)
- ❑ Classe de dommage
= $f(\text{degré de brûlure} \times \text{degré de régénération})$
- ❑ Hauteur/surface/circonférence carbonisée
(= $f(\text{hauteur flamme}) = f(\text{intensité feu} \times \text{vent} \times \text{pente})$)
- ❑ Profondeur de carbonisation du liège
(= $f(\text{intensité feu})$)
- ❑ Epaisseur du liège
- ❑ Etat du cambium
- ❑ Problèmes sanitaires

+ Mesures dendrométriques classiques (hauteur, C130, diamètre houppier)



% volume houppier roussi

Echelle qualitative de dommages

0 : pas de dégâts

1 : Feuilles roussies sur l'arbre

2 : feuilles brûlées ; brindilles en place

3 : Plus de brindilles

3+ : idem avec distance rejets aériens
> ou < 1,50 m de la cime

4 : Totalement brûlé (y compris
grosses branches)

5 : Arbre totalement consommé

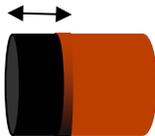
Hauteur minimale / maximale de
carbonisation (m)

Pourcentage et hauteur du déliégeage

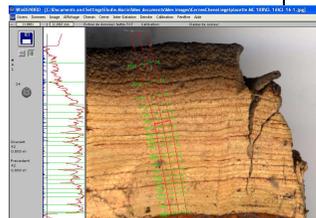
% surface carbonisée dans la zone
brûlée (%)

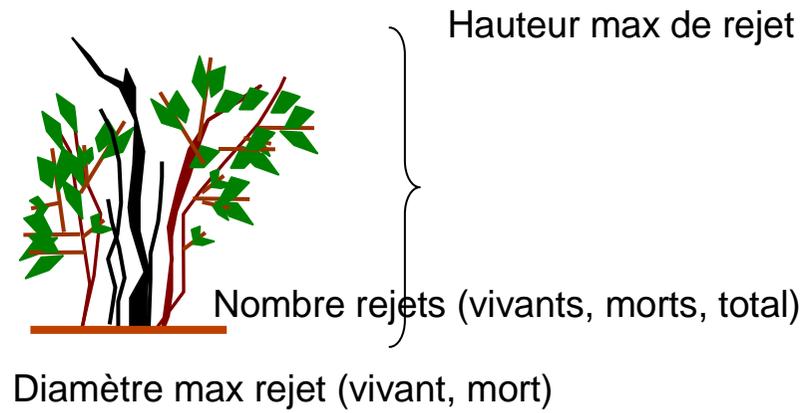
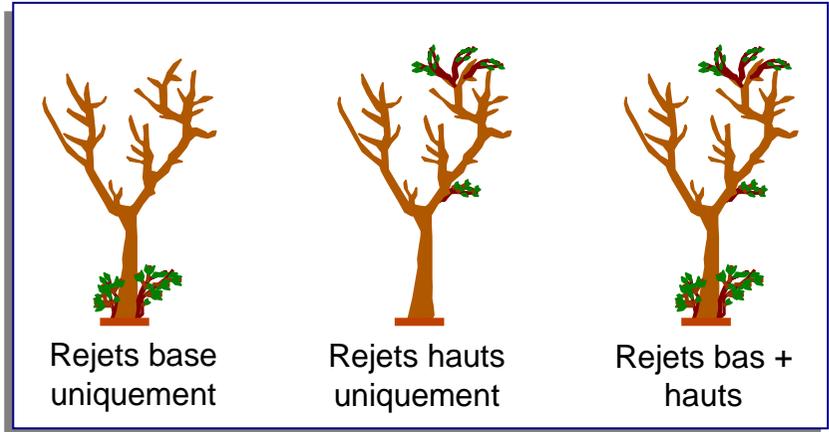
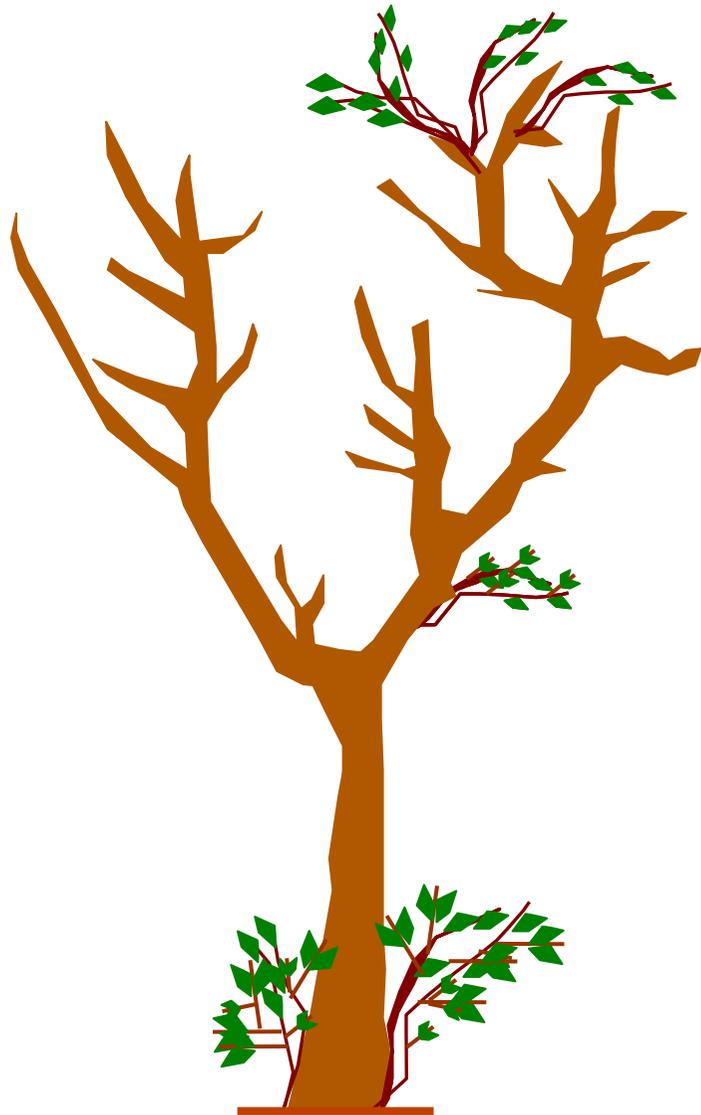


