

CEMAGREF

DIVISION FORET MEDITERRANEENNE

LE MASSIF DES MAURES

PRE ETUDE

**REFLEXIONS PREALABLES A LA MISE AU POINT D'UNE METHODE
D'EVALUATION DU RISQUE INCENDIE**

DECEMBRE 1991

**A. MAILLET
P. LECOMTE**

SOMMAIRE

INTRODUCTION

1. LES MECANISMES DU FEU

1.1. LES PRINCIPES DE COMBUSTION

1.2. LE DEPLACEMENT DE LA COMBUSTION DANS L'ESPACE

1.2.1. Les mécanismes de transfert thermique

1.2.2. Quelques notions thermodynamiques
complémentaires

1.2.3. Modélisation de la propagation du feu

1.3. LES PARAMETRES ACTIFS SUR LE COMPORTEMENT DU FEU

1.3.1. Le combustible

1.3.2. Le vent

1.3.3. La pente

2. EXEMPLES DE METHODES D'EVALUATION DU RISQUE INCENDIE

2.1. LES METHODES NORD AMERICAINES

2.1.1. L'indice de risque canadien

2.1.2. L'indice de risque des Etats-Unis

2.2. LES METHODES FRANCAISES

2.2.1. L'analyse du risque dans Prométhée

2.2.2. L'analyse du risque par la cartographie du
combustible

2.2.3. L'analyse du risque à partir des paramètres
météo

2.2.3.1. Méthode ORIEUX

2.2.3.2. Méthode CARREGA

2.2.3.3. Méthode DROUET

2.2.3.4. Méthode de l'indice numérique

2.2.4. L'analyse du risque à partir de paramètres biologiques : les méthodes INRA

3. PROPOSITIONS POUR L'ELABORATION D'UNE METHODE D'EVALUATION DU RISQUE INCENDIE DANS LES ESPACES FORESTIERS

3.1. LA NOTION DE RISQUE

3.2. LA PRISE EN COMPTE DES CARACTERISTIQUES DE L'ALEA

3.2.1. Le niveau d'occurrence de l'aléa

3.2.2. Le comportement du feu : vitesse de propagation.
Puissance

3.2.2.1. La pente

3.2.2.2. Le vent

3.2.2.3. Le combustible matière sèche

3.2.2.4. L'état hydrique du combustible

3.2.2.5. Conclusion

3.3. LA PRISE EN COMPTE DE L'IMPORTANCE DES ENJEUX

3.3.1. Le nombre de vies humaines concernées

3.3.2. Les difficultés opérationnelles d'intervention

3.3.3. La valeur des patrimoines exposés

CONCLUSION

BIBLIOGRAPHIE

INTRODUCTION

La mise au point d'une méthodologie d'évaluation du risque d'incendies de forêt implique la prise en compte préalable :

- des connaissances acquises sur les mécanismes du feu
- des techniques utilisées dans le cadre de travaux déjà réalisés sur ce thème.

1. LES MECANISMES DU FEU

Un incendie peut être considéré comme une combustion se déplaçant dans l'espace, au cours du temps, et ce, hors de tout contrôle humain.

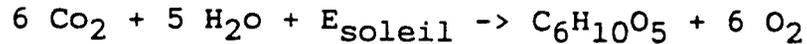
1.1. LES PRINCIPES DE COMBUSTION

La combustion est une oxydation vive fortement exothermique entre un combustible et l'oxygène de l'air. Cette réaction est communément accompagnée d'une émission de lumière et d'apparition de flammes (DAVIS 1959).

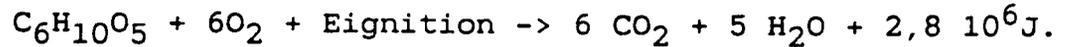
BYRAM 1959 a proposé pour le combustible végétal une formulation standard du type $(C_6 H_{10} O_5)_n$, compte tenu de la relative homogénéité dans la composition moléculaire de la biomasse.

On peut alors considérer avec DAVIS (1959) qu'une combustion est l'inverse de la photosynthèse :

Photosynthèse :



Combustion :



Il est à noter que la réaction précédente n'implique que la matière sèche, l'eau contenue dans le végétal restant chimiquement inerte. En revanche, au niveau thermodynamique, cette eau, ainsi que celle produite par la combustion, vont subir une vaporisation fortement consommatrice de chaleur.

On distingue classiquement deux phases de combustion :

- la combustion en phase gazeuse entre O_2 de l'air et les vapeurs ou les gaz issus de la décomposition de la matière, sous l'effet d'une source de chaleur (mécanisme voisin de la pyrolyse).

Selon la température atteinte par le combustible, on a les stades suivants :

- . $T \leq 275^\circ$: on note un dessèchement du végétal avec vaporisation de l'eau qu'il contient, libération de produits volatils tels que les terpènes et démarrage du processus de gazéification de la matière avec production de CO_2 , de Co et de distillats complexes.

Il s'agit là d'une phase endothermique préalable à l'oxydation.

. $275^{\circ} < T \leq 350^{\circ}$: à partir de 275° , on note une augmentation des quantités de gaz dégagées ainsi qu'une évolution dans la composition du mélange, désormais dominé par le CO et les hydrocarbures.

Lorsque la concentration du gaz émis est suffisante et que la température a dépassé un certain seuil (température d'inflammation) l'oxydation vive se produit. On est alors dans une phase exothermique, marquée par la présence de flammes. G.A. PURT (1972) CHANDLER (1983) ont montré que cette température d'inflammation variait avec la nature du combustible, tandis que BARROWS (1951) a souligné l'importance de la durée d'exposition à la source de chaleur. La valeur standard retenue par de nombreux auteurs est de 300° . (Il est par ailleurs à noter qu'en l'absence de point chaud d'allumage, SIMMS et LAW (1979) ont indiqué qu'une auto inflammation du mélange gazeux est possible aux alentours de 500° 550°).

La flamme qui fait son apparition est dite de diffusion (ALBINI 1976) puisqu'elle ne concerne que des phases gazeuses et non le solide proprement dit.

La température de cette flamme qui se situe entre 500 et 1200° dépend du combustible mais également du niveau d'oxydation réalisé.

En effet, à l'air libre, la stoechiométrie des réactions n'est jamais respectée, et l'oxydation reste plus ou moins incomplète : les gaz imbrûlés peuvent alors se recondenser en fines gouttelettes emportées dans un flux de CO_2 et de vapeur d'eau (ce sont les fumées) ou se combiner intermoléculairement dans le cas d'hydrocarbures (ce sont les dépôts de goudron en surface du solide).

Par ailleurs, les atomes de carbone libérés s'agglomèrent en particules de suie qui sont portées à incandescence dans la flamme, la rendant ainsi particulièrement éclairante.

Compte-tenu de sa forte température, la flamme constitue, en plus du solide proprement dit, une source de chaleur supplémentaire dont l'effet radiatif est important sur l'environnement immédiat.

Il est à remarquer enfin qu'il existe une teneur limite en O_2 de 15,75% (indice limite d' O_2) en dessous de laquelle la flamme ne peut se maintenir.

. $350^\circ < T \leq 450^\circ$. Le dégagement de gaz se poursuit, moins intense, mais composé désormais d'un mélange d'hydrocarbures, de CO et de H_2 , lequel hydrogène deviendra particulièrement présent au-delà de 450° .

Par ailleurs, un résidu de combustion solide et noirâtre se forme progressivement : le charbon.

- La combustion entre la phase solide en surface de combustible et l' O_2 de l'air.

A partir de 450° se constitue de la surface vers l'intérieur du solide, du charbon, qui peut jouer le rôle de combustible secondaire et entrer à son tour dans un processus d'oxydation par incandescence (sans flamme ou avec des flammes courtes très intermittentes).

Cette combustion, lorsqu'elle est complète, laisse pour seuls résidus les cendres minérales incombustibles.

En conclusion, on peut donc noter que la combustion met en jeu :

- un combustible en phase gazeuse ou solide selon le stade de la combustion
- un comburant : O_2 de l'air
- une source de chaleur permettant de déclencher les processus de gazéification puis d'inflammation, stade au-delà duquel la réaction devenant fortement exothermique, le combustible en feu peut jouer à son tour le rôle de source de chaleur pour son environnement.

1.2. LE DEPLACEMENT DE LA COMBUSTION DANS L'ESPACE

Telle que décrite au paragraphe précédent, la combustion met en jeu des transferts thermiques entre :

- une source de chaleur (heat source des anglo-saxons)
- un combustible "cible" (heat sink des anglo-saxons)

qui, exposé aux effets de la source, peut entrer en combustion et devenir ainsi à son tour une source de chaleur vis-à-vis de son environnement.

La répétition en chaîne du processus décrit ci-dessus constitue une bonne représentation du mécanisme de propagation de la combustion (et donc du front de flamme) dans l'espace.

Il convient donc d'examiner de plus près les mécanismes de transfert de chaleur.

1.2.1. Les mécanismes de transfert thermique

Ils sont au nombre de trois :

- la conduction : le transfert de chaleur se réalise de proche en proche, sans mouvement de matière, grâce à des échanges d'énergie cinétique, entre composants disposant d'une certaine liberté de mouvement autour de leur position d'équilibre. L'équation correspondante est de la forme :

$$\Delta Q / \Delta t = - \lambda S \Delta T \text{ où } \Delta Q / \Delta t \text{ est la vitesse du transfert}$$

S est la surface du transfert

ΔT est le gradient de température

et λ un coefficient de conductivité thermique qui est particulièrement faible pour la matière ligneuse.

A l'exception du cas des litières, le rôle de la conduction reste très marginal dans le cas des incendies de forêt.

- la convection

La convection est un phénomène caractéristique des fluides (liquides ou gaz), se traduisant par des mouvements de matière liés à des variations de densité au sein du fluide, elles-mêmes générées par des différences de température. L'échange de chaleur et donc la tendance à l'égalisation des températures se fait par substitution progressive des molécules

chaudes, qui ont une trajectoire ascensionnelle, par des molécules froides.

Tant que l'ensemble de ces mouvements reste le fait de la seule variation de densité, on parle de convection naturelle.

Si par contre, un facteur externe vient favoriser le phénomène, on parle alors de convection forcée.

L'équation de transfert correspondante est de la forme:

$$\Delta Q/\Delta t = \alpha S \Delta T$$

où $\Delta Q/\Delta t$ est la vitesse de transfert thermique

S la surface concernée par le transfert

ΔT la différence de température entre la source de chaleur et le milieu ambiant.

et α un coefficient de convection exprimé en $W m^{-2} C^{-1}$.

Il est à noter que l'essentiel (80 à 90%) de la chaleur évacuée par un système en combustion l'est par le mécanisme de convection.

En l'absence de tout facteur correctif externe, ce flux se déplace dans la direction verticale de bas en haut. Son effet est donc sensible sur les combustibles situés au-dessus de la source de chaleur.

Cette règle est en revanche modifiée, lorsqu'un élément externe (vent, pente du terrain) conduit à une inclinaison relative plus ou moins prononcée de la colonne de convection, dont l'effet peut alors se faire sentir également sur le combustible placé en avant de la source de chaleur.

- Le Rayonnement :

Contrairement aux deux cas précédents, ce mécanisme de transfert de chaleur est parfaitement isotrope c'est-à-dire qu'il intervient de façon équivalente dans toutes les directions de l'espace.

A tout instant, un corps absorbe et émet des rayonnements électromagnétiques. D'une façon générale les corps qui absorbent bien les rayonnements (corps noir) sont également ceux qui sont de bons émetteurs (radiateur intégral).

L'énergie émise par un corps obéit à la loi de Stephan Boltzmann.

$$E = \Sigma \sigma T^4$$

où σ est la constante de Stephan Boltzmann $5,67 \cdot 10^{-8}$

USI

T est la température absolue du corps en °K

Σ un coefficient d'emissivité dont la valeur est 1 pour un radiateur intégral et inférieure à 1 sinon.

Par ailleurs, la loi de WIEN précise que, pour un corps noir, la longueur d'onde de la radiation émise diminue lorsque la température du corps émetteur augmente.

On en déduit donc, que des corps à T faible émettent des rayonnements faibles dans les grandes longueurs d'onde, tandis que les corps à T élevée produiront un fort rayonnement, pour des longueurs d'onde du domaine thermique Infra rouge et proche Infra rouge.

Dans le cas d'une combustion, cette émission thermique est le fait du solide, mais aussi et surtout de la flamme dont la température est de 2 à 3 fois supérieure.

Le rayonnement ne représente que 10% à 20% (Byram 1959) de la chaleur totale évacuée par une combustion végétale. Il constitue toutefois le mécanisme majeur, du transfert de chaleur vers les combustibles encore intacts, situés en avant du panneau radiant correspondant au front de flammes (Rothermel Anderson 1968 Van Wagner 1968). Il est à noter toutefois que seule une partie du rayonnement est "utile", compte tenu de l'isotropie du phénomène. Chaque corps étant à la fois émetteur et récepteur de rayonnements électromagnétiques, le niveau de transfert de chaleur par rayonnement dépendra de leur bilan radiatif respectif, lequel est fonction des différences de températures existant entre les deux corps, des surfaces mutuellement exposées au rayonnement, des capacités de chacun à absorber et émettre le rayonnement, des distances séparant ces deux corps.

En effet, l'air absorbe une partie de l'Energie rayonnée par une source, selon une loi proportionnelle au carré de la distance d parcourue par le rayonnement (Byram 1959 Countryman 1978).

1.2.2. Quelques notions thermodynamiques complémentaires

Les mécanismes de transfert précédemment évoqués concernent des quantités de chaleur émises par la source ou absorbées par le combustible. L'évaluation de ces flux

calorifiques fait appel à quelques notions simples qu'il convient de définir.

- La chaleur spécifique : exprimée en $\text{Jg}^{-1}\text{C}^{-1}$ ou $\text{calg}^{-1}\text{C}^{-1}$; elle représente la quantité de chaleur nécessaire pour élever de 1°C la température d'1 g de matière.

Sa valeur pour l'eau est $4,18 \text{ Jg}^{-1}\text{C}^{-1}$ ou $1 \text{ calg}^{-1}\text{C}^{-1}$.

Pour la matière végétale, TELISIN (1974) propose en moyenne $1,4 \text{ Jg}^{-1}\text{C}^{-1}$.

- La chaleur latente de vaporisation : exprimée en Jg^{-1} , elle correspond à la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer 1 g de liquide en phase vapeur, dans les conditions normales de température et de pression.

Sa valeur pour l'eau est de $2,26 \cdot 10^3 \text{ Jg}^{-1}$.

- Le pouvoir calorifique (P.C.) exprimé en Jg^{-1} (ou en cal g^{-1} auquel cas on lui donne plutôt le nom de chaleur de combustion ou de valeur énergétique) représente la quantité de chaleur libérée par la combustion complète de 1 g de matière combustible.

Ce pouvoir est dit supérieur (P.C.S.), quand l'eau impliquée dans la combustion demeure condensée et inférieure (P.C.I.) dans le cas contraire, qui correspond à la réalité du feu de forêt.

