



ENJEUX SCIENCES

# FEUX DE VÉGÉTATION

COMPRENDRE LEUR DIVERSITÉ  
ET LEUR ÉVOLUTION

T. CURT, C. HÉLY,  
R. BARBERO, J.-L. DUPUY, F. MOUILLOT, J. RUFFAULT

éditions  
**Quæ**



# FEUX DE VÉGÉTATION

## COMPRENDRE LEUR DIVERSITÉ ET LEUR ÉVOLUTION

T. CURT, C. HÉLY,  
R. BARBERO, J.-L. DUPUY, F. MOUILLOT, J. RUFFAULT

Éditions Quæ

### Dans la même collection

Les zoonoses

Gwenaél Vourc'h, François Moutou, Serge Morand, Elsa Jourdain  
2020, 172 p.

Les mondes de l'agroécologie  
Thierry Doré, Stéphane Bellon  
2019, 176 p.

Biodégradation des matériaux  
Quels risques pour la santé et l'environnement ?  
Jean Guézennec, coord.  
2017, 120 p.

Les virus, ennemis ou alliés ?  
Stéphane Biacchesi, Christophe Chevalier, Marie Galloux,  
Christelle Langevin, Ronan Le Goffic, Michel Brémont  
2017, 112 p.

L'édition de cet ouvrage a bénéficié du soutien financier  
de la Direction pour la Science Ouverte (DipSO) d'INRAE  
pour en permettre une diffusion large et ouverte.

Éditions Quæ  
RD 10  
78026 Versailles Cedex

[www.quae.com](http://www.quae.com)  
[www.quae-open.com](http://www.quae-open.com)

© Éditions Quæ, 2022

ISBN (papier) : 978-2-7592-3505-6  
ISBN (pdf) : 978-2-7592-3506-3  
ISBN (epub) : 978-2-7592-3507-0

# Sommaire

<b>Introduction</b> .....	5
<b>Qu'est-ce qui déclenche les feux de végétation ?</b> .....	9
Les mécanismes du feu .....	10
Des feux aux comportements variés : comment les décrire ?.....	21
Tour d'horizon des combustibles végétaux : inflammabilité et combustibilité.....	27
La télédétection : l'outil d'aujourd'hui pour recenser et étudier les feux .....	32
Tour d'horizon des zones à risque d'incendie dans le monde .....	37
<b>Les conséquences des feux : bonnes ou mauvaises ?</b> .....	50
Qu'est-ce que le risque incendie ? .....	50
Les feux, acteurs de la biodiversité et du fonctionnement des écosystèmes .....	52
Les stratégies des plantes face au feu : éviter, résister ou tolérer.....	54
Cycles biogéochimiques et incendies .....	66
<b>Le feu, une perturbation naturelle millénaire</b> .....	71
Les bio-indicateurs, des enregistreurs naturels pour reconstituer l'histoire des feux dans les écosystèmes.....	71
L'histoire millénaire des incendies dans le monde .....	77
En quoi les régimes de feux passés nous sont-ils utiles ? .....	91
<b>Changement climatique et modification des paysages : quels impacts sur les feux ?</b> .....	95
L'information sur les feux de végétation dans le monde : les inventaires nationaux et leurs limites .....	95
Les évolutions récentes : y a-t-il plus de feux qu'auparavant ? .....	98
Des conditions climatiques de plus en plus favorables au feu.....	99

Le rôle des facteurs non climatiques .....	100
À quoi est due l'augmentation spectaculaire des feux dans l'Ouest américain ? .....	102
Pourquoi les feux ont-ils diminué dans le sud de l'Europe et en France ? .....	106
Les méga-feux : un phénomène grandissant.....	108
Peut-on prédire les évolutions futures ?.....	113
Des prédictions soumises à de nombreuses incertitudes .....	117
<b>Les solutions pour mieux gérer les incendies de végétation à long terme.....</b>	<b>121</b>
Réagir et se protéger face au risque.....	121
Les solutions alternatives à l'extinction des feux .....	126
<b>Conclusion.....</b>	<b>132</b>
<b>Références bibliographiques .....</b>	<b>135</b>

