

Protection des forêts contre l'incendie

Fiches techniques pour les pays
du bassin méditerranéen

Pierre-Yves Colin, Marielle Jappiot, Anne Mariel

Coordination

**Pierre-Yves Colin, Marielle Jappiot, Anne Mariel,
Corinne Cabaret, Stéphanie Veillon, Fabien Brocchiero**

Rédaction

CEMAGREF

Département Gestion des territoires

Unité de recherche: Agriculture et forêt méditerranéennes

Groupement d'Aix-en-Provence

CAHIER FAO
CONSERVATION

36

INSTITUT DE
RECHERCHE POUR
L'INGÉNIERIE DE
L'AGRICULTURE ET DE
L'ENVIRONNEMENT



MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE,
DE LA PÊCHE ET DE
L'ALIMENTATION



MINISTÈRE
DE L'AGRICULTURE
DE LA PÊCHE ET DE
L'ALIMENTATION

MINISTÈRE
DE L'AMÉNAGEMENT
DU TERRITOIRE
ET DE
L'ENVIRONNEMENT



Organisation
des
Nations
Unies
pour
l'alimentation
et
l'agriculture



Rome, 2001

Les appellations employées dans cette publication et la présentation des données qui y figurent n'impliquent de la part de l' Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture ou Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement aucune prise de position quant au statut juridique des pays, territoires, villes ou zones ou de leurs autorités, ni quant au tracé de leurs frontières ou limites.

ISBN 92-5-204678-X

Tous droits réservés. Les informations ci-après peuvent être reproduites ou diffusées à des fins éducatives et non commerciales sans autorisation préalable du détenteur des droits d'auteur à condition que la source des informations soit clairement indiquée. Ces informations ne peuvent toutefois pas être reproduites pour la revente ou d'autres fins commerciales sans l'autorisation écrite du détenteur des droits d'auteur. Les demandes d'autorisation devront être adressées au Chef du Service des publications et du multimédia, Division de l'information, FAO, Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italie ou, par courrier électronique, à copyright@fao.org

© FAO et Cemagref 2001

Remerciements

Nous exprimons nos vifs remerciements pour leur précieuse collaboration à :

Daniel ALEXANDRIAN, Robert CHEVROU, Albert MAILLET, Jean de MONTGOLFIER

Nous exprimons également notre reconnaissance à tous ceux qui ont relu ce document et nous ont permis de l'améliorer par leurs remarques et leurs suggestions :

M Louis AMANDIER (France), M Michel BASSIL (Liban), Mlle Raphaële BLANCHI (France), Colonel Philippe BODINO (France), M Jean BONNIER (France), M Giovanni BOVIO (Italie), M Gérard BRUGNOT (France), M Dominique CAIROL (France), M Olivier CHAUMONTET (France), M Jean CLEMENT (FAO Rome), M Michel DESHAYES (France), M Yvon DUCHE (France), M Jean-Luc DUPUY (France), M Bernard FOUCAULT (France), Mlle Alexandra GAULIER (France), M Maurice GOUIRAN (France), M Jacques GRELU (France), M Michel MALAGNOUX (FAO Rome), M Pascal MARTINEZ (FAO Rome), M Philippe MICHAUT (France), Colonel Philippe NARDIN (France), Mme Catherine NOUALS (France), M Jean-Pierre OLIVIER (France), M Christophe ORAZIO (France), Colonel Claude PICARD (France), M Eric RIGOLOT (France), Colonel Jean-Paul RIVALIN (France), M Jean-Louis ROUSSEL (France), M Samir Belhadj SALAH (Tunisie), M El Hadji SENE (FAO Rome), M Bernard SOL (France), M Thierry TATONI (France), M Daniel TERRASSON (France), M Jean-Jacques TOLRON (France), M Louis TRABAUD (France), M Ricardo VELEZ (Espagne), M Jean-Luc WYBO (France)

Nous faisons part de notre gratitude à tous ceux qui ont organisé nos voyages d'étude ainsi qu'à ceux qui nous ont réservé le plus amical des accueils lors de ces déplacements :

A Chypre : M Alex CHRISTODOULOU, M CHRISTOPHIDES, M A.P. IOANNOU, M S THEOPHANOUS, M TSINTIDES
Au Maroc : M Mustapha AMHIRI, M Mohamed ANKOUZ, M Saïd BENJELLOUN, Colonel-Major Abdelkrim EL YAA-GOUBI, M Ahmed SABER
Au Portugal : M Herminio BOTELHO, Mme Manuela BATISTA, M Sergio CORREIA, M Rui NATARIO, M Joao De SOUSA TEXEIRA
En Syrie : M Salim ZAHOUHEH, M Riad AL LAHAAM, M Kaled AKASH, M Fouad DHNEH, M Asaad MUSTAFA, M Mustapha SINACEUR
En Tunisie : M Samir Belhadj SALAH
En Turquie : M Yüksel ERDOGAN, M BILAL

Préface

Les incendies de forêts représentent un véritable fléau pour les forêts méditerranéennes. Chaque année, on estime à 50.000 le nombre d'incendies en région méditerranéenne et plus de 600.000 ha sont ravagés par les flammes.

Pour faire face à cette menace permanente, les pays se sont depuis longtemps mobilisés et organisés pour tenter d'être toujours plus efficaces dans la prévention des incendies et le combat contre les flammes. Ainsi, progressivement, en fonction de leur culture, de leurs moyens et de leurs choix, les pays méditerranéens ont développé une connaissance, des outils et des méthodes qui leur sont propres.

Malheureusement, cette information reste disséminée et même parfois non écrite, alors que l'échange d'informations et d'expériences entre les pays constitue un moyen efficace pour aider au renforcement de la prévention et de la lutte contre les incendies de forêts. Des manuels de grande utilité ont déjà été élaborés sur le sujet des incendies de forêt, comme par exemple le "Guide technique du forestier méditerranéen français" réalisé par le Cemagref (France), institut public de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement en 1989, ou encore le "Handbook on forest fire control, a guide for trainers", publié par l'Organisme finlandais pour le développement international (FINNIDA, Finlande) en 1993. Mais ces publications, soit ne représentent pas la région méditerranéenne, soit se limitent à un seul pays et ne prennent pas en compte la diversité régionale.

Ainsi, sous l'impulsion du réseau "Aménagement anti-incendie des forêts" du Comité des Questions Forestières Méditerranéennes de la FAO *Silva Mediterranea* et grâce à un appui financier de la France, notamment du Ministère de l'Aménagement du Territoire et de l'Environnement, la FAO a demandé au Cemagref de réaliser un outil pratique, actuel et complet, capable de renforcer la formation en matière de prévention et de lutte contre les incendies de forêt, et valable pour l'ensemble des pays de la région. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'un projet plus vaste, ayant pour objectif général le renforcement des capacités nationales en matière de prévention contre les incendies de forêts en région méditerranéenne. Le Cemagref n'a pas ménagé ses efforts pour rassembler toute l'information disponible, en contactant tous les pays membres de *Silva Mediterranea*, en procédant à une large revue bibliographique et en visitant plusieurs pays.

Le guide est organisé en huit grands thèmes qui couvrent l'ensemble de la problématique feux de forêt en région méditerranéenne : le mécanisme du feu, les bases de données, les causes des incendies, l'analyse du risque, la prévention, la prévision de tout départ de feu, le contrôle de la propagation du feu, la lutte et les mesures de réhabilitation après l'incendie. Le lecteur y trouvera bon nombre d'informations, conseils pratiques, méthodes... Il s'agit d'un matériel didactique complet à la portée du plus grand nombre. En outre, ce guide technique est fait pour être flexible et adaptable : chaque pays qui le souhaite peut l'améliorer, en y intégrant davantage sa spécificité nationale.

La FAO tient à remercier vivement l'ensemble des personnes qui ont participé directement ou indirectement à l'élaboration de ce guide : le Cemagref, pour son excellent travail, les pays de la région, qui se sont impliqués dans ce travail en accueillant le personnel du Cemagref ou en lui faisant parvenir des informations pertinentes, ainsi que la France qui a financé l'ouvrage. Nos remerciements s'adressent également en particulier à M. Pierre-Yves Colin, Mme Marielle Jappiot et Mme Anne Mariel, tous trois Ingénieurs-chercheurs au Cemagref, qui ont piloté toute l'étude depuis la phase d'enquête jusqu'à la préparation finale du guide. Au niveau de la FAO, ce travail a été conçu dans le cadre des activités du Comité des Questions Forestières Méditerranéennes et en particulier du réseau "Aménagement anti-incendie des forêts". Le secrétariat de ce Comité, assuré par M. Michel Malagnoux, a coordonné ce travail. M Pascal Martinez, cadre associé puis consultant à la FAO, a suivi et impulsé avec beaucoup d'efficacité et de clairvoyance la réalisation de l'ouvrage et a assuré le relais avec le Cemagref.

Le Directeur de la Division des ressources forestières
Département des Forêts de la FAO.