A titre d'exemple, on peut citer les P.C.S. trouvés par DOAT et VALETTE 1980 pour un certain nombre de combustible :

Celluloses	16,7 10 ³ Jg ⁻¹
Lignine	25,5 10 ³ Jg ⁻¹
Bois sec	19,6 10 ³ Jg ⁻¹
Bois à 25% d'humidité	14,1 10 ³ Jg ⁻¹
Ecorce	14,6 10 ³ Jg ⁻¹
Feuillages	20 à 24 10 ³ Jg ⁻¹ selon les espèces.

Van WAGNER (1972) et HOUGH-ALBINI (1978) considèrent que l'intervalle compris entre 18 10³ Jg⁻¹ et 24 10³ Jg⁻¹ constitue une fourchette acceptable pour les PCS de l'ensemble des combustibles végétaux.

Les variations entre espèces résultent principalement des variations de teneur relative en cellulose et lignine.

La différence entre PCI et PCS de la matière sèche est accessible si la quantité d'eau formée par la combustion est connue.

GIORDANO (1971) propose une valeur moyenne pour l'écart de 1350 Jg⁻¹, HOUGH en 1969 ayant quant à lui avancé une valeur moyenne de 1250 Jg⁻¹.

L'ensemble des définitions données jusqu'à présent concernent des grandeurs relatives à l'unité de masse de combustible.

On peut en déduire d'autres notions, relatives à l'ensemble de la phytomasse présente en un lieu donné. Il s'agit en particulier des grandeurs suivantes :

- Le potentiel calorifique : c'est la quantité maximale de chaleur, libérée par la combustion complète de la charge combustible, c'est-à-dire de la phytomasse présente par unité de surface.

Ce potentiel exprimé en $J m^{-2}$ s'obtient par la formule:

$Pot = \sum_i m_i PC_i$ où m_i est la masse en $g m^{-2}$ d'un type de combustible présent,

PC_i son pouvoir calorifique, correspondant à une teneur en eau donnée.

- L'énergie de combustion : c'est la quantité de chaleur réellement libérée par la combustion de la charge combustible. Elle est donnée par la formule $E = Pot - R - I$

où Pot est le potentiel calorifique

R est le potentiel des résidus de combustion

I est l'énergie des gaz et particules inoxydés.

FONS (1960) indique que pour des feux provoqués ou pour des feux en laboratoire, I représente environ 5% de Pot .

- Le débit calorifique : exprimé en Watt, il correspond à la quantité de chaleur libérée par l'ensemble des surfaces émissives, dans l'unité de temps.

Ce débit, ramené à l'unité de surface émissive, constitue le flux calorifique exprimé en $W m^{-2}$.

- La puissance du front de feu (BYRAM 1959 et TANGREN 1976).

Elle est donnée par la formule :

$$P_f = PCI \times \Delta m \times V_F$$

où PCI est le pouvoir calorifique de la matière sèche mesuré en Jg^{-1} ,

Δm la masse de matière sèche détruite par unité de surface en gm^{-2} ,

V_F la vitesse d'avancement du front en ms^{-1}

On en déduit l'Intensité du front de feu en multipliant P_f par le linéaire total du front.

Il est à noter que P_f concerne non seulement le front de flamme, mais également la zone en combustion lente, située en arrière du front de flamme proprement dit.

La valeur de V_F peut être obtenue par l'observation directe ou estimée grâce à des formules de calcul, issues de modélisation de la propagation du feu, du type de celle présentée au paragraphe ci-dessous.

1.2.3. Modélisation de la propagation du feu

La modélisation de la propagation du feu a donné lieu à bon nombre de travaux, dont la plupart ont abouti à une formalisation prédictive de la vitesse d'avancement du front de flamme.

Les modèles ainsi mis au point sont divers dans leur conception, mais ils relèvent tous de l'une des trois catégories suivantes :

- modèles empiriques : ils ne font appel à aucune théorie physique, mais reposent exclusivement sur une description statistique d'un bon nombre d'observations et d'expériences, à partir desquelles ont pu être établies des corrélations significatives entre certains facteurs.

- modèles semi-physiques : ils s'appuient, contrairement aux précédents, sur les principaux paramètres physiques intervenant dans le mécanisme du feu. En revanche, la détermination des coefficients, reliant dans la formule finale les paramètres entre eux, se fait encore, au moins pour partie, par calage statistique et non par calcul théorique. Le modèle BEHAVE de ROTHERMEL (1972) relève de cette catégorie.

- modèles physiques : ils visent à rendre compte de l'ensemble des phénomènes, sur la base d'une description mathématisée de tous les processus physiques élémentaires en jeu. Ces modèles, qui sont de loin les plus complexes à établir, n'ont toujours pas acquis à ce jour d'existence opérationnelle.

Les modèles semi-physiques ou physiques considèrent la propagation comme la répétition de proche en proche, dans l'espace, du mécanisme d'éclosion (avec comme seule différence avec l'éclosion initiale, que le rôle de source de chaleur est alors joué par du combustible déjà en feu et non par une source exogène au système).

Dans ces conditions, le comportement du feu au sein duquel on distingue habituellement éclosion et propagation se réduit à l'itération dans l'espace et dans le temps d'un seul

phénomène de base : le transfert de chaleur entre une source et une zone de combustible intact.

Le processus ainsi enclenché se poursuit et se développe, tant que les quantités de chaleurs produites par la combustion en cours, suffisent à initier de nouvelles combustions, par transfert au niveau des zones de combustibles encore intactes.

Cette représentation du comportement du feu suppose toutefois que soient remplies les hypothèses suivantes, qui sont communes à nombre de modèles de propagation :

- Le combustible est constitué de particules élémentaires, disposées selon une couche homogène, isotrope, et possédant une continuité verticale et horizontale parfaite.

- la propagation s'effectue de façon régulière, sans phénomène d'embrasements brusques ou de sautes de feu.

Parmi les modèles les plus fréquemment utilisés, on peut citer celui de ROTHERMEL (1972), complété par ALBINI (1976) et basé sur une équation théorique de conservation de l'énergie établie par FRANDSEN en 1971.

Les calculs mis en oeuvre par ROTHERMEL conduisent à la formulation suivante de la vitesse de progression du front de flamme.

$$V = [I_r \xi (1 + \emptyset w + \emptyset s)] / \rho_b \epsilon Q_{ig}$$

Les facteurs du dénominateur représentent respectivement :

- . ρ_b : la masse volumique apparente de la couche combustible, c'est-à-dire le rapport de la masse de matière, au volume total apparent de la couche.

- . \mathcal{E} : la proportion de la matière devant atteindre la température d'ignition pour que puisse apparaître l'inflammation du combustible.

- . Q_{ig} : la chaleur nécessaire pour élever l'unité de masse du combustible jusqu'à sa température d'ignition.

Les facteurs du numérateur correspondent quant à eux à :

- . I_r : l'intensité de réaction c'est-à-dire la quantité de chaleur dégagée par unité de temps et unité de surface émissive.

I_r peut se déduire de P_f , calculé d'après la formule de Byram, grâce à la relation $P_f = I_r \times h$, où h est la profondeur du front de flamme.

- . ξ est un facteur correctif, lié au fait qu'une partie seulement de I_r est réellement utilisée dans le déclenchement de la combustion de la phytomasse encore intacte. Le reste de I_r étant évacué dans d'autres directions.

Ce facteur correctif est lui-même influencé par le vent et la topographie, d'où le coefficient $(1 + \emptyset w + \emptyset s)$, où $\emptyset w$ rend compte de l'effet du vent sur ξ et $\emptyset s$ rend compte de l'effet de la pente sur ξ .

1.3. LES PARAMETRES ACTIFS SUR LE COMPORTEMENT DU FEU

D'après les données fournies dans les paragraphes précédents, il apparaît que ces paramètres relèvent de trois domaines principaux :

- le combustible,
- le vent,
- la pente.

1.3.1. *Le combustible*

Le combustible impliqué dans un incendie se présente généralement sous forme de strates végétales superposées ; chaque strate correspond à une couche combustible, elle-même constituée d'un assemblage de particules élémentaires de combustible.

La description et la classification des différentes formations combustibles vont faire appel à des critères physiques, chimiques et biologiques relatifs soit à la particule élémentaire, soit à la couche, soit à la formation dans son ensemble (BROWN 1970 TRABAUD 1974) :

- La teneur en eau du combustible

Ce paramètre est capital. En effet, l'influence de la teneur en eau du combustible sur le processus de combustion se fait sentir à plusieurs niveaux :

. la chaleur nécessaire pour élever la température du combustible humide est supérieure à celle, capable de produire un effet identique, sur les composants matière sèche et eau pris séparément. (SIMARD 1968).

Ceci s'explique par les liaisons eau-matière qui existent au sein du végétal. Heller en 1969 a montré qu'on peut distinguer 3 états de l'eau dans un système biologique :

- * l'eau libre,

- * l'eau liée par des mécanismes d'adsorption, qui ne peuvent être rompus que moyennant apport d'une certaine quantité d'énergie,

- * l'eau de constitution : cette eau intramoléculaire n'est récupérable qu'après destruction de l'édifice moléculaire, opération qui exige une énergie importante.

. La vaporisation de l'eau est forte consommatrice de chaleur, compte tenu de la valeur de la chaleur latente de vaporisation de ce corps.

L'eau constitue donc un excellent "refroidisseur", d'où son emploi généralisé en matière de lutte contre le feu.

. La vapeur d'eau, une fois formée, occupe un volume notable au sein du mélange gaz de pyrolyse-oxygène de l'air. Etant chimiquement inerte dans la réaction d'oxydation, elle a pour seul effet de "diluer" les réactifs en présence et donc de gêner le bon déroulement de la réaction.

. VINES (1981) et TROLLOPE (1978) ont mis en évidence le rôle d'écran thermique également joué par la vapeur d'eau au niveau du rayonnement infra rouge.

L'ensemble des considérations précédentes expliquent pourquoi Trabaud, en 1979, obtient lors de feux expérimentaux sur chênes Kermès, des températures de flamme de 1000°C en début d'automne et de 650°C seulement au printemps. De la même façon, on conçoit qu'il existe une teneur en eau, au-delà de laquelle le maintien de la flamme et sa progression dans l'espace deviennent impossibles : on parle alors de teneur en eau d'extinction, dont Blackmarr en 1972, puis Cheney en 1981 fixe la valeur respectivement à 45% et 20% du poids de matière sèche, dans le cas d'une litière d'aiguilles de pins.

D'une manière plus générale, on constate expérimentalement, que l'augmentation de la teneur en eau du combustible entraîne une diminution de la puissance du front de feu, de sa vitesse de propagation, ainsi que de la hauteur et de la profondeur de la flamme.

Les mécanismes contrôlant l'humidité du combustible ne sont pas de même nature selon qu'il s'agit de phytomasse morte ou vivante.

. Cas du combustible mort : son comportement est parfaitement hygroscopique, sa teneur en eau est donc entièrement déterminée par l'humidité relative de l'air et les précipitations récentes. La vitesse de mise en équilibre entre l'humidité du combustible et celle de l'environnement est d'autant plus forte que le combustible est fin : les combustibles lourds ont une telle inertie en la matière, qu'ils

ne peuvent suivre les variations rapides du milieu et demeurent de ce fait très souvent, hors de leur état d'équilibre. Par ailleurs, Fosberg 1970 et Furman 1975 ont montré que la vitesse de dessiccation était plus rapide que celle de réhumectation.

L'humidité relative de l'air, définie par le rapport entre la pression de vapeur observée et la pression de vapeur saturante, est sous la dépendance de facteurs météorologiques secondaires tels que :

- * la température de l'air, qui détermine la valeur de la pression de vapeur saturante. En effet, un air chaud est susceptible de contenir à l'état vapeur une quantité d'eau supérieure à celle admissible par un air froid.

On utilise souvent la notion de point de rosée, qui correspond au seuil de température à partir duquel, pour une pression de vapeur donnée, la condensation commence à se produire.

Les variations de la température de l'air se font essentiellement au contact du combustible ou du sol, dont la température évolue quant à elle, en fonction du bilan radiatif, d'où l'influence secondaire de la qualité de l'insolation et de l'importance de la nébulosité et du degré de couvert végétal (Countryman 1967, 1968, 1977).

- * Le vent, qui a un pouvoir desséchant advectionnel par renouvellement permanent des couches d'air (Schroeder Buck 1970).

En ce qui concerne les précipitations récentes, il est à noter d'une part que leur durée importe plus que leur volume, d'autre part que leur effet est d'autant plus net que la teneur en eau

des combustibles est initialement basse (Van Wagner 1970, Fosberg 1972 1977, Hough 1978).

. Cas du combustible vivant : sauf dans le cas des végétaux très fins, (Trabaud 1980), l'humidité relative de l'air et les précipitations récentes n'ont qu'un rôle marginal dans la teneur en eau du combustible vivant.

En réalité, l'humidité des végétaux vivants est commandée essentiellement par des mécanismes physiologiques, qui sont sous la dépendance à leur tour :

* des conditions climatiques saisonnières : les cycles saisonniers jouent en effet un rôle majeur dans la succession des stades phénologiques des végétaux.

* du bilan existant à tout instant, entre une disponibilité hydrique, représentée par la réserve en eau du sol, (laquelle dépend à la fois de la nature du sol mais aussi de l'historique des précipitations) et une demande évaporative représentée par l'E.T.P.

La résultante des deux composantes précédentes conduit à des teneurs moyennes en eau pour les végétaux vivants : (exprimées en % de la matière sèche)

. feuillage et pousses en période de	
végétation active	200 à 250%
. maturation	100 à 150%
. activité réduite "dormance"	40 à 50%
. dessèchement poussé	30%

- La structure du combustible

Les principales caractéristiques physiques à prendre en compte ont été analysées par Anderson et Rothermel 1965 Brown 1970 Fosberg 1971 Deeming et al 1974.

Elles concernent :

. la finesse ou état de division du combustible : on peut avoir une idée au travers, d'une part de la taille des particules élémentaires regroupés par classes, d'autre part de la distribution au sein de la couche de combustible de ces différentes classes. L'indicateur fréquemment utilisé est le rapport de la surface développée au volume matière S/V .

La combustion mettant en oeuvre des phénomènes de transfert, on comprend l'importance que peut avoir une surface d'échange maximale, laquelle s'obtient avec une division fine du combustible.

Ainsi Curry et Fons en 1940 ont montré que lorsque S/V augmentait le délai d'inflammation diminuait, tandis que la vitesse de combustion s'accélérait. De la même manière, Rothermel et Anderson en 1966 ont noté que l'intensité de réaction I_r et la vitesse de propagation croissaient avec S/V tant que l'alimentation en O_2 était assurée.

Mc Arthur pour sa part, avait déjà indiqué en 1967 que vitesse de combustion et vitesse de propagation étaient inversement proportionnelles à l'épaisseur du combustible (donc à sa taille).

Toute la difficulté pratique réside dans la mesure de S/V , qui n'est accessible que pour les formes géométriques simples.

. la compacité (ou la porosité) de la couche combustible considérée :

La compacité est généralement estimée au travers de l'un des rapports suivants :

* V_{mat}/V_{tot} où V_{mat} est le volume réel occupé par la matière combustible et V_{tot} est le volume total apparent correspondant, c'est-à-dire le volume réel augmenté du volume des vides intersticiels.

* m/V_{tot} où m est la masse de combustible correspondant au volume apparent V_{tot} , (on parle alors de masse volumique apparente).