# INTRODUCTION

Depuis des millénaires, des feux embrasent les forêts et la végétation naturelle de notre planète. Des incendies de toutes tailles et d'intensités variées brûlent épisodiquement forêts, garrigues, buissons, savanes, etc. Dans plusieurs régions du globe, ces feux s'allument naturellement : en effet, un simple impact de foudre met le feu à la végétation quand elle est suffisamment sèche et abondante. Mais aujourd'hui, la cause principale des feux à l'échelle du globe, c'est bien l'homme.

Des sites archéologiques montrent que l'homme cuisait déjà des aliments dans des foyers il y a 800 000 ans. Comme chacun sait, la maîtrise du feu a favorisé l'émergence de l'homme moderne : grâce aux flammes, l'homme s'est chauffé, s'est éclairé, a rendu sa nourriture plus digeste, a durci la pointe de ses outils de chasse, et plus tard a fabriqué des poteries et travaillé le métal. Le feu a aussi permis le développement de l'agriculture et la pratique de l'écobuage par l'homme moderne : c'est un moyen facile et peu coûteux pour défricher une parcelle, éliminer les broussailles, fertiliser le sol et permettre ainsi la culture sur brûlis, ou encore favoriser l'installation de certaines espèces végétales au détriment d'autres. Bref, si l'homme joue le premier rôle dans l'activité des feux, le feu joue aussi un rôle central dans l'histoire de l'homme ! C'est encore vrai aujourd'hui, même si les usages et les méthodes ont évolué. De vastes étendues de terres cultivées sont brûlées chaque année, à différentes saisons suivant le climat, notamment dans la Fédération de Russie, en Ukraine, en Inde et en Chine. Ces quatre pays contribuent ensemble à plus de 40 % des feux agricoles dans le monde.

Évidemment, les feux de végétation présentent des risques : ils portent immédiatement atteinte aux écosystèmes, provoquent des dégâts matériels et font parfois des victimes. L'approche du risque associé aux incendies s'est longtemps cantonnée à une stratégie de surveillance des départs de feu et d'attaque massive sur tous les départs de feux, ces tâches étant dévolues

aux seuls pompiers. Du fait des changements climatiques en cours, des évolutions de la végétation et de l'urbanisation croissante, la problématique des feux de végétation évolue rapidement dans de nombreuses régions. Des chercheurs et experts de différentes disciplines viennent à présent compléter l'action des pompiers en se penchant sur les origines des flammes et leurs conséquences, grâce à des approches transdisciplinaires. L'émergence de grands incendies destructeurs comme ceux qui ont ravagé l'Australie entre 2019 et 2020 – les *méga-feux* – en est un symptôme majeur. Pour mieux gérer la problématique des feux, il faut tenter de comprendre comment ils se déclenchent et se propagent, discuter leurs impacts (négatifs mais aussi positifs), mettre en regard leur évolution depuis plusieurs millénaires avec les effets des changements climatiques, et envisager des solutions à long terme. C'est l'objectif de cet ouvrage.

Dans le premier chapitre, nous expliquerons les mécanismes physiques du feu, de sa naissance à sa propagation ; nous examinerons ses effets et les principaux types de feux existants. Puis nous identifierons les facteurs qui contrôlent ces feux de végétation. Si la plupart des régions du globe sont affectées par des feux, leur régime varie suivant les conditions climatiques, la nature des activités humaines dans la zone concernée et le type de végétation. Des bases de données globales enregistrent à présent des informations quotidiennes sur le comportement des feux de végétation. L'étude des différents régimes de feu permet de comprendre pourquoi certaines régions sont plus à risque que d'autres.

