



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

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
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

Introduction	5
Qu'est-ce qui déclenche les feux de végétation ?	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
Les conséquences des feux : bonnes ou mauvaises ?	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
Le feu, une perturbation naturelle millénaire	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
Changement climatique et modification des paysages : quels impacts sur les feux ?	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
Les solutions pour mieux gérer les incendies de végétation à long terme.....	121
Réagir et se protéger face au risque.....	121
Les solutions alternatives à l'extinction des feux	126
Conclusion.....	132
Références bibliographiques	135

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 (CO₂), 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.

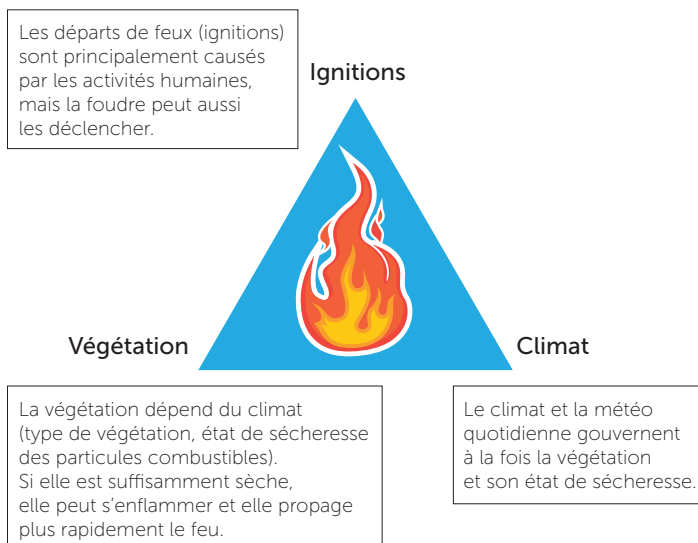


Figure 1. Les facteurs qui contrôlent les feux de végétation.

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

dans la stratosphère (nous y reviendrons dans le quatrième chapitre). De la formation de ces nuages peuvent aussi résulter de puissants courants d'air descendants qui modifient rapidement les conditions de vent près du sol. Généralement, la zone touchée se trouve loin du feu (plusieurs kilomètres). Dans des cas assez rares, ces modifications se produisent près du feu, altérant de manière importante sa propagation et engendrant des conditions très dangereuses pour les équipes qui s'activent sur place à éteindre l'incendie.

Quand l'oxygène vient à manquer

Le rôle de l'oxygène est souvent oublié quand on parle du comportement des feux de végétation. Comme nous l'avons vu, il est pourtant indispensable à la combustion. Cet oubli tient probablement au fait que la concentration en oxygène de l'atmosphère est remarquablement stable aux échelles de temps contemporaines, ou à l'échelle de quelques millénaires. Aujourd'hui de 21 % en volume, cette concentration a cependant varié à l'échelle des temps géologiques, sur des périodes de quelques millions d'années. L'étude de paléofeux très anciens (qui datent de plusieurs millions, voire de centaines de millions d'années) montre ainsi que des pics de concentration de l'oxygène proches de 30 % se sont produits dans l'atmosphère. Ces pics sont associés à davantage d'activité des incendies. Inversement, cette activité faiblit lorsque la concentration en oxygène est basse.

Pour préciser les effets de l'oxygène atmosphérique, des expériences de combustion, au cours desquelles la concentration en oxygène était artificiellement modifiée, ont été effectuées au laboratoire à partir de matériaux très divers. Elles montrent que la concentration en oxygène contrôle la vitesse et la puissance de la combustion. Les matériaux d'origine organique ne brûlent pas pour des concentrations inférieures à environ 15 %. Lorsque la concentration augmente, la vitesse de combustion augmente parallèlement.

Dans les feux de végétation les plus communs, qui sont caractérisés par la présence de flammes bien visibles, on considère que

l'oxygène ne limite pas la propagation, même si une concentration atmosphérique supérieure à 21 % augmenterait leur vitesse et leur puissance. Cela tient au fait que la végétation est bien aérée et que les mouvements d'air dus au vent et engendrés par le feu alimentent le foyer en oxygène. Cette alimentation en air frais est indispensable à la combustion puisque les réactions consomment l'oxygène là où elles ont lieu, dans la flamme et à la surface des braises. Ce qui limite la combustion n'est donc pas à proprement parler la disponibilité en oxygène de l'atmosphère au niveau de la végétation, mais la vitesse à laquelle l'air frais est mélangé avec les gaz inflammables issus de la pyrolyse de la végétation.

Dans un feu de végétation, deux mécanismes contribuent à réaliser ce mélange : la diffusion moléculaire et la diffusion dite « turbulente » de l'oxygène. La diffusion moléculaire résulte des différences de concentration en oxygène entre l'air frais et la flamme. C'est le seul processus en jeu dans une flamme de bougie. La diffusion turbulente, quant à elle, résulte des mouvements turbulents d'air et de gaz, c'est-à-dire de tourbillons qui présentent une très large gamme de dimensions : au niveau du foyer, par exemple, leur diamètre varie de plusieurs mètres à quelques millimètres. Les grands tourbillons apportent de l'air frais dans la région du foyer et les plus petits assurent le mélange intime de cet air frais et des gaz inflammables. Les tourbillons seront d'autant plus efficaces pour apporter de l'air et réaliser le mélange que les mouvements d'air sont rapides, autrement dit que le vent est fort et que le feu est puissant.

Certains feux brûlent sans flamme visible, tels que les feux d'humus ou de tourbière, qui peuvent couvrir pendant une très longue durée, de plusieurs semaines à plusieurs mois. Ils démarrent généralement dans un milieu bien drainé après une période de sécheresse, mais ils continuent parfois à brûler dans des conditions plus humides. On rencontre ces feux surtout dans les régions boréales et dans certaines régions tropicales où l'homme modifie les conditions de drainage des sols et fait usage du feu, comme en Indonésie. Les couches d'humus et les tourbières constituent un combustible abondant et continu, mais limitent l'apport en oxygène, car elles sont peu poreuses.

Le feu progresse alors très lentement, typiquement de 1 à 3 cm par heure. Ces feux consomment de très grandes quantités de matière organique et libèrent beaucoup de fumées qui ne sont pas transportées rapidement en altitude, contrairement à ce qui est observé au cours de feux brûlant les parties aériennes de la végétation. Ces fumées sont particulièrement chargées en éléments et particules toxiques, car elles résultent d'une combustion lente et incomplète.

DES FEUX AUX COMPORTEMENTS VARIÉS : COMMENT LES DÉCRIRE ?

En dehors de ces feux qui couvent discrètement, les feux de végétation constituent un phénomène bien visible : ils se manifestent, nous l'avons dit, par des flammes, des braises et des fumées. Ce n'est pas le cas de tous les phénomènes naturels ; par exemple, on ne voit pas le vent quand il ne transporte pas de particules en suspension dans l'air, liquides ou solides (des nuages ou des fumées), qui révèlent les mouvements d'air. Au contraire, il est possible d'observer la propagation du feu et de constater que les flammes sont plus ou moins grandes ou plus ou moins inclinées d'un feu à l'autre selon la végétation qu'ils brûlent ou selon la force du vent. C'est ainsi que les hommes ont appris, à travers l'utilisation du feu et l'observation des incendies, comment agissent les feux et quels sont les facteurs qui influencent leur activité. On parle, plus généralement, du *comportement du feu*. Ce terme révèle la perception courante de l'incendie de végétation : le feu est vu comme une sorte d'animal aux multiples facettes qui agit différemment selon les circonstances. Il naît, se déplace, accélère, ralentit, couve, saute une piste ; il faiblit la nuit et reprend de la vigueur dans la journée ; il se heurte à la mer qui l'arrête dans sa course...

S'il est facile de voir le feu se propager, les conséquences immédiates des feux sautent également aux yeux : le passage d'un feu intense carbonise le feuillage de la végétation et les rameaux de bois. Intuitivement, on peut se dire aussi que plus la végétation a été consommée par le feu, plus le feu a été intense. Au moment du feu, cela se traduit par des flammes plus hautes et

un panache de fumées plus volumineux. Afin de dépasser cette perception essentiellement qualitative du comportement des feux et des facteurs qui l'influencent, les chercheurs ont réalisé des études expérimentales, au laboratoire et sur le terrain, et ont appliqué des protocoles d'observation d'incendies. Ils ont défini des grandeurs d'intérêt telles que la vitesse ou la puissance du feu et ils ont établi à partir de leurs mesures et observations des relations entre ces grandeurs et les facteurs du comportement des feux que sont le vent, le relief et la végétation.

Le comportement (parfois colérique) des feux

Feux peu intenses ou destructeurs, feux de surface ou dans les cimes des arbres, feux rapides ou lents... Pour comprendre le comportement varié des feux, il faut les étudier ! Les principaux critères utilisés pour décrire les feux quand ils sont allumés sont la vitesse de propagation, la puissance et les dimensions des flammes. Considérons-les d'un peu plus près.

La *vitesse du feu* correspond à la distance parcourue par le feu dans un intervalle de temps donné. On s'en fait intuitivement une idée : si on regarde un feu depuis le ciel et qu'il n'y a pas trop de fumée, on peut distinguer la végétation en train de brûler de la végétation encore intacte ; et la ligne qui les sépare avance à une certaine vitesse, la vitesse du feu. Toutefois, il n'est pas toujours possible de définir une ligne continue séparant le brûlé de l'imbrûlé. En effet, le feu avance parfois d'une manière très irrégulière, surtout dans la direction du vent. Le feu n'est pas un objet mobile avec un contour parfaitement défini et stable ; c'est un phénomène auto-entretenu qui se déplace dans un milieu hétérogène, et dont on perçoit la présence à travers les flammes et les fumées qu'il engendre.

La *puissance du feu*, quant à elle, mesure l'énergie libérée par le feu par unité de temps. Plus précisément, lorsqu'on s'intéresse à une ligne de feu, on définit cette puissance par mètre de longueur de cette ligne, et l'unité est alors le kilowatt par mètre. Cette puissance, l'*intensité de la ligne de feu*, est souvent qualifiée plus simplement d'« intensité » dans le langage courant. La mesure directe de la puissance libérée par un feu

en mouvement est compliquée. En pratique, l'intensité de la ligne de feu est estimée en faisant le produit de trois quantités : la vitesse du feu, la quantité de biomasse végétale brûlée (par mètre carré) et la chaleur de combustion de cette matière (l'énergie libérée par la combustion d'une masse unitaire de matière végétale sèche). La chaleur de combustion est assez peu variable en comparaison de la vitesse du feu et de la quantité de biomasse végétale brûlée.

Quelles valeurs observe-t-on en pratique pour ces deux grandeurs fondamentales ? Dans les conditions naturelles d'un feu de végétation, la vitesse de celui-ci varie dans une gamme très large : de quelques dizaines de mètres par heure à plusieurs kilomètres par heure. Ainsi, par vent modéré, un feu de litière sous un peuplement d'arbres dense parcourt quelques dizaines de mètres par heure. L'été, un feu de forêt en région méditerranéenne brûle le couvert relativement ouvert d'arbres en avançant de quelques centaines de mètres par heure, et de 1 à 2 km/h si le vent est plus fort. Un feu de savane en conditions sèches et ventées pourra avancer jusqu'à 20 km/h, comme cela a été documenté en Australie ! La quantité de végétation brûlée par ces feux sera très variable, de quelques tonnes par hectare dans une formation herbacée jusqu'à 100 t/ha dans une forêt dense et âgée. En région méditerranéenne, la charge de combustible disponible est typiquement de 5 à 20 t/ha pour une garrigue à couvert clairsemé, de 30 à 60 t/ha pour un maquis haut et dense, et de 20 à 30 t/ha pour une pinède de Provence sur sol calcaire. Ces valeurs varient selon la composition, l'âge et le degré d'ouverture du peuplement d'arbres ou d'arbustes.

Sans surprise, la puissance du feu, qui résulte du produit de la vitesse du feu et de la quantité de biomasse brûlée, est donc extrêmement variable. La très grande majorité des feux ont une puissance de quelques centaines à quelques milliers de kilowatts par mètre, mais des feux de plusieurs dizaines de mégawatts par mètre (MW/m) ne sont pas rares. Les feux documentés les plus intenses (en Amérique du Nord) dépassent une centaine de mégawatts par mètre. On considère généralement que des feux de plus de 4 MW/m ne sont plus guère contrôlables par des moyens de lutte courants, et des

feux de plus de 10 MW/m ne sont plus du tout contrôlables, même avec des moyens aériens lourds.

Parce qu'il est souvent difficile, en pratique et sur le terrain, de mesurer la vitesse du feu et d'établir quelle quantité de matière il a consommé, les incendies de végétation sont souvent décrits par les *dimensions des flammes*. Des études expérimentales ont permis d'établir des relations entre la longueur des flammes et la puissance du feu, de sorte qu'on peut déduire une estimation de cette dernière en mesurant la longueur de flamme. Cette mesure est toutefois sujette à beaucoup d'incertitudes, tant les flammes sont en réalité de dimensions très variables d'un instant à l'autre, et aussi d'un point à un autre selon la nature du combustible en train de brûler, par exemple de la litière ou un arbuste.

Les facteurs qui influent sur le comportement des feux

S'il y a peu de combustible ou que ce dernier est trop humide, nous l'avons vu, le feu ne peut pas se propager. Si, au contraire, le combustible est abondant et sec, la propagation du feu est certaine. Entre ces deux situations, la propagation est incertaine, c'est-à-dire qu'une éclosion ne conduira pas toujours à une propagation : on parle de « conditions marginales de propagation ». Par exemple, pour des litières d'aiguilles de pin d'Alep, le comportement du feu devient incertain au-delà d'une teneur en eau d'environ 15 % ou en dessous d'une charge de matière sèche d'environ 2 t/ha. Ces seuils sont très variables selon les dimensions, la forme et la composition chimique des éléments végétaux servant de combustible. Ils dépendent aussi vraisemblablement du vent, qui favorise la propagation, comme cela peut être déterminé en laboratoire à l'aide d'un ventilateur. Mais il faut se souvenir que le vent, dans la nature, est très variable. Par conséquent, même s'il y a des rafales de vent, il est très probable que le vent sera assez faible à un moment donné pour que le feu s'éteigne faute de combustible, ou parce que ce dernier est trop humide dans ces conditions marginales.

Toutes les études scientifiques montrent que, en dehors des conditions marginales, les facteurs affectant le plus la propagation

du feu sont le vent et la teneur en eau des combustibles morts. Chacun de ces facteurs varie en effet quotidiennement avec la météorologie, et induit de fortes variations de la vitesse du feu. La teneur en eau de la végétation vivante, à l'échelle du couvert, est en revanche beaucoup plus stable, mais son effet sur la propagation a probablement été longtemps sous-estimé. Le vent a un effet assez linéaire sur la propagation du feu. Dans les formations boisées, forêts ou landes arbustives, la vitesse du feu est de l'ordre de 10 % de celle du vent ; cette approximation est valable dans une large gamme de vitesses de vent allant jusqu'à 70 km/h. Cette règle est une moyenne pour une grande variété de formations boisées à travers le monde, et ne doit pas être appliquée à l'aveugle dans le cadre d'une formation bien précise. Cette règle nous indique toutefois que, pour un vent augmentant de 10 à 60 km/h (les extrêmes de vent les plus courants dans les incendies), la vitesse du feu augmente en ordre de grandeur dans les mêmes proportions, soit un facteur 6. Entre des conditions de sécheresse modérée et extrême, un facteur 2 à 3 semble s'appliquer quant à l'effet de la teneur en eau des combustibles sur la vitesse du feu.

La pente est un facteur aggravant la propagation des feux. Ainsi, une règle simple établit qu'un feu montant une pente verra sa vitesse doubler par rapport à sa propagation sur un terrain plat pour une inclinaison de 20 %, tripler pour une inclinaison de 30 %, et quadrupler pour une inclinaison de 40 %. En revanche, la vitesse d'un feu descendant une pente sera peu modifiée par la valeur de cette pente et dans tous les cas sera beaucoup plus lente que dans le sens de la montée. Cette règle n'est évidemment pas gravée dans le marbre : le relief modifiant le vent localement, ses effets sont complexes, et peuvent conduire à de grandes variations dans le comportement des feux. Ainsi, un feu peu intense en fond de vallon peut se transformer en un feu embrasant rapidement un versant de colline. À l'inverse, un feu poussé par le vent vers une crête aura des difficultés à descendre le versant opposé à cause d'une pente et de vents localement défavorables derrière la crête.

Enfin, la quantité, les dimensions et la forme des éléments combustibles, ainsi que la structure spatiale de la végétation,

affectent le comportement des feux. Ces facteurs supplémentaires expliquent les différences observées entre diverses formations végétales, et exigent d'adapter les règles ou les modèles à chaque type de végétation. En première approche, la quantité de combustible affecte linéairement la puissance du feu (autrement dit, la quantité de combustible consommée est proportionnelle à la quantité disponible). Son évaluation est par conséquent cruciale pour estimer cette grandeur fondamentale. Les éléments fins s'enflamment et se consomment rapidement, alors que les éléments plus gros s'enflamment difficilement mais brûlent longtemps. Les premiers vont ainsi servir de support principal à la propagation du feu, tandis que les seconds vont aussi contribuer à sa puissance et à ses effets sur les plantes et sur le sol. D'une manière générale, une végétation très discontinue horizontalement est défavorable à la propagation du feu, de même qu'une canopée haute bien séparée du sous-bois sera défavorable au passage du feu vers les cimes des arbres.

Ces facteurs structuraux ont parfois des effets antagonistes. Ainsi, une éclaircie dans un peuplement forestier (c'est-à-dire une réduction du taux de couvert des arbres) favorise à moyen terme l'embroussaillage du sous-bois et la pénétration du vent, ce qui augmente la vitesse du feu. Mais par ailleurs, cette éclaircie rend la végétation discontinue, diminuant le risque de voir un feu se propager de cime en cime !

Les feux en conditions extrêmes

Plus les conditions de vent et de sécheresse deviennent extrêmes, moins la structure et le détail de la composition de la végétation sont importants pour déterminer la propagation du feu. Cela tient au fait que la transmission de l'énergie devient très efficace par vent fort, et que l'inflammation de la végétation sous cet apport de chaleur est beaucoup plus rapide pour des teneurs en eau faibles. Le feu parcourt alors de grandes surfaces et libère de grandes quantités d'énergie en peu de temps. Par exemple, en octobre 2017 au Portugal, 250 000 hectares de forêts et de landes ont été brûlés en dix heures dans la même région. Le feu étant intense, il peut aussi enflammer des combustibles plus

gros, comme des branches, qui vont brûler plus longtemps que les feuilles ou les rameaux fins. Ces conditions seront favorables à la formation de pyrocumululus et de pyrocumulonimbus qui, comme nous l'avons vu, peuvent altérer la circulation atmosphérique autour du feu. Ce phénomène s'accroît quand la biomasse combustible est abondante. On peut alors assister au développement d'une véritable tempête de feu, c'est-à-dire un feu très intense, créant de puissants mouvements d'air et de flammes et présentant un comportement imprévisible.

TOUR D'HORIZON DES COMBUSTIBLES VÉGÉTAUX : INFLAMMABILITÉ ET COMBUSTIBILITÉ

Les feux naissent et se propagent dans différentes végétations combustibles : forêts, herbes, buissons, haies, tourbières, etc. Selon les caractéristiques de ces combustibles, les feux seront plus ou moins grands, intenses, rapides, destructeurs, faciles à arrêter. On peut estimer le comportement potentiel du feu pour une large gamme de combustibles végétaux grâce à des simulateurs de comportement du feu, ou à des modèles physiques ou empiriques. Par exemple, on reconstitue à l'identique un type de combustible végétal prélevé avec précaution sur le terrain (par exemple une zone de buissons de romarin), que l'on place au banc d'essai devant un panneau radiant. Le rayonnement thermique émis par ce panneau chauffe ce matériel végétal. On pourra ainsi observer le temps et l'énergie nécessaires pour enflammer puis brûler les différentes particules végétales du romarin, mesurer l'énergie libérée et la part non brûlée. Cela permet de classer différentes espèces de végétaux selon leur propension à s'enflammer et leur capacité à libérer de l'énergie.