Epaisseur liège brûlé (cm)



Epaisseur totale liège (cm)



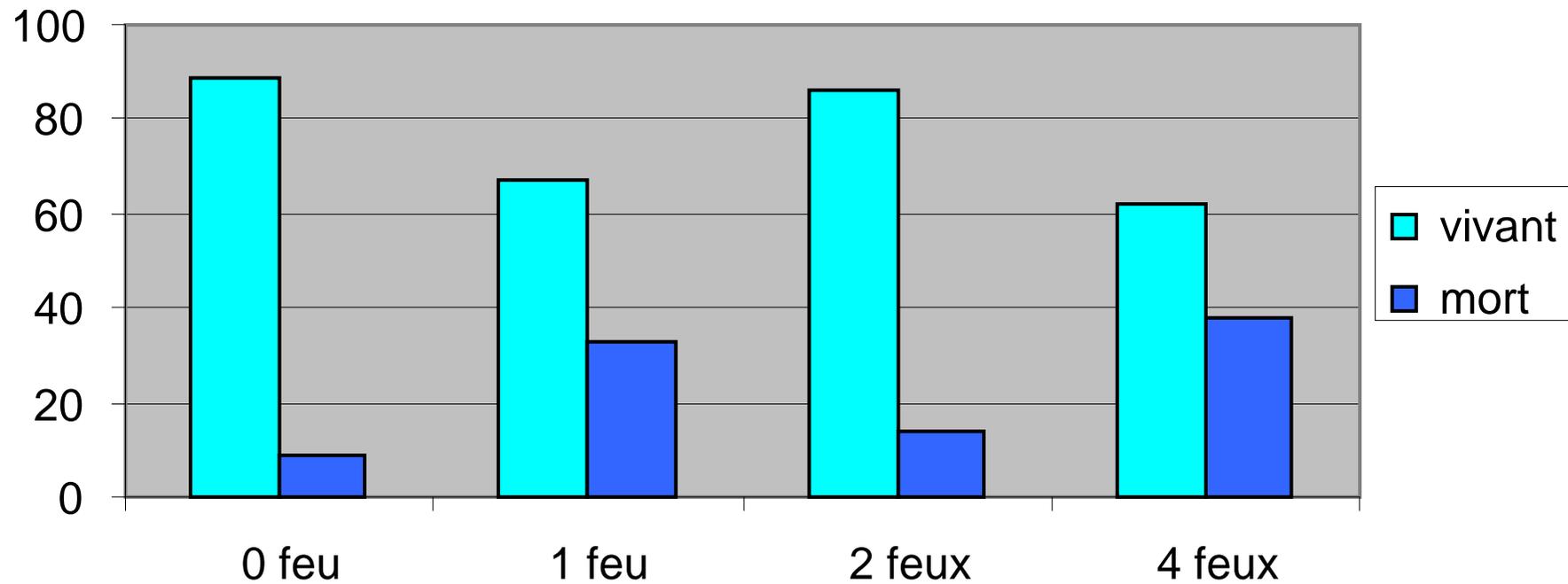


Les principaux résultats