Dans le deuxième chapitre, nous tenterons de faire la part entre les « bons » et les « mauvais » usages des feux en évaluant leurs impacts. Si le feu de végétation est un aléa et un risque, il aide aussi de nombreux agriculteurs, nous l'avons dit, à cultiver la terre. Dans certains environnements, les feux sont aussi nécessaires – voire indispensables – pour maintenir la biodiversité. Les feux « dirigés » sont également utiles pour limiter les feux futurs en diminuant la biomasse végétale. Dans tous les cas, les feux contribuent aux émissions de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), un gaz à effet de serre majeur, et participent

à la pollution de l'air par la libération d'autres gaz et de particules qui modifient le climat...

Dans le troisième chapitre, nous retournerons dans le passé, notamment jusqu'à il y a vingt-et-un-mille ans, pour nous pencher sur les feux qui ont brûlé avant l'époque moderne. De nombreux indices, tels que les charbons de bois séquestrés dans le fond des lacs et les cicatrices de feu sur les arbres, révèlent en effet que les feux de végétation ont parfois été bien plus actifs qu'aujourd'hui. Et les reconstitutions effectuées au long de plusieurs millénaires montrent que les feux font partie de notre histoire et qu'ils jouent un rôle majeur dans de nombreux écosystèmes.

Dans le quatrième chapitre, nous nous intéresserons aux effets du changement climatique, de plus en plus visibles, et nous expliquerons comment nos émissions de carbone modifient le régime des feux de végétation. Depuis quelques années, les méga-feux sont dans l'actualité mondiale et française, avec des images de koalas aux pattes brûlées et de quartiers résidentiels engloutis par des brasiers qui ont frappé les esprits. Quelles sont leurs causes spécifiques ? Comment évaluer leur dangerosité et leurs impacts ? À quelles évolutions peut-on s'attendre dans un monde de plus en plus chaud ?

Enfin, dans le dernier chapitre, nous proposerons des solutions basées sur la nature et à long terme pour mieux gérer les grands feux du futur, notamment les méga-feux.

À travers ce livre, nous avons souhaité présenter une synthèse des questionnements actuels autour des feux de forêt et de milieux naturels, illustrée par de nombreux exemples. Ainsi, au fil des pages, nous invitons à une réflexion sur des thèmes majeurs, car c'est en connaissant mieux les incendies, leurs régimes, leurs impacts (positifs et négatifs) et leurs dynamiques futures que nous saurons mieux nous en protéger. Au-delà de cette entreprise utile d'acquisition de connaissances, il s'agit de reconsidérer les liens que nous entretenons avec les incendies et d'améliorer la gestion des territoires à risque.



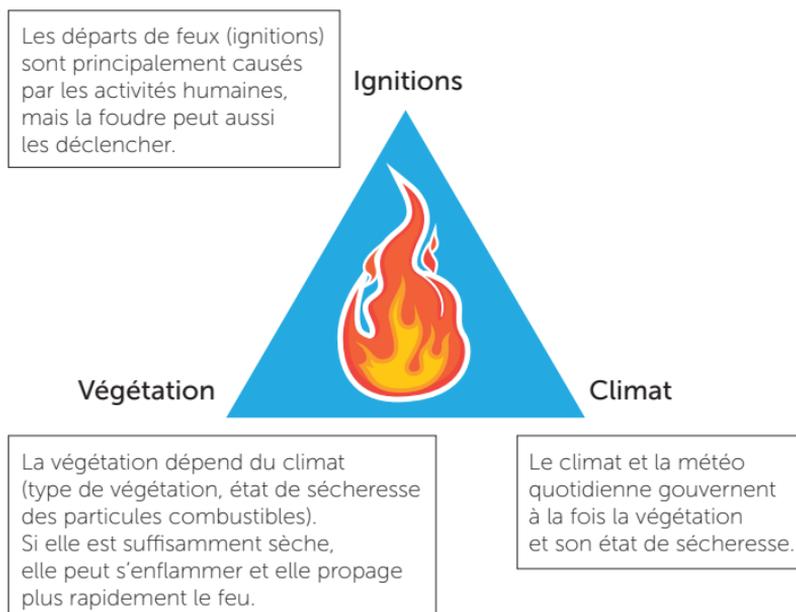
**Feu de savane en Namibie en septembre 2000.** © Samuel Alleaume.

