

# Notions générales relatives à la combustion

Jean-Charles VALETTE\*

L'utilisation du feu, qu'elle soit à des fins sylvicoles, pastorales ou sylvo-pastorales, demande une bonne connaissance de ce phénomène. Elle doit donc s'appuyer sur quelques notions qui, quoique simples, permettent de comprendre, voire d'interpréter les observations effectuées et les résultats obtenus. La présente communication a pour but de rappeler le vocabulaire et quelques notions de base de la thermodynamique même si de sérieuses difficultés se posent pour appliquer ce domaine de la physique au feu contrôlé et, plus encore, à l'incendie de forêt.

## Définitions

**La combustion:** c'est l'oxydation d'un combustible (par exemple la matière végétale) avec un comburant (par exemple l'oxygène de l'air). Cette réaction est fortement exothermique. Par exemple la combustion du carbone dans l'oxygène:



La combustion est dite « avec flammes » ou « vive » lorsque les gaz de décomposition thermique s'oxydent et « sans flammes » ou « lente » lorsque l'oxydation concerne les résidus de cette décomposition thermique. Au cours d'incendies de forêt ou de brûlages contrôlés, la majeure partie de la combustion est « vive », la phase « lente » se rencontre toutefois au niveau de la couverture morte ou lorsque le feu couve dans les racines.

**La pyrolyse** (destruction par le feu): c'est la décomposition chimique, en vase clos, de la matière sous l'effet de la chaleur seule. Au cours d'incendies de forêt ou de brûlages contrôlés, ce phénomène se produit rarement mais la gazéification observée s'y apparente.

## Caractéristiques du combustible

Le combustible forestier est très varié tant dans sa composition que dans sa structure en raison de la grande di-

versité des espèces constitutives des diverses strates.

**La teneur en eau:** exprimée en %, c'est le rapport entre le poids de l'eau contenue dans le combustible et son poids anhydre. Elle varie selon les espèces et, au sein d'un même individu, selon l'âge des tissus, l'activité physiologique et les conditions climatiques. Celle des tissus morts suit les variations de l'humidité atmosphérique avec une inertie d'autant plus grande que les éléments sont grossiers. Des modèles américains définissent des catégories selon le temps mis par ces éléments pour équilibrer leur teneur en eau avec l'humidité de l'air.

**La composition chimique:** elle varie selon les espèces et au sein d'un même individu, selon l'âge des tissus. La matière végétale contient environ 35 % de lignine, 55 % de cellulose, 2 à 4 % d'éléments minéraux ainsi qu'une proportion variable de substances volatiles parfois très inflammables et très combustibles (huiles essentielles, résines, composés terpéniques,...).

**La structure du combustible:** la répartition spatiale des éléments du combustible joue un rôle considérable dans la combustion, celle-ci est d'autant plus active que le combustible présente une surface importante au rayonnement calorifique et en contact avec l'air. Le rapport surface-volume décrit la structure élémentaire du combustible, c'est le rapport entre la surface développée et le volume réel du combustible élémentaire. La masse volumique (ou le volume massique) apparente décrit la compacité (ou le foisonnement) du combustible, c'est le rapport entre la masse du combustible et le volume qu'il occupe dans l'espace, volume très supérieur au volume réel.

**La chaleur spécifique:** c'est la quantité de chaleur nécessaire pour élever la température d'un gramme de combustible de 1 °C. Par définition, celle de l'eau est de 1 cal.g<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup> ou de 4,18 J.g<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>. Celle de la matière végétale est d'environ 1,4 J.g<sup>-1</sup>.°C<sup>-1</sup>.

**La chaleur latente de vaporisation:** c'est la quantité de chaleur nécessaire pour faire passer un corps de l'état liquide à l'état gazeux. Dans les conditions normales de température et de pression, celle de l'eau est de 2 260 J.g<sup>-1</sup>.