La porosité est estimée quant à elle à partir de l'un des indicateurs suivants :

* V_{vide}/V_{mat} : rapport du volume du vide au volume réel de la matière dans la couche combustible (Countryman 1969)

* V_{vide}/V_{tot} : rapport du volume des vides au volume total apparent de la couche combustible (Rothermel Anderson 1972)

* V_{vide}/S : rapport du volume des vides à la surface développée par le combustible (Fons 1946 Countryman 1969).

Curry et Fons (1940) Anderson (1966) Rothermel (1972) indiquent que, lorsque la porosité augmente, l'aptitude à la combustion fait de même et cela jusqu'à une certaine limite.

Ce résultat est confirmé par Frandsen et Schuette (1978) qui indiquent que la vitesse de destruction de la biomasse croît inversement au rapport V_{mat}/V_{tot} mais que la relation ne vaut que jusqu'à une certaine limite de V_{mat}/V_{tot} .

L'explication en est simple : une compacité forte implique un tel tassement des particules que la disponibilité d'O₂ est insuffisante au coeur de la couche combustible. Avec l'accroissement de la porosité, l'air circule mieux, l'apport en O₂ devient de plus en plus important, la combustion se déroule donc mieux. Il existe toutefois un optimum de porosité au-delà duquel l'espacement entre éléments de combustible s'apparente à une discontinuité préjudiciable aux transferts thermiques entre "source" et "cible", d'où une combustion qui redevient moins performante.

Le même phénomène se produit si au lieu d'avoir affaire à une couche combustible homogène, on se trouve en présence d'une distribution très hétérogène du combustible dans le plan horizontal et vertical.

Il est d'ailleurs à noter que la porosité de la couche combustible évolue, puisque, généralement, le passage du front de flamme suffit à faire disparaître les éléments de moins de 5 mm de diamètre ou d'épaisseur.

De nombreux auteurs ont d'ailleurs insisté sur le fait, que la dynamique du front de flamme était pilotée exclusivement par les combustibles fins, la combustion des éléments plus lourds se faisant toujours plus lentement, par incandescence, en arrière du front de flamme.

. La charge combustible

Il s'agit là d'un paramètre important dans la mesure où il est en relation avec la puissance du front, la vitesse de propagation, l'intensité de réaction, la hauteur et la profondeur de flamme.

En réalité, l'important est le combustible disponible, c'est-à-dire celui réellement détruit par le passage du feu (et non la phytomasse totale). Par ailleurs, la connaissance de la charge totale disponible ne suffit pas. Il faut également connaître la répartition de cette charge selon les tailles de combustible et selon les strates de végétation.

En effet, le rôle des combustibles fins et celui des combustibles lourds diffèrent quelque peu, tant en terme de dynamique du front de flamme, que de quantité de chaleur dégagée.

Cette charge combustible est généralement exprimée en phytomasse présente par unité de surface. Dans le cas d'une masse volumique apparente constante, cette mesure se ramène à une prise en compte des hauteurs de végétation.

- La composition chimique du combustible

Elle intervient de manière tout à fait sensible, dans la mesure où la combustion est une réaction chimique mettant en oeuvre des produits de décomposition thermique de la matière, en concentration variable.

On peut ainsi noter les points suivants :

. les végétaux lignifiés sont composés en moyenne de 30% de lignine et 50% de celluloses et hemicelluloses. Des variations existent cependant qui expliquent pour partie les différences de pouvoirs calorifiques spécifiques. En effet, à poids égal la lignine contient plus de C que la cellulose : elle est donc plus énergétique.

. Les substances volatiles (huiles essentielles, terpènes, résines...) quoique ne représentant que quelques % de la matière, ont une nette influence sur la combustion, car elles sont hautement inflammables et leur pouvoir calorifique est important.

. A l'inverse, les éléments minéraux (silice exclue) dont les teneurs habituelles oscillent entre 1 et 4% du poids sec, mais peuvent parfois être beaucoup plus fortes, ont un effet dépresseur indiscutable sur la combustion (Mutch Philpot 1970).

En pratique, ces sels minéraux gênent la pyrolyse des hydrates de carbone.

Il est donc important de bien distinguer au sein du combustible les espèces végétales qui le composent compte-tenu des différences de composition chimique qui en résultent, mais également de s'intéresser aux stations étudiées, dans la mesure où leurs caractéristiques peuvent avoir une influence sur la teneur des végétaux en divers éléments chimiques.

1.3.2. Le vent

Le vent est un facteur important à prendre en considération au niveau de la combustion, compte tenu de ses effets tant sur le processus lui-même, que sur les transferts de chaleur entre "source" et "cible".

En effet, la présence du vent entraîne simultanément :

- une dessiccation plus rapide

- un préchauffage plus aisé du combustible situé en avant du front de flamme, du fait d'une part, de l'inclinaison de la colonne de convection et d'autre part, de l'inclinaison du panneau radiant constitué par la flamme (d'où une augmentation de la part du rayonnement utile) (MAC GUIRE 1953). La vitesse de propagation du feu en est accrue, Mac Arthur 1967 indiquant que le taux d'accroissement est égal au carré de l'accélération du vent.

- un renouvellement plus important de l'O₂ nécessaire à la combustion, ce qui, dans certaines limites, favorise la vitesse de combustion et donc augmente la puissance du front.

Il est à noter que ce renouvellement se fait plus rapidement en altitude, là où la vitesse du vent n'est pas ralentie par la rugosité des surfaces (Barrows 1951).

- un transport de brandons à l'origine des sautes de feu.

Ce vent peut revêtir plusieurs formes :

- des vents synoptiques, c'est-à-dire générés par les conditions isobariques générales, liées aux champs de pression qui évoluent à la surface du globe.

- des vents locaux aux origines diverses :

. origine thermique : entrent dans cette catégorie

* les brises de montagne : le jour l'air s'échauffe au contact du sol et suit de ce fait un mouvement ascendant le long des pentes. Il en résulte une dépression au niveau de la vallée d'où une brise de vallée ascendante. La nuit, l'air se refroidit au contact du sol, devient plus lourd et s'écoule le long

des parois jusqu'au fond de vallée, d'où une brise descendante.

* les brises de mer : la différence du comportement thermique de la terre et de la mer entre jour et nuit crée une brise dans le sens terre-mer, la nuit et en sens inverse le jour.

. origine dynamique : ces vents résultent de la combinaison entre le déplacement de masses d'air et une topographie qui en renforce ou modifie les effets.

L'analyse de cette interaction peut se faire par simulation expérimentale ou par calcul analytique théorique.

Les principales règles à retenir sont les suivantes:

* selon l'obstacle, l'écoulement est laminaire tourbillonnaire ou turbulent

* lorsque la direction du vent fait un angle de moins de 30° avec l'obstacle, la déflexion est totale. Dans le cas contraire, on a décomposition du vecteur vent en une composante parallèle à l'obstacle et une composante perpendiculaire à l'obstacle.

* l'effet de l'obstacle sur le vent qui lui est perpendiculaire varie

→ avec la hauteur de l'obstacle

→ avec sa largeur horizontale qui détermine les cas où le contournement latéral est possible et ceux où l'accélération le long de la pente se produit.

→ avec sa forme plane : convexe, elle dévie latéralement le vent, concave, elle le concentre et l'accélère en partie centrale de la concavité.

→ avec son état de surface : plus il est rugueux, plus le flux a tendance à évoluer de laminaire à turbulent.

→ avec l'importance de la rupture de pente :

Jusqu'à 40° , cette rupture accélère de plus en plus le vent. Au-delà de 40° , se créent des rouleaux d'air à axe horizontal qui diminuent la pente apparente vis-à-vis du vent. Ces rouleaux, formés par le vent, remontent à leur tour progressivement la pente, avant de se déstructurer en crête.

→ avec la pente moyenne : si elle est faible, le vent en crête est laminaire ; si elle est forte, le vent en crête cesse d'être laminaire. Dans tous les cas, derrière la ligne de crête le vent ralentit et devient turbulent sur le haut du versant sous le vent.

* Dans le cas d'une vallée, le vent s'oriente totalement selon l'axe de cette vallée, si sa direction fait un angle de moins de 30° avec la vallée. Plus la vallée est étroite, plus l'accélération est forte.

A l'inverse, si le vent est perpendiculaire à la vallée, il n'y pénètre pas si la vallée est encaissée, il y pénètre sous forme de masse d'air en rouleaux si l'encaissement est moyen, il y pénètre sous forme de flux laminaires ou turbulents si l'encaissement est faible.

. L'effet pente, combiné à l'effet resserrement explique l'accélération maximale du vent au niveau des cols.

1.3.3. La pente

Hormis l'influence indirecte de la topographie à travers son action sur le vent, telle qu'elle a été décrite au paragraphe précédent, la pente joue également un rôle direct sur la combustion, en générant une inclinaison relative entre colonne de convection ou panneau radiant du front de flamme et combustible situé en avant dudit front.

Cette inclinaison favorise le préchauffage des combustibles : la vitesse de propagation, la vitesse de combustion et donc la puissance du front en sont sensiblement accrues.

Selon P. DELAVEAUD la vitesse de combustion et la vitesse de propagation du feu s'ajustent à la pente selon une fonction puissance.

2. EXEMPLES DE METHODES D'EVALUATION DU RISQUE INCENDIE

Il existe actuellement un certain nombre de méthodes d'évaluation du risque d'incendie en France ou à l'étranger. Nous allons en examiner quelques-unes et étudier la démarche qui a été suivie dans chaque cas.

2.1. LES METHODES NORD AMERICAINES

2.1.1. *L'indice de risque canadien*

Le système canadien a été mis au point en 1970 (Anon 1970). Une note explicative sur les équations utilisées a été publiée par Van Wagner en 1974, lequel a précisé la structure de l'indice en 1976 et 1987.

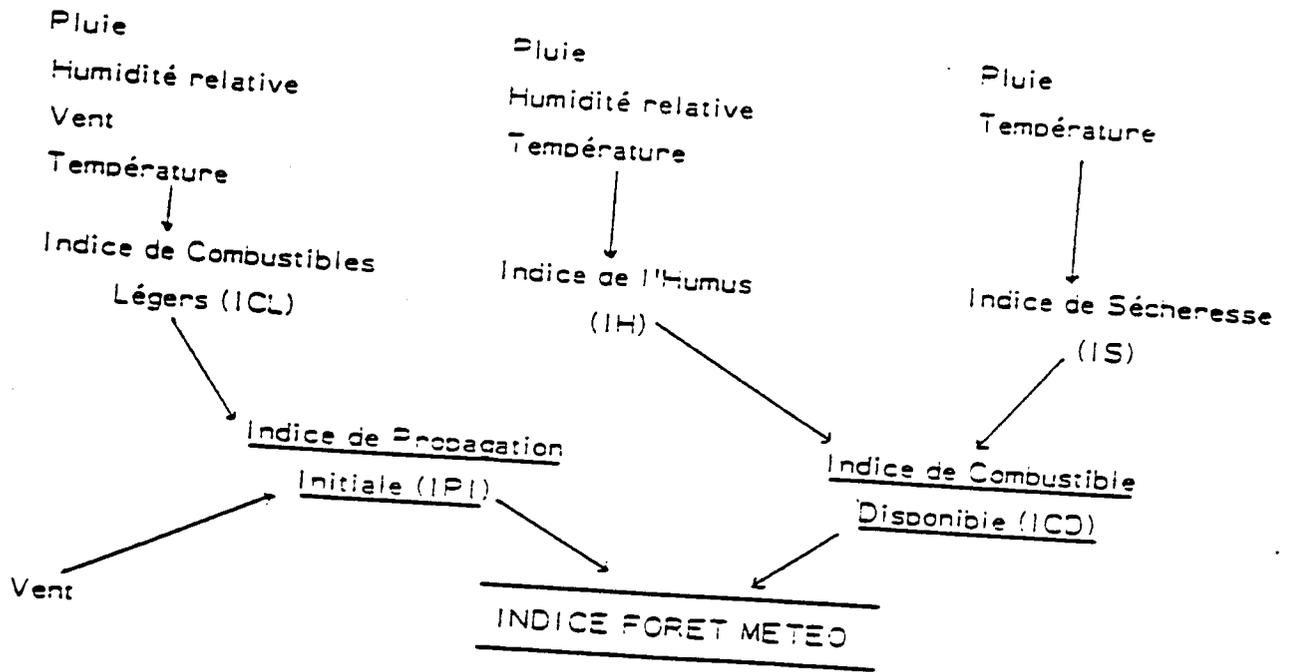
L'indice de risque canadien comprend deux parties distinctes :

- un indice Forêt Météo IFM, calculé sur une forêt de pins standard et qui prend en compte les conditions météorologiques propices à l'incendie.

- un indice de comportement du feu, qui donne des indications sur l'intensité et la vitesse de propagation, pour des types de couvert autres que la pinède standard. Cet indice définit en quelque sorte les écarts à l'I.F.M standard.

Les causes ne sont en revanche pas prises en compte dans le système canadien.

L'IFM standard se calcule par étapes à partir :



Structure de l'Indice Forêt: Météo canadien
(d'après Van Wagner, 1974)

- de 3 composantes de base, rendant compte de la teneur en eau des classes de combustible mort ayant des vitesses de dessèchement différentes :

- . ICL indice de combustible léger pour la litière
- . IH indice d'humus pour la matière organique peu tassée de surface
- . IS indice de sécheresse pour la matière organique tassée en profondeur.

- de 2 composantes intermédiaires obtenues par combinaison entre composantes de base et vitesse du vent.

. IPI : indice de propagation initiale issu de la combinaison vent avec ICL

. ICD : indice de combustible disponible issu de la combinaison vent IH et IS.

L'IFM résulte de la synthèse entre IPI et ICD.

L'ensemble des indices et des combinaisons sont calculés grâce à des formules mathématiques, déterminées exclusivement sur des bases statistiques, à partir de paramètres météo (température de l'air, humidité relative, vent, pluies récentes...).

En pratique, l'IFM est calculé quotidiennement, à partir de sa valeur du jour précédent, grâce à des tables, abaques ou programmes informatiques, permettant d'effectuer les corrections nécessaires. L'initialisation du système est faite par les services météo.

L'échelle pour l'IFM a été établie par l'observation des feux expérimentaux réalisés sur le terrain à la Station de Petawawa (Ontario). Elle comporte cinq classes de risque en

fonction de la valeur de l'IFM : Très faible, faible, modéré, élevé et extrême.

Il est à noter les points suivants concernant l'IFM :

- L'IFM, tout comme la puissance du front de feu, définie par Byram et Tangren, résulte d'une synthèse entre propagation et combustible disponible.

- IH et IS ont des valeurs plus fluctuantes qu'ICL en fonction de la longueur du jour (c'est-à-dire de la saison).

A l'inverse, ICL connaît des variations journalières plus importantes et plus rapides.

- IS est un bon indicateur de la réserve en eau du sol.

2.1.2. L'indice de risque aux Etats-Unis

L'indice de risque aux Etats-Unis est le National Fire Danger Rating System (NFDRS). Il a été élaboré en 1972 par Deeming et al puis révisé et amélioré en 1978 et 1988.