Ces connaissances et ces outils, développés par la recherche, servent ensuite aux pompiers pour anticiper le comportement du feu en fonction de la météo, du relief et de leurs propres actions de suppression. Les végétaux se caractérisent par leur biomasse et leur répartition verticale et horizontale, la taille de leurs particules, leur degré d'humidité (partiellement contrôlé par la météo) et parfois par la présence de composés organiques

volatils comme les terpènes de la résine de nombreux conifères tels que les pins, les sapins et les cèdres. Ces composants rendent certaines espèces particulièrement inflammables, et la lutte complexe. Les tests en laboratoire servent à obtenir des échelles d'inflammabilité de la végétation. On sait ainsi que certaines espèces s'enflamment particulièrement vite ; d'autres ont une longue durée d'ignition ; d'autres, une forte température de flamme ; d'autres encore, une grande vitesse de propagation. Ces typologies de combustibles végétaux permettent une cartographie de toutes les zones à risque. Des typologies ont aussi été réalisées sur les combustibles végétaux proches des maisons – comme des haies – qui sont de plus en plus souvent brûlées lors des grands feux, et qui peuvent augmenter considérablement les dégâts causés aux personnes et aux habitations.

Comment les plantes jouent avec le feu

La faculté des plantes à générer ou propager un feu et à se consumer par transfert de chaleur dépend fortement de leurs caractéristiques morphologiques et fonctionnelles. On différencie la *faculté d'ignition* (capacité à démarrer un feu, mesurée comme le temps nécessaire au matériel végétal pour s'embraser une fois qu'il est soumis à une source de chaleur) de la *combustibilité* (sa perte de masse sèche pendant la combustion) et de l'*inflammabilité* (associant sa faculté d'ignition, sa libération de chaleur et sa faculté à propager un feu). Le terme d'inflammabilité a longtemps été employé pour désigner seulement la propension à s'enflammer d'un matériau, c'est-à-dire sa faculté d'ignition telle que définie plus haut ; mais le terme d'inflammabilité est de plus en plus utilisé comme synonyme du terme anglais *flammability*, et désigne ainsi un concept plus large. C'est la définition que nous avons retenue dans cet ouvrage.

Sur cette base, on peut donc classer les types de plantes en « non inflammables » (à faible ignition et faible libération de chaleur pendant la combustion), « inflammables à propagation rapide » (caractérisées par une forte ignition et propageant rapidement le feu sans libération de chaleur excessive) et « inflammables à forte chaleur » (caractérisées par une forte ignition, une propagation lente mais une énergie de combustion importante).

Ces différents types de plantes ont des caractéristiques morphologiques, structurelles et biochimiques (que l'on appelle « traits fonctionnels ») particulières. Nous allons voir ici ceux qui ont trait à l'inflammabilité et à la combustibilité, et au chapitre suivant les adaptations que ces types d'espèces ont développées pour survivre au feu.

Les plantes non inflammables sont associées à une faible biomasse morte sur pied, une faible densité volumique (la quantité de biomasse dans un volume donné), un faible ratio entre éléments fins et élément grossiers, une faible continuité de biomasse, des feuilles et des branches épaisses – les feuilles se caractérisent par le ratio de leur masse par unité de surface en g/cm^2 (*Leaf Mass per Area* (LMA) dans la littérature anglo-saxonne). Les plantes grasses comme les cactus sont le meilleur exemple de plantes non inflammables. Les plantes inflammables à vitesse de propagation rapide sont caractérisées par une forte quantité de biomasse morte sur pied, une faible densité volumique, un fort ratio d'éléments fins, une forte continuité de combustible et des feuilles et des branches fines. Les herbacées représentent la grande partie de ces espèces. Les espèces inflammables à forte énergie, quant à elles, sont similaires à la précédente catégorie, mais avec une forte densité volumique et beaucoup de ramifications du branchage, comme les arbustes ou résineux à aiguilles.

La composition chimique du matériel végétal est aussi importante pour l'inflammabilité. La teneur en composés organiques volatils (molécules souvent odorantes, dérivés benzéniques et fortement inflammables) et la teneur en eau du matériel végétal modifient l'ignition, la combustibilité et l'inflammabilité. Ainsi, le temps d'ignition augmente linéairement avec la teneur en eau, tandis que la vitesse de propagation d'une flamme diminue exponentiellement avec la teneur en eau. Dans un couvert d'arbustes, les vitesses de propagation les plus importantes sont observées pour des teneurs en eau du feuillage inférieures à 80 %.

La teneur en eau du matériel vivant (le feuillage des plantes), qui dépend de la teneur en eau du sol, varie de 40 % à 350 %

selon la saison et les espèces. Cependant, pour une même teneur en eau du sol, les espèces ne réagissent pas de la même manière pour conserver l'eau dans leurs tissus, et ce pour deux raisons.

D'une part, les différentes espèces n'ont pas la même profondeur racinaire et n'ont pas accès à la même ressource en eau. Les plantes à système racinaire superficiel, comme les herbacées, ont donc tendance à se déshydrater plus rapidement que les arbres aux racines profondes. Les plantes ont aussi des capacités différentielles à fermer leurs stomates foliaires selon leur teneur en eau. La déshydratation des espèces dites « isohydriques » a tendance à suivre le dessèchement du sol, tandis que les espèces dites « anisohydriques » peuvent fermer leurs stomates rapidement, bloquer leur perte en eau et maintenir ainsi leur hydratation quand le sol continue à se dessécher (le pin d'Alep par exemple).

D'autre part, c'est la capacité de la plante à déshydrater ses cellules, lorsque la dépression d'eau dans les vaisseaux conducteurs (le xylème) augmente, qui pilote la teneur en eau de son feuillage. Dans un premier temps, le manque d'eau dans le sol et la perte en eau au niveau des stomates foliaires vont faire diminuer la teneur en eau dans les vaisseaux (la perte au niveau des feuilles étant plus importante que l'entrée d'eau au niveau des racines). Les vaisseaux étant rigides, cette diminution ressemble à l'action que l'on fait sur une paille pour aspirer son soda préféré : la dépression générée à l'embouchure se transmet dans le tuyau et à l'extrémité basse de la paille (du vaisseau). La pression de turgescence dans les cellules, cette pression exercée par l'eau contenue dans la vacuole sur les parois cellulaires (comme un ballon de baudruche aux parois flexibles contenu dans une caisse rigide) et qui donne un aspect frais au feuillage, va être maintenue par la pression osmotique, conduisant à une teneur en eau stable dans les cellules.

La pression osmotique est la pression hydrostatique produite par une solution concentrée en soluté, et générant un flux d'eau subi de manière naturelle d'un milieu aqueux peu concentré en soluté, vers un milieu plus concentré en soluté et séparé par une membrane semi-perméable. La pression

osmotique est par exemple à l'origine du phénomène que l'on peut observer lors de la réhydratation de fruits secs plongés dans l'eau (comme les pruneaux), où l'eau extérieure se trouve aspirée dans les cellules végétales fortement concentrées en sucres. Passé un certain seuil de dépression des vaisseaux (appelé « point de perte de turgescence ») propre à chaque espèce, la diminution d'eau dans les vaisseaux s'accompagne d'une déshydratation des cellules vivantes, la pression osmotique ne pouvant plus maintenir la teneur en eau cellulaire. La turgescence de la vacuole cellulaire s'affaiblit, la vacuole se dégonfle (comme notre ballon de baudruche) et n'exerce plus sa pression sur les parois cellulaires, qui ont tendance à s'affaisser et donner au feuillage son aspect flétri. Au-delà de ces seuils de sécheresse, plusieurs mécanismes peuvent ensuite drastiquement impacter la teneur en eau du combustible : le processus de cavitation (création de bulles de gaz dans les vaisseaux conducteurs), qui va bloquer le flux d'eau et entraîner l'embolie (un blocage du flux, similaire aux embolies de flux sanguin observées chez les animaux), puis le dessèchement total et la mort des feuilles ou des branches où a eu lieu l'embolie. La plante perd en général sa feuille, qui tombe au sol, mais la chute du feuillage n'est pas systématique et un certain nombre d'espèces peuvent conserver de la biomasse morte et sèche sur leurs branches, créant une masse combustible importante dans la canopée. Ces mécanismes successifs conditionnent l'état hydrique des espèces et la combustibilité de l'écosystème au cours de la saison de sécheresse.

La propagation du feu est, comme nous l'avons vu, conditionnée par la structure verticale et horizontale de la végétation combustible. Cette structure spatiale dépend des espèces de plantes présentes dans le peuplement, de leur architecture, de leurs conditions de croissance et de leur compétition entre elles pour l'accès à la lumière. Un incendie démarre généralement à la surface du sol, dans la couche herbacée (sauf pour les incendies initiés par la foudre qui touchent directement toute la hauteur de l'arbre jusqu'à la canopée), et le feu se propage ensuite à travers les différentes couches de végétation, dans la mesure où une continuité verticale et horizontale du combustible existe.

En particulier, la hauteur de base de la canopée (qui correspond à la hauteur, par rapport au sol, à partir de laquelle les arbres ou les arbustes commencent à avoir des feuilles) ainsi que son épaisseur sont deux paramètres structuraux expliquant le processus de propagation du feu dans les cimes.

LA TÉLÉDÉTECTION : L'OUTIL D'AUJOURD'HUI POUR RECENSER ET ÉTUDIER LES FEUX

Pompiers, assureurs, forestiers, chercheurs et décideurs ont besoin de connaître les points de dépôts de feux et les surfaces brûlées partout dans le monde. Ces informations sont longtemps restées difficiles d'accès. Dans les années 1980, l'imagerie satellitaire a révolutionné notre connaissance des surfaces terrestre et marine. Elle fournit également des clichés des feux en cours de propagation, en temps réel, sur tout le globe. Comment fonctionne-t-elle ?

La surface terrestre reçoit du Soleil un rayonnement global. Ce rayonnement solaire, tout comme le son, peut se décrire par un ensemble de longueurs d'onde comprises entre 10 nm (ou 1 milliardième de millimètre) dans l'ultraviolet et 0,05 cm dans l'infrarouge. À titre de comparaison, les ondes radio, moins énergivores, varient entre 0,05 cm et 100 m. La part visible du rayonnement solaire couvre les longueurs d'onde allant de 400 nm (violet) à 700 nm (rouge) en passant par le vert (500 nm) et le jaune (600 nm). Le spectre solaire total regroupe les bandes spectrales de l'ultraviolet (5 %, nocives pour la peau et causant les coups de soleil du fait de leur forte énergie), de la lumière visible (43 %, que les récepteurs de nos yeux peuvent percevoir dans le détail) et de l'infrarouge (52 %, qui correspond aux longueurs d'onde que peut émettre une source de chaleur comme un radiateur et que nos récepteurs de la peau peuvent sentir, ou encore les caméras thermiques permettant de voir dans la nuit en détectant les longueurs d'onde émises par la chaleur animale ou utilisées pour les diagnostics thermiques de nos habitations). L'ensemble de ce rayonnement est en partie absorbé par la surface terrestre. Ce qui n'est pas absorbé est réémis par un effet miroir.

Les capteurs satellitaires, situés en orbite autour de la Terre, perçoivent donc ce rayonnement émis par la surface continentale aussi bien pour les longueurs du visible (comme le ferait un astronaute avec ses yeux) que pour l'infrarouge et l'ultraviolet. La surface continentale renvoie ainsi une fraction des longueurs d'onde reçues dont la distribution de fréquence dépend de l'état de cette surface. Par exemple, le feuillage des arbres absorbe principalement les longueurs d'onde visibles du rouge et du jaune, et renvoie donc les longueurs d'onde restantes (non absorbées) que nos yeux identifient comme vertes. Le signal perçu par les capteurs satellitaires est plus complexe, notamment dans l'infrarouge non perceptible par nos yeux. Il permet de connaître l'état physique de ce feuillage ainsi que sa température de surface. La discipline de la télédétection cherche donc à identifier des liens entre les distributions de fréquence des longueurs d'onde reçues et l'état de surface mesuré sur le terrain. Les incendies affectent la végétation, modifiant ainsi le feuillage couvrant la surface continentale. Les changements rapides dans la couleur de surface entre deux images successives peuvent donc témoigner d'un incendie. Si les satellites passent pendant la combustion, ils peuvent capter le rayonnement infrarouge thermique émis par les flammes. Sur cette base théorique, il semble donc assez facile d'estimer les surfaces incendiées. Cependant, les satellites ont des temps de retours et des résolutions spatiales différentes. Les satellites passant le moins souvent (tous les 15 jours) sur un même endroit ont des résolutions spatiales fines (30 m, satellite Landsat), tandis que les satellites à récurrence temporelle importante (tous les 3 jours) ont des résolutions spatiales plus grossières (> 500 m).

Sachant que les nuages ou la fumée peuvent masquer la surface continentale, il est fréquent de passer plusieurs mois sans image nette. C'est particulièrement vrai dans les zones nuageuses comme les tropiques pour les satellites à basse résolution temporelle, ou si les incendies affectent partiellement les pixels de 500 m, rendant le signal moins net. La végétation pouvant régénérer du feuillage herbacé rapidement après un incendie, il est donc fréquent que certains feux soient difficilement captés

(« erreur d'omission »). Aussi, les zones agricoles à forte variabilité de couvert après les fauchages ou récoltes, les zones herbacées à couvert végétal peu dense, les torchères de puits de pétrole générant des flammes ou encore les sols réfléchissant fortement la lumière peuvent engendrer un signal similaire aux zones incendiées (appelées « erreurs de commission »).

À ce jour, aucune méthode automatique ne permet de générer des contours de feux fiables à 100 %, et les contrôles visuels restent importants et nécessaires. Si le régime des feux globaux basé sur les grands incendies notoires est bien identifié, le nouveau satellite européen Sentinel, à 10 m de résolution spatiale et actif depuis 2016, a permis une réévaluation des surfaces brûlées, révélant en Afrique une sous-estimation qui peut atteindre 30 %. Les nouveaux capteurs mis régulièrement en orbite accroissent la qualité spatiale et temporelle des données, mais pas de manière rétroactive, laissant l'histoire des incendies dans leur incertitude. Les plus longues séries temporelles d'images satellites utilisables depuis les années 1980 restent les images Landsat, à 30 m de résolution et un temps de retour de 15 jours, et les images AVHRR (en français « radiomètre avancé à très haute résolution »), à 5 km de résolution.

La révolution de la télédétection

Avec l'avènement de la télédétection, nous sommes donc entrés dans l'ère de la donnée globale sur les incendies, accessible par tous à tout moment. Depuis les années 2000, l'augmentation massive des données satellitaires quotidiennes a permis de suivre presque en temps réel les incendies de forêt et de milieux naturels sur tout le globe. Ces données sont disponibles grâce à la Nasa. Depuis 2001, les données du capteur Modis (en français « spectro-radiomètre d'imagerie à résolution modérée ») permettent en effet de détecter toutes les 3 à 6 heures et sur tout le globe l'énergie de combustion des incendies de forêt et de milieux naturels en cours, à l'échelle de pixels d'environ 1 km de côté. Le capteur VIIRS, à 375 m de résolution spatiale, les accompagne depuis 2012. Ces deux types de capteurs alimentent les bases de données

répertoriant les points chauds ou les feux actifs pendant l'événement incendie. Les informations sur la date et l'heure de la combustion permettent une estimation de la progression spatiale des incendies, et le pouvoir radiatif émis par les feux nous renseigne sur l'intensité du feu.

Les petits feux ou les feux rapides d'une durée inférieure à 6 heures sont donc, de fait, majoritairement omis, et la continuité spatiale de l'information n'est pas assurée, les feux pouvant parcourir de grandes distances pendant les 6 heures où ils ne sont pas enregistrés. Ces données sur les feux actifs sont toutefois complétées par l'estimation des surfaces brûlées, grâce aux 36 bandes spectrales renseignant la variabilité temporelle de la réflectance du sol avant et après feux, et dont la résolution varie de 250 m à 1 km selon la bande pour le même capteur Modis. Sur ces données de surface incendiée obtenues une fois le feu terminé, la continuité spatiale des pixels détectés est assurée. La date de détection enregistrée correspond à la date de la première image post-feu non nuageuse où une différence de réflectance est observée. Elle est donc postérieure à la propagation réelle du feu, et peut être biaisée de trois à plusieurs dizaines de jours si les conditions atmosphériques post-incendie sont défavorables.

Ces données spatio-temporelles pixélisées permettent ainsi d'acquérir une information dérivée, plus intelligible, sur les contours de feux : des algorithmes d'agrégation spatio-temporelle des pixels ont été développés, destinés à reconstituer les contours d'incendies automatiquement. Les plus grands feux, qui peuvent brûler plusieurs jours d'affilée, sont ainsi caractérisés par leur direction, leur intensité, leur vitesse d'expansion et leur morphologie. Ce travail fastidieux était opéré sur le terrain ou par analyse d'images à haute résolution pour des études locales dans les décennies précédentes. Il est désormais automatisé pour constituer une base de données homogène et systématique au niveau global (voir l'encadré 1). Cela fournit des contours assez précis (la résolution reste malgré tout à 500 m ou à 250 m) pour les grands incendies, mais la qualité des données reste encore insuffisante pour les incendies d'une surface inférieure à 150 ha. Les plus grands

incendies (supérieurs à 1 000 ha) représentant la majeure partie de la surface incendiée totale globale, cet outil reste la référence pour les interactions entre la biosphère et l'atmosphère, et une pyrogéographie (voir plus loin) globale. Mais il peut être largement insuffisant pour certaines zones où les petits incendies sont fréquents.

Les données issues de Modis permettent non seulement de détecter les feux de végétation, mais aussi d'observer et de mesurer des processus qui se produisent sur les terres (enneigement, tempêtes de sable), dans les océans (périodes de végétation du phytoplancton) et dans la basse atmosphère (détection de l'ozone, des nuages). Modis joue donc un rôle majeur dans l'identification des processus de fonctionnement de la surface terrestre (et marine) et dans l'évaluation des modèles simulant les interactions biosphère/atmosphère et le fonctionnement des agroécosystèmes. L'état hydrique de la végétation et la couverture foliaire, nos paramètres clés du processus de combustion et de propagation des feux, sont ainsi captés au niveau global et au cours de la saison.

ENCADRÉ 1. UN AN DE FEUX AUTOUR DU GLOBE

À quoi ressemble une année typique de feux sous l'œil attentif des instruments Modis ?

En janvier, l'activité des feux se concentre presque uniquement dans l'hémisphère sud, particulièrement dans la zone tropicale (Afrique, Venezuela, Colombie, Paraguay, Vietnam, Thaïlande, Australie) : ce sont des feux de savane agricoles, destinés à brûler les résidus végétaux avant ou après culture. La partie de l'Afrique située dans l'hémisphère nord est ainsi ceinturée par une bande continue d'incendies. L'activité est très faible ou inexistante ailleurs dans cet hémisphère. L'image de février est très similaire à celle de janvier : ces deux mois d'hiver sont destinés aux cultures sur brûlis.

Le mois de mars signe un changement dans l'hémisphère nord : des feux de printemps se développent en Amérique du Nord et en Eurasie. Au Sud, la plupart des feux de janvier-février restent présents, mais leur nombre diminue. Le mois d'avril reste dans la continuité de mars : on enregistre une augmentation des feux dans l'hémisphère nord, et une diminution au sud. En mai et juin, en Afrique et en

Amérique du Sud (Brésil principalement), le feu se déplace vers les savanes et les forêts sèches de l'hémisphère sud, alors que l'essentiel de l'hémisphère nord est toujours épargné. Cette tendance se renforce de juillet à septembre : les feux sont extrêmement nombreux en Afrique, en Amérique du Sud et en Australie, et s'étendent aussi dans l'hémisphère nord (notamment dans le bassin méditerranéen, aux États-Unis, en Russie et en Ukraine). L'automne annonce le retour progressif à la situation de janvier, avec une réapparition des feux vers la zone tropicale et une diminution de l'activité dans l'hémisphère nord. Notons que certaines régions du globe restent épargnées pendant toute l'année.

Ce schéma classique est valable presque chaque année, sauf dans des situations exceptionnelles. Cette relative stabilité témoigne du fait que les variations saisonnières des grands facteurs qui contrôlent les incendies sont assez stables d'une année à l'autre à grande échelle.

TOUR D'HORIZON DES ZONES À RISQUE D'INCENDIE DANS LE MONDE

Les feux de végétation présentent de fortes variations de densité, de taille, de saisonnalité et de dangerosité. On appelle « pyrogéographie » (du grec *pyro*, « feu ») la science qui étudie l'occurrence spatiale et temporelle des incendies de forêt et de végétation. Celle-ci vise donc à identifier où, quand et comment se produisent les incendies de forêt à travers le monde (voir l'encadré 2). Elle cherche ainsi à expliquer ce qui vaut à certaines régions du globe d'obtenir le record des zones les plus brûlées, et pourquoi le feu est limité, voire absent, dans certaines régions.