Jean Clément

Préface

Fin 1999, s'est achevée la décennie internationale pour la prévention des catastrophes naturelles qui, sous l'égide des Nations Unies, a permis une large coopération, d'une part sur les méthodes de prévision de ces catastrophes, d'autre part sur les méthodes de prévention mises en œuvre pour en limiter les effets.

Beaucoup a été fait dans de nombreux pays dans le domaine de la prévention, malgré cela beaucoup reste à faire. La confrontation internationale des solutions mises en œuvre permet, dans le respect des particularités locales, de progresser ensemble plus rapidement en adaptant localement les méthodes qui ont fait la preuve de leur efficacité.

C'est cette idée qui a prévalu lors de la mise en chantier de ce guide international méditerranéen.

Le mérite en revient à la FAO dans le cadre de son programme d'action forestier méditerranéen. Quelle que soit l'hétérogénéité des milieux et des conditions locales des pays qui le composent, le pourtour méditerranéen constitue une entité géographique autour de la mer commune, et historique comme berceau et carrefour des civilisations occidentale et moyen orientale. Le programme de la FAO concrétise cette solidarité. L'incendie de forêt en méditerranée et sa prévention font partie d'une culture commune.

L'incendie de forêt affecte particulièrement les pays du bassin méditerranéen. Que ce soit dans les zones où la forêt est en extension comme en Europe, ou dans celles au contraire où la désertification menace, l'incendie met en danger les équilibres économiques, écologiques et sociaux. Protéger les personnes, les biens et le milieu naturel suppose d'adapter et d'optimiser les stratégies et les moyens de prévention et de lutte.

Ce guide réalisé par le Cemagref tente de présenter une partie de la diversité et de la richesse des solutions mises en œuvre dans le pourtour méditerranéen pour prévenir et lutter contre les incendies de forêt. S'il ne peut s'agir par nature d'un travail exhaustif, il constitue toutefois une base, à la fois sur les fondements communs du phénomène, et sur des pratiques locales replacées dans leur contexte. Partie émergée de l'iceberg, ce guide est aussi le témoin de la base de données bibliographiques constituée par le Cemagref pour faire ce travail, qui peut être consultée et qui pourra être enrichie régulièrement.

Outil d'échange, de coopération, de dialogue, ce guide a, à ce titre, reçu le soutien des ministères chargés de l'environnement, de l'agriculture et de la forêt.

Souhaitons lui le succès que mérite toute initiative dans le domaine de la protection des forêts méditerranéennes, dans celui de la protection contre l'incendie et dans la perspective de la collaboration internationale.

Le Directeur de la prévention des pollutions et des risques,
Délégué aux risques majeurs au Ministère français de l'Aménagement du territoire et de l'environnement

Philippe VESSERON

Le Directeur de l'Espace rural et de la Forêt
au Ministère français de l'Agriculture et de la Pêche



Pierre-Eric ROSENBERG

Sommaire

PREFACE

INTRODUCTION AU GUIDE ET AU CONTEXTE MEDITERRANEEN 1

Un guide Incendie pour le Bassin Méditerranéen 3

- Objectifs 3
- Élaboration 3
 - Collecte d'informations 3
 - Création d'une base de données 3
 - Bilan sur les informations collectées 4
- Structure de l'ouvrage 4

Feux de forêts dans le Bassin Méditerranéen 5

- Le contexte méditerranéen 5
 - Des conditions climatiques très particulières 5
 - Importance de la forêt 5
 - Un environnement social déterminant 5
- Les feux de forêt dans le bassin méditerranéen 7
 - Définition des feux de forêts 7
 - Données sur les feux 8

THÈME 1 LE MÉCANISME DU FEU 9

Fiche 1.1 Combustion et énergie dégagée 11

- Combustible 11
 - Structure 11
 - Composition chimique 12
- Comburant 13
- Source d'énergie 13
- Énergie dégagée 13

Fiche 1.2 Transfert de chaleur et propagation du feu 15

- Les modes de transfert de chaleur 15
 - Conduction 15
 - Rayonnement thermique 15
 - Convection 16
- Les modes de propagation du feu 16

Fiche 1.3 Inflammabilité, combustibilité 19

- Inflammabilité 19
- Combustibilité 19
- Utilisation de ces paramètres 20

THÈME 2 LES BASES DE DONNÉES - LES SYSTEMES D'INFORMATIONS 21

Fiche 2.1 Création et gestion d'une base de données 23

- Propriétés des bases de données 23
- Choix des informations à collecter 23
 - Nature des données 23
 - Propriétés des données 24
- Récolte des données et intégration des informations dans la base 24
 - Récolte des données 24
 - Codification des données 24
 - Stockage et gestion des données 24
 - Modalités de la saisie 24

Fiche 2.2 Exploitation d'une base de données 25

Logiciels utilisés 25
Traitements possibles 25
Programme de traitements 26
 Analyses annuelles 26
 Études particulières à renouveler tous les 4 ans environ 28
Retour d'informations 28

Fiche 2.3 La coopération internationale 29

Vers une mise en commun des données 29
Banque de données décentralisée sur les feux de forêt 29
 Les objectifs 29
 Les principes 29
 Le socle commun 30
 L'exploitation 30

THÈME 3 LES CAUSES DES INCENDIES 31**Fiche 3.1 Origine des incendies 33**

Causes naturelles 33
Causes humaines 33
 Causes involontaires 33
 Causes volontaires 34

Fiche 3.2 Recherche des causes 37

Méthodes de recherche des causes 37
 Dédution à partir du contexte du feu 37
 Enquête après incendie 37
 Méthodes originales 37
Les équipes spécialisées 40
Classification des causes 40
Extrapolation des causes connues 40

THÈME 4 L'ANALYSE DU RISQUE 43**Fiche 4.1 Estimation dans le temps : la prévision des périodes à risque 45**

Les facteurs de risque 45
 Facteurs climatiques 45
 Inflammabilité des strates basses de la végétation 45
L'estimation du risque 47

Fiche 4.2 Estimation dans l'espace : l'évaluation des zones à risque 49

Les facteurs de risque 49
 Facteurs anthropiques : activités et installations humaines 49
 Facteurs du milieu naturel : climat, végétation et topographie 49
Méthodes d'évaluation spatiale du risque 50
 Analyse de la variabilité spatiale du risque d'éclosion 51
 Analyse de la variabilité spatiale du risque de propagation 51
 Le cas des données historiques 51
Le recours aux Systèmes d'Information Géographique (SIG) 53

Fiche 4.3 Prévision de la propagation du feu 55

Les modèles locaux 55
 Les modèles locaux de propagation du feu 55
 Les modèles locaux de comportement du feu 55
Les systèmes de prédiction des feux 57
 Les systèmes simples : ellipse, ovale ou "cône du Var" 58
 Les systèmes complexes 59
Exemples d'utilisation des modèles locaux et des systèmes de prédiction 60
 Analyse de protection des biens 60
 Analyse de surfaces brûlées à l'attaque initiale 60
 Implantation d'équipements 60

THÈME 5 LA PRÉVENTION : EVITER TOUT DEPART DE FEU 61

Fiche 5.1 Information et sensibilisation 63

- Les publics visés 63
 - Sensibilisation ciblée 63
 - Sensibilisation de masse 63
- Les messages 63
- Les outils de communication 64
 - Les médias 64
 - Les autres vecteurs directs 65
 - Les actions indirectes 65
- Analyse des actions de communication 66
- La formation 66

Fiche 5.2 Le cadre législatif 67

- Législation préventive 67
 - Contrôle des activités humaines 67
 - Occupation des sols 67
 - Débroussailllements 68
- Législation répressive 68
- Application des lois 68

THÈME 6 LA PREVISION : LIMITER LE DEVELOPPEMENT DU FEU 69

Fiche 6.1 La détection 71

- Guet fixe 71
 - Conception d'un réseau optimal de postes vigies fixes 71
 - Caractéristiques de l'équipement 72
 - Règles d'exploitation 73
- Guet mobile terrestre 74
- Guet aérien 74
- Systèmes automatisés 74
- Intervention de la population 75
- Localisation des départs de feu 75

Fiche 6.2 Débroussailllements localisés 77

- Débroussailllement le long des voies de circulation : bandes de sécurité 77
- Débroussailllement autour des habitations 77
- Interfaces forêt / zones agricoles 78
- Autres zones sensibles 78

Fiche 6.3 Compartimentation de l'espace 79

- Les pare-feu ou tranchées pare-feu 79
- Les coupures de combustible 79
 - Coupures arborées 79
 - Coupures agricoles 80

Fiche 6.4 Techniques de débroussailllement 81

- Débroussailllements manuels 81
- Débroussailllements mécaniques 82
- Débroussailllements chimiques 83
- Brûlage dirigé 85
 - Comment utiliser le brûlage dirigé ? 85
 - La torche de brûlage 87
- Sylvopastoralisme 87
- Combinaisons de méthodes 88