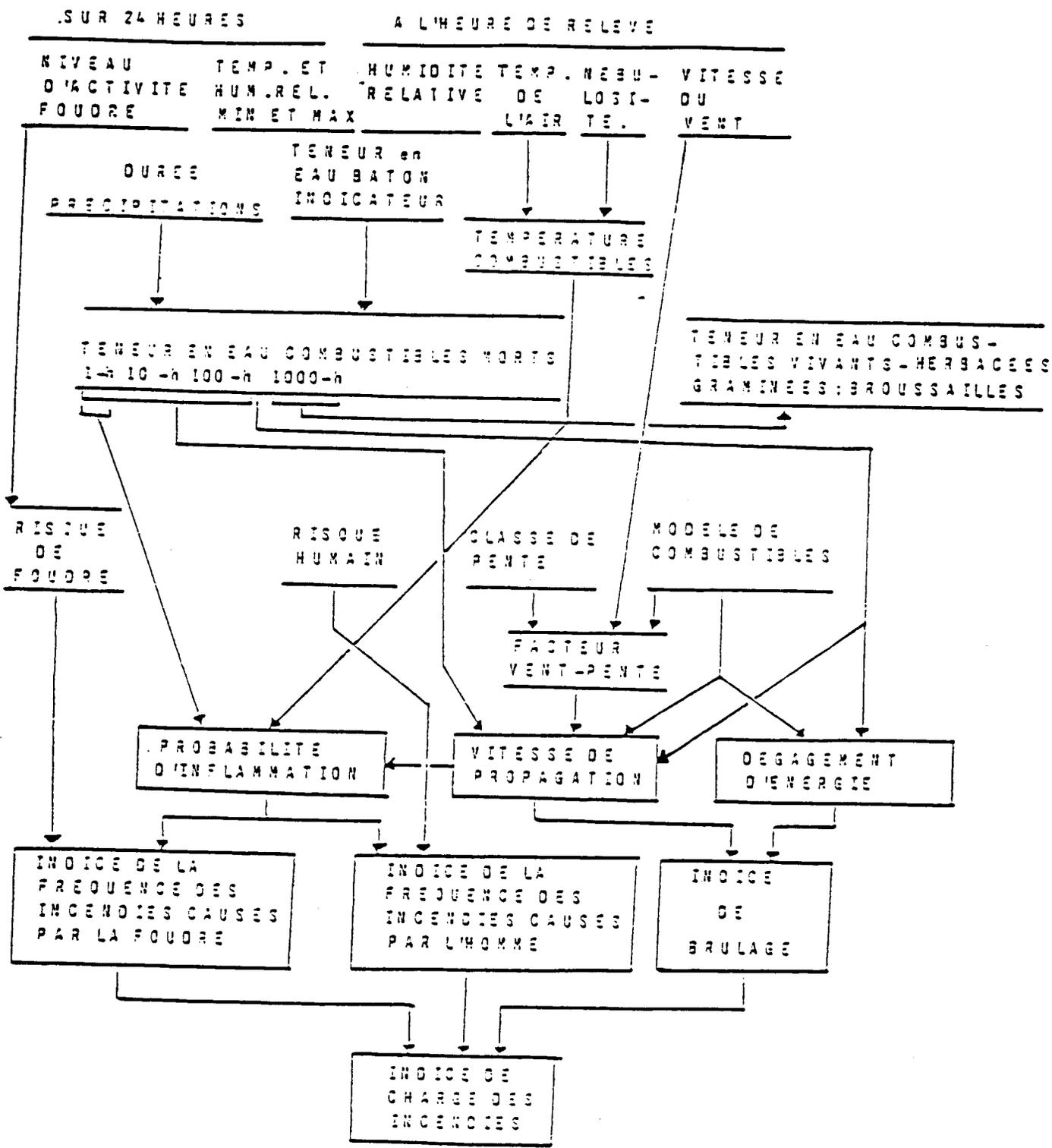
Deeming (1974 1978) a décrit en détail sa structure parfaitement hiérarchisée.

Le NFDRS est basé sur 4 index :

- le MCOI : Man Caused Fire occurrence index. Il prend en compte les causes d'origine humaine (accident ou malveillance)

- le LOI : Lightning caused fire occurrence index : il prend en compte les feux de foudre

- le B.I : Burning index qui rend compte du comportement du feu en vitesse et puissance



- Structure du système américain d'évaluation du danger d'incendie.
 (d'après Deeming, Burgan et Conen, 1977 b).

- le FLI : Fire load index qui est un index synthétique des 3 précédents.

Le MCOI est obtenu à partir de deux sous indices :

. R_{MC} : man caused risk qui correspond à la probabilité de mise à feu par l'homme. Cet indice est évalué à partir de statistiques historiques, ainsi que données plus ou moins subjectives.

. IC : inflammability component : cet indice indique la facilité avec laquelle le milieu va s'enflammer dans le cas d'une mise à feu par l'homme. Cet indice est évalué à partir de données relatives au combustible (à savoir quantité de combustible mort, teneur en eau calculée, température du combustible S/V et compacité) ainsi qu'à la source de chaleur.

Le LOI est également obtenu à partir de deux sous-indices :

. R_L : Lightning risk, qui correspond à la probabilité de mise à feu par la foudre. RL est également évalué sur la base de statistiques.

. IC : inflammability component.

Le B.I. est obtenu à partir de deux sous indices :

. SC : spread component. La connaissance de cette composante de propagation est directement dérivée de l'application du modèle de ROTHERMEL (1972), qui donne une estimation de la vitesse du front. Ceci suppose donc la prise en compte des "inputs" du modèle à savoir combustible, vent et pente.

Dans le NFDRS, les classes retenues pour les pentes sont les suivantes :

0-25%, 25-40%, 40-55%, 55-75%, 75% et plus

. ERC : energy released component, qui repose sur la prise en considération des mêmes paramètres que pour SC.

Le calcul de B.I. nécessite donc une description fine du combustible. La variabilité de la végétation aux USA ne permet pas de travailler comme au Canada, à partir d'un seul combustible standard. Il a fallu faire appel à plusieurs modèles de combustibles (20 modèles dans la version la plus récente du NFDRS).

Ces modèles ne sont pas fondés sur le type de couvert végétal, mais plutôt sur la quantité de combustible de chaque classe de taille et sur l'agencement des végétaux.

Ces modèles décrits par Deeming et Brown (1975) Deeming Burgan Cohen (1977) Deeming et al (1978) sont caractérisés par les paramètres suivants :

- phytomasse totale et phytomasse morte par classe de taille
- hauteur de la couche combustible
- S/V par classe de taille de particules combustibles
- teneur en eau et teneur en eau à l'extinction
- compacité de la couche
- chaleur de combustion
- teneur en éléments minéraux.

Dans le système, le rôle central est donné aux combustibles morts, dont le suivi de la teneur en eau a fait l'objet de quantités de travaux aux USA. Dans ces études, on

considère représentatif le temps mis pour perdre 63% de l'excédent d'humidité par rapport à l'air. Byram (1963) montre que la vitesse instantanée d'approche vers l'Etat d'équilibre décroît de façon exponentielle et qu'il en est de même en sens inverse lors des gains d'humidité.

On déduit alors le classement ci-dessous :

Temps de réponse moyen	Taille de combustible
1 h (0 à 2 h)	< 0,6 cm de diamètre
10 h (2 à 20 h)	0,6 à 2,5 cm de diamètre et les 18 premiers mm de la litière
100 h (20 à 200 h)	2,5 à 7,5 cm de diamètre et les 82 mm suivants de la litière

L'humidité des combustibles de classe 1 h s'obtient soit par mesure pondérale sur des baguettes standard, soit plus couramment par calcul effectué à l'aide de tables faisant intervenir température, humidité relative de l'air et nébulosité.

L'humidité des combustibles de classe 10 h se mesure sur des baguettes standard de bois de pinus ponderosa à 12,5 mm de diamètre.

L'humidité des combustibles de classe 100 h est calculée de façon cumulative par correction journalière du taux de la veille. La correction fait intervenir d'une part l'hygrométrie des dernières 24 h, d'autre part, les précipitations durant la même période. L'initialisation est faite à 35% d'humidité.

On peut noter en conclusion que le NFDRS apparaît moins empirique et surtout plus complet que le système canadien. Son domaine d'utilisation est toutefois plus étroit en théorie tout au moins : en effet il est conçu dans l'optique des feux en phase initiale, n'ayant pas de comportement erratique tels que feux de cimes ou sautes.

2.2. LES METHODES FRANÇAISES

2.2.1. L'analyse du risque dans Prométhée

Il s'agit d'une banque de données, mise en place en 1973 par les ministères de l'Intérieur et de l'Agriculture sur le thème des incendies de forêt dans les 15 Départements de la zone méditerranéenne française.

L'objectif était de disposer d'une source statistique permettant :

- Une bonne connaissance des phénomènes, basée sur:
 - . une description plus précise, tant en matière d'identification que de quantification,
 - . une compréhension plus complète, au travers d'une meilleure analyse des mécanismes et des causes.
- Une amélioration dans la définition des stratégies d'action
- Une possibilité d'évaluation des choix techniques opérés.

Chaque feu fait l'objet d'une collecte d'informations réalisée par l'ensemble des services concernés DDAF, ONF,

DD SIS, Gendarmerie, Météo, moyens aériens de la Sécurité Civile.

Le tout est rassemblé puis traité par le CTI de la Préfecture des Bouches du Rhône à Marseille.

Actuellement, la Banque de données contient environ 50.000 feux de forêts et 150.000 feux de l'espace rural ou périurbain.

Sont considérés comme feux de forêts, tous les incendies s'étant déclarés ou ayant atteint un espace forestier (forêt bois, garrigues, ou maquis) de plus de 1 ha.

En cas contraire, le feu est rangé dans la 2ème catégorie.

Un audit technique conduit en 1988 montre toutefois une hétérogénéité marquée dans la qualité des données et dans leur nombre selon les années, les départements ainsi que les services fournisseurs. Il en résulte un taux moyen de remplissage d'à peine 60% et une démobilisation croissante des services à l'origine de l'alimentation de la banque de données.

D'où le projet en cours, de modernisation et de restructuration, qui vise à faire profiter Prométhée de l'accroissement de fiabilité et de convivialité de l'informatique moderne.

L'objectif est de rendre l'outil interactif afin de remotiver l'ensemble des partenaires de l'opération.

La plupart des études et analyses réalisées soit par le C.T.I soit par l'agence MTDA sur le fichier Prométhée relèvent de la démarche suivante :

- sélection de deux indicateurs à l'échelle communale : surface parcourue par le feu, nombre de départs de feu.

- croisement de ces deux paramètres avec un ensemble d'autres variables, afin de mettre en évidence, soit des corrélations statistiquement significatives, soit des seuils importants dans les valeurs prises par la variable ainsi étudiée.

Ainsi par exemple, le croisement avec le fichier IFN permet d'obtenir :

- . le taux d'éclosion pour 1.000 ha boisés
- . le taux de feux de plus de 50 ha pour 1000 ha boisés
- . la fréquence et l'importance relative des feux pour chacun des types de peuplement définis par l'IFN.

De la même façon le croisement du fichier avec celui de la météo conduit à des résultats fort intéressants sur :

- . la fréquence et la surface relative des feux en fonction de la réserve en eau du sol,
- . la fréquence et la surface relative des feux en fonction de la vitesse du vent.

Ce type de traitement permet en particulier de faire ressortir des seuils en terme de réserve en eau, vitesse du vent et surface à l'attaque à partir desquels une dégradation sensible de la situation opérationnelle est perceptible.

Enfin, par croisement entre variables internes au seul fichier Prométhée, on peut obtenir nombre d'informations telles que :

- . la répartition en nombre et surface des feux selon la saison.
- . le taux de feux présentant des difficultés d'intervention, telles que l'éloignement du centre de secours, l'équipement en pistes ou points d'eau insuffisant,

. la répartition selon les causes d'incendies :
Prométhée a dans ce domaine fournit les enseignements suivants:

- * les imprudences représentent 42% des cas et 36% des surfaces
- * les accidents constituent 19% des cas et 27% des surfaces
- * la malveillance pèse pour 11% des cas et 15% des dégâts
- * les causes naturelles sont quasi négligeables.

. l'évolution spatiale et temporelle du nombre de départs de feux qui montre une tendance à l'aggravation de la situation et au déplacement des points d'éclosion au voisinage des zones urbaines.

2.2.2. *L'analyse du risque par la cartographie du combustible*

Cette méthode a été mise au point par TRABAUD au début des années 70 dans le cas de l'Hérault.

L'objectif poursuivi était de dresser une description de la phytomasse combustible tant à petite échelle (1/200000^e) qu'à grande échelle (1/20000^e).

Les étapes de la méthode sont les suivantes :

- définir les types de combustible qui vont entrer dans la composition des formations végétales : TRABAUD distingue à ce niveau :

-la litière -la strate herbacée -les ligneux bas \leq 2 m -les ligneux hauts \leq 4 m

CARACTERISATION DE LA FORMATION VEGETALE

Constitution interne de la formation (typologie de base)		Pourcentage de recouvrement		
		des ligneux hauts	des ligneux bas	des herbacés
Ligneux hauts, denses	LHd	75—100 %	0—100 %	0—100 %
Ligneux hauts, assez clairs	LHac	50—75 %	0—100 %	0—100 %
Ligneux hauts, clairs	LHc	25—50 %	0—10 %	0—10 %
Ligneux bas	LB	0—25 %	10—100 %	0—10 %
Herbacés	H	0—25 %	0—10 %	10—100 %
Complexes ligneux hauts et ligneux bas	LHB	25—50 %	10—100 %	0—10 %
Complexes ligneux hauts et herbacés	LHH	25—50 %	0—10 %	10—100 %
Complexes ligneux bas et herbacés	LBH	0—25 %	10—100 %	10—100 %
Complexes ligneux hauts ligneux bas et herbacés.	LHBH	25—50 %	10—100 %	10—100 %
Zone à la végétation très claire	ZE	0—25 %	0—10 %	0—10 %
Zone sans végétation (mines, carrières, etc.)	ZN	0 %	0 %	0 %

(d'après TRABAUD 1972 1973)

COMMUNITES POUR LA LUTTE ANTI-INCENDIE
(toutes les possibilités ont été envisagées)

I.	ADP	Toutes évolutions possibles dans la zone.
II.	ADP	Zone accessible et non accidentée mais pénétration difficile (rarement rencontrée).
III.	ADP	Zone accessible et pénétrable, mais présence d'obstacles (pour engins) sur le terrain.
IV.	ADP	Zone accessible mais mauvaises conditions de lutte sur le terrain.
V.	ADP	Zone peu accessible mais terrain propice à la lutte.
VI.	ADP	Zone peu accessible, pénétration sur le terrain difficile, mais les engins tous terrains peuvent s'y déplacer (rarement rencontrée).
VII.	ADP	Zone peu accessible et difficilement pénétrable pour un engin, l'homme seul peut s'y déplacer.
VIII.	ADP	Zone inaccessible à tous points de vue.

(d'après TRABAUD 1972 1973)

-les ligneux hauts > 4m -les bois morts lourds.

soit 5 types stratifiés et un sixième complémentaire non stratifié.

- définir les formations végétales correspondantes à partir :

. de la structure de la végétation, c'est-à-dire de la répartition spatiale relative des types de combustibles définis lors de la diagnose précédente.