Ces feux sont allumés soit par la foudre accompagnant les orages en fin de saison sèche, soit par l'homme avant une conversion en culture ou pour favoriser le pâturage du bétail.



# QU'EST-CE QUI DÉCLENCHE LES FEUX DE VÉGÉTATION ?

L'objectif de ce chapitre est d'expliquer les mécanismes et le comportement des feux de végétation ainsi que leurs causes. Les feux de végétation sont contrôlés par les interactions entre trois facteurs : le climat, la végétation et les actions humaines (figure 1). La plupart des régions du globe – et tous les continents – sont affectées par des feux, mais les caractéristiques de ces derniers varient. C'est pourquoi on s'intéresse à leurs *régimes*, un terme qui recouvre à la fois le comportement des feux, leur nombre par an, leur taille moyenne, leur continuité spatiale, leur type dominant (feu de surface ou feu de cimes) et leurs impacts sur une région ou sur un écosystème donné. Un tour d'horizon s'impose pour présenter les différents régimes d'incendies et comprendre pourquoi certaines régions sont plus à risque que d'autres.



**Figure 1.** Les facteurs qui contrôlent les feux de végétation.

## LES MÉCANISMES DU FEU

Comment les feux de végétation naissent-ils et se propagent-ils ?

Un feu de végétation consiste en un phénomène de combustion qui se propage sur une étendue boisée ou végétalisée en consommant une fraction de la matière végétale. Pour qu'un feu apparaisse, trois ingrédients doivent être réunis : une source de chaleur, un combustible (la matière qui « brûle ») et un comburant (l'oxygène de l'air). La source de chaleur peut être un impact de foudre, un point chaud initial (un mégot, des particules incandescentes de diverses origines) ou un foyer initial (feux domestiques, usages professionnels du feu lors de travaux agricoles ou forestiers, allumage volontaire). Une fois que le feu a éclos, il se propage, pourvu que la végétation soit assez sèche, abondante et continue.

Le mécanisme de cette propagation peut être décrit simplement : la combustion de la végétation libère de la chaleur, qui est en partie transmise à la végétation située autour du foyer. Sous l'effet de cet apport de chaleur, la végétation encore intacte perd son eau, puis elle atteint une température suffisamment élevée pour libérer des gaz inflammables. Ces produits, au contact de l'oxygène de l'air et de la flamme préexistante, s'enflamment à leur tour, ce qui alimente la combustion. Ainsi, le foyer initial s'étend et avance à travers la végétation de proche en proche.

### De la photosynthèse à la combustion

Sans matière végétale, bien évidemment, pas de feu de végétation possible. Ce dernier s'alimente en effet des molécules carbonées constituant la partie sèche de la matière végétale. Ces molécules sont issues de la photosynthèse réalisée par les plantes, qui captent l'énergie lumineuse des photons émis par le Soleil grâce à la chlorophylle de leurs feuilles. Cette énergie est utilisée pour, dans un premier temps, recharger les molécules qui assurent le transport de l'énergie dans la cellule. Cette étape consomme de l'eau. L'énergie de ces molécules est, dans un deuxième temps, utilisée pour fixer le carbone présent dans

le dioxyde de carbone de l'air et élaborer des glucides, qui sont ensuite assemblés dans les différents tissus de la plante.

Cette réaction de synthèse rejette dans l'atmosphère de l'oxygène, qui est le résidu du fractionnement des molécules de dioxyde de carbone et d'eau. Ces échanges entre la plante et l'atmosphère s'effectuent à travers les stomates, de petits orifices situés sur la face inférieure des feuilles. À partir des molécules de base issues de la photosynthèse, la plante élabore ensuite toute une panoplie de molécules dont la cellulose, les hémicelluloses et la lignine, qui forment les parois des cellules végétales. Le carbone fixé par la photosynthèse est ainsi alloué sous différentes formes aux divers organes (racines, feuilles, bourgeons et tiges). Une partie moins importante de ce métabolisme sert à synthétiser des composés organiques volatils (molécules souvent odorantes, comme les benzènes et terpènes) entrant en jeu dans la lutte des plantes contre les attaques extérieures.