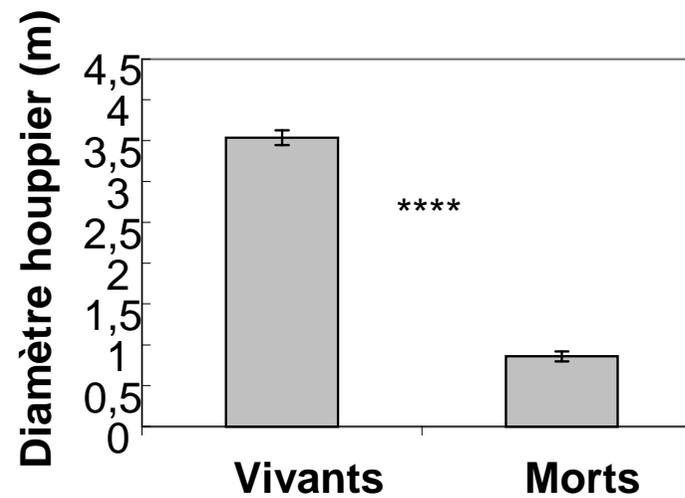
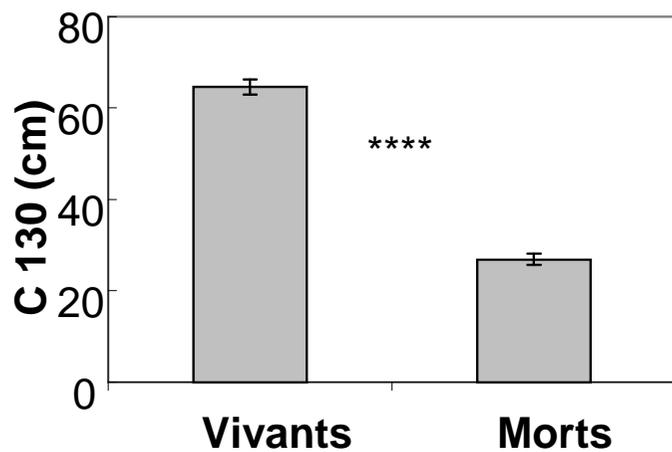
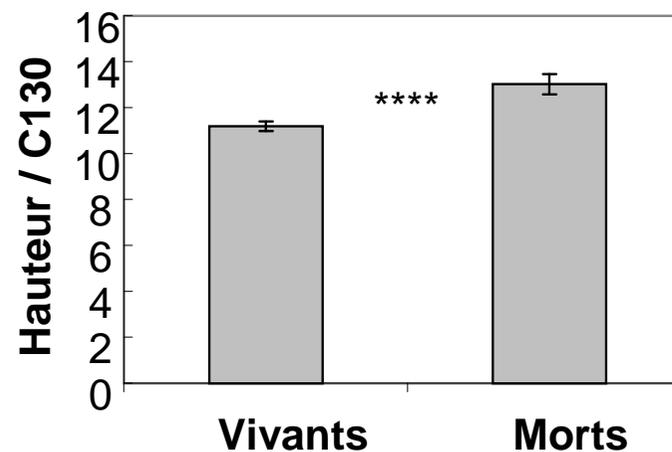
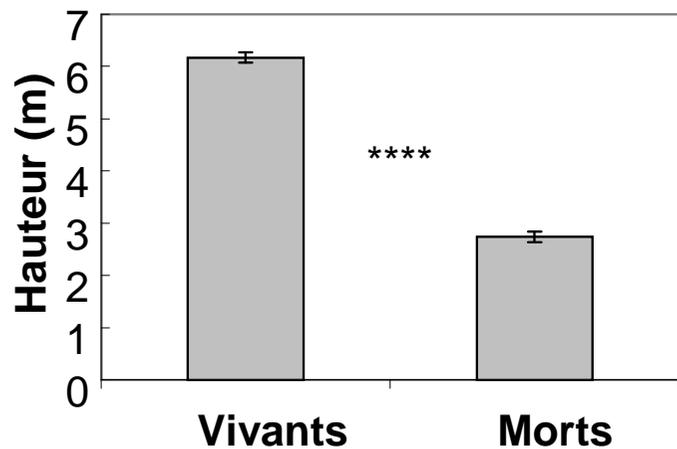