**Les pouvoirs calorifiques:** ce sont les quantités totales de chaleur dégagées par la combustion complète d'un corps. Lorsque la combustion s'effectue en vase clos (calorimètre adiabatique), le pouvoir calorifique mesuré est dit « supérieur » (PCS) et « inférieur » (PCI) lorsqu'elle s'effectue à l'air libre. Le PCS de la matière végétale se situe entre 18 000 et 24 000 J.g<sup>-1</sup>, tandis que PCS - PCI = 1 300 J.g<sup>-1</sup>.

**Le potentiel calorifique:** c'est la quantité maximum de chaleur que dégage la combustion de l'ensemble des combustibles présents sur une surface (dans un volume) donnée. L'énergie libérée est égale à ce potentiel duquel est déduit celui des résidus, voire des imbrûlés, ainsi que l'énergie des particules et des gaz non oxydés (environ 5 % du potentiel calorifique du combustible initial).

**La puissance du front de feu** (loi de Byram): elle est égale au produit de l'énergie libérée par la vitesse de progression du front de feu. Elle est classiquement déterminée par la formule suivante:

$$Pf = PCI \times M \times Vf \quad \text{avec,}$$

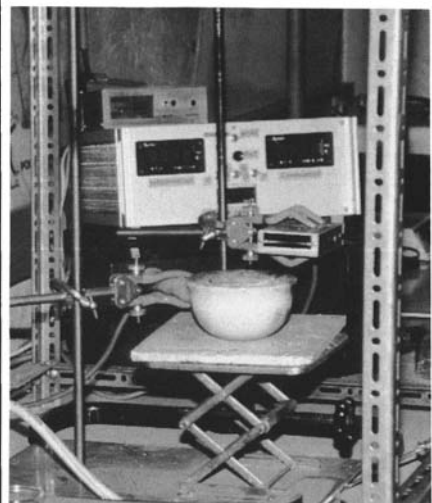
Pf : puissance du feu par mètre linéaire de front, en W.m<sup>-1</sup>.

PCI : pouvoir calorifique inférieur du combustible sec, en J.g<sup>-1</sup>.

M : masse sèche disparue au cours de la combustion, en g.m<sup>-2</sup>.

Vf : vitesse de propagation du front de feu, en m.s<sup>-1</sup>.

**Le débit et le flux calorifiques:** le débit calorifique est la quantité de chaleur libérée par unité de temps, il s'exprime en Watts. Le flux calorifique rapporte le débit calorifique à l'unité de surface émissive, il s'exprime donc en W.m<sup>-2</sup>.



Mesure d'inflammabilité des végétaux à l'INRA d'Avignon. Photo F. B.

\*Ingénieur forestier, Station de sylviculture méditerranéenne, av. Antoine Vivaldi, 84000 Avignon.

### Modes de transmission de la chaleur

La chaleur est, par définition, la forme d'énergie qui élève la température des corps. Le Premier principe fondamental de la thermodynamique postule que travail et chaleur sont deux formes équivalentes d'énergie. Le Second principe mesure le sens et l'intensité de la chaleur transférée entre deux systèmes à températures différentes.

**La conduction :** l'énergie thermique d'un milieu correspond à l'énergie cinétique de ses constituants fondamentaux ayant une certaine liberté de mouvement autour de leurs positions d'équilibre. Ces particules peuvent échanger tout ou partie de leur énergie thermique par interaction directe avec des particules voisines. Le phénomène physique de la conduction se traduit par la propagation de chaleur de proche en proche, sans transfert de matière. L'efficacité de la conduction est défini par le coefficient de conductivité thermique (loi de Fourier) exprimé en  $W \cdot m^{-1} \cdot ^\circ C^{-1}$ . Ce coefficient est de 350 pour le cuivre, 0,36 pour le bois ( $10^3$  fois moins conducteur) et de 0,038 pour le liège ( $10^4$  fois moins conducteur), ce mode de transmission peut donc être négligé pour ce qui concerne les incendies de forêt ou les brûlages contrôlés.