La combustion réalise en quelque sorte le processus inverse de la photosynthèse : cette réaction d'oxydation violente casse les liaisons chimiques dans les molécules carbonées qui constituent la partie sèche de la matière végétale. Ces cassures libèrent l'énergie chimique contenue dans les liaisons, qui est ensuite dissipée sous forme de chaleur ; c'est pourquoi le feu est chaud ! La réaction consomme de l'oxygène, et produit du dioxyde de carbone et de l'eau.

### Comment les flammes apparaissent-elles ?

Pour que la combustion avec une flamme s'amorce, la matière végétale doit libérer des gaz inflammables, qui vont réagir avec l'oxygène de l'air pour former la flamme que l'on voit. C'est l'inflammation. Sous l'effet de la chaleur, les composés organiques volatils, très inflammables, passent facilement à l'état gazeux. Cependant, la matière végétale est essentiellement composée de molécules très grosses (la cellulose, les hémicelluloses et la lignine) qui, pour passer à l'état gazeux, doivent être « cassées » en molécules plus petites. C'est l'étape de *pyrolyse*.

Ce processus est surtout actif autour de 300 °C. Les gaz libérés par la pyrolyse (du monoxyde de carbone, du méthane

et d'autres composés) s'enflamment facilement au contact de l'oxygène de l'air en présence d'une flamme ou d'une étincelle. Ils peuvent aussi s'enflammer spontanément lorsqu'ils sont portés à très haute température (de l'ordre de 500-600 °C). Dans un feu, la pyrolyse, qui nécessite un apport de chaleur, est entretenue par la combustion qui lui succède et fournit cette chaleur.

À l'issue de la pyrolyse, une fraction de la matière végétale subsiste à l'état solide sous la forme de charbon de bois : il ne reste alors plus que du carbone et des minéraux. Ces charbons ardents, les braises, se consomment ensuite plus ou moins complètement. La combustion des produits gazeux et du charbon produit, comme nous l'avons vu, du dioxyde de carbone et de la vapeur d'eau. De nombreuses particules solides et liquides, riches en carbone, donc combustibles mais non brûlées, sont aussi libérées pendant la combustion : avec les produits de combustion, elles forment les fumées. Ainsi, la combustion de la matière végétale est incomplète. La fraction minérale de la matière végétale, qui, elle, est incombustible, constitue les cendres.

### Faire feu de tout bois

Tout le combustible brûlant lors d'un feu de végétation est issu de la photosynthèse, mais il se présente sous des formes variées. Le combustible brûlant le plus facilement est sec et fin : feuilles, aiguilles et petites branches mortes. Ces éléments, parfois présents sur l'arbre ou l'arbuste, finissent par tomber au sol pour constituer la litière. Cette chute fait partie du cycle de vie des plantes, qui renouvellent régulièrement leurs organes, mais elle est parfois déclenchée par un stress, comme une sécheresse. Les parties vertes des arbres et arbustes, vivantes et riches en eau, sont moins inflammables et brûlent moins bien que le matériel sec et mort, mais elles se consomment également dans les feux les plus intenses. La partie aérienne des herbacées, qui s'assèche à certains moments de l'année (principalement à la saison sèche ou à la fin de la saison froide), est également combustible.

## Pourquoi le feu n'aime-t-il pas l'eau ?

L'eau contenue dans la matière végétale constitue un frein majeur à l'éclosion et à la propagation du feu dans la végétation, et nous savons tous que l'eau est utilisée pour son extinction. Pourquoi ? Cela tient au fait que l'eau est un liquide non combustible, doté à la fois d'une grande capacité calorifique (énergie nécessaire pour échauffer une masse d'eau unitaire d'un degré) et d'une chaleur latente de vaporisation (énergie nécessaire au changement de phase entre les phases liquide et gazeuse) très élevée. Une masse d'eau liquide consomme donc beaucoup d'énergie pour monter en température et pour s'évaporer.