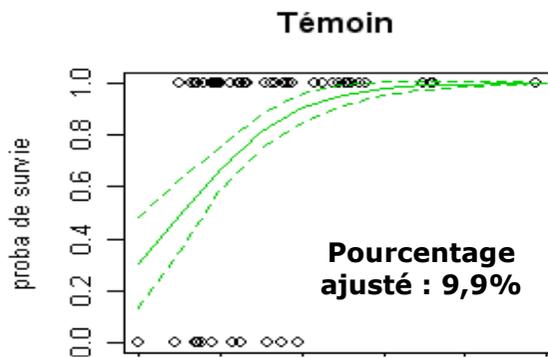
- ❑ La mortalité totale est très faible même avec des feux intenses (3,1%)
- ❑ Le taux de mortalité de la tige principale varie avec la répétition des feux mais aussi avec la date du dernier feu

Répartition de la mortalité et de la survie par rapport à l'occurrence des feux

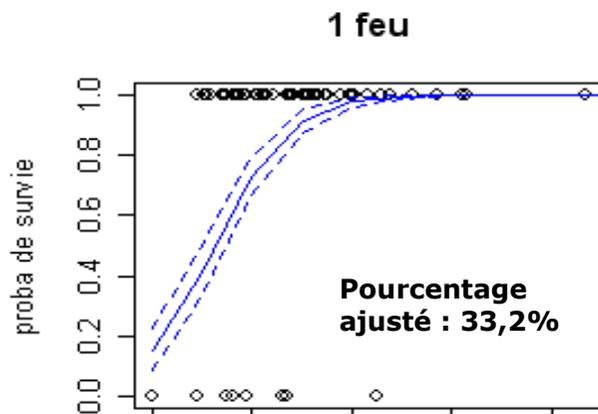


❑ Les caractéristiques dendrométriques des chênes liège vivants et morts diffèrent fortement