Fiche 6.5 Sylviculture préventive 89

- Quels peuplements rechercher 89
 - Discontinuités dans la structure 89
 - Densité du couvert 89
 - Composition en essences 90
- Opérations sylvicoles 90

- Éclaircies 90
- Dépressage 91
- Élagage 92
- Élimination des rémanents 92

Fiche 6.6 Équipements de terrain 93

- Voies de circulation 93
 - Réseau routier 93
 - Pistes 93
 - Implantation d'un réseau de pistes 94
- Zones d'appui - Lignes de combat préparées à l'avance 96
 - Renforcement des zones de lutte 96
 - Compartmentation de l'espace 96
 - Lignes de combat préparées à l'avance 96
- Points d'eau 97
 - Plans d'eau 97
 - Citernes 97
 - Réseau d'eau potable 98
 - Densité d'un réseau de citernes 98
 - Entretien 98
- Brumisation 98

Fiche 6.7 Plan d'aménagement du territoire 99

- Délimitation du périmètre d'intervention 99
- Concertation 99
- Élaboration d'un plan d'aménagement 100
 - Analyse de la zone étudiée 100
 - Scénarios d'incendies 100
 - Proposition d'actions préventives 100
 - Synthèse 101
- Mise en œuvre de l'étude 101

THÈME 7 LA LUTTE 103

Fiche 7.1 La stratégie 105

- Les principes fondamentaux 105
- Les objectifs principaux 105
 - Maîtriser les éclosions au stade initial 105
 - Limiter l'extension des incendies qui n'ont pas pu être éteints au stade initial 106

Fiche 7.2 Les acteurs de la lutte 107

- Personnels de lutte 107
 - Personnel spécialisé 107
 - Personnel non spécialisé 108
- Équipement personnel de protection 109
- Organisation et coordination 109
 - Responsabilité de la lutte 109
 - Organisation des moyens 110
- Outils de gestion 112

Fiche 7.3 Le matériel de lutte 113

- Moyens terrestres 113
 - Intervention directe sur le feu 113
 - Intervention indirecte 114
- Moyens aériens 115
 - Matériel utilisé 115
 - Modalités d'utilisation 117
- Additifs chimiques 118

Fiche 7.4 La communication 119

- Radio 119
 - Choix des fréquences 119
 - Types de réseaux 119

- Matériel d'un réseau 120
- Conception d'un réseau semi-duplex 120
- Téléphone 121
 - Réseau téléphonique 121
 - Téléphone portable 121
 - Numéro d'appel gratuit 121
- Procédure d'utilisation 121

THÈME 8 APRES L'INCENDIE 123

Fiche 8.1 Impact du feu sur le milieu naturel 125

- Impact du feu sur le peuplement 125
 - Domages causés par le feu 125
 - Risques phytosanitaires 126
 - Effets sur la régénération du peuplement 126
- Impact du feu sur l'environnement 126
 - Effets sur le sol 126
 - Effets sur la dynamique de végétation 127
 - Effets sur la faune 127
 - Effets sur le paysage 127
 - Pertes économiques 128

Fiche 8.2 Diagnostic des peuplements après l'incendie 129

- Estimation des dégâts sur le houppier 129
- Estimation des dégâts sur le tronc 129
- Estimation des dégâts sur les racines 130
- Bilan 130

Fiche 8.3 Réhabilitation des peuplements 131

- Réhabilitation à court terme 131
 - Maîtrise de l'érosion - Fascinage 131
 - Coupe des arbres brûlés 131
 - Recépage et taille des feuillus brûlés 132
- Réhabilitation à long terme - Régénération des peuplements 132
 - La régénération naturelle 132
 - La régénération artificielle 133

SIGLES 135

GLOSSAIRE 137

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 139

Introduction au guide et au contexte méditerranéen



Région du Rif (Maroc)

Un guide Incendie pour le Bassin Méditerranéen

Objectifs

Ce guide répond à trois objectifs :

- Faire le point sur l'ensemble des connaissances en matière de feux de forêt dans le Bassin Méditerranéen.
- Être avant tout un document technique, pratique, conçu comme un outil.
- Constituer à terme une source d'échanges au sein du Bassin Méditerranéen.

Répondant à une demande de l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), ce projet de coopération technique s'inscrit dans le cadre du Comité des questions forestières méditerranéennes *Silva Mediterranea*.

SILVA MEDITERRANEA

Les forêts du pourtour méditerranéen possèdent de nombreuses caractéristiques communes très particulières qui devaient inévitablement inciter à une coopération régionale.

L'idée d'une coopération forestière méditerranéenne fut lancée en 1911 et une "Ligue forestière méditerranéenne" fut établie en 1922, sous le nom de "Silva Mediterranea". En 1948, Silva Mediterranea est devenue un organe statutaire de la FAO sous la forme d'un "Comité des questions forestières méditerranéennes" où les pays de la région peuvent se rencontrer, partager leur expérience et établir des programmes de coopération. Vingt six pays et l'Union européenne sont membres de plein droit du Comité. Le Comité constitue un forum pour la coopération régionale visant au développement durable du secteur forestier et à la protection de l'environnement. Lorsque le besoin se fait sentir, le Comité établit des réseaux coopératifs entre les pays concernés.

Actuellement six réseaux sont actifs: i) Aménagement anti-incendie des forêts; ii) Sélection d'espèces à usage multiple des zones arides et semi-arides; iii) Sylviculture des essences: le cèdre; iv) Sylviculture des essences: le pin pignon; v) Sélection de peuplements de conifères méditerranéens pour la production de graines destinées aux programmes de reboisement; and vi) Sylviculture des essences: le chêne-liège.

Le guide technique est une des actions financées par le projet régional "Coopération internationale dans le domaine de l'information sur les incendies de forêt et leur prévention en région méditerranéenne" (projet sur fonds fiduciaires français GCP/REM/056/FRA).

De 1989 à 1992, le Cemagref d'Aix en Provence a édité 7 tomes d'un "Guide technique du forestier méditerranéen français", traitant des problématiques spécifiques à la forêt méditerranéenne française.

Le tome "Protection des Forêts Contre les Incendies" a été apprécié en France, mais également à l'étranger. Afin d'éviter toute extrapolation inadaptée aux autres pays du Bassin Méditerranéen, la FAO a jugé nécessaire la réalisation d'un guide international.

Le guide sera rédigé en 2 étapes :

- Réalisation d'un document international synthétique présentant la problématique "feux de forêts" pour l'ensemble des pays méditerranéens : il s'agit du présent guide. Le Cemagref a été chargé de cette première phase.

- Rédaction de fiches nationales spécifiques de chaque pays. Ce projet est à plus long terme et sa réalisation sera assurée par les pays qui le souhaitent.

Élaboration

COLLECTE D'INFORMATIONS

Indispensable pour réaliser la synthèse des connaissances sur la problématique "Feux de forêts", la collecte d'informations a été réalisée de plusieurs façons :

- Recherche de documentation par mots-clés dans les bases de données internationales existantes : références de la F.A.O., bases mondiales (Agris, Agricola, Cab, Enviroline, Pascal, Ntis).
- Tournées sur le terrain dans 6 pays (Chypre, Maroc, Portugal, Syrie, Tunisie, Turquie).
- Contacts par courrier dans les différents pays.

CRÉATION D'UNE BASE DE DONNÉES

Cette collecte d'informations a permis au Cemagref de créer une base de données sous le logiciel EndNotes, regroupant la documentation utilisée lors de l'élaboration du guide, c'est-à-dire plus de 500 documents au total. Chaque document est lu, analysé par rapport à son utilité pour le guide, puis répertorié dans une fiche permettant de l'identifier (titre, auteur, date de parution, résumé...).

Cette base de données peut être consultée au Cemagref d'Aix en Provence, Unité de Recherche "Agriculture et Forêt méditerranéennes".



Pays concernés par le guide

BILAN SUR LES INFORMATIONS COLLECTÉES

Sur l'ensemble des 31 pays concernés par le programme PAF-MED, la collecte d'informations est très hétérogène, en quantité et en qualité. Les informations sont nombreuses pour les pays dans lesquels une tournée a été effectuée. En revanche, pour certains pays, il a été difficile, voire impossible de collecter des informations (absence de références bibliographiques).

Les incendies n'ont pas la même importance selon les pays. Pour certains, il s'agit d'un problème dont l'impact important exige une prise en compte (Algérie, Bulgarie, Chypre, Espagne, France, Grèce, Iran, Israël, Italie, Maroc, Portugal, Syrie, Tunisie, Turquie). Pour d'autres, ce problème reste marginal ou inexistant compte tenu des faibles surfaces forestières (Arabie Saoudite, Bahreïn, Égypte, Émirats Arabes Unis, Koweït, Libye, Malte, Oman, Qatar).

Structure de l'ouvrage

Une première fiche présente les feux de forêts dans le Bassin méditerranéen.

Le guide est ensuite organisé selon 8 grands thèmes :

- Le mécanisme du feu.
- Les bases de données.