**La convection :** les différences de température produisent dans un liquide ou dans un gaz des différences de densité qui entraînent des mouvements au sein du fluide, dits « mouvements de convection » : les molécules chaudes, plus légères, ayant tendance à monter et à être remplacées par des molécules froides, plus lourdes. La convection « naturelle » correspond aux mouvements dus uniquement aux variations de densité. Ce mouvement ascensionnel de l'air chaud au-dessus d'une zone en combustion crée une « colonne de convection ». Lorsque les mouvements sont amplifiés par une action extérieure (flames, vent, tuyauteries...), la convection est dite « forcée ». Le flux calorifique, émis par convection et exprimé en  $W \cdot m^{-2}$ , dépend d'un coefficient de convection, en  $W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ C^{-1}$  et de la différence de température entre la source de chaleur et le milieu ambiant, en  $^\circ C$ .

**Le rayonnement :** tout corps émet, du fait de sa température, un rayonnement thermique sous forme de radiations électromagnétiques (entre  $10^{-4}$  et  $10^{-7}$  m) qui se propagent à une vitesse proche de celle de la lumière. Ces radiations sont absorbées par l'air selon une loi inversement proportionnelle au carré de la distance parcourue : deux récepteurs placés à des distances respectives de 1 et 10 d'un émetteur reçoivent des énergies dans un rapport de 100 à 1. La quantité d'énergie émise par un corps est proportionnelle à la puissance quatrième de la température thermodynamique de ce corps (loi de Stephan-

Boltzmann). Exprimée en  $W \cdot m^{-2}$ , elle est calculée par la formule :

$$E = e \times s \times T^4 \text{ avec}$$

$e$  : coefficient d'émissivité, celui du radiateur intégral est égal à 1.

$s$  : constante de Stephan-Boltzmann  $5,67 \cdot 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot ^\circ K^{-4}$ .

$T$  : température thermodynamique en  $^\circ K$ ,  $T = 273,15 + t$  avec  $t$  en  $^\circ C$ .

Tout corps soumis à un rayonnement en absorbe tout ou partie. Le facteur spectral d'absorption est la quantité d'énergie absorbée rapportée à la quantité d'énergie incidente, celui du corps noir est égal à 1.

### La flamme

**Définition :** elle est toujours associée à une oxydation, elle accompagne une réaction fortement exothermique, sa température est élevée et elle émet de la lumière. Elle contient les réactifs et les produits de l'oxydation et se trouve à l'intérieur de l'enveloppe la plus externe qui émet de la lumière. Un combustible solide brûle avec des « flammes de diffusion ». Les particules de carbone portées à l'incandescence les rendent brillantes et éclairantes. Lorsque la combustion est par trop incomplète, la flamme est dite « fuligineuse ».

**Conditions d'inflammation :** à l'air libre, l'accumulation de gaz combustibles et la présence d'un « point chaud » (étincelle, autre flamme, particule incandescente) sont indispensables pour que la flamme apparaisse. Quel que soit le « point chaud », l'inflammation ne se produit qu'au-delà d'un seuil, la « température d'inflammation », dont la valeur varie selon les combustibles. Pour élever sa température interne jusqu'au seuil d'inflammation, le combustible doit recevoir de la chaleur (phase endothermique). Cette « chaleur d'échauffement du combustible » se décompose en trois parties :

– la chaleur d'échauffement de l'eau dans le combustible :

$$Q_e = m \times t_{es} \times c_e \times (100 - T_a)$$

– la chaleur de vaporisation de cette eau :

$$Q_v = m \times t_{es} \cdot l_v$$

– la chaleur d'échauffement de la matière sèche :

$$Q_m = m \times c_m \times (T_i - T_a)$$

$m$  : masse de matière sèche, en g

$t_{es}$  : teneur en eau de la matière verte  
 $c_e$  : chaleur spécifique de l'eau,  $4,18 J \cdot g^{-1}$

$c_m$  : chaleur spécifique de la matière,  $1,4 J \cdot g^{-1}$

$l_v$  : chaleur latente de vaporisation de l'eau,  $2 260 J \cdot g^{-1}$

$T_a$  : température ambiante, en  $^\circ C$

$T_i$  : température d'inflammation, en  $^\circ C$ .