ENCADRÉ 2. LES CHIFFRES CLÉS* DE LA PYROGÉOGRAPHIE ACTUELLE (2019)

Les feux de forêt et de milieux naturels sont présents sur environ 60 à 80 % des terres émergées du globe. Un peu plus de 13 millions de feux de végétation se sont produits en quatorze ans (entre 2003 et 2016), pour une surface de 4,4 km².

Les plus grands feux ont été observés en Australie (18 km²) et en



Afrique (5 km²), mais aussi en Amérique du Nord (6 km²). Cela s'explique par le fait que, dans les régions chaudes et arides, le climat est très favorable à l'ignition des feux et à leur propagation pendant une grande partie de l'année. Ce sont les zones où la durée de saison météorologiquement favorable aux feux est la plus longue. Leur végétation est aussi très combustible et assez abondante malgré l'aridité relative. Les feux touchent d'aussi grandes surfaces en Amérique du Nord à cause de l'abondance et de la continuité de la végétation à l'échelle du paysage, de l'existence d'une saison sèche et chaude et de la densité des impacts de foudre.

Les feux les plus petits sont souvent localisés en Amérique centrale (2 km²) et en Asie équatoriale (2 km²), mais aussi en Europe (2 km²). Dans les régions tropicales, la surface des feux est limitée par l'humidité permanente de la végétation, qui réduit aussi la vitesse de propagation des incendies et leur vitesse d'expansion. En Europe, les feux restent petits en moyenne du fait de la compartimentation et de la fragmentation des paysages par l'agriculture et les activités humaines. Ils sont aussi limités grâce à la politique de lutte et de suppression massive des feux par les pompiers mise en place afin d'éviter au maximum les dommages aux biens et aux personnes, et largement développée en Europe. L'occurrence de méga-feux en Europe (voir le quatrième chapitre) montre tout de même que certaines régions sont vulnérables aux grands incendies.

Dans beaucoup de régions semi-arides (Afrique, Australie, Amérique), la végétation dominante est buissonnante (*bush, chaparral*) ou herbacée (savane). Elle se reconstitue rapidement lors de la saison humide, mais elle se dessèche tout aussi rapidement pendant la saison sèche. Les feux associés à ces régions se caractérisent par une grande vitesse d'expansion (1,7 km² par jour) et une grande intensité, mais une faible durée. Au contraire, dans les régions de forêts tropicales humides, la vitesse de propagation et l'intensité sont limitées du fait de l'humidité de l'air et de la végétation.

* Tous les chiffres donnés sont des moyennes.

Les différents régimes de feu à la surface du globe

Nous avons vu que la notion de *régime de feu* permet de décrire les grandes caractéristiques des feux de végétation dans une région donnée : le nombre de feux, la taille des surfaces brûlées, la longueur de saison favorable au feu, leur vitesse de propagation, leur intensité, leur durée, ou encore l'intervalle

de temps entre deux feux au même endroit (aussi appelé « durée de retour »). Par exemple, l'Australie du Nord connaît de nombreux et très grands incendies de surface, intenses et rapides. Les pluies tropicales y favorisent en effet la croissance des herbes pendant la saison humide, et celles-ci deviennent un combustible hautement inflammable pendant la saison sèche (d'avril à octobre). Dans ce territoire du feu, la saisonnalité est très fortement marquée.

La carte des feux de végétation pour l'ensemble du globe montre une succession de « points chauds » où se concentrent une grande majorité des départs de feux et des surfaces brûlées (figure 2). Ceux-ci sont localisés en Afrique australe et subsaharienne, en Australie, en Amérique du Sud, en Europe, en Asie centrale et dans l'ouest des États-Unis. Les feux responsables de ces points chauds sont très différents d'une région à l'autre : il s'agit d'immenses feux de forêt au Canada et en Russie, de milliers de petits feux agricoles en Asie centrale et au Brésil, de feux de savane répétés en Afrique (voir l'encadré 3) ou encore de feux intenses dans le *bush* australien.

Les points chauds sont caractérisés par la présence d'au moins deux facteurs très favorables aux incendies : par exemple un climat chaud et la présence d'une grande quantité de végétation combustible ou bien d'une forte densité de population qui augmente la probabilité de départs de feux. Inversement, les zones qui connaissent peu de feux bénéficient de facteurs défavorables aux incendies : par exemple un climat très chaud et sec, qui limite la quantité de végétation combustible. Les zones très peu peuplées, comme les zones boréales, enregistrent comparativement beaucoup moins de feux, notamment ceux d'origine humaine, mais ces feux se propagent en général sur de grandes surfaces forestières, car la stratégie de lutte sur un territoire aussi vaste ne s'active que si le feu se rapproche des régions habitées.

Le climat détermine à quelle saison les incendies se produisent, car la végétation doit être suffisamment desséchée pour prendre feu, puis permettre au feu de se propager. Mais le rôle de l'homme est crucial : c'est généralement lui qui déclenche le feu – pour diverses raisons –, même si les incendies sont

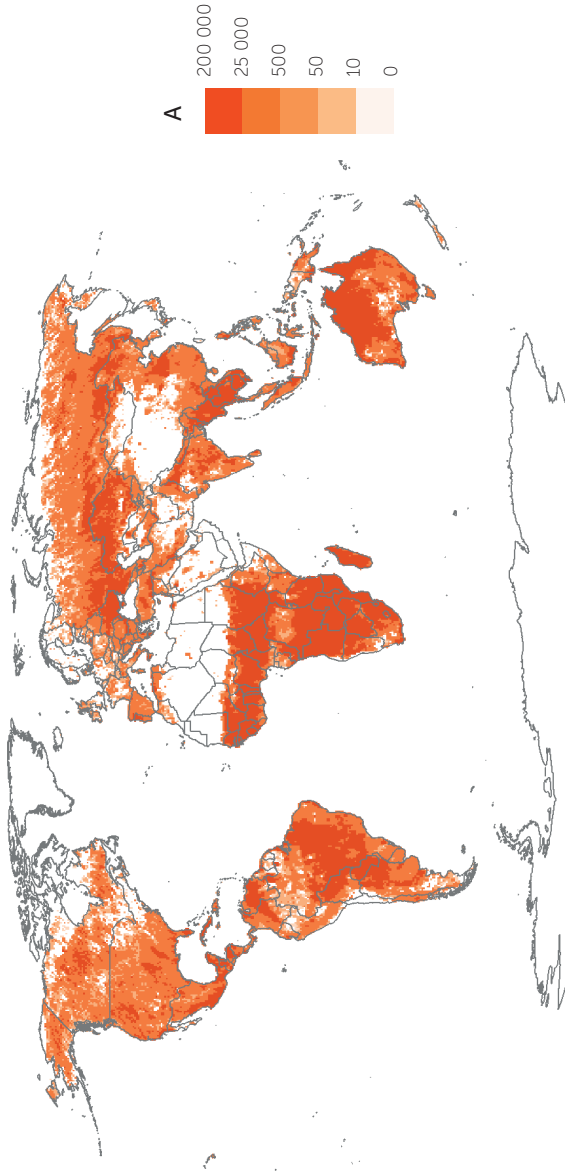


Figure 2A. Surface annuelle brûlée (en hectares) par les feux de forêt et de végétation détectés par le satellite Modis sur le globe entre 2003 et 2016.

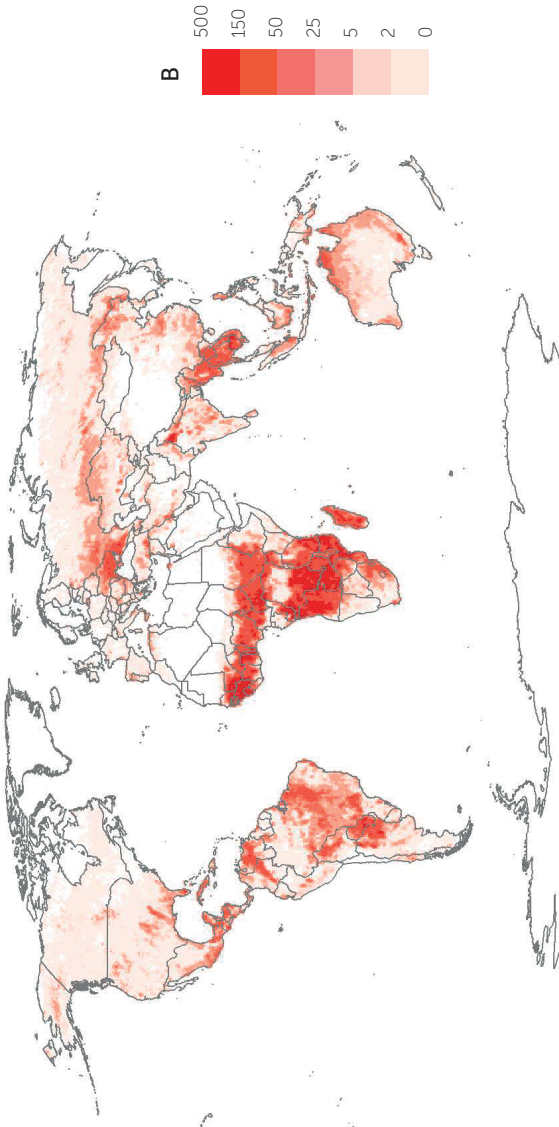


Figure 2B. Nombre annuel de feux sur la même période. Source : *Global fire atlas* (Andela et al., 2019) ; cartes réalisées par Luiz Galizia.

ENCADRÉ 3. L'AFRIQUE, CONTINENT DU FEU

Dans les années 1990-2000, les données satellitaires ont rapidement permis de visualiser chaque année une très forte concentration de feux actifs en Afrique, qui a ainsi été dénommée « le continent du feu » ! Les feux sont surtout présents dans les zones de savanes et de forêts claires qui brûlent facilement, du fait d'une végétation herbacée très fine qui peut sécher très rapidement et devenir inflammable. Dès la fin de la saison des pluies, la végétation herbacée se dessèche. C'est la principale période choisie par la population pour brûler la végétation afin de chasser et de faire des cultures sur brûlis. La végétation est également brûlée pour favoriser les pousses et éliminer les végétaux inconsommables par le bétail, qui vient ensuite pâturer sur la zone.

Les feux de forêt et de savane en Afrique sont responsables de 70 % de la surface brûlée annuellement dans le monde, et d'environ 50 % des émissions de CO₂. Ces feux sont d'origine humaine, mais ils suivent aussi la saison des pluies, gouvernée par les oscillations climatiques (El Niño/Southern Oscillation, ENSO) et les téléconnexions (voir le quatrième chapitre, encadré 9). Par exemple, le mode El Niño se traduit par un déficit de pluie en Afrique du Sud pendant la saison humide, et donc moins de combustible et moins de feux à la saison sèche suivante.

Un très fort contraste existe entre l'Afrique du Nord subsaharienne, à forte démographie et dont les savanes ont été converties en terres cultivées, et l'Afrique du Sud, majoritairement couverte de savanes et de forêts sèches.

principalement allumés par la foudre dans certaines régions comme le Canada. Le feu a toujours été un outil pour l'homme, destiné à produire des aliments, entretenir le paysage, défricher, ou encore nettoyer le sol, brûler la végétation après culture et éliminer des mauvaises herbes ou des parasites. Ainsi, l'homme joue un rôle clé dans l'ignition des feux de végétation depuis au moins les derniers dix mille ans (période de l'Holocène). Il sélectionne les types de végétation et les secteurs géographiques pour les brûler, il détermine la saison et le *timing* des feux et il met en place (ou non) des politiques de prévention, de lutte et de restauration post-incendie. Il joue donc un rôle majeur dans la mise en place des régimes de feu. Certains choix

sont ainsi lourds de conséquences : par exemple, développer des cultures sur brûlis a un impact considérable sur la végétation et le paysage, comme au Brésil. L'homme est aussi la principale victime des incendies de forêt, qui atteignent aussi bien les personnes que les maisons et les infrastructures.

Qu'est-ce qui déclenche les feux d'une région à l'autre ?

Une question centrale en matière d'incendies de forêt et de milieux naturels, partout dans le monde, est celle des véritables causes de départs de feux allumés par l'homme. De nombreux chercheurs enquêtent sur cette question. En Europe, notamment dans sa partie méditerranéenne, une part importante des feux (55 %) sont allumés délibérément pour nettoyer la végétation. Ces pratiques ancestrales perdurent dans les milieux ruraux. Les feux accidentels et naturels allumés par la foudre contribuent chacun pour moins de 10 %. Les départs de feux sont donc principalement liés aux actions humaines, agricoles, ou liées à des incendiaires. Au Canada, 35 % des feux sont d'origine naturelle, et 65 % des feux sont d'origine humaine. Dans ce pays, la surface brûlée par les feux d'origine humaine ne représente que 15 %, alors que celle causée par la foudre représente 85 % des surfaces brûlées. Cet écart surprenant est lié au fait que les feux de foudre qui prennent naissance dans des zones reculées, inaccessibles, ne sont pas combattus ; ils sont également possiblement moins bien détectés et peuvent s'étendre, alors que les feux d'origine humaine sont plus proches des maisons et sont arrêtés plus rapidement et facilement par les pompiers.

Comment évaluer le rôle de la météo ?

Dans presque tous les pays, pour évaluer le « risque » incendie de forêt, la prédiction à court terme se fonde sur l'analyse de la météo : le vent va-t-il se renforcer ? La pluie va-t-elle tomber ? Les météorologues traquent des indices spécifiques pour prévoir le niveau de danger quotidien. L'approche la plus courante exploite le système canadien de prévision des indices météo de danger de feu ; l'approche utilisée en France,

notamment, est adaptée de ce système. Il s'agit de calculer quotidiennement le niveau d'humidité de la végétation à partir des données de température, de vent et d'humidité de l'air à midi, et des précipitations des dernières 24 heures. Cinq sous-indices sont calculés et combinés pour donner l'indice global de danger feu-météo du jour (*Fire Weather Index*, ou FWI), qui traduit l'effet de l'humidité du combustible et du vent sur le niveau d'intensité attendu si un feu se déclenche. Le nombre de départs de feux est corrélé à cet indice.

Bien qu'initialement calibré dans une forêt de pins gris canadienne, l'indice a été exploité par la communauté scientifique ainsi que par la majorité des services opérationnels partout à travers le monde, y compris en Europe. Grâce à cette vaste utilisation depuis des décennies, les scientifiques ont pu recalibrer l'indice dans différents écosystèmes et évaluer sa pertinence ; il reste encore très utilisé aujourd'hui. Chaque pays ou région se voit ainsi attribuer un niveau de risque de départ de feu du jour ou des jours à venir, en fonction de la météo prévue. Cet indice est aussi calculé pour les décennies futures en prenant en compte les différents scénarios de changements climatiques, afin de déterminer quelles régions seront le plus à risque. Dans certains pays, d'autres indices du système canadien sont utilisés. C'est le cas de la Russie (*Eurasian Fire Danger System*), qui utilise le sous-indice IPI (indice de propagation initiale du feu) du FWI, mieux adapté aux feux de tourbière et de litière. Enfin, d'autres indices de danger de feu ont été développés, notamment aux États-Unis et en Australie.

Feux agricoles *versus* feux de milieux naturels

Chaque année, 3 à 4 millions de km² sont brûlés par des feux de végétation, soit environ 3 % des terres émergées. Les feux de végétation naturelle comme les forêts ou les savanes (*wildfires* ou *wildland fires*, en anglais) brûlent la végétation des forêts, des formations buissonnantes (maquis, garrigue, etc.), des pelouses naturelles, des savanes ou des zones tourbeuses du globe. On distingue les feux de végétation non contrôlés (les feux de forêt et de milieux naturels), souvent intenses et destructeurs, des feux contrôlés par l'homme, destinés à brûler

volontairement la végétation afin de la cultiver ou de permettre le pâturage (les feux agricoles et pastoraux). Actuellement, les terres cultivées couvrent environ 17 millions de km², soit 10 % de la surface terrestre mondiale. Ces terres sont en expansion pour répondre à une demande alimentaire croissante et assurer un approvisionnement mondial sécurisé. Au fil de l'histoire humaine, l'agriculture s'est étendue à l'échelle mondiale, remplaçant à la fois les forêts et les prairies. Les feux agricoles ou pastoraux représentent environ 10 % des feux annuels autour du globe. Leur principal pourvoyeur est la Russie (environ 33 % du total). Ce sont des feux dont la localisation est assez stable d'année en année, puisqu'ils sont liés à la présence de zones agricoles et de cultures, souvent permanentes. Ils sont surtout actifs lors de deux périodes de l'année : au printemps (avril-mai) et pendant l'été (août) (voir l'encadré 1).

Le brûlage dans les champs est une pratique agricole courante et peu onéreuse qui a lieu pendant les périodes de récolte, de post-récolte ou de pré-semis. C'est une pratique culturelle fermement ancrée (voir l'encadré 3). Elle représente 400 millions de tonnes de résidus de récolte dans les pays en développement, avec des conséquences régionales importantes sur la qualité de l'air atmosphérique et la santé humaine. Il faut noter que le brûlage agricole n'est pas limité aux pays en développement : il est aussi très présent dans toute l'Europe et aux États-Unis. Les principales cultures dans le monde sont le blé, le maïs, le riz, l'orge, le millet et le sorgho, qui occupent plus des deux tiers de la superficie mondiale cultivée ; et leurs déchets sont les principaux contributeurs à la combustion de la biomasse agricole. Les cultures de canne à sucre, de soja et de coton fournissent également des quantités considérables de résidus qui sont brûlés. Notre alimentation est donc indirectement une source massive d'émission de CO₂ du fait de ces brûlages agricoles.

Les feux de forêt et de végétation brûlent ainsi une grande variété d'écosystèmes et de types de végétations combustibles appartenant à tous les biomes terrestres : des savanes tropicales aux régions boréales, en passant par les écosystèmes tempérés. La quantité de végétation et sa productivité augmentent

l'occurrence des feux jusqu'à un certain seuil : si certaines régions de forêts tropicales (bordure de l'Amazonie, Indonésie) connaissent des feux, dans d'autres régions tropicales à forte productivité et biomasse (Amazonie centrale, Congo), les feux sont absents parce que la végétation reste humide toute l'année (même lors de périodes inhabituellement sèches), le vent est faible et les ignitions rares. Les incendies de forêt restent donc fortement contrôlés par la température moyenne et les précipitations, qui conditionnent elles-mêmes le type et la quantité de végétation autour du globe.

De même, la durée et l'intensité de périodes sèches conditionnent la probabilité de grands incendies. Les activités humaines (feux volontaires, travaux, maisons, routes, etc.) augmentent la probabilité de feux dans les régions humides à forte productivité de végétation. La pression humaine sur ces régions est visible en Amazonie, où l'ouverture progressive des forêts par l'exploitation forestière transforme ces dernières en zones de végétations plus sèches, fortement inflammables. Ce processus explique l'accélération de l'augmentation des surfaces incendiées dans certaines régions tropicales ou tempérées. Les forêts situées à proximité des zones de développement urbain ou d'exploitation forestière massive sont souvent soumises aux incendies. L'homme rend ainsi la plupart des forêts inflammables, pourvu qu'elles aient suffisamment de biomasse : il fait en quelque sorte tomber les barrières pyrogéographiques naturelles.

Les dommages causés aux écosystèmes sont très variables suivant la saison, le climat et la météo, et aussi selon les caractéristiques de la végétation. Celle-ci peut brûler partiellement ou complètement. Certaines végétations situées dans des écosystèmes régulièrement soumis au feu ont acquis la capacité de retrouver leur état initial après un feu (*résilience*). Inversement, des végétations rarement soumises au feu pourront disparaître après un seul feu. Si on associe souvent les feux aux forêts, il faut rappeler que 80 % des surfaces brûlées du globe sont situées dans des pelouses et des savanes composées principalement d'espèces herbacées, notamment en Afrique, en Australie, en Asie du Sud-Est et en Amérique du Sud. L'intensité du feu

dans ces végétations est faible, de même que les dommages causés aux personnes et aux biens. Inversement, beaucoup de forêts brûlent très intensément, et les dommages matériels et humains associés aux feux de forêt sont alors très importants.

Les paysages du feu

Certains paysages végétaux sont particulièrement sensibles au feu. Certains biomes (les domaines bioclimatiques et les grands types de formations végétales qui leur sont associés) lui sont propices, tandis que d'autres ne le connaissent jamais.