- Les causes des incendies.
- L'analyse du risque.
- La prévention : éviter tout départ de feu.
- La prévision : réduire les délais d'intervention et limiter la propagation du feu.
- La lutte.
- Après l'incendie.

Chaque thème est développé en :

- Une introduction présentant le sujet traité.
- Plusieurs fiches donnant ensuite les informations techniques.

Toutes les fiches, à l'exception de quatre d'entre elles, sont organisées selon un même plan :

- Au début de la fiche, un paragraphe assez court présente les raisons de mener telle action.

- Ensuite, le corps de la fiche présente une synthèse des solutions adoptées, illustrée en encadrés d'exemples précis issus de différents pays.

Quatre fiches, à vocation descriptive, font état des connaissances chacune dans un domaine particulier :

- Fiche 1. 1 : Combustion et énergie dégagée.
- Fiche 1. 2 : Transfert de chaleur et propagation du feu.
- Fiche 3. 1 : Origine des incendies.
- Fiche 8. 1 : Impact du feu sur le milieu naturel.

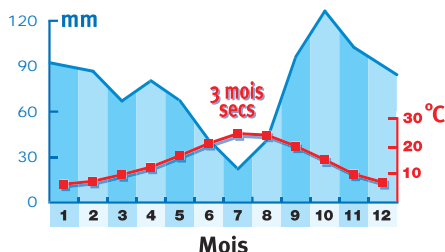
Ces fiches sont, si nécessaire, illustrées d'exemples précis issus de différents pays.

Feux de forêts dans le Bassin Méditerranéen

Le contexte méditerranéen

DES CONDITIONS CLIMATIQUES TRÈS PARTICULIÈRES

- Pour qu'un climat soit méditerranéen, il faut et il suffit :
- Que l'été soit la saison la moins arrosée.
 - Et que, de plus, il soit sec.



Histogramme températures / précipitations. Région méditerranéenne française (Brignoles). Moyenne 1961-1996 - Source Météo France

On peut cependant observer une grande variabilité suivant les pays :

- La sécheresse peut être plus ou moins importante en durée et en intensité. Par exemple, la Syrie est privée de pluies pendant une grande partie de l'année en raison d'une chaîne montagneuse longeant le littoral.
- Le vent peut également être une composante essentielle de ce climat. En France, il s'agit du Mistral ou de la Tramontane ; en Israël, au Liban et en Syrie, c'est le Khamsin, vent chaud et sec ; sur les côtes d'Afrique du Nord souffle le Sirocco en provenance du Sahara.

Cette variabilité existe aussi entre régions d'un même pays, en fonction de la topographie, de la distance à la mer, de l'altitude, de l'exposition au vent. Ainsi, au Liban, le nord de la plaine de la Bekaa subit une forte sécheresse, du fait d'une chaîne montagneuse (Chaîne Occidentale) empêchant toute entrée d'eau sous forme de précipitations. Le sud de cette plaine est plus arrosé, le relief étant beaucoup moins marqué.

Dans l'ensemble, le contexte climatique est donc fortement propice aux feux de forêts. Les températures élevées et l'absence de précipitations augmentent la dessiccation des végétaux, ce qui favorise l'éclosion et la propagation des incendies. Le vent facilite leur propagation.

IMPORTANCE DE LA FORÊT

Le taux de boisement du Bassin méditerranéen est d'environ 5,5 %, mais la variation est considérable d'un pays à l'autre. Cependant, il est très difficile d'estimer la surface boisée d'un pays, car le sens attribué au terme forêt varie beaucoup selon les pays. Cette absence d'une définition commune rend difficile la comparaison des données entre les pays du Bassin Méditerranéen.

Par ailleurs, ces espaces boisés sont extrêmement variés quant à leur composition floristique et à leur structure. Ils vont des hautes futaies résineuses jusqu'à des formations basses pré-désertiques aux végétaux ligneux clairsemés. Il n'existe donc pas une forêt méditerranéenne mais une multitude d'écosystèmes de types méditerranéens, plus ou moins riches en végétaux ligneux.

Le tableau de la page suivante présente l'étendue des formations forestières pour quelques pays du Bassin Méditerranéen, en précisant dans la mesure du possible le sens attribué à l'expression "zone forestière".

UN ENVIRONNEMENT SOCIAL DÉTERMINANT

Le contexte social est déterminant dans le développement des feux de forêts.

Pression de la population

Elle s'exerce différemment selon les fonctions de la forêt.

La forêt comme ressource.

Dans certains pays (Albanie, Maroc, Syrie, Tunisie, Turquie), la forêt constitue un moyen direct de subsistance pour la population rurale (bois de chauffage, de



Pin brutia. Gemmage des pins (Turquie)

Pays	Zone forestière		Définition de la forêt
	milliers d'ha	% du territoire	
Albanie	1 242	45,3	*
Algérie	4 366	1,8	Ensemble des végétaux ligneux et autres dont la hauteur moyenne dépasse 7 m.
Bosnie Herzégovine	2 710	53,1	*
Arabie saoudite	1 601	0,7	*
Bulgarie	3 800	34,4	*
Chypre	175	18,9	Formations arborées naturelles ou artificielles, garrigues, landes, maquis, tant du domaine public que du domaine privé.
Croatie	1 825	32,6	*
Espagne	30 490	61,0	Surfaces boisées ou couvertes d'espèces non cultivées (arbres, arbustes, maquis, herbacées...).
France	15 075	27,7	Formations arborées présentant un couvert supérieur à 10%, plantations, landes, maquis, garrigues.
Grèce	5 754	44,5	Formations arborées ou arbustives, pâturages.
Iran	18 043	11,0	*
Irak	1 550	3,5	*
Israël	109	5,4	*
Italie	8 063	27,4	*
Jordanie	146	1,6	*
Liban	84	8,2	Groupement végétal comprenant des arbustes ou des arbres de futaie ou de taillis qui ne peuvent être utilisés que pour l'industrie et le chauffage.
Libye	779	0,4	*
Macédoine	988	38,9	*
Maroc	4 718	6,7	Formations arborées naturelles ou artificielles, matorral
Portugal	2 976	32,5	Terrains supérieurs à 0,2 ha où les arbres couvrent plus de 10% de la surface.
Roumanie	6 340	27,6	*
Syrie	429	2,3	Formations végétales naturelles ou artificielles appartenant à l'État.
Slovénie	1 077	53,5	*
Tunisie	831	5,3	Surfaces arborées naturelles ou artificielles, garrigues.
Turquie	20 199	26,0	Formations arborées ou arbustives de densité variable, d'origine naturelle ou artificielle.
Yémen	4 060	7,7	*
Yougoslavie	1 769	17,3	*
FAO (pour information)			Terres portant un couvert arboré supérieur à 10 pour cent et une superficie de plus de 0,5 hectare (ha). Les arbres doivent pouvoir atteindre une hauteur minimale de 5 mètres (m) à maturité <i>in situ</i> .

* définition non communiquée

Taux de boisement des pays méditerranéens rajouter la définition
FAO - Source : FAO, 1993

construction, cueillette de fruits). Elle peut également être une ressource indirecte, par le pacage et le parcours des animaux.

La forêt marocaine est soumise à une très forte pression humaine. Pour la région du Rif, la consommation moyenne de bois de feu s'échelonne entre 4 et 6



Charbonnière (Maroc)



Zones cultivées aux dépens de la forêt (Syrie)

tonnes par foyer et par an. La forêt est divisée en zones de droits d'usage, attribuées aux douars (villages) et reconnues juridiquement. Ces droits d'usage, parfois contraignants pour les services forestiers chargés de la gestion de la forêt, autorisent et réglementent le parcours des troupeaux, le ramassage de bois mort pour les besoins de la population locale, et le prélèvement de matériaux de construction dans la limite des besoins familiaux. Les bénéfices liés aux droits d'usage représentent par usager la moitié du salaire moyen d'un marocain.

Il en résulte une forte pression humaine, à la fois positive, en raison du nettoyage du sous bois et négative, par diminution de la surface forestière et augmentation des risques de départs de feu (feux pastoraux, fabrication du charbon de bois, récolte du miel par fumage...).

La forêt comme cadre de vie.

En France, les constructions se multiplient en forêt, la population recherchant souvent le calme de la nature. En Grèce, l'extension de la ville d'Athènes s'est traduite par le développement des habitations en bordure de la forêt. La multiplication de ces interfaces forêt-habitations augmente les risques d'éclosion et augmente la vulnérabilité de ces habitations.

La forêt comme espace à convertir.

L'augmentation de surfaces à cultiver se fait au détriment de la forêt. Parfois, des mises à feu intentionnelles en périphérie des forêts sont destinées à réduire la surface de ces espaces forestiers. C'est le cas au Maroc ou en Syrie.



Taux de boisement des pays méditerranéens - Source : FAO, 1993.

La forêt comme lieu de détente.