Par exemple, pour élever la température de deux grammes de matière verte

à 100 % de teneur en eau depuis  $20^\circ C$  jusqu'à  $300^\circ C$ , il faudra fournir :

$$Q = Q_e + Q_v + Q_m$$

$$Q = 335 + 2 260 + 392 = 3 \cdot 10^3 J$$

La combustion de ces deux grammes fournit environ  $20 \cdot 10^3 J$ .

**Caractéristiques de la flamme :** la longueur, la hauteur, la profondeur et l'inclinaison de la flamme ainsi que la longueur du front de feu sont indiquées sur la figure ci-après. En régime permanent, la longueur de la flamme est calculée par la formule :

$$l = h \times \sin(a)^{-1}$$

En régime permanent, l'angle d'inclinaison de la flamme permet de déterminer le coefficient de configuration qui mesure la part de rayonnement émis par la flamme et dirigé sur le combustible et qui sert à son préchauffage :

$$c = 0,5 \times (1 + \cos(a))$$

L'énergie libérée par la flamme, sous forme d'énergie lumineuse et d'énergie calorifique, se dégage par rayonnement et par convection. Le calcul est mal aisé car :

– la quantité de chaleur libérée par convection s'établit à partir des caractéristiques du mélange gazeux ;

– la quantité de chaleur libérée par rayonnement s'établit par application de la loi de Stephan-Boltzmann et demande donc la connaissance de l'émissivité de la flamme qui n'est pas un radiateur intégral. Cette émissivité dépend de la profondeur de la flamme ( $p$ ) et de son coefficient d'absorption ( $k$ ) selon la loi :

$$e = 1 - \exp^{-kp}$$

Ce coefficient ( $k$ ) dépend lui-même de la concentration des particules émises dans la flamme et de leur rapport surface-volume. Certains auteurs proposent un coefficient d'émissivité de 0,16 pour les incendies de forêt.

J.-C. V.

### Pour en savoir plus

Anderson H. E., 1969. – *Heat transfer and fire spread*. (Inter. Mount. For. and Range Exp. St., USDA Forest Service. Research Paper INT-69, 20 p).

Anderson H. E., Brackebusch A. P., Much R. W., Rothermei R. C., 1966. – *Mechanisms of fire spread*. (Inter. Moun. For. and Range Exp. St., USDA Forest Service. Research Paper INT-28, 29 p.).

Belakohowsky S., 1978. – *Introduction aux combustibles et à la combustion*. Technique et Documentation éd., Paris, 385 p.

Bruhat G., 1968. – *Thermodynamique*. Masson éd., Paris, 887 p.

Centre technique du bois, 1979. *Le comportement du bois au feu*. Cahier du CTB, Paris, n° 144, septembre 1979, 37 p.  
 Chaussin C., Hilly G., Barralis G., 1969. — *Chaleur et thermodynamique*. Dunod éd., Paris, 370 p.  
 Doat J., Valette J.-C., 1981. — « Le pouvoir calorifique supérieur d'espèces forestières méditerranéennes ».

Ann. Sci. forest., 1981, n° 38, t. 4, p. 469-486.  
 Gray W. A., Kilham J. K., Muller R., 1976. — *Heat transfer from flames*. Elek Science edit., Londres, 152 p.  
 Rothermel R. C., Anderson H. E., 1986. — *Fire spread characteristics determined in the laboratory*. (Inter. Mount. For. and Range Exp. St., USDA Forest Service. Research Paper INT-30, 29 p.)

Telisin P. H., 1971. — *Flame radiation as a mechanism of fire spread in forests*. Heat transfer in flames, Afgan and Bear Editors, Washington, 442-449.  
 Van Wagner C. E., 1967. — *Calculations on forest fire spread by flames radiations*. (Dep. of For. and Rur. Devel., Canada Forestry Branch, Departmental Publication n° 1 185, 14 p.)