Nous avons déjà vu (figure 2 et encadré 3) que les savanes africaines sont les zones les plus incendiées à l'échelle du globe : la moitié d'entre elles brûle chaque année ! Cela s'explique par la conjonction du type de combustible qui s'y développe : la savane est principalement herbacée, mais aussi parfois parsemée d'arbustes ou de buissons. La saison des pluies est propice à la production herbacée, et donc à l'accumulation de combustible fin dont une grande partie brûlera pendant la saison sèche suivante, en raison de feux agricoles et pastoraux. Ce mode de gestion traditionnel permet aussi de préserver des espèces végétales locales : le feu dirigé est pratiqué même dans les aires protégées, comme dans les plaines du Serengeti, en Tanzanie.

Les régions dominées par des végétations buissonnantes très proches de la garrigue méditerranéenne (le *chaparral* californien, le *bush* australien ou le *fynbos* sud-africain) sont aussi très combustibles. Les plantes y jouent avec le feu ! Les espèces y sont petites et facilement inflammables. Elles brûlent pendant la saison sèche et se régénèrent rapidement pendant la saison humide. Un grand nombre d'entre elles sont adaptées au feu, et certaines brûlent facilement du fait de leur composition chimique. Elles ont besoin du feu pour se reproduire et persister (nous y reviendrons au deuxième chapitre).

À l'opposé, certaines régions du globe ne sont jamais ou très rarement exposées aux incendies de végétation. L'Antarctique en fait évidemment partie, car ce continent est couvert de glace en permanence. Ces régions représentent environ 20 % des terres émergées. Le feu ayant besoin d'un climat favorable,

d'ignitions (naturelles ou anthropiques) et de végétation combustible pour s'allumer, si aucun incendie ne s'est déclaré pendant des décennies, cela doit logiquement correspondre à la combinaison d'un climat défavorable et de l'absence d'ignitions ou de végétation combustible. Ces conditions sont notamment rencontrées dans les territoires de hautes latitudes (pôle Nord, pôle Sud) et dans les contrées désertiques froides (steppes du Tibet, Kazakhstan, Iran, etc.). En effet, ces régions sont soumises à des limitations multiples : températures basses, absence de végétation, densité humaine très faible. Des conditions très défavorables à l'ignition et à la propagation des feux règnent aussi dans les étendues désertiques arides et chaudes (tropicales ou subtropicales comme le Sahara).

Les ignitions et les feux sont aussi rares (mais pas totalement absents) dans les zones tropicales humides et chaudes : l'humidité y limite l'ignition et la densité humaine y est très faible. La végétation y est suffisante, mais elle est souvent trop humide pour propager le feu. Dans ces régions, la vitesse de propagation et l'intensité des feux, une fois allumés, sont très réduites. À l'échelle du globe, l'activité des feux est maximale dans les zones où la biomasse et le climat sont intermédiaires : ni trop secs, ni trop humides, avec une biomasse végétale moyenne.

Un monde sans feu : à quoi ressemblerait la végétation en l'absence de feux ?

Il est communément admis que le type de végétation terrestre qui s'installe dans une région dépend principalement du climat, c'est-à-dire des températures et de la pluviométrie. En conséquence, des types d'écosystèmes similaires s'épanouissent sous un même type de climat : les forêts, les savanes, les déserts et les végétations herbacées correspondent ainsi à des climats spécifiques.

Cependant, selon l'hypothèse de Williams Bond, de l'université du Cap, en Afrique du Sud, le climat n'est pas le seul facteur capable de déterminer la végétation autour du globe. Le feu l'est tout autant ! Au moins 40 % de la surface du globe est recouverte par des écosystèmes gouvernés par le feu : les

prairies, les savanes, les végétations méditerranéennes et les forêts boréales. Dans ces biomes, le feu agit comme un animal herbivore : il réduit la biomasse, et quand son activité est fréquente, les arbres sont remplacés par des buissons ou des herbacées.

Le feu se combine donc au climat pour transformer la végétation. C'est notamment le cas dans des régions dominées par des herbacées et des buissons dans lesquels subsistent des arbres. On peut aussi observer que les arbres deviennent dominants quand il y a une exclusion de feu dans les savanes. Les scientifiques ont donc essayé de comprendre à quoi ressemblerait la végétation de notre planète en l'absence totale de feux. Au cours de leur étude, ils se sont posé la question suivante : comment serait distribuée la végétation du globe si on éliminait tous les feux ? Ils ont fait tourner des modèles simulant la croissance de la végétation et le climat sur plusieurs décennies.

Les résultats montrent que les régions humides dominées par les herbacées (savanes et prairies) en Amérique du Sud et en Afrique du Sud évoluent vers des forêts, alors qu'elles sont actuellement couvertes d'herbes représentant une faible biomasse, du fait de la répétition annuelle des feux. En l'absence de feux, les forêts fermées denses occuperaient deux fois plus de surface dans les régions froides, aux dépens des herbacées et des buissons. Les herbacées se sont répandues sur le globe il y a 6 à 8 millions d'années, bien longtemps avant que l'homme n'influence les régimes de feux. Ces résultats suggèrent donc que le feu est un facteur majeur de l'expansion des herbacées dans les zones forestières. Il a clairement conduit à l'installation de deux types d'espèces au fil du temps : celles tolérantes au feu (les herbacées, les buissons) et celles globalement intolérantes au feu (les arbres).



LES CONSÉQUENCES DES FEUX : BONNES OU MAUVAISES ?

Le feu est un aléa et un risque qui peut causer des dommages variés – parfois irréversibles – aux personnes et aux biens, comme les maisons ou les infrastructures. Comme tel, il est combattu par les pompiers dans presque tous les pays. Mais les feux sont nécessaires – voire indispensables – dans certains environnements pour favoriser les usages agricoles, et ils contribuent au maintien de la diversité des paysages et des espèces qui leur sont adaptées. Nous verrons également que les feux « dirigés » par l'homme sont utiles pour limiter les feux futurs, en diminuant la biomasse végétale. Ailleurs, ils sont utilisés pour cultiver dans les zones forestières, et ils participent ainsi à la fragmentation des écosystèmes et des habitats à forte biodiversité, ce qui est potentiellement préjudiciable. Les feux de végétation concourent aussi fortement aux émissions de CO₂ et à l'émission de particules affectant la qualité de l'air et le climat régional ou global.

Quels sont les « bons » et les « mauvais » usages des feux ? Ce chapitre montrera que le feu n'est pas tout bon ou tout mauvais, et que les espèces animales ou végétales peuvent avoir des liens particuliers avec cette perturbation.

QU'EST-CE QUE LE RISQUE INCENDIE ?

Les incendies de forêt et de milieux naturels font partie des grands aléas naturels qui se produisent autour du globe, au même titre que les avalanches, les tsunamis, les inondations, les séismes, les cyclones et les canicules. Tous ces phénomènes naturels sont une source de danger pour les écosystèmes, pour l'homme ou pour les infrastructures qu'il construit, ces éléments (humains, bâtiments, écosystèmes, etc.) étant appelés les « enjeux ».

Chaque aléa peut être caractérisé par son intensité ou sa puissance : dans le cas des incendies de forêt, les événements sont souvent classés par leur vitesse de propagation, leur surface et l'intensité de la combustion, notamment quand on s'intéresse aux méga-feux (voir le quatrième chapitre). Pour un aléa donné, on peut calculer dans une région donnée une *durée de retour*, qui décrit la durée moyenne pour que l'aléa se reproduise au même endroit. Cette information permet de dimensionner les moyens nécessaires pour éviter un nouvel aléa et pour réduire le risque. Le risque incendie de forêt prend ainsi en compte à la fois l'aléa (avec sa fréquence et sa durée de retour) et la vulnérabilité des enjeux à protéger. Le risque est fort si l'aléa est fréquent et l'enjeu important, mais il est relativement faible s'il y a peu d'enjeux à protéger.

Chaque aléa est contrôlé par des facteurs clés qui se combinent pour créer le danger. Comme nous l'avons déjà mentionné, dans le cas des feux de végétation, ce sont le climat (ou la météo sur un temps court), la végétation (qui sert de combustible) et les actions humaines (et la foudre) qui créent des départs de feux (figure 1). Ces trois facteurs sont fortement liés dans l'espace ou dans le temps : le climat conditionne le type de végétation (les espèces en présence) et sa biomasse dans une région donnée ainsi que son état de sécheresse à un instant donné. La végétation détermine pour une bonne part le comportement du feu, en interaction avec la météo du jour (température, humidité, vitesse et direction du vent). L'homme agit sur le climat à long terme. Il est aussi le principal facteur d'allumage des feux, et il gère et modifie l'occupation du sol et les paysages végétaux, par exemple en plantant des espèces résineuses ou en débroussaillant les buissons. Enfin, il est responsable de la majeure partie des enjeux à protéger, maisons et infrastructures. Des différentes combinaisons de ces trois facteurs clés, fortement interdépendants, naissent des régimes d'incendie variés, caractérisés par des feux de fréquences, de tailles et d'intensités différentes.

LES FEUX, ACTEURS DE LA BIODIVERSITÉ ET DU FONCTIONNEMENT DES ÉCOSYSTÈMES

Le feu est souvent présenté comme un agent destructeur, n'ayant que des conséquences négatives pour les écosystèmes affectés. Dans cette perspective, il représente un ennemi à éradiquer de nos paysages, et il s'agit de le combattre avec un maximum d'efficacité et de moyens ! Cette vision est toutefois biaisée, puisqu'elle ignore le rôle déterminant du feu dans le fonctionnement et la résilience d'un très grand nombre d'écosystèmes différents sur la planète. En réalité, les feux font partie du fonctionnement intrinsèque de ces écosystèmes.

Comment le feu peut-il contrôler l'installation des plantes dans une zone climatique, et comment la végétation peut-elle à son tour contrôler les incendies ? L'étude des frontières géographiques parfois très tranchées entre une végétation hautement inflammable et une végétation moins inflammable, en témoignant des équilibres entre le feu et la végétation, permet de le comprendre. L'exemple des savanes est généralement avancé pour illustrer ces interactions, mais celles-ci existent également dans de nombreux autres écosystèmes.

En Méditerranée, on trouve une végétation sclérophylle (garrigue avec des feuilles épaisses), dominée par des arbustes fréquemment brûlés, en mélange avec des forêts de conifères (pins) ou de feuillus (chênes verts et chênes blancs), moins fréquemment brûlés. Dans de nombreux cas, les facteurs microclimatiques, édaphiques et topographiques n'expliquent pas ces différences de végétation entre deux zones très similaires : il faut avoir recours à l'histoire des feux. En effet, les zones arbustives sont très inflammables et se rétablissent rapidement après un incendie, tandis que les formes végétatives à croissance plus lente, comme les arbres, apparaîtront plus tard. Certaines zones se maintiennent ainsi dans leur forme arbustive par des incendies fréquents.

En revanche, les forêts sont généralement considérées comme moins inflammables ; et lorsqu'un feu arrive, des mécanismes (que nous expliquons plus loin) permettent une régénération végétale rapide après lui, ces zones conservant ainsi un type

d'écosystème identique à ce qu'il était avant l'incendie. Ainsi, le feu et la végétation sont impliqués dans des boucles de rétroaction qui tendent à stabiliser le type de végétation présent.

Ces rétroactions entre feu et végétation, et leurs rôles dans le maintien de la biodiversité, peuvent être bouleversées soit par une augmentation de la fréquence ou de l'intensité des feux, soit, au contraire, par une longue période sans feu (on parle alors de « déficit de feu »). Prenons un exemple emblématique pour illustrer les effets, parfois négatifs, d'un déficit de feu sur les écosystèmes : les forêts de l'Ouest américain. Ce cas met en exergue les effets inattendus d'une politique de suppression des feux sur la résilience des forêts typiques de séquoias géants, dont les plus beaux spécimens dépassent 80 m de hauteur. Cette espèce est bien adaptée aux feux grâce à différents mécanismes qui permettent aux plus gros individus adultes de résister au passage de feux de faible intensité : ils s'entourent d'une écorce épaisse et leur feuillage est placé en hauteur, loin des flammes basses. En outre, les graines sont libérées par le feu et leur dispersion survient au moment où le sol est idéal pour leur germination, les protégeant d'une couche de cendres ; les jeunes séquoias se développent donc après le passage du feu.

La suppression systématique des incendies dans ces écosystèmes durant une grande partie du xx^e siècle est venue perturber ces équilibres. L'allongement moyen de la période entre deux incendies a en effet permis le développement d'un grand nombre d'individus à la fois d'espèces concurrentes, mais aussi de la même espèce. La végétation s'est donc multipliée au niveau du sol et dans les strates intermédiaires, ce qui a conduit à une plus grande continuité verticale et horizontale de la biomasse. Résultat : les risques de feux de forte intensité sont montés en flèche, ce qui a eu pour effet d'augmenter la mortalité des arbres adultes lors de passages des feux, et a mis en péril le renouvellement de la banque de graines entre deux passages de feux ! Le passage régulier du feu joue donc un rôle important dans le renouvellement des séquoias : il protège les individus adultes d'événements moins fréquents mais potentiellement destructeurs, et il permet le renouvellement des individus en favorisant la germination et le développement

des jeunes individus. Les autorités organisent à présent des passages réguliers au lance-flammes.

LES STRATÉGIES DES PLANTES FACE AU FEU : ÉVITER, RÉSISTER OU TOLÉRER

La dynamique de végétation post-feu est fonction des stratégies de résistance et de régénération des espèces face à cette perturbation. Dans la catégorie des plantes dites « évitantes », se trouvent celles qui ont pour stratégie de ne pas générer de feux, et qui présentent donc les caractéristiques morphologiques et physiologiques des plantes dites « non inflammables » présentées au chapitre précédent, car elles ne possèdent pas de stratégies de résistance ou de régénération. Pour les plantes inflammables, deux stratégies sont possibles. Les plantes dites « résistantes » ont développé la capacité de protéger leurs tissus (feuilles ou bois/vaisseaux) de la combustion ou des fortes températures. Le chêne-liège, avec sa couche de liège isolante enveloppant tronc et branche, est un exemple emblématique des espèces résistantes dans les écosystèmes méditerranéens. Une autre stratégie consiste à posséder des organes souterrains (racines, bourgeons ou graines) qui résistent au feu, tandis que les tissus au-dessus du sol sont mortellement brûlés. Les plantes dites « tolérantes au niveau individuel » se régénèrent à partir de leur système racinaire, en produisant des rejets, et constituent la majeure partie des espèces de garrigues méditerranéennes. On différencie les rejets de souche, comme l'arbousier ou la bruyère, des rejets sur les troncs calcinés (eucalyptus). Les rejets de souche sont facilités par des organes souterrains de différentes structures. Les organes ligneux, comme les racines tubéreuses ou les stolons, constituent autant de stratégies souterraines permettant de survivre aux fortes températures générées par les flammes au-dessus du sol, mais fortement atténuées même à faible profondeur (au-delà de 10 cm).

Si les espèces ne possèdent pas de telles capacités de régénération, elles peuvent produire des graines qui survivent à l'incendie. Ce sont les plantes « tolérantes au niveau de la population ». La taille

des graines, l'épaisseur de leur péricarpe (enveloppe externe) et leur pubescence pilotent leur dormance, leur résistance à la combustion et leur levée de dormance ou leur sensibilité à la chaleur. Le ciste de Montpellier, par exemple, est une espèce commune des garrigues méditerranéennes. Il ne possède pas d'organe souterrain pour produire des rejets, mais a développé une stratégie de régénération par des graines qui ont une durée de vie longue (plusieurs décennies) et la capacité de rester en dormance (donc ne pas germer) pendant de nombreuses années dans le sol. Le péricarpe de ses graines est en effet suffisamment épais pour bloquer son oxygénation, donc son activité métabolique. Le feu, par sa température, permet une altération du péricarpe qui induit une oxygénation et une hydratation soudaine de la graine. Le feu lève ainsi la dormance des graines et active leur germination, ce qui fait apparaître un tapis de centaines de pousses lors des premières pluies après l'incendie.

Les gaz oxydatifs ou les acides contenus dans les fumées générées par les incendies agissent aussi comme un stimulant significatif de certaines graines. La sérotonine est une stratégie particulière aux résineux, bien adaptée aux feux, qui permet de produire des cônes renfermant les graines dans une résine qui fond lors des fortes chaleurs générées par les incendies, puis libère les graines. En l'absence de ces stratégies, certaines espèces peuvent rapidement coloniser un milieu incendié par dispersion des graines à partir des individus situés en pourtour du feu (ou dans des îlots non brûlés). Elles sont considérées comme « tolérantes au niveau du paysage ». Même si les individus et leurs graines sont détruits dans la zone incendiée, les stratégies de dissémination et de germination de ces espèces en milieu ouvert sont suffisamment efficaces pour la recoloniser rapidement.

Un gradient de stratégies existe donc parmi les espèces végétales confrontées au feu, certaines combinant à la fois les stratégies de tolérance au niveau des individus, des populations et des paysages. Si les résineux sont plutôt tolérants au feu avec leur stratégie de régénération par graine et la sérotonine de leurs cônes, les espèces comme les chênes seront plutôt résistantes ou tolérantes par leur stratégie de régénération

par rejet de souche. Le pin des Canaries est la seule espèce méditerranéenne combinant les deux stratégies. En l'absence d'au moins une de ces stratégies, les espèces sont éliminées de l'écosystème dès le premier passage du feu. Tout le danger d'un premier feu dans un écosystème historiquement épargné par cette perturbation (forêt tropicale humide par exemple) réside donc dans l'incapacité de ses espèces à résister ou à se régénérer (elles ont investi dans des stratégies différentes comme la compétition pour la lumière).

Dans le cas d'écosystèmes soumis à des incendies successifs à répétition, un point critique pour les espèces à stratégies de régénération par graine sera la date de maturité après germination, ou la durée de vie de la graine dans le sol. Le modèle simple des « attributs vitaux », utilisé pour simuler les compositions en espèces des écosystèmes soumis à incendies, caractérise donc les espèces par leur stratégie de résistance et de tolérance au feu que nous venons de voir, mais aussi par leur âge de maturité, de mortalité et de pérennité de la banque de graines de sol. Par exemple, si cinquante ans se sont écoulés entre deux feux successifs dans une pinède de pin d'Alep avec un sous-bois de ciste de Montpellier, composition commune en milieu méditerranéen, la recolonisation devrait être rapide à partir de la banque de graines des deux espèces. En revanche, la maturité du pin d'Alep (et donc sa capacité à former des graines viables) n'étant acquise que dix à quinze ans après sa germination, contre trois ou quatre ans pour le ciste de Montpellier, si seulement dix ans se sont écoulés entre les deux feux, seul le ciste de Montpellier recolonisera la zone, le pin d'Alep n'ayant pas eu assez de temps pour arriver à maturité et produire des graines. L'écosystème sera alors bloqué au stade de garrigue tant que de nouvelles graines de pin d'Alep ne seront pas transportées sur la zone par le vent ou par des animaux à partir des individus les plus proches en pourtour de feu.

La taille des incendies et la structure des paysages apparaissent dans ce cas comme un autre facteur critique, les grands incendies répétitifs générant des zones plus lentes à se régénérer du fait de la longue distance à parcourir pour les graines présentes sur les individus matures en bordure d'incendie. En conclusion,

les incendies seront dommageables pour les écosystèmes dont les espèces ne possèdent de stratégies ni de résistance ni de tolérance. Pour les écosystèmes régulièrement soumis à incendies et dont les espèces ont développé un certain nombre de stratégies face au feu, un seul incendie aura rarement un impact négatif fort sur le long terme. Le retour de feu et la taille de ces incendies, éloignant les sources potentielles de graines en périphérie des zones brûlées, seront donc le critère principal de vulnérabilité et de déclenchement des mesures de gestion ou de restauration permettant une résilience accélérée.

Comment les espèces forestières se sont-elles adaptées pour survivre face aux incendies ?

Toutes les forêts dans le monde ont déjà brûlé mais, dans ce registre, ce qui les différencie, c'est leur régime, et notamment la combinaison entre l'intensité du feu qui les parcourt et l'intervalle de temps qui sépare deux feux au même endroit. Cette durée, puisqu'on parle des forêts, est par conséquent d'au moins plusieurs décennies, le temps qu'une forêt, quelle que soit sa composition, forme à nouveau une canopée fermée. Or cet intervalle est parfois de plusieurs siècles, voire se compte en millénaires ! Comment les espèces forestières se sont-elles adaptées pour survivre et perdurer dans le temps face aux incendies ?