L'analyse des structures, réalisée selon les techniques prônées par GODRON et al 1968, conduit à définir une typologie comportant 11 formations de base (cf tableau ci-joint).

* cinq formations simples, dominées par un type de combustible

* quatre formations complexes où plusieurs types codominent

* deux formations à végétation rare ou absente.

. de la composition floristique, en particulier en terme d'espèces dominantes (on en retient généralement trois).

. du biovolume BV, obtenu par addition des taux de recouvrement de chaque strate décrite, plus celle des bois morts s'il y a lieu.

A noter que, seules sont prises en considération, les strates dont le recouvrement excède 10%.

- évaluer les commodités de lutte anti-incendie à partir de 3 critères : l'accessibilité (présence ou non d'une voie carrossable à moins de 50 m), la facilité de déplacement (possibilité pour un véhicule d'évoluer sur le terrain hors des voies carrossables), la pénétrabilité (facilité de déplacement d'un homme à pied au sein de la formation).

Ces commodités de lutte sont évaluées dans une échelle à 8 niveaux.

Par ailleurs, cette approche de cartographie physiologique du combustible ouvrirait de nouvelles possibilités en matière de cartographie d'inflammabilité et de combustibilité des formations, une fois connues expérimentalement ou empiriquement les inflammabilités spécifiques.

(L'inflammabilité est définie dans ce cadre comme la facilité à s'enflammer, la combustibilité comme la manière de brûler en dégageant de la chaleur).

Ce travail complémentaire, entrepris pour partie par TRABAUD, a été particulièrement développé par ALEXANDRIAN au CTGREF d'Aix (1978).

La démarche suivie par ALEXANDRIAN a été la suivante :

- pour chaque formation végétale de la carte des combustibles, dressée selon les modalités exposées ci-dessus, on veut déterminer la valeur de trois indices :

- . indice d'inflammabilité
- . indice de combustibilité
- . indice de vitesse de propagation

Pour cela, on demande à un groupe d'expert de se prononcer sur un échantillon représentatif des formations présentes dans la végétation cartographiée.

Par calcul de moyenne/écart type sur chaque série de notations ou par application de traitements de classement, on obtient finalement les valeurs des trois indices pour chaque formation.

«NOTES D'INFLAMMABILITE ET DE COMBUSTIBILITE»

1 - Formations :	Inflammabilité	Combustibilité
LHd	2	5
LHac	4	5
LHc	4	5
LS	5	5
H	4	5
LHB	4	5
LHH	4	5
LBH	4	5
LHBH	4	5
LN	4	5
ZN	0	0

2 - Especes :

I = inflammabilité; E = combustibilité.

Ligneux hauts :

Symbole		E	I
AC	Érable	4	5
AR	Arbousier	4	5
CB	Chêne pubescent	4	5
CD	Gené	4	5
CH	Cataïonier	5	5
CV	Chêne vert	5	7
DG	Cyprès	6	6
DG	Douglas	6	6
EP	Épicéa	6	6
ER	Essences de reboisement	6	6
FR	Frêne	6	6
HF	Hêtre	1	1
NO	Noisetier	1	1
OR	Orme	1	1
OL	Olivier	4	5
PA	Pin d'Alep	8	8
PM	Pin Maritime	6	7
PN	Pin Noir	6	7
PP	Pin Pignon	5	7
PS	Pin Sylvestre	6	7
PZ	Pin de Salzmann	6	7
PE	Peuplier	1	1
RP	Robiner	2	2
SA	Saule	1	1
SP	Sapin	6	6
TE	Térébinthe	6	6

Ligneux bas :

Symbole		E	I
Ad	Canne de Provence	4	5
Ad	Amelanchier	5	5
Bu	Buis	5	5
Ca	Callune	7	6
Ch	Chêne kermès	7	6
Br	Bruyère arborescente	7	6
Br	Bruyère multiflore	6	6
Br	Bruyère à balais	7	7
Br	Bruyère cendrée	6	6
Ge	Genet scorpion	7	6
Ge	Genet purgatif	7	7
Ge	Genévrier commun	7	7
Ge	Genévrier oxycedre	7	7
La	Lavande à larges feuilles	7	5
La	Lavande en épi	7	5
Fi	Filaria	6	5
Pi	Pistachier lentis	6	4
Pr	Prunellier	6	4
Ec	Épine au Christ	4	4
Ep	Épilobium	5	5
Ro	Romarin	7	5
Ro	Ronces	5	6
Ge	Genet d'Espagne	6	5
Ge	Genet à balais	6	5
St	Stachéline	5	5
Th	Thym	7	4
Xb	Ciste blanc	5	6
Xm	Ciste de Montpellier	5	6
Xs	Ciste à feuilles de sauge	3	3

Herbacées :

Symbole		E	I
ag	Agrostoides	0	1
an	Achillée	0	1
an	Anthyllide	4	1
ar	Armentaire	4	1
av	Avoine	0	1
be	Brome eride	0	1
br	Brachypode penne	0	1
br	Brachypode rameux	0	1
br	Brachypode des bois	4	1
ca	Cactée	7	1
ca	Canche flexueuse	4	1
pe	Pétuques	0	1
in	Inule visqueuse	0	1
fo	Fougère aigle	1	1

d'après ALEXANDRIAN 1982

- A ce stade, une très forte corrélation apparaissant entre indice d'inflammabilité et indice de vitesse de propagation, seul sera conservé l'indice d'inflammabilité.

- L'analyse des variances résiduelles permet alors de constater :

- . que l'inflammabilité est principalement liée aux espèces présentes et au type de formation végétale,
- . que la combustibilité dépend des espèces présentes mais également du nombre de strates et du BV.

- On demande au groupe d'experts de se prononcer également sur une notation d'inflammabilité de chaque espèce et de chaque type de formation végétale.

- A partir des trois notations ainsi obtenues (indice de formation, inflammabilité spécifique, inflammabilité du type de formation) on peut élaborer deux formules par régression multiple.

. la première donne l'indice d'inflammabilité de la formation $i = 0,4 + 2,5 E_2 + 5E_3 + 0,3 (BV \times F) - 4,47 NS$

. la seconde donne l'indice de combustibilité de la formation $C = 39 + 0,23 BV (E'_1 + E'_2 - 7,18)$.

formules dans lesquelles

E_2 et E_3 représentent les inflammabilités de la 2^è et 3^è espèce les plus abondantes dans le relevé de la strate herbacée ou de la strate basse ligneuse.

E'_1 E'_2 représentent les combustibilités des deux espèces dominantes dans la formation végétale.

BV est le biovolume

NS est le nombre de strates

F est la note d'inflammabilité du type de formation

2.2.3. *L'analyse du risque à partir des paramètres météo*

Les méthodes mises au point dans ce domaine sont particulièrement nombreuses en France.

2.2.3.1. Méthode ORIEUX

Mise au point par Adrien ORIEUX dans les années 1960, elle s'appuie sur la recherche de corrélations statistiques entre surfaces brûlées, nombre de départs de feu, inflammabilité d'une part et vitesse du vent, température de l'air, humidité relative de l'air et réserve en eau du sol d'autre part.

Des expériences faites de 1966 à 1969, ont mis en évidence des corrélations nettes, entre inflammabilité des végétaux morts et humidité relative de l'air, puis entre inflammabilité des végétaux vivants et réserve en eau du sol, tout au moins pendant la période végétative et une bonne partie de l'été.

Il en résulte au plan opérationnel un tableau à deux entrées :

vent sécheresse	< 20	20 - 40	> 40 km/h
nulle	O	O	O
moyenne	H	H	S
forte	H	S	TS
très forte	H	S	TS

O : pas de risque

H : risque habituel

S : risque sévère

TS : risque très sévère

Les seuils de sécheresse sont définis à partir des valeurs de la réserve en eau du sol de 150 mm, 100 mm, 50 mm et 30 mm.

Le sol est en effet considéré comme un réservoir fictif, saturé à 150 mm, se vidant par évapotranspiration, se remplissant par les précipitations.

La réserve en eau est difficile à obtenir par des mesures directes. (sondes à neutrons) dans le cas des sols forestiers méditerranéens.

Elle est donc calculée selon la méthode des bilans hydriques utilisée pour les bassins versants : l'équation de base est $R_J = R_{J-1} + P - ET$

où R_J est la valeur de la réserve le jour J

R_{J-1} la valeur de la veille

et $P - ET$ l'apport net : précipitations - évapotranspiration.

avec $ET = ETP \cdot r/R$ où ETP est calculée grâce à la formule de THORNTHWAITE et r est obtenu par décroissance exponentielle de la réserve en eau du sol, en fonction de l'ETP cumulée $r = R \exp^{-\int ETP/R}$

et $R = 150$ mm valeur de la réserve à saturation.

La méthode ORIEUX a l'avantage d'être simple et de prendre en compte, au travers de la réserve en eau du sol, l'humidité de la végétation vivante. On notera toutefois son imprécision liée :

- à l'emploi de la formule de THORNTHWAITE, qui donne sous climat méditerranéen, des résultats de 20% à 40% trop faibles. La réalité serait mieux rendue par une formule basée sur des bilans énergétiques, telle celle de PENMANN.

- à la non prise en compte de l'état du combustible mort, dont l'humidité varie avec celle de l'air et les précipitations récentes, voire la rosée, trois facteurs qui ne modifient en rien la Réserve en eau du sol.

- au fait que la réserve en eau du sol cesse d'être indicatrice de l'état hydrique du végétal, hors de la phase de végétation, tandis qu'elle n'est qu'une approximation de cet état hydrique en période d'activité végétative.

Il est toutefois bon de noter également, que la plupart des insuffisances précédentes ne sont pas rédhitoires, dans la mesure où les valeurs relatives ont beaucoup plus d'intérêt que les valeurs absolues en la matière.

2.2.3.2. Méthodes CARREGA

Carrega propose en 1985 un premier indice de risque météo ne faisant intervenir que la réserve en eau du sol r , calculée selon la méthode ORIEUX, la vitesse du vent V et l'humidité relative de l'air h .

$i = r^{0,5} (h/V) \cdot c$ c étant un coefficient compris entre 0,8 et 1 et rendant compte de l'état phénologique.

La vitesse du vent étant exprimée en degré Beaufort i peut prendre les valeurs suivantes :

$i \leq 50$ très haut risque

$50 < i \leq 150$ haut risque

$150 < i \leq 300$ risque modéré

$300 < i \leq 450$ risque faible $i > 450$ risque nul.

Par la suite, Carrega est passé à une formulation décimale de la vitesse Beaufort et à un recalibrage de sa formule, pour que i évolue dans une fourchette de 0 à 20. On a alors un risque faible $i \leq 8$; moyen $8 < i \leq 14$; sévère $14 < i \leq 18$; très sévère > 18 .

Carrega propose en 1987, un second indice, destiné à mieux prendre en compte l'état hydrique de surface, grâce à un réservoir fictif superficiel r_{sup} saturé à 15 mm et se vidant sous l'action de l'ETP selon une loi exponentielle.

on a $i = ((TV)/(r^{0,5} r_{sup} h)) \cdot c$

où T : température de l'air en °C

V : vent en ms^{-1}

r : réserve du sol (saturée à 150 mm)

r_{sup} : réserve superficielle (saturée à 15 mm).

h : humidité relative de l'air

c : coefficient de phénologie égal à 100 en automne-printemps ; 200 en été-hiver.

2.2.3.3. Méthodes DROUET

Le point de départ de la méthode est le modèle de propagation développé par l'auteur dans sa thèse de 1972.

Ce modèle s'appuie sur les hypothèses suivantes :

- la flamme est un panneau radiant plan, sans épaisseur, de température et de hauteur constantes.

- le feu évolue librement, dans une végétation homogène et isotrope.

Le modèle retenu sur terrain plat, sans vent, donne une forme circulaire, tandis qu'avec un vent constant et unidirectionnel, ou une pente monoclinale, la forme devient elliptique, le point d'éclosion étant situé à l'un des foyers de l'ellipse.

Un vent de direction variable, autour d'une position moyenne, conduit généralement à une forme du feu en éventail.

Drouet cherche alors à "caler" une formule de prédiction de la vitesse de propagation en tête du feu, en fonction d'une série de paramètres météos. Il aboutit ainsi à une équation, dont les 8 coefficients ont été déterminés à partir d'observations de feux réels ou expérimentaux.

$$V_f = 180 \operatorname{tgh} \left[\frac{(100-R)}{150} \right] \left[\exp 0,035 T_s \right] \left[1 + 2(0,8483 + \operatorname{tgh} (U/30 - 1,25)) \right]$$

où T_s est la température au sol, mesurée ou calculée à partir d'une formule de régression, sur la température de l'air, le vent et la nébulosité.

où U est la vitesse du vent.

Cette méthode, résolument expérimentale, prend en compte le combustible mort bien plus que la végétation vivante. Elle nécessite par ailleurs la mesure de paramètres météo parfois délicats à suivre.

Aussi Drouet, a-t-il également proposé une deuxième approche, qui consiste à définir un seuil de feu possible, à partir de la prise en compte de la température de la litière, du point de rosée et de la vitesse du vent.

Les deux premiers paramètres lui permettent grâce, à un abaque, d'obtenir la teneur en eau du combustible mort, à partir de laquelle est déterminé le seuil de la vitesse de vent nécessaire au déclenchement et à la propagation d'un feu.

L'avantage de la méthode est qu'elle est utilisable en toute saison.

2.2.3.4. Méthode indice numérique

Cette méthode présentée par SOL (1989-1990) s'efforce d'utiliser un indice de risque météo qui combine les apports jugés les plus positifs des méthodes CARREGA et DROUET.

L'optimisation de l'indice se fait sur la base de tests réalisés à posteriori à partir du fichier PROMETHEE.

La formulation obtenue est finalement la suivante :

$$i = 25 - (FHR \times C_{res} \times C_{vent}) / 15 + A$$

où - FHR est une fausse humidité relative égale à
 $100 \frac{Esat(Td)}{Esat(Tsol)}$

où $Esat(Td)$ est la tension de vapeur saturante à
la température du point de rosée.

$Esat(Tsol)$ est la tension de vapeur à la
température du sol.

- $Cres$ est un coefficient de réserve en eau du sol
égal à $3 + 2 \operatorname{tgh} [(R-50)/25]$ où R est la réserve du sol en mm.

- $Cvent$ est un coefficient de vent égal à $3 + 3 \operatorname{tgh}$
 $[(45-U)/50]$ où U est la vitesse du vent en Km/h.

- A est un coefficient correcteur égal à $- 3$ si la
vitesse du feu est inférieure à 600 m/h ; égal à $+ 2$ si la
vitesse du feu excède 1000 m/h et égal à 0 sinon.

2.2.4. *L'analyse du risque à partir de paramètres biologiques : les méthodes INRA*

Nous avons vu au paragraphe 2.2.2. comment la
cartographie du combustible pouvait servir de départ à une
analyse du risque basée sur l'inflammabilité et la
combustibilité des formations végétales déterminées par
l'expertise humaine.

La démarche suivie par l'INRA depuis plusieurs années
est d'évaluer inflammabilité et combustibilité sur des bases
expérimentales reproductibles et non plus de manière empirique.