## Les types de feux contrôlés

Jean-Charles VALETTE

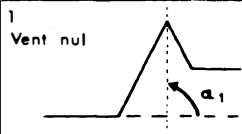
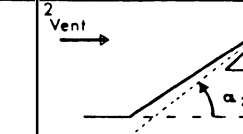
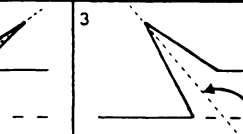
Tableau I  
 Inclinaison du front de flammes en fonction du vent et de la pente

**D**ans le texte de cette communication, le terme « feu contrôlé » est réservé à la stricte conduite du feu, tandis que celui de « brûlage contrôlé » couvre l'ensemble de l'opération :

- définition de(s) objectif(s) en accord avec les diverses parties concernées (propriétaires, gestionnaires, administrations, services d'incendie...),
- délimitation de la zone à traiter,
- préparation du chantier (matériels, aménagements spécifiques...),
- conduite du feu contrôlé (observations, mesures...),
- mesures et système de sécurité,
- analyses à court et long termes des conséquences.

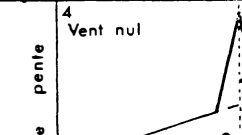
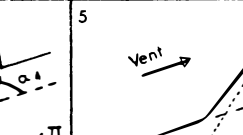
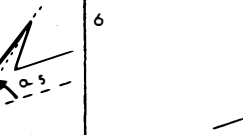
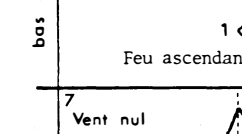
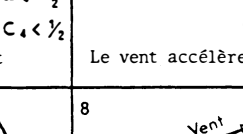
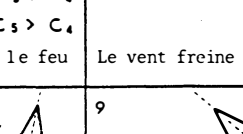
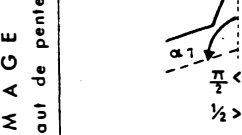
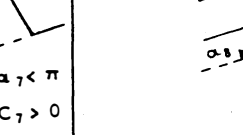
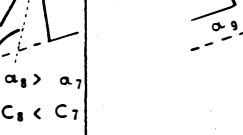
Des connaissances, tant « théoriques » sur la combustion que « pratiques » sur le comportement du feu, sont indispensables pour conduire efficacement une opération de brûlage contrôlé. Comme toute opération sylvicole, sylvopastorale, l'outil (le feu contrôlé) doit être adapté à(aux) l'objectif(s) clairement défini(s) au préalable. D'autre part, les effets directs, mais aussi les effets indirects de la technique (le brûlage contrôlé) doivent être intégrés dans la réflexion globale et pris en compte dans le bilan final de l'opération. En effet, la méthode suivie varie selon que le but est tout d'abord, la destruction des rémanents d'une coupe rase pour pouvoir ensuite replanter ou bien, la réduction des strates basses d'un peuplement en croissance afin de réduire autant que faire se peut sa combustibilité sans porter préjudice à la strate arborée ou encore, l'élimination des refus de pâture afin de permettre la remise en exploitation de formations à vocation sylvopastorales, voire même strictement pastorales.

### 1. Sur terrain plat

1 Vent nul 	2 Vent 	3 
$\alpha_1 = \frac{\pi}{2}$ $C_1 = \frac{1}{2}$	$0 < \alpha_2 < \frac{\pi}{2}$ $1 < C_2 < \frac{1}{2}$ Feu "au vent"	$\frac{\pi}{2} < \alpha_3 < \pi$ $\frac{1}{2} > C_3 > 0$ Feu "à la recule"

$$C = \frac{1 + \cos \alpha}{2} \text{ avec } \alpha : \text{angle de la pente}$$