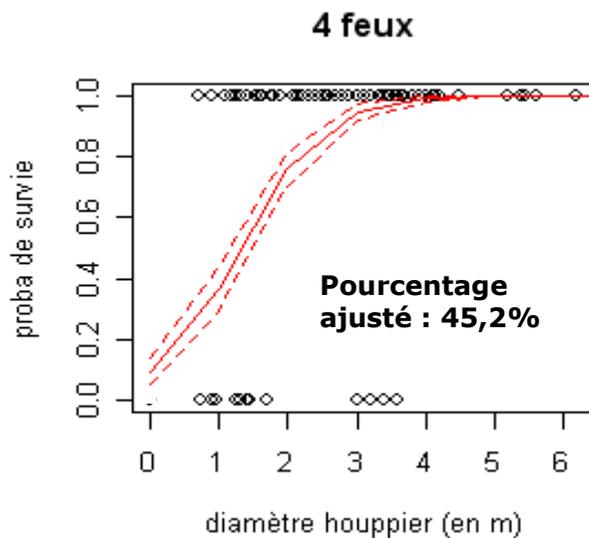




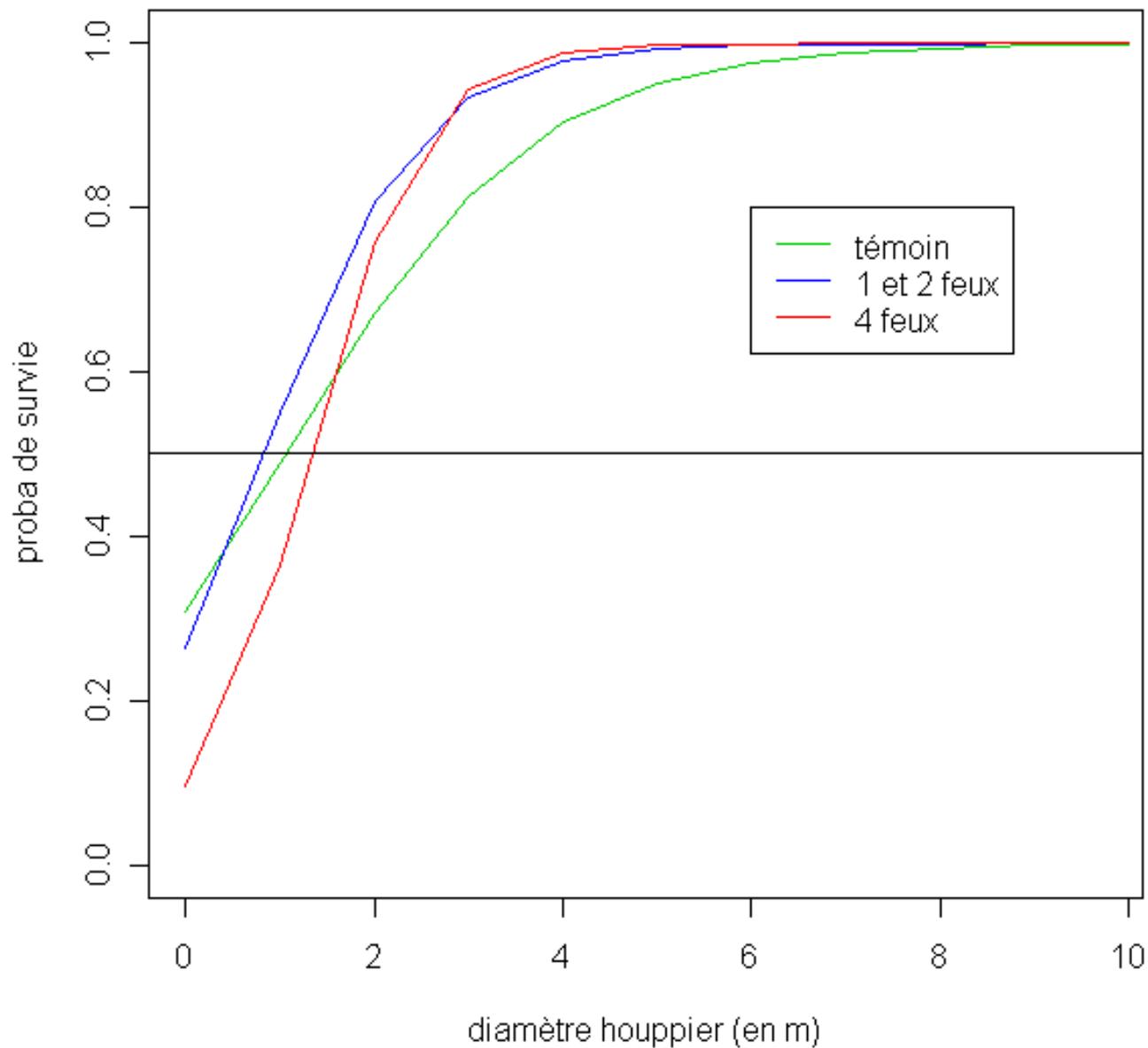
□ La probabilité de mortalité est difficilement prédictible par les dimensions de l'arbre en l'absence de feu récent



□ La répétition des feux tend à détruire des tiges plus grosses...