Cet objectif a conduit les chercheurs de la station de
sylviculture Méditerranéenne de l'INRA Avignon :

- à définir un protocole expérimental de mesure d'inflammabilité des éléments fins avec un épiradiateur et de combustibilité des formations végétales, grâce à un banc thermique ;

- à étudier de manière détaillée l'influence de l'état hydrique du végétal sur son comportement au feu afin de déterminer la pertinence de l'emploi d'un tel indicateur biologique pour préciser et affiner l'évolution du niveau du risque telle qu'elle est pratiquée aujourd'hui selon les techniques météo.

En ce qui concerne le premier point, la démarche suivie est la suivante :

. l'inflammabilité qui est normalement caractérisée par la quantité de chaleur nécessaire à l'apparition de la flamme est évaluée (grâce à l'emploi d'un épiradiateur étalonné) à partir d'une simple mesure de durée d'exposition avant inflammation.

. les tests sont réalisés sur des échantillons classés par âge et par types de tissus. Ils sont répétés 50 fois, ce qui permet de déterminer une fréquence d'inflammation, un délai moyen d'inflammation (et son écart type), une durée moyenne de combustion (et son écart type).

. un tableau à double entrée fréquence/délai d'inflammation permet d'attribuer une note d'inflammabilité comprise entre 1 et 5.

Les résultats obtenus mois par mois pour toute une série d'espèces méditerranéennes sont résumées dans un tableau permettant de classer les espèces entre elles sur la base de ce critère.

Évolution des inflammabilités spécifiques de mai à avril

Essences	Mois												
	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	
<i>Brachypodium pinnatum</i>	0	1	1	3	2	5	5	5	5	5	5	5	5
<i>Brachypodium ramosum</i>	0	2	4	5	5	4	5	5	5	5	5	5	5
<i>Arbutus unedo</i>	0	0	1	3	2	3	3	4	4	4	4	4	4
<i>Buxus sempervirens</i>	0	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<i>Calluna vulgaris</i>	0	2	3	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4
<i>Calycotoma spinosa</i>	0	0	1	2	2	1	2	2	2	2	2	2	2
<i>Cistus albidus</i>	0	0	1	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
<i>Cistus monspeliensis</i>	0	1	2	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3
<i>Cistus saivaetolius</i>	0	0	1	1	2	1	2	2	2	2	2	2	2
<i>Cytisus triflorus</i>	0	0	1	1	2	1	2	3	3	3	3	3	3
<i>Erica arborea</i>	0	1	3	5	4	4	5	5	5	5	5	5	5
<i>Erica scoparia</i>	0	2	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5
<i>Phyllirea latifolia</i>	0	2	4	5	4	5	5	5	5	5	5	5	5
<i>Quercus coccifera</i>	0	1	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4
<i>Rosmannus officinalis</i>	0	1	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3
<i>Thymus vulgaris</i>	0	2	3	5	4	4	5	5	5	5	5	5	5
<i>Ulex parviflorus</i>	0	1	2	3	4	3	5	5	5	5	5	5	5
<i>Abies cephalonica</i>	0	0	1	2	1	0	1	1	1	1	1	1	1
<i>Acacia dealbata</i>	0	1	3	4	4	4	5	5	5	5	5	5	5
<i>Acacia melanoxylon</i>	0	2	4	4	3	4	5	5	5	5	5	5	5
<i>Alnus subcordata</i>	0	2	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
<i>Castanea sativa</i>	0	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
<i>Cedrus atlantica</i>	0	0	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2
<i>Cupressus arizonica</i>	0	0	1	1	1	0	2	2	2	2	2	2	2
<i>Cupressus sempervirens</i>	0	0	1	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3
<i>Eucalyptus cairymoreana</i>	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
<i>Eucalyptus Macarthuri</i>	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
<i>Pinus halepensis</i>	0	1	3	4	4	3	5	5	5	5	5	5	5
<i>Pinus pinaster</i>	0	1	2	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3
<i>Quercus ilex</i>	0	3	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
<i>Quercus pubescens</i>	0	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
<i>Quercus suber</i>	0	2	4	4	3	4	4	4	4	4	4	4	4

d'après VALETTE in RFF 1989

En ce qui concerne le deuxième point, la démarche précédente a été complétée comme suit :

- . la teneur en eau des échantillons est déterminée, en rapportant le poids d'eau au poids anhydre.

- . des corrélations sont recherchées, entre fréquence et délais d'inflammation d'une part, et teneur en eau des échantillons d'autre part.

D'une manière générale les résultats obtenus sont de même nature, quelle que soit l'espèce considérée.

- * Lors du débourement, et tant que la teneur en eau excède 150 à 200%, la fréquence d'inflammation est très faible, le délai d'inflammation élevé et la durée de combustion réduite,

- * Lorsque la teneur en eau passe sous le seuil 150%, la fréquence d'inflammation augmente rapidement, ainsi que la durée de combustion, tandis que le délai d'inflammation s'amenuise.

- * Cette évolution se renforce à l'aoûtement, avec des teneurs en eau de 80 à 120%.

Les écarts obtenus sont alors statistiquement significatifs, comme ils le sont dans le cas des mesures faites sur du matériel mort, dont la teneur en eau est comprise entre 5 et 45%.

Ces résultats ont par ailleurs été complétés par des investigations, visant à définir l'intérêt relatif d'un ensemble d'indicateurs, censés représenter l'état hydrique du végétal :

- * l'indice de siccité
- * le potentiel de sève
- * la teneur pondérale

* le déficit de saturation hydrique et la turgescence relative (complément à 1 du déficit)

* la réserve utile du sol.

La technique d'évaluation consiste à rechercher les corrélations existantes avec les tests d'inflammabilité pratiqués par ailleurs.

3. PROPOSITIONS POUR L'ELABORATION D'UNE METHODE D'EVALUATION DU RISQUE D'INCENDIE EN ESPACES FORESTIERS

3.1. LA NOTION DE RISQUE

La notion de risque résulte de la confrontation d'un aléa et d'un enjeu. En matière d'incendie de forêt, l'aléa correspond au phénomène feu et l'enjeu aux vies humaines et aux patrimoines potentiellement menacés par le sinistre.

Dans ces conditions, l'évaluation du niveau de risque incendie suppose la prise en compte :

- des principales caractéristiques de "l'aléa feu" à savoir :

- * le niveau d'occurrence, souvent assimilé en pratique à la fréquence d'éclosion,
- * l'intensité et la vitesse de propagation du feu qui sont deux descripteurs essentiels du pouvoir destructeur de l'incendie.

- de l'importance de l'enjeu laquelle peut s'estimer selon les critères suivants :

- * nombre de vies humaines concernées
- * valeurs des patrimoines individuels ou collectifs exposés
- * vulnérabilité du milieu face au feu, laquelle dépend des difficultés opérationnelles d'intervention, et du degré d'irréversibilité des éventuels dommages.

Le niveau du risque ainsi défini, dépend de toute évidence d'une multitude de facteurs, dont la plupart ont une grande variabilité tant spatiale que temporelle.

Dans ces conditions, selon le point de vue adopté, l'analyse des facteurs peut conduire à deux types de résultats:

- la définition de "périodes à risque" dont la connaissance et si possible la prévision sont d'un intérêt capital en matière opérationnelle,

- la délimitation de "secteurs à risque", sous forme d'un zonage cartographique, qui constitue un outil d'aide à la décision, dans toute réflexion visant à intégrer la problématique incendie de forêt dans l'aménagement du territoire, en zone méditerranéenne.

Pour notre part, nous nous intéresserons essentiellement à cette dernière approche.

3.2. LA PRISE EN COMPTE DES CARACTERISTIQUES DE L'ALEA

3.2.1. *Le niveau d'occurrence de l'aléa*

L'idéal serait de pouvoir le calculer sous forme d'une probabilité. Ceci n'est malheureusement pas envisageable, dans la mesure où l'éclosion d'un feu dépend de facteurs dont certains ne répondent à aucune loi de probabilité (en particulier dans le cas de mise à feu humaine).

On est donc amené à se rabattre sur l'utilisation d'un certain nombre d'indicateurs statistiques jugés pertinents dans ce domaine (J.P. PAULET 1982, D. ALEXANDRIAN 1985).

- nombre de départs de feux recensés par 1000 ha de forêt. Ce nombre représente la "pression" des feux sur une zone donnée. L'étude de son évolution dans le temps est également à faire.

- indicateurs de déprise agricole : Δ SAU/SAU pour une période donnée

- indicateurs de "pression" humaine à savoir :

- . indicateur de construction : nombre

- . d'autorisations de défrichements par 1000 ha boisés

- . nombre de permis de construire par 1000 ha boisés
- . surfaces classées NA ou NB au POS par 1000 ha boisés

- . indicateur de fréquentation : densité routière par 1000 ha

- . boisés, rapport population/surface boisée,
- . distance à la mer (indicateur de pression touristique)

- recensements des équipements sensibles : Décharges d'ordures, lignes électriques, SNCF.

D'une manière générale, compte tenu des sources d'informations disponibles, (statistiques Prométhée, INSEE, IFN...) les indicateurs précédents seront calculés à l'échelle communale et devraient permettre une typologie, au regard du niveau d'occurrence des feux.

3.2.2. *Le comportement du feu : vitesse de propagation Puissance*

Nous avons vu précédemment que les paramètres principaux à prendre en compte étaient :

- le combustible (matière sèche)
- l'état d'humidité du combustible
- la pente
- le vent.

3.2.2.1. La pente

L'utilisation d'un modèle numérique de terrain ou d'un logiciel de calcul des pentes permet d'obtenir sans grande difficulté :

- une carte des altitudes : courbes de niveaux
- une carte des valeurs des pentes au pas de 50 ou 100 m
- une carte des expositions.

Le découpage en classes de pente va dépendre quant à lui :

. de l'objectif poursuivi au travers de la connaissance de la pente

. de l'allure de la distribution obtenue pour l'ensemble des pentes du massif.

3.2.2.2. Le vent

La prévision des variations spatiales du vent en force et direction est un problème théorique difficile.

La météo possède des modèles de calcul à maille de 30 km, le passage à la maille 10 km étant envisageable à terme.

En revanche, les méthodes d'interpolations pour des échelles plus fines ne sont pas opérationnelle.

Deux solutions sont alors envisageables :

- la mise en place d'un réseau dense de points de mesure : cette méthode exige d'importants moyens humains et matériels.

- l'étude locale des vents par une approche "qualitative" ;

Enquête auprès des populations rurales, pour connaître l'emplacement des secteurs les plus ventés, prise en compte analytique des caractéristiques topographiques locales, dont l'effet sur l'aérodynamique est connu de façon générale.

3.2.2.3. Le combustible matière sèche

Le combustible matière sèche est très certainement le facteur de comportement du feu, dont les variations spatiales sont les plus faciles à repérer sur le terrain, au moins sur un plan qualitatif. En effet, l'évaluation quantitative est quant à elle bien plus délicate. D'où l'intérêt de disposer d'une méthode d'analyse aussi performante que possible.

Nous avons vu précédemment que deux approches étaient possibles :

- l'approche "modèle de combustible" : développée et mise en oeuvre aux USA, elle ne prend en compte que les paramètres physiques du combustible, sans s'intéresser à la description floristique de la végétation.

L'avantage de cette méthode est de permettre une évaluation directe du comportement du feu, à partir de la connaissance du combustible.

Les difficultés pratiques sont toutefois nombreuses :

- . Les critères retenus sont nombreux, difficiles à mesurer, y compris en laboratoire, et extrêmement variables. Une détermination directe sur le terrain et systématique est de ce fait exclue.
 - . Aussi les américains ont décidé de simplifier le problème, en réduisant la diversité des cas rencontrés, en un nombre fini de "modèles" (13 ou 20 selon les auteurs), dont les caractéristiques physiques sont connus, grâce à des mesures en laboratoire préalables.
- La tâche du praticien de terrain se limite alors à reconnaître, grâce à une clef d'identification, le ou les modèles auxquels il a affaire.
- . La difficulté réside alors, dans l'importance et la complexité du travail de définition préalable des modèles, dont le nombre a tendance à croître rapidement dans le cas de couverts végétaux très hétérogènes.

Par ailleurs, l'emploi de la clef d'identification

re quiert une forte expérience, dans la mesure où elle prend compte un comportement potentiel du feu, tout autant qu'une série de descripteurs, utiles à la détermination du "modèle de combustible", descripteurs dont certains exigent un oeil exercé à l'emploi de la clef.

- L'approche "analyse des formations végétales"

Cette approche, utilisée par la plupart des auteurs qui, en France, se sont intéressés au problèmes des incendies de forêt, est basée sur une analyse de la végétation qui peut être physiologique, floristique et écologique.

* l'aspect physiologie domine dans les typologies de la végétation réalisées par exemple, par l'IFN ou par TRABAUD pour ses cartes de combustibles du département de l'Hérault.

* l'aspect floristique et écologique est nettement plus important, dans les cartes de végétation dressées, dans le cadre d'études phytosociologiques ou phytoécologiques, adaptées à la problématique incendie.

Cette approche "analyse des formations végétales" a l'énorme avantage, par rapport à la précédente, d'être facilement utilisable par le praticien, moyennant un minimum de connaissances botaniques et pédologiques.

En effet, les descripteurs utilisés sont visuellement aisés à repérer et à évaluer.

En revanche, toute la difficulté réside dans l'établissement de la liaison entre la formation végétale décrite et son comportement au feu.

En effet, la liste exhaustive des paramètres physiques, qui permettait une telle évaluation "objective", dans le cas de la méthode américaine fait ici défaut.

On est alors conduit à faire appel à l'expertise humaine (évaluation "subjective" par notation de l'inflammabilité et de la combustibilité des formations) ou à l'expérimentation lourde de laboratoire (multiplication des mesures d'inflammabilité à l'épiradiateur et de combustibilité au banc thermique de l'ensemble des espèces et formations végétales décrites).

Compte tenu de l'ensemble des considérations précédentes, la méthode de prise en compte du combustible matière sèche pourrait s'inspirer des techniques de description de la physiologie végétale, aux modifications suivantes près :

- prendre en considération 5 strates : litière/herbacée/ligneux inférieurs à 2 m de haut/ligneux compris entre 2 et 4 m/ligneux hauts de 4 m et plus.

- conserver une analyse strate par strate sans faire intervenir le biovolume qui conduit à des compensations interstrates, parfois dommageables pour la justesse de l'évaluation finale.

- introduire une clef descriptive qui contrairement à celle utilisée par l'IFN ou par TRABAUD soit précise au niveau des strates basses et de la litière plutôt qu'au niveau des strates hautes de la végétation.

Cette précision accrue devrait intervenir dans l'évaluation des taux de recouvrement mais également dans le relevé des espèces dominantes dont l'inflammabilité et la

combustibilité intrinsèques déterminent celles de la strate correspondante.

Dans la mesure où ces modifications risquent d'augmenter considérablement le nombre de combinaisons théoriquement possibles, il sera peut être nécessaire d'abandonner la typologie des structures de végétation établie à priori, à partir d'un tableau croisé, au profit de celle mise en évidence à posteriori par traitement d'analyse de données, appliqué à l'ensemble des observations réalisées.