Dans le cas d'un combustible fin et homogène, comme une feuille ou un ensemble de feuilles, toute l'eau présente dans le matériau doit être évaporée avant que son inflammation puisse avoir lieu sous l'effet d'un apport de chaleur. La teneur en eau du combustible est par conséquent une variable critique pour évaluer le danger d'incendie. Pour la mesurer au laboratoire, on pèse la matière fraîche (hydratée), puis on pèse cette même matière déshydratée (matière sèche) en étuve, ce qui permet de déduire la masse d'eau contenue dans la feuille par différence.

La teneur en eau est définie comme le rapport de cette masse d'eau à la masse de matière sèche de la feuille et elle est exprimée en pourcentage. Par exemple, en période estivale, une feuille morte au sol et la même feuille verte portée par une plante ont une teneur en eau d'environ 10 % et 100 % respectivement. Une teneur en eau de 100 % signifie que la feuille contient autant d'eau que de matière sèche, mais encore que l'eau représente 50 % de la masse de la feuille vivante. Pour chauffer l'eau contenue dans ces feuilles puis l'évaporer, il faut apporter environ sept fois plus de chaleur à la feuille vivante qu'à la feuille morte !

Le matériel mort et sec constitue par conséquent un support essentiel pour l'éclosion et la propagation du feu. S'il est assez abondant, il aidera le feu à se propager aux arbres et arbustes beaucoup plus riches en eau. Au contraire, si le matériel mort

est trop humide, parce qu'il a plu ou parce que l'atmosphère est chargée d'eau, le feu va rapidement mourir.

### Comment l'énergie du foyer est-elle transmise à la végétation ?

La combustion complète de la matière végétale libère une quantité d'énergie très supérieure à celle qui est nécessaire pour l'enflammer. Une feuille morte d'une masse de 0,1 gramme et contenant seulement 10 % d'eau libérera une quantité d'énergie d'environ 1,6 kilojoule en brûlant. C'est l'énergie nécessaire pour enflammer entre 40 et 50 feuilles mortes d'une teneur en eau de 10 %, mais seulement 6 ou 7 feuilles vivantes d'une teneur en eau de 100 % ! Toute l'énergie libérée par un feu ne sert cependant pas à enflammer la matière environnante. Au cours d'un feu de végétation, une grande partie de l'énergie libérée par la combustion se retrouve dans l'atmosphère. Autrement dit, seule une petite fraction de l'énergie libérée par la combustion est effectivement transmise à la végétation située autour du foyer. Cette fraction, de l'ordre de quelques pour cent, varie beaucoup selon les conditions de vent et la configuration de la végétation, et son évaluation est particulièrement délicate. Ce paramètre est néanmoins crucial pour déterminer si le feu se propagera et, si oui, à quelle vitesse.

Lors d'un feu de végétation, comme pour tout phénomène physique, la chaleur est transférée d'un élément à l'autre selon trois modes. Le premier de ces modes est la conduction thermique, un processus par lequel la chaleur est communiquée par contact à l'intérieur de chaque élément de végétation (par exemple de la surface d'un rameau vers son centre). Ce processus, qui s'effectue sans transfert de matière, intervient peu dans la transmission du feu d'un élément de végétation à son voisin.

Le deuxième mode de transfert est le rayonnement, qui « transporte » l'énergie sous la forme d'ondes électromagnétiques. Par leur température, les corps chauffés émettent en effet un rayonnement thermique. Dans le cas des feux, il est majoritairement émis dans l'infrarouge. Les flammes et les braises émettent ce rayonnement dans toutes les directions de l'espace ;

son intensité diminue donc au fur et à mesure qu'on s'éloigne de la source de chaleur (depuis un point source, l'intensité du rayonnement est inversement proportionnelle au carré de la distance à cette source). Le rayonnement thermique est très peu absorbé par l'air sur de faibles distances (quelques mètres), mais il est en revanche intercepté efficacement par la végétation, et ce en proportion de la surface exposée par les feuilles, les rameaux et les branches. Le rayonnement thermique contribue ainsi à l'échauffement de la végétation.