L'évolution, par le biais du hasard et de la sélection naturelle, agit sur les espèces : de génération en génération, les individus les mieux adaptés à leur environnement rencontrent un meilleur succès reproducteur que les autres, et ont plus de descendants, ou des descendants plus vigoureux, qui transmettront à leur tour ces adaptations. Chaque adaptation que l'on observe aujourd'hui est donc, au départ, le résultat d'une mutation aléatoire dans le génome, voire d'une série de mutations qui ont été sélectionnées parce qu'elles se sont révélées efficaces pour que l'individu ou ses descendants se maintiennent dans l'environnement, et que l'espèce perdure.

Les incendies existent depuis que les plantes vasculaires sont apparues sur Terre. Ils constituent l'un des processus les plus perturbants au sein des écosystèmes. À ce titre, ils ont

été et sont encore une force de sélection. Pour comprendre comment les espèces forestières se sont adaptées aux incendies, classons les différentes forêts à l'aide d'un gradient croissant, depuis celles où les feux sont peu intenses et très rares, en passant par celles où les feux sont peu intenses mais un peu plus fréquents, puis par celles où les feux sont intenses et peu fréquents, jusqu'à atteindre l'autre extrémité du gradient, où les forêts sont soumises à des feux qui sont à la fois intenses et relativement fréquents. Illustrons chaque classe de ce gradient avec des types de forêts, et regardons quelles adaptations ont été sélectionnées par les espèces qui les composent.

Les feux peu intenses et rares

Cette première classe du gradient définit parfaitement le régime des feux des forêts tropicales humides en conditions naturelles. La densité d'arbres très élevée et la présence d'une canopée fermée et multistratée maintiennent un microclimat humide en sous-bois, qui favorise la décomposition rapide des débris végétaux en matière organique et son assimilation dans les horizons minéraux du sol. Ainsi, le sol de ces forêts n'est recouvert que d'une faible quantité de combustible non décomposé, et fortement humide ; ces deux facteurs sont un frein efficace à la propagation du feu de surface, qui s'éteint très rapidement après avoir pénétré dans le sous-bois sur quelques dizaines de mètres. En effet, faute d'une chaleur dégagée suffisante pour enflammer les combustibles de proche en proche, le feu s'arrête !

Dans le passé, à l'échelle de quelques millénaires, ces conditions naturelles ont été très rarement modifiées, seulement lors d'épisodes extrêmement secs qui ont pu changer le microclimat en sous-bois et provoquer quelques incendies, *a priori* peu intenses. Or le fait que plusieurs générations d'arbres d'une même espèce se soient chaque fois succédé au même endroit entre deux incendies n'a pas été un facteur favorable pour maintenir et promouvoir dans la population une mutation particulière, comme une écorce un peu plus épaisse que la normale et donc un peu mieux isolante. Ainsi, les espèces végétales qui composent les forêts tropicales humides ne présentent aucune

adaptation efficace pour résister à des feux, même peu intenses. En cas de feu, les individus en place meurent par échauffement de la base de leur tronc et de leurs racines aériennes, et seules les graines des arbres en dehors de la zone brûlée peuvent permettre une régénération forestière, si le milieu n'est pas colonisé par les herbacées entre-temps. C'est d'ailleurs l'un des problèmes majeurs des activités liées à l'agriculture en bordure des forêts en milieu tropical, car même les effets indirects (par exemple, l'ouverture du paysage et le nettoyage des zones coupées par le feu pour préparer les futures cultures) fragilisent les parcelles forestières par leurs lisières (voir l'encadré 4).

Les feux peu intenses mais plus fréquents

Cette deuxième classe du gradient s'applique à différents types de forêts. Il s'agit toujours de feux de surface, mais ces forêts produisent plus de combustible, qui s'accumule peu à peu au sol et dont l'humidité, au moins dans la litière, peut être suffisamment faible pour entretenir la propagation du feu une fois allumé. Dans ces forêts, l'espace situé entre la surface du sol et la cime des arbres est souvent dépourvu de combustible, car il n'y a pas ou trop peu de buissons et surtout pas de branches basses, facteurs qui, ensemble, assureraient le continuum vertical permettant aux flammes de monter jusque dans la cime.

L'absence de branches basses résulte de l'autoélagage pendant la croissance verticale des arbres, une capacité commune à de nombreuses espèces grâce à laquelle elles économisent de l'énergie. En effet, les feuilles des branches basses, à l'ombre des plus hautes (branches du même arbre ou des arbres voisins), ne réalisent plus une photosynthèse optimale, tout en nécessitant des flux de sève. L'individu qui les conserverait serait donc doublement désavantagé dans la compétition pour la lumière. Cette adaptation physiologique est devenue une adaptation au feu pour les espèces qui en bénéficient, car une cime très haute est à l'abri des flammes qui se propagent au sol, et la chaleur dégagée lors de la combustion n'est souvent pas assez importante pour endommager le feuillage en hauteur. En général, cette adaptation est associée à une écorce suffisamment épaisse qui sert d'isolant et protège le cambium (la zone de tissus

vivants juste sous l'écorce) des fortes températures pendant le passage des flammes.

L'association de ces deux adaptations (cime élevée et écorce épaisse) se retrouve dans les forêts de séquoias, comme nous l'avons vu, mais aussi dans les forêts qui couvrent les îles des nombreux lacs en zone boréale : par sa surélévation, l'île attire la foudre et concentre donc plus d'impacts de foudre que sur les terres autour du lac, donc les sources d'allumage ne manquent pas. Si, à ces allumages, vous ajoutez un environnement rocailleux ou sablonneux, où le combustible peut s'assécher plus facilement que dans la forêt autour du lac, alors les conditions sont réunies pour que des feux s'allument assez fréquemment et qu'ils se propagent au sol. En revanche, la superficie de l'île, somme toute restreinte dans la plupart des cas, permet rarement à l'incendie de se développer en feu de cime. Par conséquent, les essences forestières se sont adaptées à de telles conditions : les individus survivent en général à plusieurs feux successifs, avec au pire une cicatrice de feu au niveau du tronc, dans la zone où le cambium a été tué au moment du passage de la flamme (voir le troisième chapitre). Pour que ces espèces perdurent et que les cohortes se renouvellent, il faut, occasionnellement, que se produise un incendie beaucoup plus intense qui tue les individus en place et ouvre le milieu ; la régénération, issue de graines dans le sol et produisant la cohorte suivante, peut alors démarrer.

Les forêts tropicales sèches sont un autre exemple de cette catégorie de forêts, en raison d'une saison sèche de plusieurs mois et de la proximité des savanes qui, quant à elles, brûlent très fréquemment. Dans ces forêts, les espèces qui ne présentent pas d'écorce suffisamment épaisse pour résister au passage du feu ont développé un autre type d'adaptation : le rejet sur souche. La reprise de croissance post-incendie se traduit alors par l'apparition rapide de nouvelles tiges (souvent plusieurs) à la base du tronc qui a brûlé et dont la cime a été tuée. Cette régénération sur souche est possible car la plupart de ces espèces, ayant un feuillage caduc (toutes les feuilles se détachent et tombent sur le sol en très peu de temps), ont renvoyé leurs réserves carbonées des branches vers les racines avant la chute des feuilles

au début de la saison sèche. Les réserves peuvent donc servir à produire de nouvelles tiges, dont l'apparition est déclenchée par l'arrêt d'inhibition, une autre sorte de levée de dormance que le tronc principal imposait tant qu'il était en vie. Ces nouvelles tiges croissent rapidement en hauteur afin de porter des feuilles qui, en réalisant la photosynthèse, permettront à leur tour de stocker à nouveau des réserves carbonées dans les racines, au cas où... On peut donc voir les individus de ces espèces et leurs tiges comme des individus clonaux.

Les feux intenses et peu fréquents

Cette troisième classe du gradient définit bien le régime des feux de cime qui caractérisent plusieurs types de forêts dans le monde, par exemple les forêts boréales d'épinettes noires, de pins gris, de mélèzes, ou encore les pinèdes méditerranéennes. Elles ont besoin des feux, souvent de cime (donc très intenses), pour perdurer. En effet, dans ces forêts, les charges de combustibles au sol sont très importantes et/ou inflammables, et l'énergie dégagée par le feu de surface naissant transforme rapidement celui-ci en feu de cime.

Ainsi, les arbres meurent généralement sur toute leur hauteur lors du passage du feu. L'adaptation, et donc la survie de l'espèce, réside dans le fait que les cônes, suspendus aux branches, restent fermés tant qu'ils ne sont pas échauffés ! C'est la sérotinie, que nous avons déjà évoquée. Pendant l'incendie, les graines dans les cônes sont protégées de l'échauffement, mais le processus d'ouverture s'enclenche car la fermeture thermolabile a disparu. Par gravité, les graines tombent au sol quelques jours ou semaines plus tard. L'intensité du feu ayant brûlé tous les combustibles au sol, y compris la litière, les conditions de germination sont alors optimales pour les graines libérées, qui produiront les individus de la cohorte forestière suivante.

Dans ces conditions, les peuplements forestiers sont équiens, c'est-à-dire que les arbres ont le même âge, puisqu'ils sont apparus à la suite du même feu. Les espèces qui ne se reproduisent que par voie sexuée, donc par graines, comme les pins, sont dépendantes de l'ouverture des cônes. Ces espèces



se sont donc adaptées non seulement à l'intensité des feux, mais aussi à leur fréquence. Ainsi, dans les régions où les feux sont fréquents, les pins gris par exemple deviennent matures rapidement (en vingt ans environ) et ne présentent que des cônes sérotineux, alors que dans les régions où les feux sont beaucoup moins fréquents, la sérotonie n'est pas complète. C'est pourquoi, même si aucun feu ne passe sur le site en plus d'un siècle, les vieux individus mourront de vieillesse et non d'un feu ; mais leurs cônes, ni tous fermés, ni complètement fermés, au gré des vents et des chaudes journées estivales, auront pu laisser tomber quelques graines qui permettront à de nouveaux individus d'apparaître. Ces peuplements seront alors constitués d'arbres d'âges variés. D'autres espèces, comme l'épinette noire au Canada, ont trouvé un compromis dans leur adaptation au feu. Il faut dire que, contrairement au pin gris, l'épinette noire présente des branches sur toute la hauteur du tronc, et donc expose tout son feuillage aux flammes. Elle se développe également sur des substrats beaucoup plus humides que le pin gris. Comme ce dernier, elle possède donc des cônes ; mais les siens sont semi-sérotineux (un peu fermés... mais pas trop, et pas tous) au cas où l'intervalle de temps entre deux feux serait trop long pour permettre la régénération. En outre, elle peut se régénérer végétativement par marcottage (*via* une branche basse latérale prenant racine) au cas où l'intervalle de temps entre deux feux dépasserait deux cents ans.

Les feux intenses et très fréquents

Cette quatrième et dernière classe du gradient définit bien le régime des feux des forêts méditerranéennes. À l'image du carrefour que symbolise souvent la région méditerranéenne en matière de climat, d'histoire et de langues, les forêts, elles aussi, sont un milieu carrefour en matière d'adaptation au feu, puisque nous y retrouvons à peu près tous les types d'adaptations au feu. Le chêne-liège, avec son écorce démesurément épaisse, résiste à l'échauffement lors du passage de la flamme, mais peut aussi faire des rejets sur souche ou sur tronc, comme les autres chênes (chêne kermès et chêne vert), dont les écorces sont moins isolantes. À l'autre extrémité du

gradient d'adaptation se situent les conifères, et notamment le pin d'Alep, qui est l'espèce la plus fréquente. Il possède, nous l'avons dit, des cônes sérotineux s'ouvrant seulement après le passage du feu. Germant sur un sol décapé (litière brûlée) et sans compétiteurs, les graines produiront les individus de la nouvelle cohorte de pins d'Alep.

ENCADRÉ 4. MADAGASCAR, L'ÎLE DU FEU

On dénomme souvent Madagascar « l'île du feu » du fait de la densité énorme des dépôts de feux quotidiens et de leurs fumées, qui sont visibles depuis l'espace. Cette île, grande comme la France, la Belgique et le Luxembourg réunis, est régulièrement brûlée, malgré son statut de « point chaud de biodiversité exceptionnel » à l'échelle mondiale. Située face à l'Afrique (plus précisément, au Mozambique), l'île est brûlée quotidiennement par des centaines de feux. Son régime ressemble à celui des pays africains les plus proches, comme le Mozambique. Les feux sont allumés sur l'île tout au long de l'année en fonction du climat et des activités humaines : ils démarrent doucement dans l'ouest au printemps, puis se déplacent vers l'est en été, et finissent par apparaître tout autour de l'île pendant le reste de l'année. Le feu est particulièrement présent dans les savanes, qui occupent la plus grande partie de l'île. On l'allume pour nettoyer la végétation (feux dits « tavy »), éliminer les buissons épineux, fertiliser le sol, préparer des zones de pâturage ou tuer les parasites.

Si le feu est utile au maintien d'espèces végétales dans certaines régions du globe comme la Méditerranée, ici il menace souvent les forêts tropicales, exceptionnellement riches et rares, de l'île. On fait souvent démarrer le feu en bordure de forêt, qu'il « grignote ». Après quelques semaines de culture ou de pâturage, les paysans se déplacent un peu plus loin pour recommencer. Cela aboutit à un mitage du paysage forestier, qui devient moins riche en biodiversité que la forêt fermée originelle.

La situation sur le front des incendies semble insoluble : malgré un siècle de répression des feux par les autorités, les agriculteurs et les éleveurs continuent de brûler environ la moitié des savanes et des bois de l'île chaque année. Il existe, comme dans d'autres régions du monde, une véritable incompréhension entre l'État, qui interdit les feux, et les paysans, qui en ont besoin quotidiennement pour leur subsistance. En effet, l'État a criminalisé les incendies, craignant que le feu détruise les ressources naturelles de l'île et bloque le



développement, notamment touristique. Dans le même temps, de nombreux paysans comptent sur le feu pour entretenir les pâturages et les forêts, préparer les champs cultivés, lutter contre les ravageurs et gérer les incendies de forêt, parfois au prix de la disparition de forêts exceptionnellement riches.

Ce conflit interminable se traduit par des hectares incendiés par les paysans pour de bonnes ou moins bonnes raisons : ils brûlent pour gérer les bois et forêts pyrophytes, y compris les forêts de tapia endémique et les plantations exotiques de pins et d'eucalyptus. Le feu est aussi un outil de pouvoir et de conflit. On observe ainsi que les périodes de crises politiques correspondent aux périodes de plus forte activité.

Érosion, fragmentation et déforestation dues au feu

Utile au maintien des espèces végétales dans de nombreuses régions du globe, le feu est aussi parfois néfaste, comme à Madagascar (voir l'encadré 4), et plus généralement dans les forêts tropicales humides (voir l'encadré 5), où il est responsable de la dégradation des forêts, alors qu'il s'agit de régions à la biodiversité très riche.

ENCADRÉ 5. ÉROSION, FRAGMENTATION ET DÉFORESTATION DANS LES FORÊTS TROPICALES HUMIDES

Les forêts tropicales humides sont réparties dans toutes les zones équatoriales du globe : Amérique centrale, Amérique du Sud, Afrique, Asie et Australie. Elles concentrent plus de la moitié de la biodiversité terrestre mondiale. Cette biodiversité est pour partie due à l'humidité (1 500 à 4 000 mm de pluie par an !) et à la chaleur, qui sont propices à la diversification des espèces végétales et animales. Ces conditions météorologiques sont clairement défavorables à l'ignition et à la propagation des feux de forêt. Pourtant, on observe qu'ils augmentent en taille et en fréquence dans les régions tropicales depuis plusieurs décennies. Une partie de cette augmentation est liée aux changements climatiques, mais une autre partie est liée aux feux eux-mêmes ! Pratiqués quotidiennement, ils érodent la lisière des forêts humides et créent ainsi un microclimat plus chaud et sec. Ils constituent des perturbations écologiques qui, au-delà de

la déforestation, dégradent de vastes régions de forêt sur pied, diminuant les services écosystémiques et le potentiel économique de ces ressources naturelles. Dans la plupart des cas, les forêts tropicales humides sont brûlées pour installer des cultures (soja, maïs, canne à sucre, vanille, riz, etc.). Les feux allumés pour brûler la forêt humide sont généralement petits et peu intenses, du fait des conditions météorologiques défavorables. Il s'agit donc d'un processus sur le moyen terme : les petits feux répétés altèrent la composition et la structure forestière.

La plupart des arbres des forêts tropicales se régénèrent difficilement après des feux répétés. Même les feux de surface développés dans la litière humide des arbres, peu intenses, réduisent les banques de graines du sol et de la litière de 60 à 85 %. Cela limite fortement la régénération naturelle de la forêt. Les îlots forestiers imbrûlés (qui ont échappé au passage du feu) sont les seules zones à partir desquelles la régénération forestière peut s'opérer sur le long terme. Le feu exerce un deuxième effet sur la forêt tropicale humide : en fragmentant les grandes forêts en petits îlots forestiers résiduels, il modifie le climat local. Celui-ci devient plus sec et plus favorable à l'installation d'espèces pionnières très compétitives pour la forêt tropicale humide. Ces forêts dites « secondaires » sont souvent très inflammables. Si ce cycle de fragmentation/ouverture se produit très fréquemment, on aboutit à des végétations de savane boisée qui accélèrent le processus de remplacement de la forêt par des milieux ouverts, secs, et inflammables. Face à cette fragmentation et à la déforestation, une stratégie consiste à développer dans ces forêts humides une agriculture durable. Ces forêts sont à la fois le domaine d'une biodiversité remarquable, mais aussi des puits de carbone au niveau global : en absorbant le dioxyde de carbone contenu dans notre atmosphère, les forêts tropicales humides permettent de ralentir les changements climatiques en cours.

Les feux en forêts tropicales humides sont aussi des sources importantes d'émission de carbone vers l'atmosphère. Affectant la santé de millions de personnes, les émissions nettes des feux de forêt pourraient avoir libéré l'équivalent de 41 % de l'utilisation mondiale de combustibles fossiles en 1997-1998. Ce serait l'épisode El Niño (un courant océanique chaud entraînant des sécheresses) le plus intense de la seconde moitié du xx^e siècle. Affectés épisodiquement par des événements El Niño plus sévères du fait des changements climatiques, les feux de forêts tropicales augmenteront à mesure que les forêts seront ouvertes et endommagées.

CYCLES BIOGÉOCHIMIQUES ET INCENDIES

Les incendies, par le processus de combustion, agissent de manière significative sur les cycles biogéochimiques et les interactions entre la biosphère et l'atmosphère. Leur impact majeur et leurs conséquences directes et immédiates sont les émissions de gaz et de particules fines dans l'atmosphère, qui affectent la visibilité (particulièrement importantes pour les transports humains, entraînant les fermetures partielles de certains aéroports pendant des événements extrêmes) et surtout la santé humaine, notamment comme source de problèmes respiratoires. Ainsi, 3,6 millions de tonnes, ou 3,6 téragrammes (Tg) de particules fines, dont la taille est inférieure à 2,5 µm, sont émises par les feux de végétation en moyenne chaque année dans l'atmosphère, soit l'équivalent des émissions par les transports et l'industrie, l'énergie et l'usage domestique. Les feux de savane émettent 2,0 Tg de particules fines, ceux liés à la déforestation 0,58 Tg, les feux de tourbière 0,12 Tg et enfin les feux agricoles 0,17 Tg. L'Europe ne représente que 0,011 Tg d'émissions de particules fines. À ces particules sont associés des éléments gazeux comme le monoxyde de carbone CO (351 Tg), le méthane CH₄ (15,66 Tg), le carbone graphite (1,837 Tg), les monoxydes d'azote NO_x, précurseurs de réactions chimiques de synthèse d'ozone (14,24 Tg), ainsi que NH₃ (4,201 Tg), N₂O (0,920 Tg) et le dioxyde de soufre SO₂ (2,317 Tg), aux multiples impacts sur la qualité de l'air et la chimie de l'atmosphère. En ce sens, les incendies ont des conséquences locales directes, importantes et négatives pour les populations humaines et les animaux en général.