- prendre en compte la charge combustible par strate, en première approximation à partir de la hauteur de végétation correspondante, et éventuellement de manière plus précise, à partir des équations établies pour un certain nombre d'espèces constitutives de la végétation ligneuse méditerranéenne.

3.2.2.4. L'état hydrique du combustible

Rappels théoriques préalables

Dans la détermination de l'état hydrique du combustible, il convient de distinguer au préalable, s'il s'agit de végétation vivante ou de nécromasse.

- Dans le cas de la nécromasse, on a affaire à du matériel hygroscopique : sa teneur en eau, plus ou moins modifiée par les pluies récentes, tend à s'équilibrer en permanence avec l'humidité atmosphérique, sous la seule action des lois physiques de l'évaporation.

Cette mise en équilibre se fait à une vitesse variable, selon la taille du combustible et le taux de variation de l'humidité relative de l'air.

Les paramètres à considérer, sont principalement ceux qui ont une influence sur la variation de l'humidité relative : vent, température de l'air, insolation, nébulosité, taux de couvert.

- Dans le cas de la végétation vivante la situation est nettement plus complexe.

L'état hydrique du combustible dépend alors en effet :

. de l'état hydrique du sol : la teneur pondérale ne suffit pas à le caractériser ; il convient de prendre également en compte les forces osmotiques et matricielles (électrostatiques ou capillaires). D'où l'intérêt de la notion de potentiel hydrique Ψ qui est égal, en valeur absolue, à l'énergie requise pour extraire 1 g d'eau du sol et représente donc la succion exercée par le sol pour l'eau.

Lorsque cette succion atteint 16 bars la végétation connaît un flétrissement permanent.

. de l'absorption d'eau par la plante : elle n'est possible que tant que la succion exercée par la plante est supérieure à celle exercée par le sol sur l'eau.

L'absorption de l'eau par la plante est liée à des gradients de pression osmotique au niveau des cellules absorbantes des racines, gradients que l'on retrouve également au niveau de l'endoderme racinaire, accompagnés par l'action de forces d'imbibition.

L'ensemble de ces mécanismes, auxquels on donne parfois le nom de poussée radiculaire est sous contrôle du métabolisme

racinaire et donc en particulier des conditions d'oxygénation et de température de l'environnement racinaire.

Par ailleurs, le relais est pris, en ce qui concerne les mouvements d'eau vers le reste de la plante, grâce à la mise en tension interne, créé par la transpiration de l'appareil aérien et plus conjoncturellement par les processus de multiplication cellulaire active.

A un instant donné, le niveau maximal de transpiration possible dépend :

- . de la demande évaporative de l'atmosphère
- . de l'importance de la surface évaporante (indice foliaire) et de ses qualités (épaisseur de cuticule, densité de stomates).

Il est atteint par la plante, tant que celle-ci est en mesure de compenser la perte grâce à un apport d'eau du sol.

Quand cette compensation ne se fait plus entièrement (sol devenu trop sec ou dispositif racinaire insuffisamment performant) la plante subit un déficit hydrique, qu'elle limite grâce à la régulation stomatique, qui intervient plus ou moins complètement à partir de certains seuils (sachant qu'il demeure en permanence la perte liée à la transpiration cuticulaire).

Evaluation de l'état hydrique du combustible

Compte tenu des considérations précédentes, on conçoit la difficulté qu'il y a à prendre en compte la variabilité spatiale de l'état hydrique du combustible.

En effet qu'il s'agisse de mesures directes (potentiel de sève, teneur pondérale, indice de siccité) ou d'estimations faites par calcul sur des données externes au végétal (RU du

sol, paramètres météo ...) il est indispensable de disposer d'un réseau de mesure dense donc opérationnellement couteux et complexe à gérer.

La simultanéité et la précision des mesures à effectuer sont en effet primordiales dans une approche multistationnelle, contrairement au cas de la détermination des périodes à risques, où les valeurs relatives importent plus que les valeurs absolues, d'où l'emploi possible de formules approximatives mais également simples (calcul de l'ETP pour la formule de THORNTHWAITE par exemple).

Compte tenu des considérations précédentes, il paraît raisonnable dans un premier temps, de s'en tenir à la prise en compte d'indicateurs qualitatifs tels que :

- exposition à l'ensoleillement et au vent
- taux de couvert arboré
- température
- épaisseur du sol et taux de cailloux
- pente
- épaisseur de litière.

qui rendent compte de certaines des causes de variation spatiale, d'humidité du combustible.

Pour aller plus loin dans ce domaine, la technique à développer reste certainement l'analyse par télédétection, qui, aux échelles qui nous intéressent, serait essentiellement aérienne (les satellites qui ont des capteurs opérationnels dans les longueurs d'onde concernées ne sont en effet pas encore assez précis en terme de résolution spatiale).

Des tentatives à petite échelle ont déjà été réalisées par SEGUIN à l'INRA d'Avignon et par le laboratoire commun de télédétection CEMAGREF ENGREF de Montpellier.

Le principe repose sur la liaison qui existe entre l'évapotranspiration d'un couvert et l'écart entre la température de l'air et sa température de surface.

En conséquence, le stress hydrique du végétal est repéré par une augmentation sensible de sa température de surface, laquelle peut être déterminée à partir de la réponse radiométrique dans l'IR thermique.

Dans son application pratique en domaine forestier, la méthode mérite d'être améliorée, car les relations sont moins nettes du fait de l'épaisseur de la couverture végétale qui possède alors sa propre dynamique thermique interne.

3.2.2.5. Conclusion

Nous venons de voir que l'analyse de la composante du risque, liée au comportement du feu s'appuyait sur la prise en compte d'un nombre important de paramètres, qui, pour la plupart, servent également de base à la typologie des stations forestières.

Le travail de recueil des données est donc tout à fait similaire dans les deux cas. En revanche, il paraît difficile d'établir une corrélation directe entre un type de station et un type de comportement du feu. En effet, le traitement des données de base n'est pas de même nature selon l'objectif poursuivi.

En typologie des stations, le relevé de végétation, effectué selon les techniques phytosociologiques classiques, conduit à une interprétation écologique, basée sur des groupes d'espèces indicatrices de l'intervention d'un facteur du milieu.

L'objectif étant celui de la définition des potentialités du milieu, un poids important est donné aux espèces à fort pouvoir "explicatif" (espèces caractéristiques et différentielles des groupes sociologiques, espèces indicatrices des groupes écologiques).

En terme de comportement au feu, la physionomie réelle de la végétation importe plus que la potentialité du milieu : aussi les espèces à prendre en considération sont celles qui, en surface ou en biomasse, dominent la formation et dont la présence résulte très souvent de la combinaison de facteurs du milieu avec une très forte et très ancienne action humaine.

3.3. LA PRISE EN COMPTE DE L'IMPORTANCE DES ENJEUX

3.3.1. *Le nombre de vies humaines concernées*

On peut l'évaluer assez grossièrement à partir des critères suivants :

- densité d'habitations en ce qui concerne l'habitat dispersé ;

- longueur du linéaire d'interface avec les espaces naturels, pour le cas de l'habitat individuel groupé (lotissements) ou de l'habitat collectif urbain ;

- nombre et capacité d'hébergement des centres d'accueils saisonniers autres que l'habitat ou l'hôtellerie : camping, caravaning...

3.3.2. Les difficultés opérationnelles d'intervention

TRABAUD (1972) avait abordé le problème par une approche analytique, ALEXANDRIAN (1985) l'a également traité de façon plus globale à partir des statistiques Prométhée.

Cet aspect des choses a été également pris en compte dans l'outil d'évaluation du risque bâti par DAGORNE (1989 1990) à partir d'un SIG, ainsi que dans le système expert EXPERGRAPH, mis au point par l'Ecole des Mines à SOPHIA ANTIPOLIS.

Il ressort de ces divers travaux que les paramètres à considérer à ce niveau sont :

- la densité du réseau routier ;
- l'importance des équipements DFCI, longueur de piste, de pare-feux, nombre de citernes ;

- la pente ;

- l'éloignement des centres de secours.

On pourrait y ajouter deux paramètres complémentaires :

- l'éloignement à la mer, à un plan d'eau écopable ou à un aérodrome équipé en retardants et mouillants ;

- la densité des noeuds dans le réseau de communication, qui ajoute à l'information apportée par le linéaire, une évaluation du caractère plus ou moins maillé de l'ensemble.

- le nombre d'habitations isolées et le linéaire d'interface à défendre.

En complément de cette approche très analytique, on peut envisager d'utiliser le graphe de feux de forêts employé en phase opérationnelle par les PC des services d'incendie et de secours pour comparer montée en puissance des moyens et montée en puissance du feu.

Ces deux courbes sont représentées dans un même repère portant en abscisse le temps et en ordonnées la distance parcourue par le feu selon son axe principal de propagation ou le potentiel eau équivalent à chaque stade (à raison d'un camion tous les 20 m, ce ratio ayant été obtenu statistiquement sur la base de dizaines de feux réels).

3.3.3. La valeur des patrimoines exposés

Dans la mesure où les consignes données aux services de lutte amènent ces derniers à protéger très efficacement vies humaines et installations humaines, nous considérerons que les patrimoines à prendre en compte dans l'analyse sont exclusivement les espaces naturels.

Leur valeur dépend alors de leur "utilité" en terme de fonctions, les fonctions classiques étant :

- la fonction de production
- la fonction de protection
- la fonction de loisirs
- la fonction patrimoniale.

Tout le problème consiste donc à évaluer l'importance de ces fonctions dans chaque situation étudiée.

La difficulté, réside dans le fait que la fonction d'un espace naturel ne peut être considéré comme propriété intrinsèque du milieu, mais résulte plutôt de la perception que l'homme, acteur de l'écosystème, a d'une certaine réalité (J de MONTGOLFIER, P. BERTIER 1980).

En d'autres termes, la fonction est à relativiser au contexte économique culturel et social : on découvre alors par exemple, que la fonction dite de loisir ou récréative, ne correspond pas à un besoin naturel de l'homme, mais résulte plutôt d'un apprentissage ou d'une initiation à la nature, dont l'aménagement des forêts périurbaines est une des formes les plus visibles : dans ce dernier cas, l'équipement crée le besoin plus qu'il n'y répond (CERFISE 1979).

Par ailleurs, l'autre difficulté repose sur l'inadaptation des outils d'évaluation classique (approche économique stricte) à la prise en compte des valeurs du patrimoine naturel.

En effet, l'approche économique suppose la possibilité d'attribuer un coût ou une valeur monétaire au bien menacé de destruction. Ceci permet alors de comparer par exemple, l'efficacité marginale d'un investissement de DFCI et d'optimiser le niveau d'équipement, en poursuivant les travaux tant que le coût marginal de l'opération reste inférieur à la valeur marginale du dommage évité.

Une telle démarche est déjà délicate à mener dans le cas des fonctions de production, de protection ou de loisirs dans la mesure où, en matière de risque incendie, le

raisonnement ne relève ni du domaine du réel, ni de celui du probabilisable mais de celui de l'incertain.

Certaines théories mathématiques, (théorie des jeux), devraient toutefois permettre de ne pas rester totalement démunis.

En revanche, la démarche devient impossible dans le cas de la fonction patrimoniale, car interviennent alors deux contraintes très mal gérées par la théorie économique classique : celle du très long terme, où la notion d'actualisation perd son sens et celle des valeurs non marchandes (J. de MONTGOLFIER, NATALI 1987).

Il est alors nécessaire de faire appel à d'autres techniques d'évaluation, telles que par exemple les comptes de patrimoine.

On peut donner au patrimoine deux définitions :

- la première à caractère "économique" : bien susceptible moyennant une gestion adéquate de conserver dans le futur des potentialités d'adaptation à des usages non prévisibles dans le présent ;

- la seconde à caractère "socio-politique" : ensemble des éléments matériels et immatériels qui concourent à sauvegarder l'autonomie et l'identité du titulaire ainsi que son potentiel d'adaptation à un environnement variant (OLLAGNON 1976-1979).

La première définition conduit à penser que la garantie du patrimoine est basée sur une rationalité, une organisation, une planification permettant d'optimiser le fonctionnement du système.

La seconde définition, qui introduit la notion de titulaire, insiste beaucoup plus sur l'importance de la diversité, de la variabilité, de l'hétérogénéité, comme gages d'adaptabilité et donc de préservation du patrimoine.

Nous nous attacherons, en ce qui nous concerne, plutôt à la deuxième définition.

Compte tenu de l'ensemble des considérations précédentes, quels pourraient être les indicateurs simples de valeur de patrimoine naturel?

- indicateurs de "valeur sylvicole" :

- . surfaces occupées par de beaux peuplements :
futaies denses et de hauteur importante.
- . surfaces non occupées par de beaux peuplements
mais correspondant à des stations à forte
potentialité (en première approximation sol
profond et pente pas trop prononcée).

- indicateurs de "valeur loisirs" :

- . fréquentation par la population quand on est
capable de l'estimer ;
- . importance du territoire de chasse et nombre de
chasseurs.

- indicateurs de "valeur protection" : classement forêt
de protection

- indicateurs de "valeur patrimoniale"

- . ZNIEF
- . site classé ou inscrit
- . terrains du conservatoire du littoral
- . réserve biologique domaniale
- . Parc National

- . monuments historiques
- . arboretum et plantations expérimentales
- . peuplements classés
- . arrêté de biotope
- . réserve naturelle.

Dans le cas de la valeur patrimoniale, on peut faire appel en outre à une série de critères plus complexes définis par GODRON et POISSONET en 1972.

Il s'agit des notions suivantes :

- séquence de végétation : l'idée est de compléter la description faite avec les cartes d'occupation des terres (structure, degré d'artificialisation, espèces dominantes de la végétation) par une analyse dynamique, dans laquelle on observe les stades successifs d'évolution prévisible de la végétation, en fonction de critères visibles in situ.

(Contrairement aux séries de végétations, où la succession des stades répond à un modèle théorique d'évolution, en l'absence de toute intervention humaine).

- diversité du paysage : Elle est fonction
- . de la diversité topographique
 - . de la diversité de la végétation, elle-même liée à la diversité des formations végétales, en terme de stratification, espèce dominante, taux de recouvrement...

- vitesse de cicatrisation de la végétation :

Il s'agit d'une indication, sur la capacité à la recolonisation végétale des milieux en évolution libre. Cette notion est donc très corrélée à celle de biovolume produit.

De manière plus précise, cette vitesse est celle avec laquelle le milieu est apte, par son activité biologique, à produire après destruction, une formation ligneuse haute et dense ou une formation climacique.

- sensibilité de la végétation : on intègre la notion de capital végétal, qui, combine vitesse de cicatrisation et nature des formations végétales observées avant destruction.

La sensibilité est de ce fait évaluée par le délai de reconstitution de la végétation à l'identique.

Ces concepts de vitesse de cicatrisation et de sensibilité de la végétation amènent tout naturellement à s'intéresser au type de réponse de la végétation au feu.

TRABAUD (1980) a montré que dans le cas des garrigues à chêne kermès du Languedoc Roussillon le retour à la situation floristique, structurale et architecturale d'avant feu était relativement rapide, seule l'abondance relative des espèces pouvant être modifiée, du fait de l'efficacité plus ou moins forte des mécanismes de régénération sexuée et asexuée.