... mais la population ayant subi plusieurs feux a déjà évolué



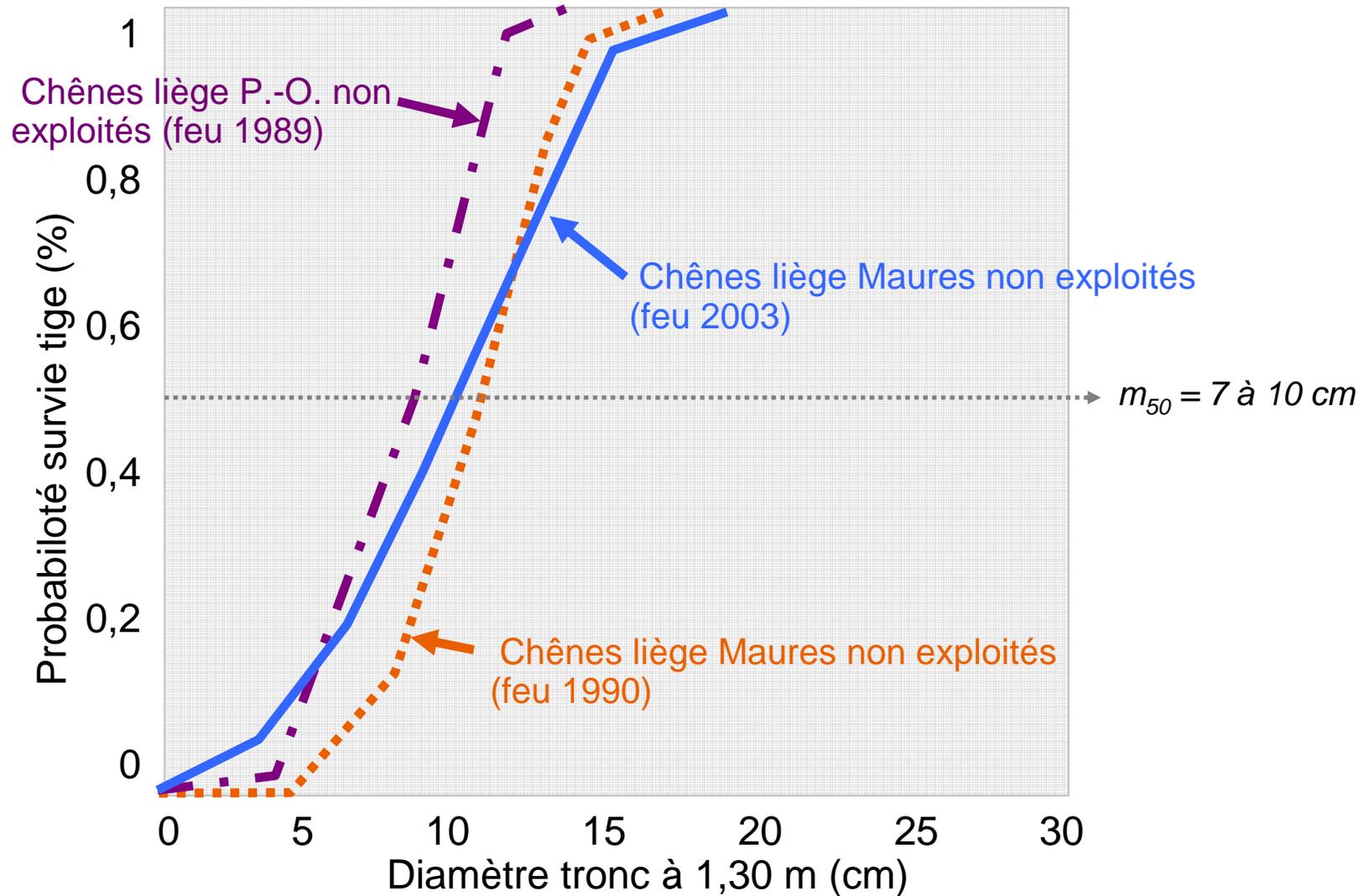
❑ La probabilité de mortalité est difficilement prédictible par les dimensions de l'arbre en l'absence de feu récent

❑ La répétition des feux tend à détruire des tiges plus grosses...