La forêt est parfois soumise à une forte fréquentation touristique - tout particulièrement en période estivale - ce qui augmente les risques de départ de feu.

La pression de la population est d'autant plus forte que le cadre législatif est mal défini (absence de délimitation des forêts, faible répression...).

Déprise agricole

Si la forêt régresse au sud et à l'est du Bassin méditerranéen, elle recolonise dans le nord des espaces abandonnés par l'agriculture. Ces nouvelles formations forestières sont en général très sensibles au feu, du fait de leur caractère pionnier (composition en essences et structure favorables à la propagation des incendies). Leur extension favorise la jonction de massifs forestiers existants et le risque d'incendies catastrophiques.



Terrasses anciennement cultivées et maintenant abandonnées (France)

Contexte politique

L'instabilité politique peut devenir un facteur de risque d'incendie, dans la mesure où la forêt devient alors un enjeu, et où la mise à feu est utilisée comme moyen de pression.

Les feux de forêt dans le Bassin méditerranéen

DÉFINITION DES FEUX DE FORÊTS

Cette définition varie selon les pays en fonction de celle de la forêt, mais aussi selon des critères annexes : lieu d'éclosion et distance par rapport à la forêt, nature du propriétaire, taille du feu...

Bulgarie : Tout feu se développant dans les forêts, les plantations, les vergers à graines et les pâturages.

Chypre : Feu écloso à l'intérieur des forêts domaniales ou sur des terrains privés à moins d'un kilomètre des forêts domaniales.

Espagne : Feu se développant dans des surfaces boisées ou couvertes par des espèces non cultivées.

France : Feu qui a atteint des forêts, landes, garrigues ou maquis d'une superficie d'au moins un hectare d'un seul tenant (et ce quelle que soit la superficie parcourue). Le terme "atteint" sous-entend qu'une partie au moins de l'étage arbustif ou de l'étage arboré a été détruite.

Grèce : Feu de végétation, en dehors de la végétation agricole.

Italie : Tous les feux de végétation sont considérés comme des feux de "forêts".

Liban : Feu affectant la forêt, les garrigues, les zones de parcours pour les animaux, les terres agricoles ou les vergers.

Maroc : Feu concernant les formations forestières et matorrals appartenant au domaine forestier de l'État ou soumis au régime forestier.

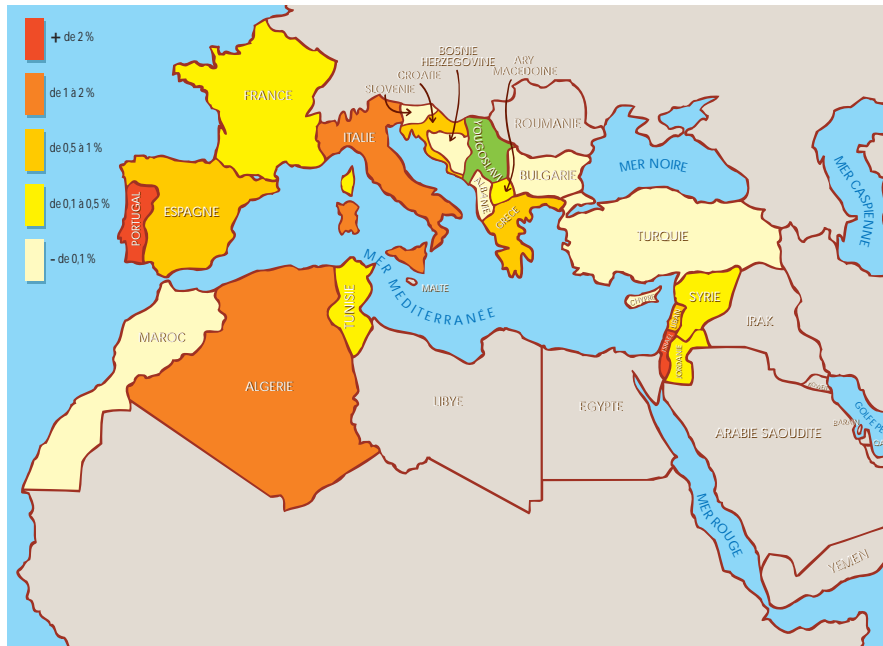
Portugal : Feu affectant une zone boisée, non agricole ou urbaine.

Tunisie : Feu affectant des forêts naturelles ou artificielles de plus de 4 ha.

Ces quelques exemples illustrent bien la grande variabilité dans les définitions des feux de forêts. Dès lors, les comparaisons entre pays doivent être menées avec précaution.

DONNÉES SUR LES FEUX

Pays	Période	Surface annuelle moyenne brûlée (ha)	Part de la surface forestière nationale (%)
Algérie	81-96	49 130	1,13
Albanie	88-97	136	0,01
Bosnie			
Herzégovine	81-97	881	0,03
Bulgarie	95-98	2 550	0,07
Chypre	81-97	130	0,07
Croatie	81-97	10 121	0,55
Espagne	81-97	211 635	0,69
France	81-97	32 456	0,22
Grèce	81-97	48 003	0,83
Israël	81-97	3 407	3,13
Italie	81-97	132 305	3,13
Jordanie	81-85	299	0,20
Liban	96-97	734	0,87
Libye	83-85	16	-
Macédoine	91-97	4 716	0,48
Maroc	81-97	3 459	0,07
Portugal	81-97	83 143	2,79
Slovénie	91-97	743	0,07
Syrie	81-97	1 312	0,31
Tunisie	81-97	1 468	0,18
Turquie	81-97	14 662	0,07



Importance des feux de forêt dans les pays du bassin méditerranéen. Part de la surface forestière brûlée.

1

Le mécanisme du feu



Feu dans un peuplement de Chêne liège (France)

sommaire

- 1.1 Combustion et énergie dégagée. p 11*
- 1.2 Transfert de chaleur et propagation du feu p 15*
- 1.3 Inflammabilité, combustibilité. p 19*

Introduction

Un mégot de cigarette, un fragment de bois incandescent, un arc électrique, une élévation importante de température peuvent provoquer un feu de forêt. Le foyer initial peut se transformer ensuite, si les conditions s'y prêtent, en un incendie catastrophique très difficile voire impossible à maîtriser. Le front d'un incendie peut dégager une puissance telle (plusieurs milliers de kilowatts par mètre) qu'il est impossible de s'en approcher à moins de quelques dizaines de mètres, ce qui rend les conditions de lutte très pénibles et dangereuses.

La naissance d'un feu est liée à la présence d'un apport initial d'énergie.

La propagation et la puissance d'un incendie, donc les possibilités d'extinction et les méthodes à mettre en œuvre pour y parvenir, dépendent :

- Des caractéristiques des éléments en jeu dans le phénomène de combustion (combustible, comburant).

- Des transferts d'énergie (chaleur) du front de flamme vers la végétation en avant de celui-ci.

La mise en œuvre de toutes les actions de prévention, de prévision, de lutte et même de réhabilitation nécessite de comprendre les mécanismes de l'incendie et de connaître l'importance des facteurs qui y participent.

En voici quelques exemples :

- Une ligne électrique balancée par le vent peut venir toucher des branches d'arbre, créer un arc électrique qui déclenche un incendie. Une prévention efficace nécessite de dégager la végétation à proximité de la ligne électrique, pour éliminer les risques de contact.

- La quantité et la disposition du combustible végétal influent sur le mode de propagation du feu. Une discontinuité importante entre la végétation basse et les houppiers permet au feu de rester en surface et de ne pas se propager dans la canopée. Des actions de prévision (débranchement) visent à limiter la puissance et la progression du feu dans des zones définies, afin de permettre l'intervention des équipes de lutte dans de meilleures conditions d'efficacité et de sécurité.

- Le vent intervient dans la propagation d'un incendie de deux façons. Il augmente la quantité d'oxygène (comburant) apportée aux flammes et il accroît les transferts de chaleur vers l'avant du front de flammes par convection. La lutte sur le front d'un incendie par grand vent est impossible, les équipes de lutte ne peuvent intervenir que sur les flancs du feu.

Ce premier thème donne une série de définitions relatives aux mécanismes d'un incendie de forêt.

1.1 Combustion et énergie dégagée

L'incendie de forêt résulte d'une réaction chimique, la combustion. Il s'agit d'une réaction d'oxydation vive fortement exothermique, c'est-à-dire produisant de la chaleur, d'un comburant sur un combustible, en l'occurrence dans le cas des feux de forêts, de l'oxygène de l'air sur la végétation.

La combustion nécessite la présence de trois éléments : le combustible, le comburant et un apport initial d'énergie. Le processus se décompose en trois étapes : évaporation de l'eau contenue dans le combustible, émission de gaz inflammables par pyrolyse et enfin mise à feu.

Le déclenchement de la combustion est assuré par une source d'énergie extérieure. Une partie de l'énergie libérée par la combustion est ensuite réabsorbée par le combustible pour entretenir la combustion.