### 2. Sur pente

A L L U M A G E	bas de pente	4 Vent nul 	5 Vent 	6 
	haut de pente	7 Vent nul 	8 Vent 	9 Vent 
	mi - pente	10 Vent nul 	11 Vent 	12 Vent 
		$0 < \alpha_4 < \frac{\pi}{2}$ $1 < C_4 < \frac{1}{2}$ Feu ascendant	$\alpha_5 < \alpha_4$ $C_5 > C_4$ Le vent accélère le feu	$\alpha_6 > \alpha_4$ $C_6 < C_4$ Le vent freine le feu
		$\frac{\pi}{2} < \alpha_7 < \pi$ $\frac{1}{2} > C_7 > 0$ Feu descendant	$\alpha_8 > \alpha_7$ $C_8 < C_7$ Le vent freine le feu	$\alpha_9 < \alpha_7$ $C_9 > C_7$ Le vent accélère le feu
		$0 < \alpha_{10} < \frac{\pi}{2} < \alpha'_{10} < \pi$ $1 > C_{10} > \frac{1}{2} > C'_{10} > 0$ Le feu monte plus vite qu'il ne descend	$\alpha_{11} < \alpha_{10}$ $\alpha'_{11} > \alpha'_{10}$ $C_{11} > C_{10}$ $C'_{11} < C'_{10}$ Le vent accélère le feu montant et freine le feu descendant	$\alpha_{12} > \alpha_{10}$ $\alpha'_{12} < \alpha'_{10}$ $C_{12} < C_{10}$ $C'_{12} > C'_{10}$ Le vent freine le feu montant et accélère le feu descendant

DÉBATS

Tableau II Types de feux contrôlés

Techniques	Structure végétale favorable	Mise à feu	Avantages	Inconvénients
Feu à la recule ou descendant	- pelouse broussailles (20 cm à 1 m) - arbres > 5 m - couverture morte continue	en haut de pente ou à contre-vent	complet, peu puissant - dommages réduits ou nuls - brandons rares	- très lent - inutilisable si litière humide ou discontinue
Feu au vent ou ascendant	- pelouse ou garrigue (10 à 50 cm) - pas d'arbre	en bas de pente ou au vent	- rapide et général - fumée bien dispersée - utilisable avec combustible discontinu	- zone de sécurité large* - puissant et destructeur - brandons fréquents
Feu par lignes successives	- pelouse et arbustes bas (20 à 40 cm) - arbres de 5 m et plus	à partir du haut, en courbe de niveau ou à contre-vent, perpendiculairement à sa direction	- assez rapide - puissance fonction de l'espacement des lignes	- zone de sécurité large* - exige un terrain facile à parcourir - feu plus puissant à la rencontre des fronts de feu
Feu en râteau ou par lignes simultanées	- pelouse et arbustes bas (20 cm à 1 m) - arbres de 5 m et plus	simultanée sur des lignes parallèles, à contre-vent ou en descendant	- puissance intermédiaire entre feu à la recule et au vent - puissance contrôlée par la vitesse des opérateurs	- zone de sécurité large* - exige un vent très régulier - nécessite une bonne coordination
Feu en anneaux ou par lignes concentriques	- pelouse, broussailles et arbustes (20 cm à 1 m) - pas d'arbre	au centre puis suivant des circonférences concentriques	- rapide - convergence du feu par aspiration de proche en proche	- très puissant - brandons fréquents
Feu périmétral	- pelouse, broussailles et arbustes (20 cm à 1 m) - pas d'arbre	en suivant le périmètre	- rapide - mise en œuvre facile	- puissant - brandons fréquents - pas de vent et parcelle horizontale

\* L'élargissement de la zone de sécurité peut être réalisé par un feu à la recule. Le brûlage fait alors appel à deux techniques : feu à la recule, puis feu au vent, par exemple.

Il est enfin nécessaire de prendre en compte les divers paramètres du milieu et les conditions locales :

- climatiques : température et humidité de l'air, vitesse et direction du vent, nature, date et hauteur des précipitations...
- topographiques : pente, plateau, crête...
- structurels : litière, strates herbacée, arbustive, arborée...
- phénologiques : activité végétative, état sanitaire...
- de situation : piste, route...

L'évaluation pertinente et préalable de l'influence de chacun de ces facteurs sur le comportement du feu est le gage d'un brûlage contrôlé réussi.

La présente communication a simplement pour but de présenter quelques types de feux contrôlés utilisables sur la façade méditerranéenne, leurs exigences, avantages et inconvénients.

Le tableau I illustre les modifications apportées par le vent et la pente à l'inclinaison du front de flammes et donc au coefficient de configuration :  $c = 0,5 \times (1 + \cos(\alpha))$ .