Dans une perspective d'effets à plus long terme, les incendies émettent aussi 7,24 milliards de tonnes (pétagrammes, Pg, soit 1 000 téragrammes) de CO₂ dans l'atmosphère, et contribuent ainsi à l'augmentation de la concentration atmosphérique de ce gaz à effet de serre agissant sur le réchauffement climatique. 4,78 Pg sont émises annuellement par les incendies de savane avec 3,78 Pg pour la seule Afrique. L'Europe ne représente que 0,03 Pg de CO₂. La déforestation contribue à 1,05 Pg, les feux de tourbière à 0,22 Pg et les feux agricoles à 0,43 Pg.

À titre de comparaison, l'Europe émet chaque année 3,7 Pg de CO₂ par la combustion des énergies fossiles.

Exprimées en carbone (C), les émissions annuelles par les incendies au niveau global sont estimées à 2,13 Pg, dont 1,057 Pg en Afrique et 0,007 Pg en Europe. Les savanes contribuent à 1,38 Pg, les forêts boréales à 0,172 Pg, la déforestation à 0,315 Pg, les feux de tourbière à 0,074 Pg et les feux agricoles à 0,131 Pg.

La différence majeure entre les émissions de carbone sous forme de CO₂ et les particules fines ou bien les autres composés chimiques est que le C du CO₂ est partiellement récupéré par la végétation pendant la photosynthèse et durant la reconstitution de biomasse après les incendies. La photosynthèse globale annuelle est estimée à 121,6 Pg de C par an. Mais attention, cet énorme flux de carbone capté par la végétation est systématiquement associé à un flux sortant vers l'atmosphère de 60 Pg, dû à la respiration (dite « autotrophe », car les cellules des plantes vivantes respirent). De plus, les écosystèmes émettent 60 Pg de C dans l'atmosphère chaque année, générés par la décomposition chimique ou biologique (par les herbivores, la microfaune du sol ou les bactéries) de la matière organique morte (feuilles mortes, troncs morts) que l'on appelle « flux de respiration hétérotrophe ».

La particularité des flux de carbone associés aux incendies est que le carbone assimilé par la photosynthèse et stocké dans la biomasse des plantes et des sols pendant des dizaines, voire des centaines d'années, peut être émis dans l'atmosphère en quelques jours. Inversement, une année donnée, les émissions de carbone pendant les incendies mettront plusieurs décennies à être captées dans la biomasse. Le bilan carbone d'un écosystème est donc fonction de son temps passé depuis la dernière perturbation. On notera aussi que les valeurs indiquées pour les émissions de carbone pendant les incendies sont issues de la combustion de la biomasse uniquement. Mais, si la combustion consomme en moyenne 90 à 100 % de la biomasse foliaire, elle consomme seulement 10 à 50 % de la biomasse de

bois, laissant ainsi une grande quantité de biomasse morte sur site après un incendie.

Les paysages forestiers incendiés sont en effet souvent composés de troncs superficiellement carbonisés encore sur pied et de débris au sol. Cette biomasse morte, lentement décomposée après l'incendie, constitue un flux supplémentaire de carbone vers l'atmosphère par le processus de décomposition pendant plusieurs années. Les incendies agissent donc comme une source de carbone importante vers l'atmosphère pendant leur propagation, et par la suite avec des émissions de carbone issues de la décomposition des débris, alors que les zones incendiées agissent en même temps comme un puits de carbone pendant des décennies durant la phase de croissance du couvert végétal et de la reconstitution des stocks de carbone du sol. Les chiffres impressionnants des émissions de CO_2 pendant les incendies doivent donc être modérés par le puits de carbone que ces incendies vont générer pendant les années et les décennies suivantes, voire des centaines d'années.

En milieu méditerranéen, les stocks de carbone des sols sont faibles (< 50 t/ha) en raison, d'une part, des températures élevées et des hivers humides, qui favorisent la décomposition des débris, d'autre part, de la croissance des buissons ou des arbres, qui atteignent leur maximum respectivement dix ans et cent cinquante ans après un incendie environ. On peut donc estimer que l'impact d'un incendie sur le puits de carbone durera au maximum cent cinquante ans. Il peut prendre beaucoup plus longtemps dans les systèmes boréaux, où les stocks de carbone des sols, parfois soumis à combustion lente comme dans les tourbières, sont énormes (> 300 t/ha), en raison des faibles températures limitant l'activité microbienne et de la croissance des arbres qui peut durer plusieurs centaines d'années. L'impact d'un incendie aura donc des conséquences sur plusieurs centaines, voire milliers d'années, avant de totalement reconstituer les stocks de carbone observés avant l'incendie.

Comme nous l'avons précisé, la combustion de la biomasse génère des émissions de composés gazeux carbonés, mais aussi

de composés azotés. La biomasse est en effet constituée majoritairement de carbone et d'hydrogène, mais aussi d'azote (N) et de phosphore (P) nécessaires à leur fonctionnement, notamment à la photosynthèse. Dans le feuillage, le ratio C/N varie de 15 à 50 et celui C/P de 100 à 1 000, tandis que dans le bois, le ratio C/N varie de 100 à 500 et celui C/P de 5 000 à 20 000. Pendant les incendies, l'azote est volatilisé à 95 % et génère les éléments azotés NO_x , NO_2 et NH_3 . Le phosphore, lui, est peu volatilisé, mais minéralisé dans les cendres au sol, ainsi que d'autres oligoéléments comme le fer. Les cendres et les débris organiques peuvent donc agir comme un élément fertilisant pour les sols dans un premier temps, mais leur forme minérale peu assimilable, le caractère hydrophobe de la cendre, facilement transportée par le vent, et le ruissellement vont vite transformer ce bénéfice apparent en un déficit en nutriments. C'est notamment pour cette raison que la culture sur brûlis se déplace après quelques années d'exploitation. Les stocks d'azote sont reconstitués à hauteur de 0,1 à 1 $\text{g}/\text{m}^2/\text{an}$ par le dépôt atmosphérique (dans les eaux de pluie ou les poussières solides) ou par l'assimilation de l'azote gazeux atmosphérique par les plantes légumineuses, seules capables d'absorber l'azote gazeux (et non l'azote organique contenu dans les sols comme les autres plantes).

Les plantes légumineuses sont par exemple les plantes fourragères, comme la luzerne ou le trèfle, ainsi que les plantes à graines comme les lentilles, le soja, les haricots ou les pois, et plus généralement la famille des Fabacées couvrant les espèces agricoles mais aussi naturelles. Le stock de phosphore, lui, sera reconstitué plus lentement par l'altération de la roche mère (processus de *pédogenèse*) à hauteur de 0,0065 à 0,037 $\text{g}/\text{m}^2/\text{an}$ selon le type de roche, créant un déficit souvent limitant après un incendie, notamment lors des incendies récurrents. Ainsi, pour un maquis méditerranéen composé en moyenne de 1 000 g/m^2 de C pour le bois et 200 g/m^2 de C pour les feuilles, le stock d'azote dans la biomasse correspondante serait respectivement de 5 g/m^2 (C/N = 200) et 8 g/m^2 (C/N = 25), et le stock de P serait de 0,05 g/m^2 (C/P = 20 000) et 0,2 g/m^2 (C/P = 1 000). Le phosphore

perdu par la combustion mettrait donc environ vingt ans à se reconstruire, et l'azote perdu mettrait environ treize ans pour un dépôt azoté de $1 \text{ g/m}^2/\text{an}$.

L'intervalle de temps entre les incendies successifs apparaît donc une fois de plus comme le point critique : des incendies ayant un temps de retour de moins de treize ans ne permettraient pas au stock de se renouveler et induiraient un épuisement progressif des stocks en azote et en phosphore du sol, avec des conséquences sur la productivité et la durabilité du système. Cet exemple, bien que réaliste mais basé sur des valeurs moyennes, est une simple illustration ; les impacts peuvent largement varier selon les écosystèmes et leur fertilité de sol, leur dépôt atmosphérique et leur vitesse de pédogenèse, ainsi que le fonctionnement de leur végétation.



LE FEU, UNE PERTURBATION NATURELLE MILLÉNAIRE

Les incendies de forêt et de milieux naturels provoqués par la foudre ou d'autres causes naturelles existent depuis bien plus longtemps que l'homme, et nous avons vu dans le premier chapitre qu'ils ont parfois été bien plus actifs, notamment lorsqu'il y avait 30 % d'oxygène dans l'air. Sans remonter à des millions d'années, des reconstitutions basées sur différents indices permettent aujourd'hui de mieux comprendre les changements des régimes des feux passés. Que sait-on sur les feux passés, et comment les connaissons-nous ? Dans ce chapitre, nous verrons que les feux constituent une perturbation millénaire, mais aussi un moteur pour les écosystèmes. Ils ont d'abord évolué avec le climat et la végétation, puis avec les activités humaines et l'occupation du sol. Une si longue durée de cohabitation entre les hommes, la végétation et les incendies indique bien que le feu est une composante majeure de beaucoup d'écosystèmes, et fait partie intégrante de notre histoire.

LES BIO-INDICATEURS, DES ENREGISTREURS NATURELS POUR RECONSTITUER L'HISTOIRE DES FEUX DANS LES ÉCOSYSTÈMES

Avant les années 1980, du temps où les satellites ne nous donnaient pas encore d'informations précises et régulières sur les incendies, leur recensement se faisait, au mieux, par cartographie manuelle des surfaces brûlées. Des techniciens allaient sur le terrain pour en tracer le contour, ou les survolaient en hélicoptère. Ainsi, la date exacte et la zone de démarrage précise restaient inconnues, mais on pouvait tout de même estimer les surfaces brûlées annuellement et le nombre d'incendies.

Les forêts, quelle que soit leur latitude, prennent au minimum plusieurs décennies à se régénérer après un incendie et à refermer leur canopée avec des individus matures capables de

se reproduire. Par conséquent, définir le régime des incendies d'un type de forêt nécessite d'englober une période plus longue que celle couverte par les données instrumentales. Qu'il s'agisse d'une pinède de pins d'Alep dans le sud de la France, d'une sapinière à bouleaux blancs, d'une pessière à mousses au Québec (forêt d'épicéas noirs à sous-bois de mousses) ou encore d'une forêt tropicale humide ou d'une forêt claire au Brésil, il faut dans la plupart des cas remonter au moins sur plusieurs siècles, voire des millénaires. Pour cela, les scientifiques font appel à la *paléoécologie*, en récupérant puis en analysant les enregistrements naturels qui ont été archivés dans les lacs, dans les tourbières ou dans les arbres. Grâce à ces données, ils reconstruisent ensuite l'histoire du climat, de la végétation et des feux.

La dendrochronologie : reconstituer l'histoire par les cicatrices de feux

Pour reconstruire l'historique des incendies de végétation sur les derniers siècles, la première approche s'appuie sur la dendrochronologie (du grec *dendron*, « arbre », et *chronos*, « temps »). Cette discipline vise à estimer l'âge d'un arbre et les événements qu'il a traversés grâce à l'étude de ses cernes de croissance, aussi appelés « anneaux de croissance ». Elle s'applique donc surtout aux écosystèmes dont les arbres ont une croissance annuelle saisonnière, interrompue pendant la « mauvaise » saison (froide ou sèche, selon la latitude). Lorsque la croissance du cerne démarre, à la belle saison, son bois initial créé est souvent assez clair, car les vaisseaux qui le composent et qui assurent l'acheminement des flux de sève ont de gros diamètres. À l'opposé, son bois final, positionné en périphérie du tronc, est plus sombre et dense car les vaisseaux créés sont beaucoup plus fins. Année après année, il apparaît ainsi une succession de cernes, chacun ayant une partie claire et l'autre sombre, depuis le centre du tronc jusqu'à la périphérie.

Comment les cernes enregistrent-ils un incendie ? Lorsque le front de flamme arrive au niveau d'un tronc d'arbre, le feu contourne l'obstacle par les deux côtés, et des courants d'air

tourbillonnant se créent de part et d'autre à l'arrière du tronc. Ces courants d'air piègent la chaleur et la maintiennent près du tronc plus longtemps que ne le fait le front de flamme, qui continue d'avancer. Cet allongement du temps de résidence de la flamme va souvent tuer le cambium, localisé juste sous l'écorce du tronc. En effet, la température létale des cellules végétales est de 60 °C. L'écorce, même épaisse, ne protège les cellules vivantes qu'à très court terme lorsque la température extérieure au niveau de la flamme est de plusieurs centaines de degrés. Si l'arbre survit au passage du feu, une cicatrice apparaîtra donc à l'endroit où les cellules cambiales ont été tuées : il s'agira d'une zone sans croissance, sans possibilité de créer de nouveau cerne ; et deux bourrelets se formeront à gauche et à droite de la cicatrice, par l'empilement successif des cernes annuels de croissance post-incendie (figure 3).

L'interprétation du spécialiste en dendrochronologie dépend ensuite de l'état de l'arbre au moment où on le trouve. Si l'arbre est vivant, on peut connaître son âge et la date du feu à l'année près, en prélevant deux carottes de bois passant par le centre du tronc, l'une positionnée dans la zone de la cicatrice, l'autre en dehors de la cicatrice et des bourrelets, puis en comptant le nombre de cernes annuels. Grâce au type de bois (final ou initial), on peut même dater le feu à quelques mois près. Si l'arbre est déjà mort (et que l'autorisation de couper a été accordée), on prélève plutôt une portion de la section du tronc incluant à la fois la zone de la cicatrice, un des bourrelets et une zone saine de croissance (figure 3). L'âge auquel l'arbre a subi l'incendie qui a causé la cicatrice correspond alors au nombre de cernes entre le centre du tronc et la cicatrice. L'année calendaire pourra être estimée en comparant la série des largeurs de cernes mesurées sur ce tronc avec celle de la chronologie de référence régionale, produite à partir de nombreux arbres sans cicatrice et de plusieurs espèces, afin de reconstituer les variations climatiques.



Figure 3. Cicatrices de feu sur des pins sylvestres autour du lac Inari (Laponie finlandaise, septembre 2016). © Benoît Brossier.

- A. La cicatrice part de la base du tronc et remonte jusqu'à 2 m de haut.
- B. L'analyse dendrochronologique d'un autre arbre, réalisée par Benoît Brossier, montre qu'il était âgé de 411 ans et qu'il a été affecté, au cours de sa vie, par trois feux successifs en 1692, 1785 et 1924 (dates de l'initiation des trois bourrelets).

Afin d'obtenir des estimations fiables d'intervalles de feu et de superficies minimales brûlées pour un secteur, il faut analyser le plus grand nombre d'arbres portant des cicatrices, sachant que certains peuvent présenter plusieurs zones de bourrelets, superposées ou non, et donc avoir enregistré plusieurs feux, avec des directions de propagation identiques ou non. Grâce au positionnement de chaque arbre échantillonné dans le secteur étudié, on peut estimer la surface brûlée minimale pour chaque feu, lorsque plusieurs arbres ont enregistré une cicatrice une même année. Les informations temporelles extraites des cicatrices sont aussi complétées par celles extraites des arbres sans cicatrice, également échantillonnés et datés. En effet, chez plusieurs espèces adaptées au feu (voir le chapitre précédent), les individus qui se développent après un incendie le font quasiment simultanément : ils partageront tous la même année d'apparition, qui désigne donc une année de feu à ajouter à l'historique. Ainsi, l'historique des incendies pour un type de

forêt reconstruit par dendrochronologie remontera d'autant plus loin dans le temps que les essences présenteront : 1°) une capacité physiologique à cicatriser si le feu est peu intense, ou bien à régénérer (par graine ou rejet de tiges) « immédiatement » après l'incendie s'il est très intense ; 2°) des individus longtemps dressés après leur mort (car l'humidité accélère la décomposition des troncs couchés au sol) ; et 3°) une grande longévité, pour augmenter la probabilité d'enregistrer le passage d'un voire de plusieurs incendies.

Les microcharbons au fond des lacs, des témoins microscopiques des feux passés

Pour reconstruire l'histoire des incendies forestiers sur des millénaires, la seconde approche s'appuie sur l'étude des microcharbons produits durant l'incendie. Ils sont transportés dans les airs par les colonnes de fumée pendant l'incendie, ou par ruissellement sur le sol, puis ils sont piégés dans des « archives naturelles », comme les sédiments lacustres ou les tourbières. Ce sont les deux types d'archives les plus utilisées pour reconstituer l'histoire des anciens feux dans le monde.

Pour effectuer la collecte des microcharbons, on choisit tout d'abord un petit lac, avec le moins de points d'entrées ou de sorties, si possible en haut de bassin-versant : il s'agit de s'assurer que les charbons qui s'y trouvent sont ceux provenant des airs ou du haut du bassin-versant. Plus le lac est petit et profond, plus les dépôts de charbons au fond du lac seront représentatifs des conditions locales de l'incendie. Ils seront aussi protégés des vents et des vagues, susceptibles de mélanger les dépôts en cours avec les dépôts antérieurs, plus profonds. En effet, les dépôts se superposent au fur et à mesure, en même temps que la matière organique produite par l'activité biologique dans la colonne d'eau et qui sédimente après la mort des micro-organismes. Ainsi, en prélevant avec un carottier la colonne de sédiments depuis la surface de la vase jusqu'à la plus grande profondeur possible, on « remonte » dans le temps.

Le but est alors de quantifier les microcharbons présents tout au long de la carotte de sédiments, et d'estimer à quelles

époques ils se sont déposés pour dater les différents incendies. Pour cela, la carotte est d'abord minutieusement découpée en un maximum de tranches fines identiques, soigneusement numérotées. L'étape de datation est réalisée sur certaines tranches avec les méthodes des isotopes, notamment grâce au plomb 210 pour les niveaux les plus récents (moins de deux cent cinquante ans) et au carbone 14 pour les plus anciens (sans pouvoir toutefois remonter plus loin que cinquante mille ans dans le passé avec cet isotope). En paléocéologie et paléoclimatologie, l'année 1950 du calendrier grégorien est considérée comme année de référence ; elle est notée 0 BP (*Before Present* en anglais). Les datations par le C¹⁴ sont réalisées sur des macrorestes végétaux tels que morceaux de feuilles, aiguilles ou graines présents dans les échantillons, ou directement sur la matière organique des échantillons quand aucun macroreste n'est visible. Il faut aussi dater systématiquement le premier et le dernier niveau de la carotte, ainsi que les niveaux situés juste avant et après un changement visible sur la carotte (par exemple, une variation de couleur ou de texture des sédiments). Par la suite, chaque échantillon subit une série de traitements pour extraire de la matière organique les particules de charbons supérieures à 250 µm. Leur nombre, la somme de leurs surfaces et le volume total qu'elles représentent sont calculés pour chaque échantillon à partir d'une prise de vue sous loupe binoculaire informatiquement analysée.

En repositionnant les données numériques obtenues selon la profondeur des sédiments, donc selon le temps écoulé, on identifie des pics significatifs dans la quantité de charbons, largement supérieurs au bruit de fond normal. On connaît ainsi la période de l'incendie qui les a produits. Dans la mesure où chaque échantillon couvre en général plusieurs années, il n'est pas possible de dater précisément le feu ; on peut néanmoins l'estimer avec une incertitude assez faible (de l'ordre d'une à deux décennies). Le temps entre deux pics de charbons successifs renseigne l'intervalle de feu, et son inverse (1/intervalle) représente la fréquence du feu. En faisant « glisser une fenêtre de mille ans » progressivement sur ces données chronologiques, on reconstruit donc les changements millénaires de

fréquence de feux, et, de la même façon, le ratio calculé entre la quantité de charbon par échantillon et la fréquence des feux permet d'estimer les changements de la taille des feux et/ou de la sévérité de leurs impacts. En analysant plusieurs carottes de sédiments extraites depuis différents lacs présents dans une même région, on peut repérer le synchronisme éventuel des pics de charbons dans les différentes carottes datées. Si tel est le cas, ces événements de feux sont considérés comme majeurs.

L'approche paléoécologique par les charbons est donc un peu moins précise temporellement que la dendrochronologie, mais elle permet de remonter beaucoup plus loin dans le temps. Les deux approches ont bien évidemment été couplées, et l'analyse a montré que les pics de charbons les plus récents dans les sédiments lacustres correspondaient bien aux événements d'incendies enregistrés dans les cicatrices des cernes d'arbres. D'autres bio-indicateurs, comme les grains de pollen et l'ADN environnemental, permettent aussi de reconstituer l'histoire de la végétation ou les conditions climatiques passées. C'est ainsi que nous pouvons comprendre les interactions entre la végétation, le climat et les incendies, ainsi que les changements survenus et la gamme de réponses jusqu'ici enregistrée.

L'HISTOIRE MILLÉNAIRE DES INCENDIES DANS LE MONDE

Grâce à de nombreuses études paléoécologiques combinant les approches que nous venons de présenter, l'histoire des incendies a été établie pour plusieurs parties du monde. Racontons-la pour différentes régions emblématiques, des forêts boréales aux savanes africaines.