BARBERO et QUEZEL (1989 1990) pour leur part, ont mis en évidence 3 modèles de réponse au feu :

- le modèle expansionniste : dont la réussite spatiale est assurée grâce à une forte régénération, une production de biomasse rapide et une grande plasticité écologique ;

- le modèle de résistance : dont la capacité de dissémination est plus faible, la croissance plus lente mais la longévité et le pouvoir concurrentiel interspécifique plus forts que dans le modèle précédent.

Le modèle exige un temps de mise en place plus long, mais le stade d'évolution obtenu est plutôt stable (RAMADE 1984

GODRON 1984) la résistance étant le fait de l'organisation architecturale de la formation (BARBERO MIGLIORETTI 1987) ;

- le modèle de stabilisation : la capacité de dissémination est faible ainsi que la résistance à des stress importants. Les surfaces occupées par ce modèle sont donc souvent relativement réduites, mais susceptibles de se développer, avec l'abandon d'anciennes terres agricoles qui peuvent constituer dans certains cas des milieux favorables.

Il est à noter que la difficulté majeure, dans le choix des indicateurs de "valeur patrimoniale", réside dans l'obligation de disposer d'outils d'évaluation non dépendant des contingences historiques, des usages et fonctions qui évoluent sans cesse en liaison avec l'Environnement social économique et humain.

4. CONCLUSION

Le thème de l'évaluation du risque incendie a fait l'objet, en France comme à l'étranger, de très nombreux travaux, débouchant parfois sur la mise au point de méthodes.

On notera toutefois que ces méthodes, lorsqu'elles existent, sont plus ou moins centrées sur la prise en compte des facteurs de comportement du feu, en particulier de ceux pour lesquels l'auteur de la méthode possédait une compétence particulière (météo, végétation...).

Tout en poursuivant les travaux d'investigation dans chacune des spécialités concernées, il importe donc, et tel sera notre objectif, de fédérer l'ensemble des résultats déjà acquis dans un outil d'évaluation, sans doute encore imprécis, mais aussi complet que possible sur les domaines des causes d'incendies, du comportement du feu, des enjeux à défendre.

BIBLIOGRAPHIE

- ALBINI Estimating Wildfire behaviour and effects
USDA F.S. GTR INT 30 1976
- ALBINI HOUGH Predicting fire behaviour in Palmetto Gallberry
full complex
USDA F.S. Research Paper SE n°174.
- ALEXANDRIAN Estimation de l'inflammabilité et de la
combustibilité de la végétation
CEMAGREF B.I. n°288 Janvier 82
- ANDERSON Aids to determining fuels models for
estimating fire behaviour
USDA F.S. GDR INT 122 Avril 1982
- ANDERSON Heat transfer and fire spread
USDA F.S. GTR INT 69 1969
- ARTSYBASHEV Forest fires and their control
Russian translation serie 15 1986
Ed. A.A. BALKENA/ROTTERDAM
- AUBERT Quelques aspects fondamentaux sur les
conditions d'existence de la végétation en
région méditerranéenne
IMEP Juin 1988
- AUSSENAC et al Potentiel de sève Etude de quelques espèces
forestières du Mont Ventoux
doc int INRA 78/03 1978
- BARBERO QUEZEL La déprise rurale et ses effets sur les
superficies forestières en région PACA
Bull soc linn Provence t 41 1990

- BARBERO QUEZEL Structures Architectures forestières à sclerophylles et prévention des incendies. Bull Ecol t 20 1 1989 p.7-14.
- BARBERO BRISSE QUEZEL Echantillonnage paramètres hiérarchisé contraintes de l'information écologique en vue de la protection de l'espace Ecologica Mediteranea 1989
- BARESCUT La prévision du risque feu de forêt La météo VIè série n°26 1981
- BAUDIN Phytovolume Phytomasse et stratégie d'occupation spatiale de six espèces arbustives sur le pare feu de l'Esterel DEA Université Aix-Marseille III Faculté Saint-Jérôme 1985
- BERNIER Prévention Incendie dans le Département de l'Aude 1985 ENSA Montpellier Thèse doct Ingénieur
- BERTIER OLLAGNON Etudes sur la gestion de la nappe phréatique d'Alsace Rapport pour le SRAE Alsace 1976-1979
- BLACKMARR Moisture content influences ignitability of slash pine litter USDA F.S. Research Note SE 1972 1973
- BLACKMARR Equilibrium moisture content of common fine fuels found in Southern Forests USDA F.S. Research paper SE 74 1972
- BOVIO- SAITTA Modello di propagazione di un incendio boschivo Regione Piemonte/Universita di Torino Sept 1989

- BOZABALIAN Informatisation du tunnel thermique
d'expertise et d'analyse informatique des
données TEXAID IBIZA
Thèse Université de Nice CRAI Fév 1989
- BRACKEBUSCH Gain and Loss of Moisture in large forest
fuels.
USDA F.S. Research paper n°173 1975
- BROWN-DAVIS Forest fire Control and Use (2è édition)
Mc Graw Hill Series in Forest Resources
- BROWN Ratios of surface area to volume for common
fine fuels
Forest Science Vol 16 n°1 1970
- BROWN Physical fuel properties of ponderosa pine
forest floors and cheatgrass
USDA F.S. Research paper INT 74 1970
- CARAMELLE-CLEMENT Inflammabilité et combustibilité de la
végétation méditerranéenne
Rapport ENITEF 1978
- CARREGA Une formule améliorée pour l'estimation des
risques d'incendie de forêts dans les Alpes
Maritimes
Analyse spatiale quantitative et appliquée
n°24
- CATCHPOLE-DE MESTRE Physical models for a spreading linefire
Aust For 1986 49 (2) 102-111
- CERFISE Les mutations de la Forêt méditerranéenne :
Fréquentation des forêts périurbaines de
l'aire métropolitaine marseillaise
Forêt Méditerranéenne t1 n°1 1979

- CHANDLER-CHENEY-THOMAS-
TRABAUD-WILLIAMS Fire in Forestry vol 1 Forest fires behavior
and effects
Vol 2 Forest fires management and organisation
1983
- COUNTRYMAN Fuel evaluation for fire control and fire use
Proceedings of the symposium on fire ecology
and control and use of fire in Wildland
management
Tuscon Arizona April 19 1969
- CTB Le comportement du bois au feu
Cahier n°74 série 1 Avril 1967
- CTGREF PFCI dans le département de l'Hérault
Prévention et Equipement du terrain
Rapport général + Annexes Avril 1978
- DEEMING et al The 1978 National Fire Danger Rating System
Technical Documentation
USDA F.S. GTR INT 169 Juillet 1983
- DELABARZE-VALETTE-CLEMENT Inflammabilité d'espèces
méditerranéennes Tests rapides Campagnes d'été
1978 Doc Int INRA 79.3 1979
- DELABRAZE Bases biologiques et physiques de la
prévention des incendies de forêt
doc int 5/85 INRA Janv 1985
- DELAVEAUD Le feu outil sylvicole ? Utilisation pratique
des données de combustibilité
Rapport ENITEF 1981
- DOAT-VALETTE Le pouvoir calorifique supérieur d'espèces
forestières méditerranéennes 1981

- DROUET Relations entre le spectre de la vitesse du vent et les incendies de forêt en Provence
IUT D'Aix-en-Provence Département Hygiène et Sécurité déc 1985
- DROUET Considérations sur le modèle de feu par vent arrière
Revue Forêt méditerranéenne t X n°1 Juillet 1988
- DROUET Propagation des feux de forêts Prévision du risque Conséquences pour la lutte
Revue technique dufeu Juin-Juillet 1980
- DROUET Aide à la décision pour l'envoi de secours en forêt
Pleins feux n°4 1986
- DROUET Etude théorique de la lutte contre les feux de forêts
Thèse Doctorat Université de Provence
1972
- DROUET Un moyen de prévoir les risques d'éclosion et de propagation des feux de forêts
Revue Forêt Méditerranéenne tIII n°2 1982
- DUCLOS Appréciation de l'aptitude à la mise en valeur forestière et agricole des zones accidentées de Provence
Bulletin de l'Association Française d'Etudes des sols n°6 1971
- FAHNESTOCK Two keys for appraising forest fine fuels
USDA Forest Service Research paper PNW 99 1970
- FISCHER Wilderness Fire Management planning guide
USDA F.S. GTR int 171 Aout 1974

- FEUILLAS Méthodes de mesure de biomasse
Université Paris sud DEA 1979
- FOSBERG Forecasting the 10 hour timelag fuel moisture
USDA F.S. Research Note RM 187 1977
- GAUDET Des paramètres biologiques pour améliorer
l'indice de risque feux de forêts
BTSA Mirecourt doc int INRA Janv 1989
- GODRON-POISSONET Quatre thèmes complémentaires pour la
cartographie de la végétation et du milieu
Bull. De la Société Languedocienne de
géographie t6 fasc 3 1972
- GUIDE TECHNIQUE DU FORESTIER MEDITERRANEEN FRANÇAIS CEMAGREF
Chapitre 1 Conception des Projets
chapitre 4 DFCI
- GOUIRAN L'opération Prométhée : présentation
exploitation CTI des Bouches du Rhone 54 p.
- HELLER Physiologie Végétale tI Nutrition (Abrégé)
Masson Editeur 1977
- HETIER-ALLAG Notice des cartes d'inflammabilité et de
combustibilité des formations végétales des
garrigues du Gard
IARE 1981-1982
- HOUGH Caloric values of some forest fuels of the
Southern United States
Research note SE 120 1969
- JOHNSON-ROUSSOSPOULOS Help in making fuel management
decision
USDA F.S. Research paper NC 112 1975

- LAURENT Relation Phytomasse-phytovolume E scoparia
Phillyrea latifolia
INRA 1987
- LAVAGNE La forêt vierge mythe ou réalité
Forêt méditerranéenne tX n°1 1988
- LAYEC Paramètres biologiques pour améliorer l'indice
de risque feux de forêts
DAA ENSAR INRA Octobre 1989
- LEFEVRE Réflexions sur la conservation des patrimoines
naturels forestiers des Alpes-Maritimes
ENGREF 1989
- MEYER-HEINE Investissement de la Forêt méditerranéenne par
l'urbanisation
Forêt méditerranéenne t I n°1 1979
- DE MONTGOLFIER-NATALI Le patrimoine du futur
Approches pour une gestion patrimoniale des
ressources naturelles
Ed. ECONOMICA 1987
- DE MONTGOLFIER BERTIER La forêt méditerranéenne : un
patrimoine aux fonctions qui évoluent
Forêt Méditerranéenne t I n°1 1979 t II n°2
1980
- MTDA ALEXANDRIAN Schéma Départemental d'Aménagement des Forêts
contre l'Incendie Bouches du Rhône
Evaluation des risques DDAF 13 1991
- MTDA ALEXANDRIAN Analyse des données contenues dans le fichier
Prométhée région PACA Juillet 1990
DRAF PACA Juillet 1990

- MUTCH PHILPOT Relation of silica content to flammability in
grasses
Forest Sci 16(1) 64.65 1970
- NORUM MILLER Measuring fuel moisture standard methods and
procedures
USDA FS GTR INT PNW 171 1984
- OLLAGNON Acteurs et patrimoine dans la gestion de la
qualité des milieux naturels.
in Aménagement et Nature 19è année n°74 Eté
1984
- ORIEUX Conditions météorologiques et incendies de
forêt en région méditerranéenne
Note technique section XXIV pièce n°8 1979
- PAULET Pour une typologie des massifs boisés de basse
Provence côtière et subcôtière
RFF XXXIV 4 1982
- PECH The association between atmospheric humidity
and fuel moisture
IN XIV IUFRO Kongress Muncher 1967 tome V
section 24
- PHILPOT MUTCH The seasonal trends in moisture content ether
extractives and energy of ponderosa pine and
Douglas fire needles
USDA F.S. Research paper INT 102 1971
- PHILPOT Mineral content and pyrolysis of selected
plant materials
USDA F.S. Research note INT 84 1968
- POMPE VINES Influence of moisture on the combustion of
leaves 1966
Australian Forestry vol 30 n°3

- RAMBAL Sécheresse réelle et sécheresse calculée
Bull Soc bot Fr 131 Actual bot 1984
- LA RECHERCHE n° spécial Incendies de forêts n°234 Juillet
-Août 1991
- REVUE FORESTIERE FRANCAISE
n° spécial Espaces Forestiers et Incendies
1990
n° spécial Les Incendies de Forêts (tome 1 et
2) 1974
- ROBERSTON Etude critique de la bibliographie sur les
incendies de forêt aux USA et CANADA
Possibilités d'adaptation de certaines
techniques en France
Thèse Doctorat Université P et M Curie Paris
VI Avril 1979
- ROTHERMEL BURGAN Behave : fire behaviour prediction and Fuel
modeling system
USDA F.S. GTR INT 167 1984
- ROTHERMEL How to predict the spread and intensity of
Forest and Range fires
USDA F.S GTR INT 143 1983
- ROTHERMEL A mathematical model for predicting fire
spread in wildland fuels
USDA F.S Research paper INT 115 1972
- ROTHERMEL-ANDERSON Fire spread characteristics determined in
the Laboratory
USDA F.S Research Paper INT 30 1966

- SCP Mission Interministérielle pour la protection et
l'aménagement de l'espace naturel
Méditerranéen
mars 1971
La méthode de la Planification Ecologique
- SOL-DROUET Etude de deux nouveaux indices de risques
météo IUT Aix et SMIRISE 1988
- THAVAUD-ARNAUT Proposition d'une méthode d'évaluation de la
biomasse de la strate combustible
Cerpam Déc 1984
- TRABAUD Les combustibles végétaux dans le département
de l'Hérault CEPE/CNRS Montpellier 1971
- TRABAUD Notice des cartes à grande échelle des
formations végétales combustibles du
département de l'Hérault
Doc n°68 CEPE/CNRS Montpellier 1973
- TRABAUD Inflammabilité et combustibilité des
principales espèces de la garrigue
Oecologica Plantarum 11.117:136 1976
- TRABAUD Etude du comportement du feu dans la garrigue
de chêne Kermès à partir des températures et
vitesses de propagation
Ann Sci Forestiers 36 13.38 1979
- TRABAUD Evolution après incendie de la structure de
quelques phytocénoses méditerranéennes du Bas
Languedoc
Ann. SCI Forestières 1983 40(2) 177.196
- TRABAUD Les feux de forêts
Mécanismes comportement Environnement
France sélection Editions 1989

- TRABAUD Impact biologique et écologique des feux de végétation sur l'Organisation, la structure et l'évolution de la végétation des zones de garrigues du Bas Languedoc
Thèse de Doctorat es Sciences Académie de Montpellier Oct 1980
- TRABAUD Quantités d'énergie et puissance potentielle de feu de quelques communautés végétales du Sud de la France
Acta Oecologica OEcd Plant 1985 vol 6(20) n°4
- VALETTE Risques présentés par Arbousier et Bruyère arborescente
Doc int INRA Sept 1989
- VALETTE Notions générales relatives à la combustion
Revue Forêt méditerranéenne Tome X n°1 juillet 1988
- VAN WAGNER Structure de l'indice canadien Forêt Météo
Centre de Petawawa Ontario 1987
- VIEUVILLE Impact du débroussaillage
Thèse Doctorat 1985 Fac St-Charles Université Aix-Marseille I