Dans le cas d'un incendie de forêt, l'énergie libérée est réabsorbée par la végétation située en avant du front de feu, ce qui entraîne la progression du feu.



Combustible

STRUCTURE

Macrostructure

C'est la distribution horizontale ou verticale du combustible dans l'espace. Des modèles permettent de décrire cette distribution.

Ex : En France, on distingue quatre strates verticales :

- La litière, souvent peu épaisse en région méditerranéenne.
- La strate herbacée, très inflammable en période de sécheresse.
- Les ligneux bas, d'une hauteur inférieure à 2 m.
- Les ligneux hauts, d'une hauteur supérieure à 2 m.

Les structures horizontales et verticales peuvent être continues ou discontinues (répartition par bouquets, absence de sous étage).

Microstructure

Il s'agit de l'agencement dans l'espace des organes végétaux les plus fins (feuilles, aiguilles,

rameaux). L'intensité du feu dépend également de cette microstructure. Plus un combustible est finement divisé, meilleur est le contact avec le comburant, et donc plus la combustion est facilitée. Ainsi :

- Des aiguilles tombées au sol récemment forment un tapis aéré, facilitant le contact entre l'air et la matière végétale et donc la combustion.

- En revanche, un tapis d'aiguilles au sol depuis longtemps, tassées sous l'effet du vieillissement et des intempéries, forme une couche beaucoup plus compacte, rendant la combustion plus difficile.



Les différentes strates de la végétation



Macrostructure : coronille sous chêne pubescent (France)



Microstructure : chêne kermès et asperge (France)



Continuité horizontale



Continuité verticale



Discontinuité horizontale



Discontinuité verticale

COMPOSITION CHIMIQUE

Un végétal est composé de matière sèche et d'eau

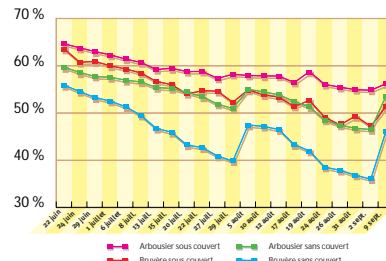
Teneur en eau

La condition sine qua non pour que la combustion ait lieu est l'évaporation préalable de l'eau du végétal, permettant par la suite l'émission de gaz inflammables. Ce mécanisme physique nécessite une quantité d'énergie très importante, car la chaleur latente de vaporisation de l'eau est élevée.

Il en résulte que les végétaux riches en eau sont peu inflammables et peu combustibles.

La teneur en eau varie en fonction des espèces végétales, mais également en fonction de la phénologie, des conditions physiologiques des végétaux et des influences climatiques.

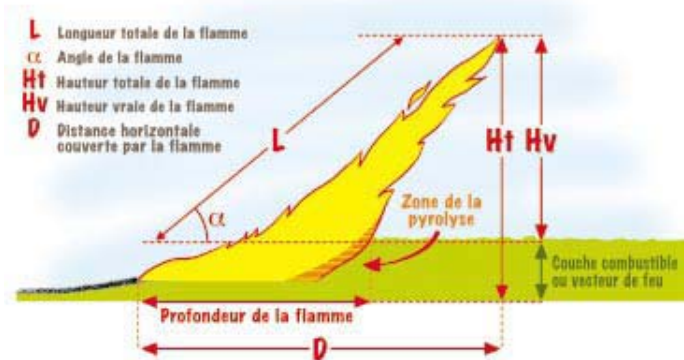
Teneur en eau



Évolution de la teneur en eau de deux végétaux au cours de l'année 1998 - INRA Bormes les Mimosas (France)

Matière sèche

La matière sèche est composée de matière organique



Géométrie de la flamme

et de minéraux. Seule la matière organique brûle, fournissant l'énergie nécessaire à la propagation du feu. Ainsi, plus un végétal est riche en minéraux, moins son pouvoir calorifique théorique est élevé, moins il est combustible.

Comburant

Dans le cas des feux de forêts, il s'agit de l'oxygène de l'air. La combustion dépend également fortement de cet élément, puisque, pour qu'une flamme se produise et s'entretienne, il faut que le pourcentage en volume d'oxygène restant présent dans l'air soit supérieur à 15,75 %, ce taux étant normalement de 20,94 %. Le vent joue donc un rôle essentiel dans la propagation du feu, notamment en assurant le renouvellement de l'oxygène, à la manière d'un soufflet de forge.

Source d'énergie

La capacité d'un combustible à s'enflammer dépend de ses caractéristiques et de celles de la source d'énergie, ainsi que du temps d'exposition :

- Un faible apport d'énergie permet l'inflammation de l'herbe sèche, alors qu'il faut un apport d'énergie beaucoup plus important pour enflammer du bois.



Peuplement de châtaignier : faible charge en combustible (France)

- Pour enflammer des végétaux en stress hydrique, des braises nécessitent la présence de vent, tandis qu'une flamme d'allumette suffit. L'arc électrique créé lors de la rupture d'un câble ou l'impact de la foudre dégage assez d'énergie pour enflammer facilement la végétation.

Énergie dégagée

Quelques définitions ...

Le combustible effectif. C'est la quantité de combustible qui est réellement brûlée au cours de l'incendie. Il est donné en poids de matière sèche, l'unité étant le gramme par mètre carré. Il dépend de la puissance du feu, un feu intense brûlant plus de combustible qu'un feu de faible intensité. Réciproquement, la puissance du feu dépend du combustible brûlé.

Le combustible total. C'est la quantité de combustible qui brûlerait lors du feu le plus intense possible. L'unité est le gramme par mètre carré.

L'énergie du combustible effectif. C'est la quantité d'énergie libérée au cours de l'incendie par le combus-



Peuplement de pin d'Alep : forte charge en combustible (France)

tible effectif. Elle est égale au produit de la masse du combustible disponible par le pouvoir calorifique de celui-ci. Elle est exprimée en joules par mètre carré.

L'énergie du combustible total. C'est la quantité d'énergie qui serait libérée par la combustion du combustible total. Elle est également exprimée en joules par mètre carré.

Le front de feu ou front de flammes. C'est le domaine spatial dans lequel la combustion produit des flammes apparentes. Le front de feu est la zone frontière entre le combustible non brûlé et le combustible brûlé, qui concentre l'essentiel de l'activité de l'incendie.

La vitesse de propagation. C'est la vitesse d'avancement du front de feu. Elle est fortement corrélée à la vitesse du vent. Elle est exprimée en mètres par seconde ou en kilomètres par heure.

La puissance du front de feu. C'est l'énergie libérée par unité de temps par unité de longueur du front de feu. Elle est exprimée en watt par mètre linéaire de front de feu (W/m).

Cette puissance est égale au produit de l'énergie du combustible effectif par la vitesse de propagation du feu. Au Canada et en France, on distingue ainsi différentes catégories de feux :

- Puissance inférieure à 2 000 kW/m : feu maîtrisable par des moyens terrestres



Vue d'un front de feu (France)

- Puissance comprise entre 2 000 et 4 000 kW/m : les moyens aériens sont nécessaires pour maîtriser la tête du feu

- Puissance supérieure à 4 000 kW/m : il est souvent impossible de contenir la tête du feu ; la lutte doit se faire sur les flancs du feu.

Un feu brûlant 200g de combustible effectif au mètre carré (soit 2 tonnes par ha), ce qui correspond par exemple à une prairie d'herbes fines, basses et sèches qui recouvre complètement le sol, et avançant à la vitesse de 0,5 m/s (soit 1,8 km/h), possède une puissance du front de feu de 2 000 kW/m (la capacité calorifique du combustible étant prise égale à 20 kJ/g).

Formation végétale	Énergie potentiellement libérable (millions de kJ par ha)	Énergie dégagée lors de la plupart des feux (millions de kJ par ha)
Forêt de chêne vert	360	220
Pinède dense de pin d'Alep	785	440
Pinède claire de pin d'Alep	480	400
Garrigue haute de chêne kermès	360	360
Garrigue basse de chêne kermès	225	225
Garrigue de romarin	310	310
Pelouse de Brachypode de Phœnicie	180	180

Énergie dégagée lors d'un incendie pour quelques formations végétales - Source : Trabaud, 1989

Pour plus d'informations, se reporter à la bibliographie en fin de guide

1.2 Transfert de chaleur et propagation du feu

Le mécanisme de propagation du feu se décompose en trois phases successives :

- Combustion du matériel végétal avec émission de chaleur.
- Transfert de la chaleur émise vers le combustible en avant du front de feu, par conduction, rayonnement thermique et convection.
- Absorption de la chaleur par le végétal en avant du front de flamme et inflammation de celui-ci.

Ce sont les mécanismes de transfert de la chaleur qui permettent la progression du feu. Les facteurs intervenant dans ces mécanismes (vent, relief) jouent un rôle prépondérant dans la propagation de l'incendie.