Les forêts boréales nord-américaines

Ces forêts boréales sont les écosystèmes les plus étudiés en matière de reconstitution des régimes de feux. Cela s'explique notamment par le fait que l'impact significatif des activités humaines sur le territoire date de l'arrivée des premiers colons européens, il y a moins de 500 ans. En effet, bien que

les autochtones installés sur le territoire boréal vécussent des ressources forestières, notamment en allumant des incendies pour chasser certaines espèces animales ou favoriser certaines espèces végétales comme les myrtilles, leur impact à l'échelle régionale était négligeable comparé aux incendies allumés par la foudre. Ainsi donc, les régimes de feux antérieurs à la colonisation européenne sont considérés comme naturels, seulement influencés par le climat et la végétation. Par ailleurs, la diversité des essences ligneuses est relativement faible comparée à celle des écosystèmes naturels tempérés ou tropicaux. Comprendre les interactions feux-végétation-climat dans ces forêts boréales est *a priori* relativement simple. Enfin, lors du maximum de la dernière période glaciaire, il y a 21 000 ans, la majeure partie du Canada et une grande partie du nord des États-Unis étaient recouvertes par l'inlandsis laurentidien, un ensemble de glaciers sous la forme d'une nappe épaisse de plusieurs kilomètres. Ayant tout érodé lors de leur expansion vers le sud, ces glaciers ont agi comme une « remise à zéro » de l'histoire enregistrée par les archives naturelles. Ce n'est qu'après leur fonte et leur retrait vers le nord, puis la vidange des immenses lacs glaciaires qu'ils avaient créés, que faune et flore terrestres ont reconquis ces terres. Depuis, le territoire boréal comporte plusieurs milliers de lacs, soit autant de possibilités pour archiver l'histoire environnementale locale au cours de l'Holocène, c'est-à-dire les 11 700 dernières années avant le présent.

Dans ces régions, l'analyse conjointe des charbons microscopiques et des grains de pollen (palynologie) révèle que le régime des feux a beaucoup varié dans le passé. Il a notamment été plus fréquent qu'aujourd'hui : il se produisait jusqu'à 6 à 8 feux de plus par millénaire. L'intervalle de temps entre deux feux était ainsi inférieur à celui d'aujourd'hui, entre quatre-vingts et cent ans environ. Cette fréquence élevée et ces intervalles de temps réduits avaient cours pendant une période qui a varié temporellement et régionalement du fait de l'interaction entre plusieurs facteurs.

En Alaska, que l'inlandsis laurentidien n'a que très peu atteint, bien que les conditions estivales aient été plus chaudes et sèches entre 11 000 et 9 000 BP, en raison du maximum

d'insolation estivale (période du maximum Holocène, MH), la fréquence des feux était faible et les intervalles longs (supérieurs à 300-500 ans). La végétation de toundra, dominée par des bouleaux nains, des peupleraies et des fourrés à épinette blanche et aulne, était peu inflammable. Ce faible régime des feux a perduré jusqu'à 7 500 BP, lorsque des conditions plus froides et plus humides ont favorisé le développement de la forêt d'épinettes noires. Cette espèce est à la fois beaucoup plus inflammable (en raison des composés volatils qu'elle émet en grande quantité quand elle brûle) et plus chargée en combustible que les autres types de végétation dominés par les espèces feuillues. Ainsi, l'activité orageuse estivale a pu déclencher des feux qui se propageaient plus facilement qu'avant, et ce sur de très grandes surfaces. C'est ainsi qu'entre 6 000 et 2 500 BP, l'intervalle de temps entre deux feux a été réduit à moins d'un siècle, puis il s'est à nouveau allongé, à plus de deux siècles, au cours des deux derniers millénaires.

De l'ouest au centre du Canada, la fonte de l'inlandsis laurentidien s'est produite de 9 000 à 6 500 BP. La recolonisation végétale qui a suivi a été semblable à celle de l'Alaska jusqu'à l'arrivée de l'épinette noire. Le maximum Holocène s'est produit entre 7 000 et 5 000 BP dans cette zone, et a favorisé la densification des forêts de conifères (épinette noire et pin gris), augmentant d'autant la disponibilité en combustibles. Les conditions globalement humides dans la région au cours de l'Holocène n'ont pas beaucoup impacté le nombre de pics de charbons, la fréquence des feux ayant varié de 5 à 7 feux par millénaire seulement. En revanche, la quantité de charbons composant les pics a bien varié au cours du temps : elle a augmenté entre 9 500 et 5 000 BP, le maximum ayant été atteint pendant le MH, ce que l'on peut traduire comme la période des feux les plus vastes et/ou les plus sévères. Le Néoglaaciaire représente la période plus froide et humide qui a suivi le MH. Ce refroidissement a ouvert progressivement les paysages, ce qui a réduit la quantité de combustible, et donc celle de charbons, jusqu'à ce que celle-ci atteigne sa valeur minimale à 500 BP. Ces feux ont été, jusqu'à récemment au moins, plus petits et/ou moins sévères que pendant le MH.

Dans l'Est canadien, du Québec au Labrador, les sédiments lacustres les plus anciens remontent en général à la vidange du lac glaciaire Ojibway (vers 8 000 BP) ou à la transgression de la mer de Tyrell (vers 6 000 BP), les deux résultant de la fonte de l'inlandsis laurentidien. Les reconstructions paléoécologiques ont montré que dans les forêts d'épinette noire de l'ouest du Québec, les feux ont été fréquents (7 à 12 feux par millénaire) mais relativement petits entre 7 000 et 4 500 BP, puis très variables jusqu'à 3 000-2 500 BP. Puis ils sont devenus peu fréquents (3 à 6 feux par millénaire) mais très vastes lors des derniers 2 000 BP. Ces changements sont liés à une diminution de l'insolation estivale ; la saison propice aux allumages s'est donc raccourcie en raison d'automnes précoces. Le Néoglaaciaire, démarré vers 3 000 BP, a favorisé la densification des forêts de conifères, propageant le feu sur de grandes surfaces. À l'est du Québec et au Labrador, l'histoire des feux est globalement la même qu'à l'ouest entre 7 000 et 2 000 BP, avec une activité amplifiée : les feux y sont plus fréquents encore, mais plus petits. Ce régime s'explique par un climat plus humide, une composition forestière plus diversifiée et une topographie plus accentuée, tous ces facteurs étant moins propices à la propagation du feu sur de grandes étendues. Les grands feux n'ont été présents qu'entre 2 000 et 1 500 BP. Ils ont favorisé temporairement le développement du pin gris, aux dépens du sapin baumier qui accompagnait jusque-là l'épinette noire. Toutefois, le sapin baumier a réussi à se maintenir dans le paysage, sans doute dans des zones protégées, moins exposées aux flammes, et à redevenir l'espèce compagne majoritaire de l'épinette noire.

Les écosystèmes européens méditerranéens, un berceau du feu

Les écosystèmes européens – notamment méditerranéens – sont fortement influencés par les activités humaines depuis des millénaires. Cela peut brouiller les interprétations quant aux facteurs responsables des changements de régimes de feu enregistrés ; au climat, aux différents types d'écosystèmes et aux activités humaines s'ajoutent en outre des conditions

topographiques variées. Il a donc fallu attendre que de nombreuses études soient réalisées dans la région pour y voir plus clair. Au cours des derniers 16 000 ans, le régime des feux en région méditerranéenne a globalement varié dans le temps et en fonction de l'altitude. La forme des charbons produits nous renseigne sur le combustible qui a effectivement brûlé : en brûlant, le bois forme des charbons compacts (cubiques), alors que les plantes herbacées produisent des charbons effilés (allongés).

De 16 000 à 7 000 BP, alors que le climat global se réchauffe progressivement en raison de la sortie de la période glaciaire induite par l'augmentation de l'insolation, plaines et collines (zones de basse et moyenne altitudes, inférieures à 2 050 m) enregistrent une augmentation progressive de la fréquence des feux et de leurs tailles, avec un maximum de surfaces brûlées entre 8 000 et 7 000 BP. Ces augmentations sont liées au climat du MH : la température, plus élevée, favorise la production végétale, donc augmente la quantité de combustible disponible et facilite l'allumage des feux par la foudre ou par les hommes. Les zones de montagne (à une altitude dépassant 2 050 m) enregistrent d'abord très peu de biomasse brûlée entre 16 000 et 10 000 BP, parce que les températures étaient encore trop froides pour favoriser une bonne production végétale. Cela dit, quelques pics de charbons attestent l'occurrence de feux, même à très faible fréquence. Au cours des trois mille ans suivants, les montagnes enregistrent toujours une faible fréquence de pics, mais les pics contiennent deux fois plus de charbons que ceux de la période précédente. Cette augmentation représente des surfaces brûlées plus vastes liées à l'accumulation de combustibles en raison de l'arrivée des forêts dans cette zone.

De fait, ce contraste entre plaines et montagnes sur la période 10 000-7 000 BP marque le début de l'impact des activités humaines sur les régimes de feux. En effet, alors que les conditions estivales deviennent de plus en plus favorables aux allumages dans le sud de l'Europe, ces derniers ont été beaucoup moins fréquents en montagne qu'en plaine, alors que les phénomènes orageux sont beaucoup plus fréquents

en montagne qu'en plaine l'été. L'explication vient donc de l'agriculture, qui s'est progressivement implantée dans la zone européenne méditerranéenne depuis la région du Croissant fertile. Les hommes ont commencé à cultiver les plaines, plus accessibles et aux températures plus clémentes que les zones montagneuses, donc plus productives. Cette implantation s'est faite aux dépens des forêts, des garrigues et des maquis, qu'il a fallu couper puis nettoyer par le feu, d'où des pics de charbons nombreux dans les archives sédimentaires, et de fortes quantités de charbons dans ces pics. Cette déforestation fut la plus importante en plaine entre 8 000 et 7 000 BP, soit exactement lorsque les conditions du MH étaient *a priori* optimales pour la croissance des nouvelles cultures et pour la propagation du feu afin de préparer les nouvelles terres. Cette déforestation est d'ailleurs l'une des composantes qui marquent la transition vers le Néolithique dans la région. Bien que ces populations de premiers fermiers, en Méditerranée, aient présenté des densités relativement faibles, elles cultivaient de grandes surfaces pour subvenir à leurs besoins.

Après 7 000 BP, du fait de l'explosion démographique, les superficies déboisées et cultivées ont continué à s'étendre en Europe et en Méditerranée ; cela s'explique par un besoin toujours croissant non seulement de bois de construction, mais aussi, et surtout, de nourriture. En plaine, les charbons présents dans les archives sédimentaires confirment cette augmentation pour les fréquences des feux (donc les allumages) jusqu'à environ 1 000 BP, mais pas pour les quantités de charbons, qui subissent au contraire une diminution drastique tout au long des derniers sept mille ans. Cette tendance à la baisse des superficies brûlées s'explique par plusieurs facteurs concomitants. Tout d'abord, les paysages ayant été fragmentés par la mise en place des premiers champs, ces derniers ont pu jouer un rôle de coupe-feu dans la propagation des incendies, limitant ainsi les surfaces nouvelles brûlées. Ensuite, la culture sur brûlis a été utilisée pour amender les champs existants afin d'augmenter leur productivité, mais la biomasse végétale des résidus de culture à brûler était beaucoup moins importante que celle des écosystèmes naturels au moment de leur transformation en

champs. Enfin, après le MH, les conditions climatiques sont devenues progressivement plus froides et plus humides, jusqu'à définir la période du Néoglaciale après 5 000 BP. Ce climat plus humide et aux températures plus rigoureuses a modifié la composition des écosystèmes naturels encore présents, et a raccourci la saison naturellement favorable à l'allumage et à la propagation des feux. Cependant, cette diminution a été compensée par des allumages anthropiques fréquents, au point de favoriser les espèces mieux adaptées (ou les plus résistantes) aux incendies.

À l'opposé des plaines, et malgré ces conditions climatiques moins favorables aux incendies après 7 000 BP, les feux en zone de montagne sont devenus plus fréquents et ont augmenté en superficie jusque vers 3 000 BP, malgré quelques fluctuations. Ces augmentations montrent, encore une fois, l'impact des activités humaines. En effet, la démographie humaine croissante a entraîné, avec un léger retard, l'expansion des activités agricoles vers des zones encore peu ou pas utilisées, comme les zones de montagne. Ces dernières, à 7 000 BP, présentaient différents écosystèmes qui dépendaient de leur exposition et de leur altitude (par exemple des forêts de feuillus ou de conifères, des fourrés, des landes à *Éricacées* ou des prairies herbeuses). Ces zones ont donc, à leur tour, enregistré les mêmes transformations que les plaines, avec des usages du feu similaires : les forêts ont été soit coupées et transformées en champs, soit leur sous-bois a été régulièrement brûlé pour entretenir le milieu ouvert et favoriser la repousse herbeuse en vue d'y faire paître les troupeaux. Cette pratique avait d'ailleurs cours jusqu'à récemment : ces feux de sous-bois étant peu intenses, ils produisent des cicatrices de feu sur les arbres avec la particularité que des cicatrices, datées de la même année (voire du même moment dans la saison) sur des arbres voisins, ne sont pas orientées dans une même et seule direction, caractérisant une propagation naturelle, généralement dans le sens de la pente ascendante et des vents dominants. Cette pratique sylvopastorale s'appuie au contraire sur des allumages multiples et ponctuels, que les hommes réalisent dans des conditions choisies pour qu'ils puissent maîtriser le feu, et donc s'assurer d'une propagation

limitée. Les formations herbacées ont elles aussi été utilisées directement comme pâtures, et possiblement brûlées annuellement pour favoriser la régénération herbeuse précoce ou tardive, et donc optimiser le nourrissage des cheptels. La Corse est un très bon exemple, car cette île présente tous les étages de végétation depuis le niveau de la mer jusqu'à plus de 2 050 m d'altitude, et donc ces différentes histoires (voir l'encadré 6).

ENCADRÉ 6. L'HISTOIRE DES FEUX SUR L'ÎLE DE BEAUTÉ

La Corse, île au relief prononcé (jusqu'à 2 710 m d'altitude), est un très bon exemple méditerranéen de *hotspot* de biodiversité dont l'histoire a été reconstruite par de nombreuses études paléoécologiques.

Nous savons par exemple que dans l'ouest de l'île, dans la vallée du Fango, en dessous de 650 m d'altitude, le chêne vert aujourd'hui présent s'est installé seulement à partir de 2 000 BP, c'est-à-dire à partir du moment où la fréquence des feux s'est fortement accrue. Il s'agit certainement d'allumages anthropiques, car les enregistrements polliniques ont montré une forte abondance du châtaignier, cette espèce ayant été introduite par l'homme sur l'île à partir de cette période.

Avant 2 000 BP, ces forêts-maquis de basse altitude étaient plutôt dominées par le pin noir laricio, la bruyère arborescente et l'arbousier. Leur litière n'était pas du tout favorable à l'implantation d'autres espèces, et notamment aux plantules de chêne vert, en raison d'une difficile décomposition par les micro-organismes sur ce sol siliceux et de la production de sous-produits allélopathiques connus pour bloquer la minéralisation de l'azote. Ce n'est donc qu'avec la répétition des feux anthropiques, qui ont brûlé et nettoyé cette litière, donc détruit les produits nocifs, que le chêne vert, après l'abandon des terres exploitées, a enfin pu s'installer, au même titre que d'autres espèces secondaires à feuilles caduques comme l'érable, le frêne et le peuplier.

L'installation du pin maritime, aujourd'hui présent au-delà de 1 000 m d'altitude dans la vallée du Fango, a également été facilitée par cette augmentation de la fréquence des feux à partir de 2 000 BP, et ce grâce à ses cônes sérotineux. À l'inverse, les pinèdes de pin laricio,

associées à un sous-bois composé de bruyère, n'ont cessé de régresser depuis, alors qu'elles dominaient les paysages avant 2 000 BP. Aujourd'hui, à basse altitude, le pin laricio ne représente qu'une espèce pionnière dans la dynamique des forêts de chêne vert. Grâce à l'étude des sédiments de différents lacs situés à plus de 1 000 m d'altitude, en plein centre de la Corse, comme ceux de Creno (1 300 m) et de Bastani (2 100 m), les chercheurs ont réussi à retracer l'histoire des incendies et des changements de végétation en remontant plus loin dans le temps qu'avec les sites de basse altitude. Ainsi, depuis la fin de la dernière glaciation et jusqu'à 12 000 BP, comme en Alaska dans la zone boréale, les feux ont été extrêmement rares (moins d'un feu par millénaire), sans doute en raison d'une très faible charge de combustible : à cette époque, les bassins-versants de ces lacs étaient naturellement recouverts d'herbacées et de buissons nains. Juste après le Dryas récent (entre 11 900 et 11 700 BP), une période caractérisée par un refroidissement important mais de courte durée, l'augmentation de l'insolation qui s'est poursuivie et le réchauffement climatique associé ont enfin permis aux arbres, notamment le pin laricio, d'atteindre ces altitudes, comme l'attestent les enregistrements polliniques.

Ces nouveaux écosystèmes forestiers ont dû produire suffisamment de combustible, puisque la fréquence des feux a augmenté jusqu'à 12 feux par millénaire vers 11 000 BP, ce qui correspond à un délai moyen de quatre-vingts ans environ entre deux feux successifs. Ce fut d'ailleurs la période avec le plus grand nombre de pics de charbons enregistrés en Corse ! Par la suite, la fréquence des feux a d'abord diminué, jusqu'à représenter moins de 5 feux par millénaire au moment de l'événement de 8 200 BP, ce repère historique marquant un épisode ultrarapide qui s'est produit pratiquement dans le monde entier, et qui se traduit en Europe notamment par un refroidissement important. La fréquence des feux a ensuite de nouveau augmenté, d'abord très lentement, puis drastiquement, jusqu'à 12 feux par millénaire à 4 500 BP, avant de diminuer à nouveau puis d'augmenter jusqu'à 1 600 BP, pour finalement décroître jusqu'aux valeurs actuelles. Les deux valeurs minimales au cours des derniers cinq mille ans correspondent à 3 100 BP et à l'actuel (0 BP). Ces fluctuations peuvent être mises en relation avec le refroidissement lié à la période du Néoglaciale, mais il faut également prendre en considération les activités humaines qui ont varié, elles aussi, au cours du temps.



C'est d'autant plus clair avec l'analyse des sédiments du lac de Bastani car, en plus des grains de pollen et des microcharbons (surfaces et forme des particules), les scientifiques ont également compté les spores des champignons coprophiles, notamment ceux du genre *Sporormiella*, afin de retracer la pression environnementale exercée par les herbivores et donc, en cas de fortes concentrations et d'une diversité spécifique importante, assimiler ces résultats à des pâtures et des activités d'élevage. Ils ont également recensé les grains de pollen des espèces cultivées (blé, olivier, châtaignier) et de leurs espèces compagnes ou rudérales, comme les plantains. Ainsi, le lac de Bastani raconte à peu près la même histoire que le lac de Creno quant à la fréquence des feux, avec notamment les nombreux feux entre 11 000 et 10 000 BP, ainsi que vers 4 500 BP. De plus, l'analyse montre qu'entre 4 500 et 2 000 BP, les charbons sont devenus effilés, signant des incendies d'herbacées, alors que les particules avaient auparavant une forme plus cubique, signant une origine ligneuse. En parallèle, les spores de *Sporormiella*, déjà présentes avant mais en très faibles quantités, ont commencé à être beaucoup plus abondantes à partir de 5 000 BP, et la diversité des espèces de champignons coprophiles également.

Analysés conjointement, ces bio-indicateurs suggèrent que de grands herbivores, de plus en plus présents autour du lac, ont, à partir de 5 000 BP, remplacé les herbivores peu nombreux et certainement sauvages de la première moitié de l'Holocène. Ce changement d'usage des terres, incluant des pâtures, des cultures, et leur entretien par la pratique du brûlis, a nécessité au préalable une déforestation massive, l'ouverture du paysage ayant été réalisée grâce au feu. Les valeurs maximales ont été atteintes il y a environ cinq cents ans ; depuis, la tendance est à la diminution, ce qui signe certainement une précoce déprise agricole de ces terres, difficilement accessibles, au profit des zones de plus basse altitude et plus proches du littoral.