Le dernier mode de transfert thermique est la convection : elle correspond au transport de chaleur qui résulte du mouvement global d'un fluide contenant une certaine quantité de chaleur. Au contact d'une surface plus froide (comme la végétation encore intacte), le fluide en mouvement (dans notre cas, l'air chaud ou le mélange gazeux dans la flamme) lui cède de la chaleur. On parle alors de transfert de chaleur convectif ; c'est le principe du sèche-cheveux, qui propulse de l'air chaud au contact de la chevelure mouillée ! Dans le cas d'un feu « poussé » par le vent, plus ce vent est fort, plus l'air en mouvement transporte rapidement la chaleur devant le feu, et plus cette chaleur est cédée rapidement à la végétation. L'échauffement de la végétation est ainsi plus rapide en présence d'un fort vent, et le feu se propagera plus vite.

### Quel est le rôle des rafales de vent ?

Notre analogie avec le sèche-cheveux a cependant des limites, car l'action du vent sur la propagation du feu est encore plus complexe. Le vent que nous ressentons à la surface de la Terre prend généralement naissance dans les hautes couches de l'atmosphère ; il force le mouvement de l'air horizontalement dans une direction privilégiée. Toutefois, la direction et la vitesse du vent fluctuent dans le temps. Ces changements de direction et de vitesse sont dus à des tourbillons qui naissent de perturbations dans l'écoulement de l'air (ce qu'on appelle la « turbulence »). Ces tourbillons se forment dans les basses couches de l'atmosphère parce que le vent est freiné au niveau de la surface terrestre.



Du fait des fluctuations du vent, l'échauffement convectif de la végétation est donc irrégulier dans le temps. Une rafale de vent « couchera » par exemple les flammes vers la surface du sol pendant quelques secondes ; ce mouvement augmentera les chances que la flamme entre en contact avec de la végétation située à distance du foyer. De ce contact résultera un échauffement extrêmement rapide des éléments les plus fins de la végétation, qui vont éventuellement s'enflammer à leur tour. Quand la rafale cesse, ce processus prend fin. La matière végétale déjà enflammée continue de brûler... jusqu'à la prochaine rafale, qui enclenchera à nouveau le processus.

### La poussée d'Archimède, ou comment le feu crée du mouvement

Le vent n'est pas le seul moteur des mouvements d'air qui se font autour d'un feu : le foyer en engendre lui-même. Pour le comprendre, considérons le feu d'un peu plus près. Dans les flammes, au sein de la mince couche où se déroule la réaction, la combustion des gaz inflammables issus de la pyrolyse produit des gaz très chauds (leur température dépasse largement 1 000 °C). La couleur jaune des flammes s'explique par l'incandescence de particules microscopiques de carbone, appelées « suies », qui se forment dans les zones plus pauvres en oxygène. Les fumées apparaissant juste au-dessus des flammes ont une température de plusieurs centaines de degrés.

Or, si 1 gramme d'air à température ambiante (25 °C) occupe un volume d'environ 1 litre à la pression atmosphérique qui règne à la surface terrestre (1 bar), à une température de 1 000 °C, cette même masse d'air occupe un volume de plus de 4 litres. Le mélange gazeux dans la flamme est donc beaucoup moins dense que l'air ambiant. La présence de vapeur d'eau, un gaz plus léger que l'air produit par la combustion, contribue aussi à réduire la densité du mélange gazeux. Cet écart de densité donne naissance à une force verticale, appelée « flottabilité », s'exerçant sur le volume de fluide chaud et provoquant son mouvement vertical ascendant. C'est la fameuse poussée d'Archimède, qui est également à l'œuvre lors du vol des montgolfières.