Les modes de transfert de chaleur

Un transfert de chaleur est un processus d'échange d'énergie entre 2 points de l'espace se produisant lorsqu'une différence de température existe entre ces 2 points. Il est assuré par 3 processus physiques fondamentaux qui sont la conduction, le rayonnement et la convection.

CONDUCTION

La conduction est le résultat de l'agitation moléculaire, elle-même liée à la constitution et à la température du milieu. Elle ne peut donc se produire que dans un support matériel, qu'il soit solide, liquide ou gazeux. La chaleur diffuse du corps chaud vers le corps froid.

En pratique, la conduction est négligeable au cours de la propagation des incendies de végétation, puisqu'elle ne représente environ que 5% des transferts de chaleur, à l'exception des feux de sol ou de tourbière, pour lesquels elle est le processus de transfert de chaleur prépondérant. En revanche, la conduction au sein de la particule solide explique les différences de comportement entre des éléments combustibles selon leur épaisseur.

RAYONNEMENT THERMIQUE

Le rayonnement est un mode de transfert de l'énergie sous forme d'ondes électromagnétiques se propageant avec ou sans support matériel. Tout corps dont la température absolue est supérieure à 0°K, soit -273°C, émet un rayonnement électromagnétique dont la fréquence est fonction de cette température. La quantité d'énergie transférée d'un corps à un autre par rayonnement augmente avec l'accroissement de la différence de température entre ces 2 corps.

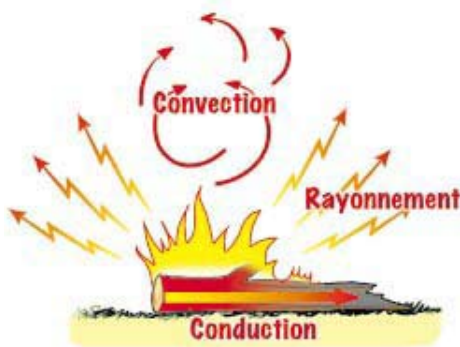
Le rayonnement calorifique mis en jeu lors des incendies de forêt est principalement un rayonnement électromagnétique infrarouge.

Entre une source de chaleur ponctuelle et un point

donné, le flux de rayonnement est inversement proportionnel au carré de la distance. Il diminue donc très rapidement avec la distance.

Cependant, un front de feu ne constitue pas une source ponctuelle mais un panneau radiant. Pour une distance au front de feu inférieure à 10 à 20 fois la hauteur des flammes, le rayonnement reçu par un objet varie alors comme l'inverse de la distance de cet objet au front de flamme. A proximité immédiate du front de feu, le rayonnement est extrêmement intense. À une distance égale à 5 à 10 fois la hauteur des flammes, ce rayonnement est beaucoup moins intense.

En pratique, c'est surtout le rayonnement à courte distance qui est à l'origine de l'élévation de la température et du dessèchement du combustible en avant du



Les trois modes de transfert de la chaleur

front de flamme, assurant ainsi la progression du feu.

Le rayonnement thermique peut atteindre plusieurs watts par cm². Pour un front de feu haut de 5 m et de longueur 50 m, on a par exemple, sur la perpendiculaire au milieu du front :

6,2 W/cm² à 0 m
5,2 W/cm² à 1 m
1,4 W/cm² à 10 m
0,7 W/cm² à 20 m
0,4 W/cm² à 30 m
0,2 W/cm² à 50 m

A titre de comparaison :

- Au Sahara, en été et par temps clair, le rayonnement solaire au sol est de 0,1 watts par cm², et la température du sable atteint 80°C.
- Le seuil de la douleur est de 0,2 w/cm² sur la peau nue.
- Le seuil conduisant au décès en 1 à 2 minutes est de 0,7 W/cm².

CONVECTION

La convection est un transfert de chaleur par mouvements macroscopiques d'un fluide (le gaz dans le cas d'un feu) dont la masse transporte la chaleur qu'elle contient. Si l'écoulement du fluide est imposé, on parle de convection forcée. En revanche, si le mouvement est dû à des différences de densités engendrées par des différences de températures, on parle de convection libre.

Dans les feux de végétation, la combustion produit des gaz chauds qui se mélangent à l'air ambiant chauffé également. Ces gaz chauds sont plus légers et montent rapidement. Ils apportent une grande quantité de chaleur aux combustibles situés au-dessus (houppiers), les dessèchent et élèvent leur température jusqu'au point d'inflammation.

Le vent, en poussant les gaz chauds en avant du front de flammes, au sein même des strates basses de la végétation, accélère la propagation du feu. Néanmoins, le vent produit un mélange de l'air frais avec les gaz chauds.

Les variations du relief participent aussi au déplacement des gaz chauds. Pour un feu montant, la convection vers l'avant du front de feu est d'autant plus marquée que la pente est plus importante. C'est l'inverse pour un feu descendant.

La convection est le processus de transfert de chaleur prépondérant dans la propagation des incendies de forêt.

Par ailleurs, les gaz en mouvements transportent souvent des matériaux en ignition ("brandons"), qui peuvent retomber à plusieurs centaines de mètres en avant du feu et être à l'origine de nouveaux foyers (foyers secondaires). On parle alors de sautes de feux.

Les modes de propagation du feu

À l'exception des feux de sol, un incendie de végétation se propage principalement par convection et par rayonnement. Les sautes de feu peuvent accélérer la propagation.

On distingue différents types de feu, en fonction des strates où ils se propagent :



Colonne de convection (France)

- **Les feux de sol** consomment la matière organique de la litière et de l'humus situé sous celle-ci et ne produisent pas de flamme apparente. Ils peuvent pénétrer dans des dépôts organiques très profonds et cheminer à plusieurs dizaines de centimètres sous la surface. Ils sont relativement rares en région méditerranéenne.

- **Les feux de surface** brûlent les strates basses et contiguës au sol (litière, tapis herbacé, broussailles). Ce sont les plus communs. Ils se propagent rapidement, en dégageant beaucoup de flammes et de chaleur.

- **Les feux de cimes** embrasent les houppiers et se propagent rapidement. Ils sont de deux types :

- * Indépendants, ils se propagent dans les cimes sans dépendre du feu de surface.
- * Dépendants, ils ne se maintiennent dans les cimes qu'en raison de la chaleur dégagée par le feu de surface. Ils sont passifs s'ils contribuent moins à la propagation que le feu de surface qui les accompagne et actifs dans le cas contraire.

Les sautes de feu sont des projections de particules enflammées ou incandescentes (brandons) en avant du front de flamme. Ces particules, entraînées dans la colonne de convection et transportées par le vent, peuvent être à l'origine de foyers secondaires à l'avant de l'incendie. Les gros brandons peuvent brûler longtemps et être transportés très loin (jusqu'à 10 ou 20 km dans les cas exceptionnels). Des sautes de feux très nombreuses



Vue aérienne d'une saute de feu (France)



Feu de sol



Feu de cimes



Feu de surface



Feu total

peuvent conduire à des éclousions multiples sur une zone peu étendue et créer ainsi une tornade de feu extrêmement dangereuse.

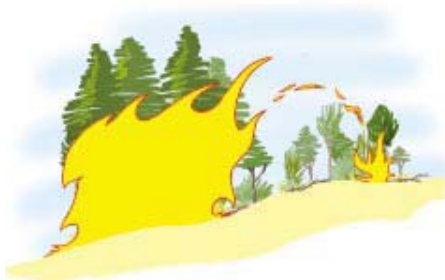
Les sautes de feu peuvent se produire sur de courtes ou de longues distances selon les conditions du milieu. Les distances parcourues par les brandons peuvent atteindre plusieurs centaines de mètres, voire plusieurs kilomètres dans certains types de peuplements.

Les vitesses de propagation des incendies sont extrêmement variables. Un feu dans une tourbière ne pro-

gresse que de quelques mètres en plusieurs semaines. La vitesse de propagation d'un feu de surface ou d'un feu de cimes dépend des caractéristiques et de l'état de la végétation, de la pente et de la vitesse du vent.

- La vitesse de progression du feu est plus élevée dans les formations végétales basses continues où la biomasse est faible (pelouses, landes, garrigues claires). Elle peut alors parfois dépasser 10 km/h.

- Dans des formations arborées avec sous bois dense, cette vitesse diminue car la végétation forme un



Saute de feu



Formes et parties d'un incendie - Source : Traubaud, 1989

écran s'opposant au vent et aux transferts de chaleur. Elle peut atteindre 5 ou 6 km/h. En revanche, la biomasse brûlée est plus importante.
 - Les tornades de feu se déplacent souvent à des vitesses comprises entre 5 et 10 km/h.

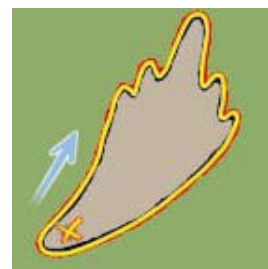
Ex : En France, les feux sont considérés comme rapides à partir d'une vitesse de propagation de 1 km/h, soit 0,28m/s.



Peu ou pas de vent ou de pente.
 Distribution uniforme des combustibles.