Le tableau II passe en revue les divers types de feux contrôlés illustrés par les figures 1 à 6 (ci-après).

J.-C. V.

#### Pour en savoir plus

Alexandrian D., Chautrand L., Delabre P., 1980. — "Prescribed fire study tour". *Forêt méditerranéenne*, n° 2, t. 2, décembre 1980, 229-236.

Lewis C. E., Harsbarger T. J., 1976. — "Shrub and herbaceous vegetation after 20 years of prescribed burning in the South Carolina coastal plain. *Journal of Range Management*", n° 29 t. 1, 13-18.

Lotti T., Klawitter R. A., Le Grande W. P., 1960. — *Prescribed burning for understory control in loblolly pine stands in the coastal plain*. (Sou. For. Exp. St., UDSA Forest Service. Station Paper SE-116, 19 p.).

Martin R. E., Colman S. E., Johnson A. H., 1977. — *Wetline technique for prescribed burning firelines in rangeland*. (Pac. Nor. For. and Range Exp. St., UDSA Forest Service. Research Note PNW-292, 6 p.).

Martin R. E., Dell J. D., 1978. — *Planning for prescribed burning in the Inland Northwest*. (Pac. Nor. For. and Range Exp. St., UDSA Forest Service. General Technical Report PNW-76, 67 p.).

Metz L. J., Loti T., Klawitter R. A., 1961. — *Some effects of prescribed burning on coastal plain forest soil*. (Sou. For. Exp. St., UDSA Forest Service. Station Paper SE-133, 10 p.).

Mobley H. E., Jackson R. S., Balmer W. E., Hough W. A., 1978. — *A guide for prescribed fire in southern forests*. UDSA Forest Service, Atlanta, 40 p.