... mais la population ayant subi plusieurs feux a déjà évolué

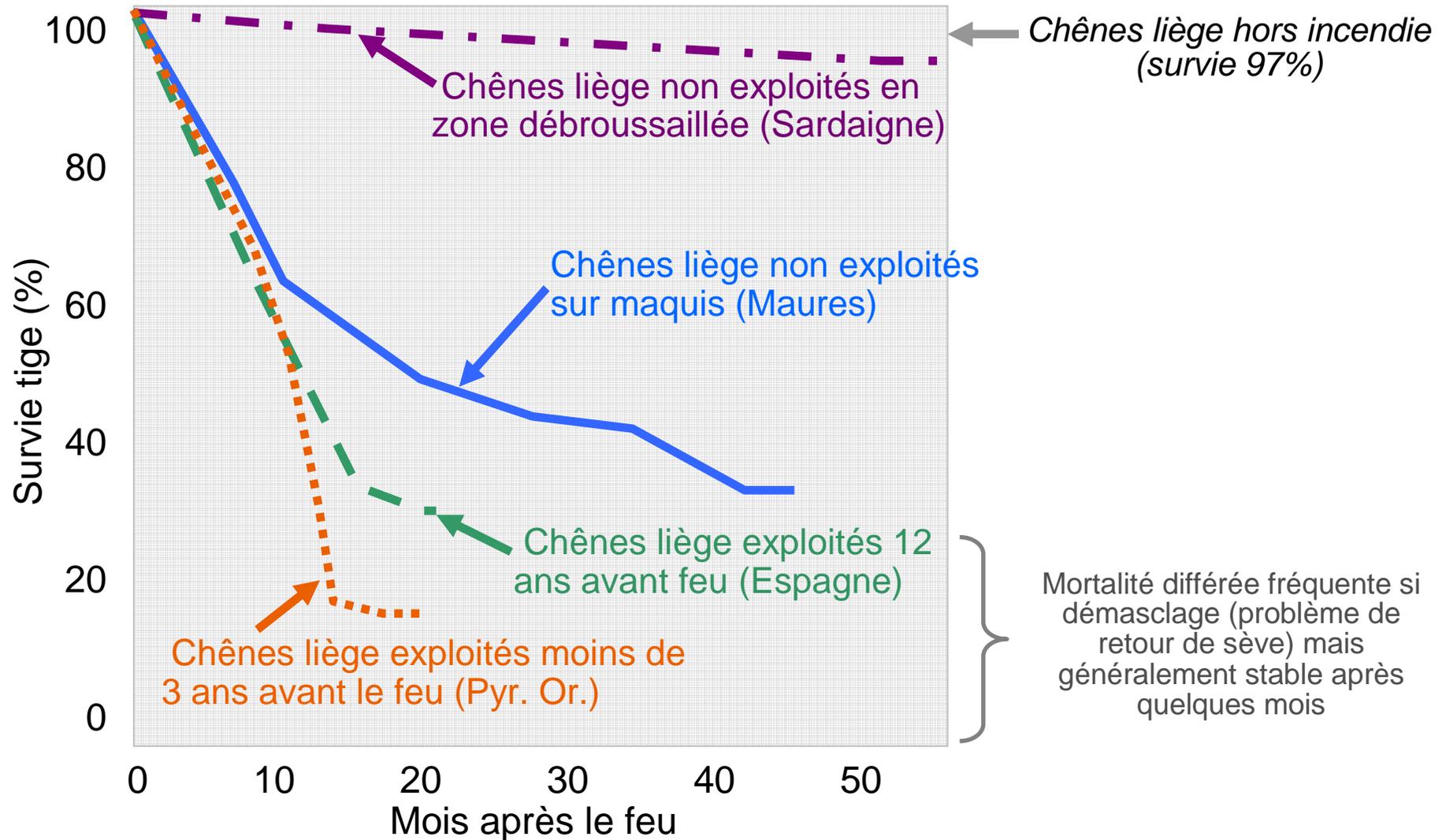
Mortalité directe de la tige principale dans les Maures :

►► *Survie généralement acquise si dbh > 15-20 cm*



Mortalité différée de la tige principale dans les Maures :

- ▶ Elle est forte : effet vraisemblable de quatre années sèches depuis le feu de 2003



Merci !