Vent variable ou topographie irrégulière.
 Distribution hétérogène des combustibles.



Vent ou pente modérés. Distribution uniforme des combustibles.



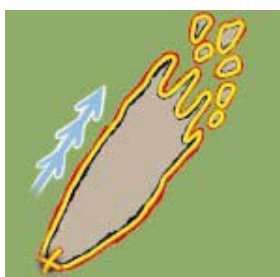
Propagation plus rapide avec vent légèrement variable, plus fort.



Plusieurs versants et direction variable du vent.



Feu poussé rapidement par un vent violent.



Apparition de foyers secondaires.



Incidence des facteurs vent et topographie sur la propagation d'un feu - Source : Trabaud, 1989

Pour plus d'informations, se reporter à la bibliographie en fin de guide

1.3 Inflammabilité, combustibilité

Le risque d'éclosion, la vitesse de propagation et la puissance du feu varient en fonction de la composition en espèces et de la structure de la formation végétale.

L'inflammabilité et la combustibilité sont des paramètres qui permettent de caractériser le comportement de la végétation par rapport au feu :

- L'inflammabilité influe sur l'éclosion du feu.
- La combustibilité intervient dans la propagation de l'incendie.

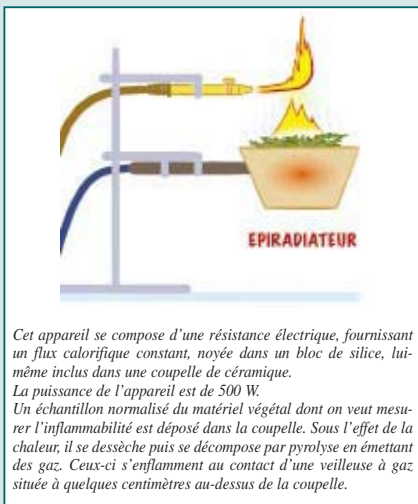
Inflammabilité

L'inflammabilité qualifie la facilité du matériel végétal à s'enflammer sous l'action d'un apport de chaleur. Elle caractérise la quantité d'énergie nécessaire à la dessiccation du végétal et à la pyrolyse.

L'inflammabilité peut être définie pour un élément végétal (rameau, feuille, fragment d'écorce), pour une espèce végétale ou pour une formation végétale.

L'une des méthodes employées pour estimer cette inflammabilité consiste à mesurer sur des échantillons de végétation soumis à un rayonnement thermique les paramètres suivants :

- Le délai d'inflammation, correspondant à la durée d'exposition nécessaire à l'apparition d'une flamme. Ce facteur peut être mesuré à l'aide d'un chronomètre.



Cet appareil se compose d'une résistance électrique, fournissant un flux calorifique constant, noyée dans un bloc de silice, lui-même inclus dans une coupelle de céramique.

La puissance de l'appareil est de 500 W.

Un échantillon normalisé du matériel végétal dont on veut mesurer l'inflammabilité est déposé dans la coupelle. Sous l'effet de la chaleur, il se dessèche puis se décompose par pyrolyse en émettant des gaz. Ceux-ci s'enflamment au contact d'une veilleuse à gaz située à quelques centimètres au-dessus de la coupelle.

- La fréquence d'inflammation, c'est-à-dire le nombre d'échantillons pour lesquels une flamme apparaît, rapporté au nombre total d'échantillons.

Les valeurs moyennes de ces deux paramètres permettent ensuite de classer les végétaux en fonction de leur inflammabilité.

L'inflammabilité d'un végétal varie en fonction de sa teneur en eau et de son état phénologique, donc en fonction de la saison. Des mesures réalisées tout au long de l'année permettent de suivre l'évolution de l'inflammabilité au cours des mois, notamment pendant la saison à risque.

Toute valeur d'inflammabilité doit être accompagnée d'informations sur la nature de l'élément végétal analysé (feuille, rameau, ensemble des éléments fins...) et sur la période de validité (mois, saison, toute l'année).

Combustibilité

La combustibilité traduit la puissance du feu qu'une formation végétale, de par ses caractéristiques, (composition en espèces, biomasse, structure) peut alimenter sans considérer l'influence du relief et du vent.

Elle caractérise l'aptitude du matériel végétal à propager l'incendie, c'est-à-dire à brûler en dégageant suffisamment d'énergie pour entraîner, par transfert de chaleur, l'inflammation des végétaux voisins.

La combustibilité est un concept applicable à une espèce végétale ou à une formation végétale.

La combustibilité d'une formation végétale est corrélée à la biomasse participant à la combustion, aux pouvoirs calorifiques des espèces qui la composent, à la structure et à la teneur en eau, c'est-à-dire à la saison.

La combustibilité peut être analysée à l'aide de modèles structurels (modèles de combustible) correspondant chacun à un comportement du feu différent et prévisible. Ces modèles de combustibilité sont identifiables visuellement. Cette méthode, développée par des chercheurs nord-américains, décrit 13 modèles normalisés,

groupés en 4 catégories (herbacées, maquis, litière de peuplements arborés, déchets ligneux). En Espagne, les forestiers ont développé une adaptation de ces 13 modèles aux écosystèmes forestiers espagnols.

Utilisation de ces paramètres

L'inflammabilité d'un végétal varie selon ses organes. L'écorce de pin d'Alep ne possède pas la même inflammabilité que les aiguilles. L'éclosion d'un feu dans une pinède a lieu au niveau de la litière, composée principalement d'aiguilles mortes, et l'analyse du risque d'éclosion dans un tel peuplement nécessite la connaissance de l'inflammabilité de ces aiguilles mortes, dont la teneur en eau (donc l'inflammabilité) varie beaucoup en fonction des conditions atmosphériques.

L'inflammabilité et la combustibilité interviennent dans l'estimation du risque d'incendie de forêt :

- L'étude de l'inflammabilité entre dans l'analyse du risque d'éclosion, soit temporel (suivi dans le temps) afin par exemple de recourir à la mobilisation préventive des moyens de lutte les jours à risque, soit spatial.
- L'étude de la combustibilité des formations végétales participe à l'analyse et à la cartographie du risque

Essence	Inflammabilité
<i>Cedrus atlantica</i>	très faible à faible
<i>Cedrus libani</i>	très faible à faible
<i>Abies cephalonica</i>	très faible à faible
<i>Abies bornmulleriana</i>	très faible à faible
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	très faible à faible
<i>Cupressus sempervirens</i>	assez forte à forte
<i>Cupressus arizonica</i>	assez forte à forte
<i>Pinus halepensis</i>	forte à très forte
<i>Pinus nigra</i>	forte à très forte
<i>Quercus pubescens</i>	forte à très forte
<i>Eucalyptus dalrympleana</i>	très forte

Inflammabilité de quelques essences forestières.
Classification française - Source : INRA-Avignon (France)

Espèces très inflammables	Espèces moyennement inflammables	Espèces peu inflammables
<i>Calluna vulgaris</i>	<i>Arbutus unedo</i>	<i>Buxus sempervirens</i>
<i>Erica arborea</i>	<i>Cistus albidus</i>	<i>Cytisus multiflorus</i>
<i>Eucalyptus sp.</i>	<i>Cistus salvifolius</i>	<i>Daphne gnidium</i>
<i>Genista hirsuta</i>	<i>Juniperus oxycedrus</i>	<i>Halimium commutatum</i>
<i>Pinus halepensis</i>	<i>Ononis tridentata</i>	<i>Olea europea</i>
<i>Quercus ilex</i>	<i>Pinus pinaster</i>	<i>Pistacia lentiscus</i>
<i>Thymus vulgaris</i>	<i>Pinus pinea</i>	<i>Rhamnus alaternus</i>
	<i>Quercus faginea</i>	<i>Rubia peregrina</i>
	<i>Rhamnus lycioides</i>	

Inflammabilité de quelques espèces : classification espagnole - Source : INIA- Madrid (Espagne)

de propagation du feu.

- La connaissance de l'inflammabilité et de la combustibilité des espèces permet de réaliser des opérations sylvicoles de suppression des essences les plus dangereuses et d'introduction d'espèces moins dangereuses.

La combustibilité est également une notion opérationnelle, utile lors des opérations de lutte.

L'analyse du risque d'incendie est développée plus précisément dans le thème 4.

Essence	Combustibilité
<i>Cedrus atlantica</i>	faible
<i>Cedrus libani</i>	faible
<i>Abies cephalonica</i>	faible
<i>Abies bornmulleriana</i>	faible
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	faible
<i>Cupressus sempervirens</i>	moyenne
<i>Cupressus arizonica</i>	moyenne
<i>Pinus halepensis</i>	forte
<i>Pinus nigra</i>	forte
<i>Quercus pubescens</i>	forte
<i>Eucalyptus dalrympleana</i>	forte

Combustibilité de quelques essences forestières.
Classification française - Source : INRA-Avignon (France)

Pour plus d'informations, se reporter à la bibliographie en fin de guide