Chaque volume d'air qui s'élève au-dessus de la flamme est remplacé par un même volume d'air prélevé dans l'air ambiant. L'ascendance de l'air chaud entraîne ainsi un mouvement de l'air ambiant et s'accompagne d'un panache au-dessus du foyer. Ce panache est visible, car les fumées contiennent des particules solides et liquides en suspension riches en carbone ou en eau (les aérosols) qui diffusent la lumière. Le feu crée donc un puissant mouvement d'air chaud ascendant ainsi que des mouvements d'air horizontaux alimentant la flamme et le panache. Au fur et à mesure que le panache entraîne l'air ambiant, il se refroidit. À une certaine altitude, un équilibre de densité est finalement atteint entre le panache et l'air ambiant ; le mouvement ascendant des fumées cesse, et elles sont ensuite transportées horizontalement par le vent.

#### Pourquoi les cimes des arbres brûlent-elles ?

L'air chaud ascendant joue un rôle majeur dans la propagation des feux en forêt. En effet, si le feu démarre et se propage initialement au sol, dans la litière de feuilles et dans les strates basses (par exemple des buissons), l'air chaud chauffe le feuillage des arbres qui se trouve au-dessus, et éventuellement l'enflamme si les flammes sont assez hautes, ou bien si des éléments combustibles, situés à une hauteur intermédiaire entre le sol et les cimes vertes, prennent feu et le propagent vers les cimes. Cela arrive souvent dans les eucalyptus, dont l'écorce se détache facilement, ou dans les pins d'Alep, qui portent des rameaux morts dans la partie inférieure de leur houppier. Ces peuplements forestiers sont de ce fait très propices à la propagation du feu. Plus le feu qui brûle la végétation basse est puissant, plus l'ascension des gaz et de l'air chaud au-dessus du foyer est rapide, et plus les cimes des arbres s'échauffent. Si cet échauffement ne conduit pas forcément à l'inflammation, il peut facilement détruire les tissus des feuilles vertes, qui roussiront après le passage du feu. Lorsqu'une large fraction des feuilles de l'arbre est roussie, l'arbre dépérit et, dans le pire des cas, meurt.

## Les brandons, petits porteurs du feu

Le vent et les courants ascendants créés par les feux de forêt arrachent fréquemment des éléments de végétation en combustion appelés « brandons ». Branches et morceaux d'écorce seront ainsi transportés loin du feu, jusqu'à plusieurs centaines de mètres. Ces brandons, qui retomberont au sol encore rougeonants, sont susceptibles d'allumer des feux secondaires. Ces *sautes de feu* font avancer le feu plus vite qu'en moyenne en déplaçant le front de l'incendie. Ce phénomène s'accroît quand le vent est fort et le feu puissant. Une multitude de brandons, beaucoup plus petits que ceux que nous venons d'évoquer, sont également emportés par le vent sur des distances plus courtes. Ils allumeront de petits foyers secondaires qui seront généralement rattrapés par le foyer d'origine. Ces brandons présentent un danger, car ils peuvent aussi « porter » le feu dans des zones urbanisées proches des forêts (les zones d'interface habitat-forêt) où il y a peu de combustible. Les brandons qui tombent sur les toitures sont souvent responsables de la transmission du feu aux constructions.

## Lorsque les nuages s'en mêlent

Comme nous l'avons vu, au fur et à mesure que l'air chaud issu du feu monte, il se mélange avec de l'air ambiant, plus frais, et se refroidit. Or plus l'air est froid, moins il peut se charger de vapeur d'eau, et celle-ci se condensera au contact d'une surface (par exemple des particules de fumée) si la température descend jusqu'au point de rosée. Un nuage (pyrocumulus) peut ainsi se former au-dessus du feu si la vapeur d'eau contenue dans l'air ascendant se condense à une certaine altitude, du fait de son refroidissement. Dans certaines conditions atmosphériques, le mouvement ascendant est renforcé en altitude, et le nuage se développe alors sur une très grande hauteur ; son sommet peut monter jusqu'à 15 km d'altitude, à la limite supérieure de la troposphère (la couche la plus basse de l'atmosphère, où se déroulent la plupart des phénomènes météorologiques).

Dans ce nuage (le pyrocumulonimbus), de puissants courants ascendants transportent les produits du panache de feu jusque