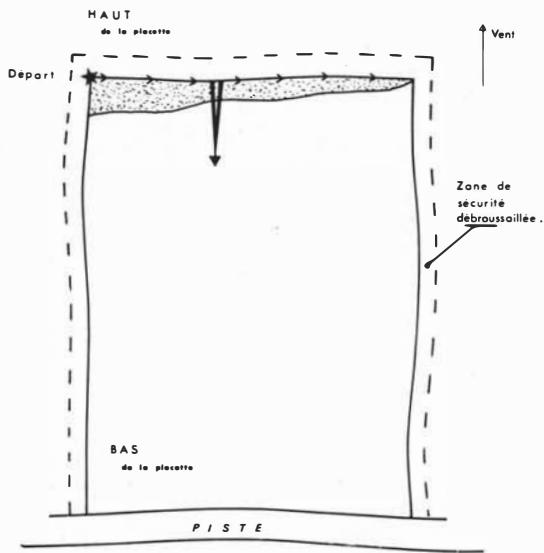


Figure 1  
Feu à la recule ou feu descendant

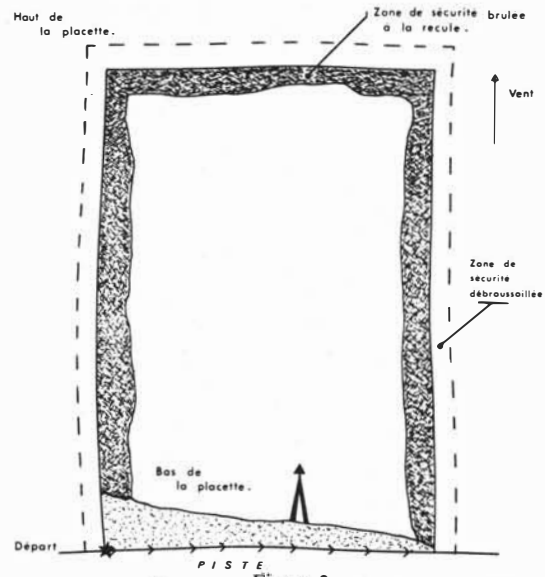


Figure 2  
Feu au vent ou feu montant

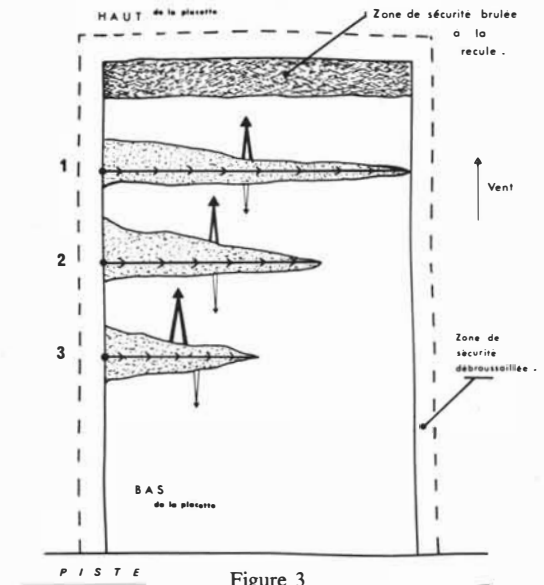


Figure 3  
Feu par lignes successives

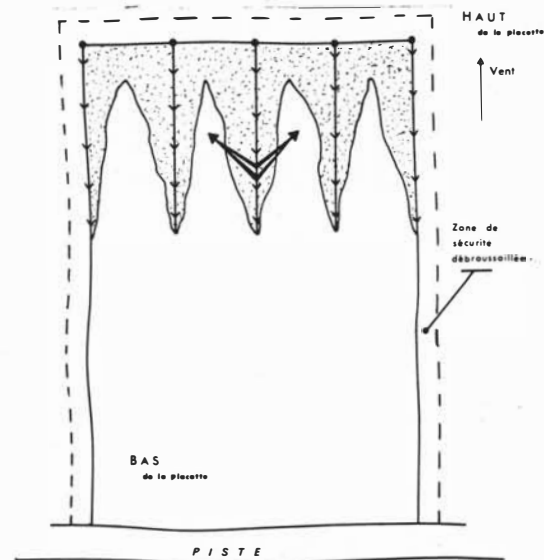


Figure 4  
Feu en râteau ou par lignes simultanées

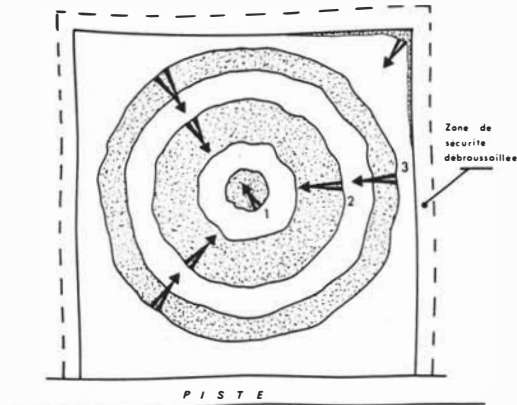


Figure 5  
Feu en anneaux ou par lignes concentriques

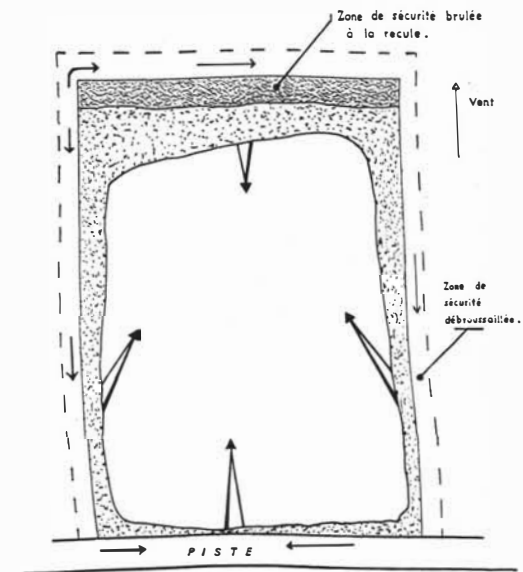
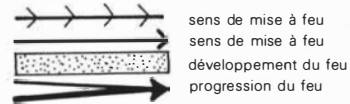


Figure 6  
Feu périmétral