Les savanes et les forêts sèches africaines

Les incendies de végétation sont très nombreux et fréquents dans les régions tropicales, notamment en Afrique (figure 2). Ils sont principalement localisés au nord et au sud de l'équateur, de part et d'autre du massif forestier de l'Afrique centrale, dans la zone des forêts sèches en Afrique australe, et dans les savanes qui jouxtent les forêts sèches. La transition entre les

deux est une mosaïque de forêt et de savane. Pour autant, faire une synthèse des régimes de feux passés dans ces écosystèmes n'est pas chose facile, et ce pour deux raisons majeures.

La première raison est que, pendant longtemps, les reconstructions paléoécologiques des incendies ont été réalisées en général après les reconstructions paléoécologiques de la végétation. Or la très grande diversité taxonomique en zone tropicale requiert une expertise palynologique dédiée et très chronophage pour identifier et dénombrer sur les lames polliniques, à l'aide d'un microscope, les nombreux grains de pollen produits eux-mêmes par quantité de taxons. Pendant de longues années, les scientifiques se sont donc arrêtés aux analyses palynologiques ou, dans le meilleur des cas, ont compté directement les particules de charbons incluses avec les grains de pollen sur les lames polliniques. Toutefois, ils savent depuis à peine deux décennies que le nombre de particules de charbons dans un échantillon donné est la moins bonne métrique pour caractériser un incendie, comparativement à la surface ou bien au volume total des charbons de cet échantillon. En effet, les particules de charbons sont susceptibles de se fragmenter entre le moment où elles sont produites et le moment où on les observe à la loupe binoculaire. Tout d'abord, elles risquent de se briser pendant leur déposition dans l'archive naturelle, surtout si elles y parviennent par ruissellement plutôt qu'en retombant directement du panache de fumée. Cela peut également leur arriver pendant le prélèvement de la carotte de sédiments, même si normalement la zone périphérique de cette dernière n'est pas utilisée lorsque la carotte est découpée en tranches au laboratoire. Enfin, elles peuvent se briser pendant le traitement chimique que subit chaque échantillon prélevé au centre de la tranche pour en extraire soit directement les charbons, soit les grains de pollen et les charbons.

En conclusion, les reconstructions des feux passés réalisées avant le début des années 2000 exclusivement à partir du nombre de charbons ne représentent pas fidèlement les incendies passés. Aujourd'hui, la méthode d'analyse basée sur le dénombrement des particules de charbons sur les lames polliniques est encore pratiquée. Cependant, elle est peu à peu délaissée pour la

méthode présentée en début de chapitre, c'est-à-dire un traitement chimique dédié uniquement à l'extraction des charbons, puis la reconnaissance automatique des particules de charbons par analyse des contrastes, et enfin la mesure automatique, pour chaque particule, de sa largeur (correspondant au plus petit diamètre), de sa longueur (le plus grand diamètre), de son périmètre et de sa surface, voire de son volume.

Il y a une seconde raison à la difficulté de faire une synthèse des régimes de feux passés dans la zone tropicale : la quantité de charbons dans un échantillon donné est souvent très importante. Cela s'explique assez naturellement par le fait que les écosystèmes tropicaux qui ont une composante herbacée (savanes et steppes sahéliennes) brûlent très régulièrement, voire annuellement ; par conséquent, un échantillon sédimentaire qui couvre plusieurs années contient les charbons produits par plusieurs feux successifs. Le contexte est donc très différent des régions boréales, méditerranéennes ou tropicales humides où, si la forêt brûle, il faut ensuite attendre plusieurs décennies pour que le combustible se reconstitue suffisamment et brûle à nouveau. De plus, comme les savanes et les steppes occupent de grandes superficies au relief relativement peu accidenté, les feux qui se propagent produisent des panaches de fumée pouvant être transportés sur de très grandes distances, mélangeant d'autant plus les informations et donc l'histoire. Enfin, en Afrique, l'impact anthropique, particulièrement avec l'usage du feu comme outil de culture et de pâture, agit sur les écosystèmes depuis au moins plusieurs millénaires, ce qui vient d'autant plus brouiller l'histoire des incendies. Il est notamment difficile de visualiser la transition entre les régimes de feux naturels et ceux anthropiques, plus récents.

Malgré tous ces bémols et précautions, les scientifiques se sont quand même fait une idée générale des régimes passés, car les combustibles brûlés lors des incendies sont le reflet de la biomasse végétale produite. L'Afrique, comme toutes les autres régions du monde, a connu de grands changements climatiques au cours de l'Holocène, en réponse à l'augmentation de l'insolation. Toutefois, contrairement aux températures dans la zone boréale et les montagnes, qui en augmentant à

l'Holocène ont permis la croissance végétale et donc la production de combustibles, en zone tropicale et subtropicale, ce sont les précipitations associées aux mouvements de la zone intertropicale de convergence (ZITC) qui ont été le plus influencées par l'augmentation globale de l'insolation. La mousson correspond aux pluies associées à la ZITC et elle arrose aujourd'hui en juillet l'Afrique de l'Ouest jusque vers 15°N. Or, de 12 000 à 5 000 BP environ, la ZITC a progressé beaucoup plus au nord et la mousson a arrosé les régions situées jusqu'au 28°N. On qualifie de « Sahara vert » ou de « Période humide africaine » cette période de forte croissance végétale grâce aux pluies très importantes (à la fois en quantité, mais sans doute aussi en durée de saison humide). À cette époque, de nombreux paléolacs et rivières sont apparus. Ils ont perduré pendant des millénaires, là où aujourd'hui le désert du Sahara domine à perte de vue. Les reconstructions paléoécologiques issues des analyses palynologiques montrent que les paysages devaient être recouverts de savanes, avec des forêts luxuriantes installées le long des cours d'eau et sur le pourtour des lacs. La biomasse végétale était suffisante pour nourrir de grands herbivores, aujourd'hui disparus de la zone.

Plus à l'est, le même phénomène de verdissement s'est produit, alimenté non pas par la mousson estivale issue de la convection au-dessus du golfe de Guinée, mais par les pluies hivernales venant de Méditerranée, également en réponse à l'augmentation de l'insolation globale. Elles ont d'ailleurs facilité l'installation de l'agriculture autour du bassin méditerranéen. Après le maximum Holocène, enregistré dans la région de l'Afrique de l'Ouest entre 9 000 et 7 000 BP selon la latitude, la ZITC et la mousson associée ont migré vers le sud pour finalement atteindre leur position actuelle de 15°N vers 3 000 BP, cette date signant la fin de la Période humide africaine. La végétation a suivi ce retrait vers le sud, avec un léger retard en raison de la persistance des paléolacs pendant quelques décennies, voire quelques siècles.

Les charbons retrouvés dans les sédiments, qu'ils proviennent de carottes marines collectées en Atlantique au large de la Mauritanie, ou bien de carottes terrestres issues

d'environnements actuellement ou anciennement lacustres, racontent une histoire régionale parallèle à celle des pluies. L'augmentation importante du nombre de charbons à partir de 11 000 BP, et jusqu'à 8 000 BP, reflète en effet l'augmentation des précipitations, celles-ci ayant provoqué le développement des herbacées et des ligneux en un tapis *a priori* assez dense pour permettre aux orages, précédant l'arrivée de la mousson et signant la fin de la saison sèche, d'allumer des incendies. Ainsi, à 8 000 BP, les sédiments en Afrique de l'Ouest enregistrent globalement quatre fois plus de particules de charbons que trois millénaires plus tôt (environ 8 000, contre 2 000 particules/cm³). Pendant le maximum Holocène, l'activité de feu a diminué d'environ 40 % (5 000 particules/cm³), sans doute en raison d'une trop forte humidité, ou plutôt d'une saison sèche peut-être trop courte. Mais après 7 000 BP, le nombre de charbons a augmenté à nouveau pour atteindre, à 6 300 BP, les valeurs les plus fortes (10 000 particules/cm³) enregistrées au cours des derniers douze mille ans.

Depuis 6 300 BP, le nombre de charbons n'a cessé de diminuer, d'abord drastiquement (de 10 000 à 4 000 particules/cm³ en trois cents ans à peine), puis plus progressivement au cours des trois millénaires suivants, les sédiments ayant enregistré le nombre minimum de 1 000 particules/cm³ à 3 000 BP. Au cours des trois mille dernières années, le nombre de charbons a légèrement augmenté, de 1 000 à 3 000 particules/cm³. Au vu de la végétation aride à semi-aride à l'échelle régionale de l'Afrique de l'Ouest et des artefacts retrouvés dans les sites archéologiques, on peut supposer que ces charbons récents signent, pour certains au moins, des allumages volontaires visant à favoriser la régénération des pâtures pour les troupeaux. Il se pourrait que l'impact anthropique soit devenu significatif beaucoup plus tôt, étant donné le nombre de particules vers 6 300 BP, mais les limites liées à l'ancienne méthode pour les compter et la grande proportion d'études s'y référant encore nous obligent pour le moment à des interprétations prudentes.

EN QUOI LES RÉGIMES DE FEUX PASSÉS NOUS SONT-ILS UTILES ?

Comme nous venons de le voir, les scientifiques ont dû relever de nombreux défis pour parvenir à reconstruire les régimes de feux passés. L'effort en valait la peine, car leur connaissance présente au moins trois intérêts différents.

Le premier intérêt est de pouvoir estimer la variabilité naturelle des incendies que les écosystèmes ont enregistré en matière de type de feu et de fréquence, voire de superficie et de comportement dans les cas les mieux documentés. En combinant l'étude des charbons et celle des grains de pollen, on peut donc savoir si les écosystèmes ont réussi à supporter ces feux passés, c'est-à-dire s'ils ont réussi à se régénérer chaque fois, soit avec les mêmes espèces qu'avant l'incendie, soit avec un retour des mêmes espèces au cours de la succession post-incendie. Plus la biodiversité spécifique est importante, plus la redondance écologique est à l'origine de la nouvelle composition spécifique post-incendie, mais pour autant l'écosystème perdure.

En effet, dans ces cas-là, alors que plusieurs espèces assurent une même fonction au sein de l'écosystème, une seule domine largement en abondance, alors que les autres ne sont représentées que par quelques individus. L'espèce dominante est celle dont la niche écologique est optimale pour les conditions du moment. Or le passage d'un incendie modifie au moins temporairement le milieu en matière d'ouverture, de recirculation des nutriments, de composition chimique du substrat ou encore d'interactions avec les autres espèces. Ainsi, après l'incendie, il se peut que ce ne soit pas exactement les mêmes espèces qui dominent, car les conditions ne sont plus optimales pour celles qui dominaient auparavant. Toutefois, du moment que les fonctions principales de l'écosystème sont assurées par des espèces « relais », devenues beaucoup plus abondantes qu'avant l'incendie, l'écosystème est résilient ; et si les incendies aujourd'hui présentent les mêmes caractéristiques que ces feux passés, alors il est probable que les écosystèmes les supportent encore. En revanche, si tel n'est pas le cas, il est possible de chercher, grâce aux enregistrements paléoécologiques, quel

facteur du régime d'incendie (possiblement en interaction avec le climat) a mis en péril la résilience de l'écosystème dans le passé, et de surveiller ce facteur aujourd'hui.

Par exemple, si nous reprenons le cas de la forêt boréale dans l'Est canadien, les scientifiques ont montré que la transition d'une pessière à mousses à une pessière à lichens correspond à une perte de résilience, car, bien que l'espèce dominante d'arbre soit la même dans les deux cas, la pessière à lichens est beaucoup plus clairsemée que la pessière à mousses ; le sous-bois est très différent, les lichens produisant des substances allélopathiques bloquant la germination des autres espèces. Or certaines pessières à mousses se sont transformées en pessières à lichens vers 4 000 BP, après des intervalles de feux très courts, alors que précédemment les sédiments avaient enregistré des pics de charbons beaucoup plus espacés. On pourrait donc penser que c'est la combinaison d'un climat devenu plus froid (le Néoglaciale) et d'une fréquence des feux trop élevée qui a induit cette bascule. Mais, depuis près de cinquante ans, ce phénomène de bascule des pessières à mousses vers des pessières à lichens se propage du nord vers le sud de la forêt boréale de conifères, et ce malgré le réchauffement climatique global actuel. Il semble finalement que la fréquence élevée des perturbations, quelles qu'elles soient (incendies et/ou coupe forestière), représente le principal facteur de cette transformation. C'est donc elles que l'aménagement doit surveiller.

Le deuxième intérêt à connaître les régimes de feux passés, dans la continuité du premier, est de pouvoir distinguer, dans les enregistrements passés, les espèces qui ont le mieux résisté aux incendies (en regardant sur leur diagramme pollinique si elles n'ont diminué que peu ou seulement sur une très courte période) ou bien celles qui ont été susceptibles de freiner la propagation du feu ou encore de maintenir le risque d'incendie plus bas que d'autres espèces dans des conditions similaires. Une fois ces espèces identifiées et leurs caractéristiques appréciées, il devient possible de les favoriser dans les aménagements visant à réduire les départs d'incendies, à ralentir la propagation s'ils ont quand même démarré, et à maintenir de la végétation (résistante) en place pour lutter contre l'érosion

dans les pentes, par exemple. Il a ainsi été montré que, pendant l'Holocène, tant que la proportion de feuillus dans la forêt boréale mixte canadienne est restée importante, la fréquence et la taille des feux sont restées beaucoup plus faibles comparées à celles enregistrées dans la forêt boréale conifère voisine, partageant pourtant le même climat. En revanche, au Néoglaciaire, bien que le climat ait été moins favorable aux incendies que la période précédente du maximum Holocène, la fréquence et la taille des feux en forêt mixte ont augmenté du fait d'une proportion plus grande de conifères, qui sont plus inflammables que les espèces feuillues. Dans l'optique de réduire le risque de propagation du feu, l'ingénierie écologique aurait donc intérêt à favoriser le développement des feuillus locaux qui sont naturellement présents dans les peuplements.

Le troisième intérêt est de pouvoir s'inspirer des impacts des régimes passés pour aménager les écosystèmes aujourd'hui, notamment pour l'exploitation sylvicole. En effet, si l'on reprend l'exemple de la forêt boréale, nous avons vu que celle-ci a été résiliente tout au long de l'Holocène, et ce malgré des fréquences de feux beaucoup plus importantes qu'actuellement. Comme la diversité des espèces d'arbres est très faible, cela signifie que ces espèces se sont très bien adaptées au feu *via* diverses stratégies (voir le deuxième chapitre). Or, bien que la forêt boréale ne soit exploitée que depuis moins de trois cents ans (voire moins de cent ans dans certaines régions), les forestiers ont tiré la sonnette d'alarme : dans de nombreux endroits déjà exploités depuis des décennies, la forêt ne s'est pas régénérée aussi bien qu'espéré.

C'est ici que les connaissances associées aux régimes des feux passés entrent en jeu. En collaborant étroitement avec les scientifiques, le Canada et ses provinces furent pionniers en la matière en décidant, en 2001, de réformer le régime forestier pour mettre en place l'aménagement écosystémique, c'est-à-dire des pratiques sylvicoles dont les impacts (au-delà de collecter le bois) miment ceux des perturbations naturelles, dont les incendies et les épidémies d'insectes, pour les deux plus importantes. À titre d'exemple, les forestiers ont modifié la façon dont ils collectent les grumes d'un peuplement forestier :

avant 2001, les débris de coupe (branches, feuillage et végétation de sous-bois) étaient laissés sur place et, au mieux, les quelques petits arbres présents mais non exploitables étaient protégés des machines et laissés en place. Or, lorsqu'un feu se propage en zone boréale, il est la plupart du temps très intense, et brûle donc tout le sous-bois, y compris l'humus et sa matière organique, laissant à nu le premier horizon du sol.

De la même manière, le feu dans la couronne des arbres brûle les feuilles et aiguilles, mais échauffe simplement les cônes sérotineux. Ils pourront, quelques jours après le feu, libérer les graines qu'ils avaient protégées et qui tomberont sur un lit de germination idéal : un sol mis à nu et sans compétiteur. Les forestiers ont donc décidé de modifier leurs pratiques : ils retirent désormais les débris de coupe et scarifient l'humus pour ouvrir des zones où le sol est mis à nu, lorsqu'ils ne choisissent pas de brûler les résidus de coupe, mimant encore mieux l'impact du feu tout en le contrôlant. Et si la régénération est déjà en place avant la coupe, mais répartie de manière hétérogène et peu dense, alors ils choisissent de replanter, ce qui équivaut à peu près à sauter l'étape de l'ouverture du milieu par le feu, même si, ce faisant, la recirculation des nutriments, normalement réalisée par le passage du feu, n'est peut-être pas optimale. C'est ainsi que la reconstruction des régimes de feux passés nous permettra de mieux gérer les écosystèmes et les incendies d'aujourd'hui, et possiblement de demain.



CHANGEMENT CLIMATIQUE ET MODIFICATION DES PAYSAGES : QUELS IMPACTS SUR LES FEUX ?

En février 2022, le sixième rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) a alerté l'opinion sur la très probable augmentation des conditions climatiques favorables aux feux de végétation dans de nombreuses régions de la planète. La hausse des températures, l'allongement des périodes de sécheresse et les pics de chaleur sont autant de facteurs qui ont déjà (par le passé) et devraient (à l'avenir) augmenter la probabilité des feux. L'un des symptômes particulièrement frappants de cette évolution est le développement des méga-feux, dont la violence dépasse bien souvent les capacités de riposte des forces de lutte. Toutefois, le climat n'est pas le seul responsable et les changements de paysages ou les pratiques de gestion ont également un rôle important. Comment étudier ces évolutions ? Quels sont ces changements de régimes de feux observés ? Quelles en sont les causes ? Comment anticiper les changements futurs ?

L'INFORMATION SUR LES FEUX DE VÉGÉTATION DANS LE MONDE : LES INVENTAIRES NATIONAUX ET LEURS LIMITES

La compréhension des dynamiques récentes des feux de végétation dans le monde repose sur la disponibilité et la qualité des informations disponibles sur les feux eux-mêmes. Depuis le début des années 2000, les données satellitaires fournissent une information sur l'ensemble de la planète. Toutefois, ces dernières manquent de recul historique et ne sont pas exemptes d'incertitudes qui limitent leur utilisation (voir le premier chapitre). De nombreuses études reposent donc sur un autre type de données : les inventaires nationaux, des informations compilées pour chaque feu depuis des décennies par les forestiers ou les services de lutte (voir l'encadré 7 pour la France).

L'objectif de ces inventaires est d'enregistrer, de cartographier et d'identifier les causes des feux. Ceci implique donc de référencer au minimum la localisation, la date et la surface brûlée par chaque feu. Les premières traces de recensements systématiques remontent au XVIII^e siècle, essentiellement dans les pays les plus développés. La forêt était alors fortement exploitée pour différents usages (construction, chauffage, charbonnage, tanins, liège) et, la population ne cessant de croître, les feux pouvaient avoir un coût économique désastreux. Certains rapports d'administrateurs territoriaux de cette époque estimaient les surfaces brûlées et cherchaient les fautifs. À partir du XIX^e siècle, les rapports ont été majoritairement faits par des forestiers dans un but de gestion de la ressource, puis plus récemment (à partir de la deuxième moitié du XX^e siècle) par les sapeurs-pompiers en charge de la lutte. Les inventaires nationaux se sont multipliés au cours des dernières décennies, permettant à la communauté scientifique de mieux comprendre l'activité des feux et leurs tendances récentes.

Cependant, les inventaires nationaux ont eux aussi certaines limites. Premièrement, leur disponibilité reste géographiquement très hétérogène. Par exemple, ils sont souvent absents dans la zone intertropicale, qui est pourtant la plus affectée par les incendies. Cela peut s'expliquer à la fois par la relative jeunesse des systèmes administratifs des pays concernés et par le nombre important d'incendies, qui compliquent les tentatives de recensement exhaustif. Deuxièmement, la qualité des inventaires nationaux est très variable d'un pays à l'autre. La qualité des données repose sur un recensement régulier et sur des procédures bien établies, pour éviter des différences de description des feux dans le temps.

De telles procédures nécessitent des moyens et du temps. Malheureusement, de nombreuses bases de données souffrent d'une absence de suivi systématique. En outre, les recensements peuvent être intentionnellement manipulés ou faussés. Un exemple emblématique est le cas de l'URSS, période durant laquelle les pompiers ont fortement minimisé les surfaces brûlées pour montrer l'efficacité de leurs actions et percevoir des primes *ad hoc*. Les régimes politiques les moins démocratiques

ont aussi eu tendance à minimiser – voire nier – les catastrophes naturelles, en déclarant des surfaces incendiées bien en dessous de la réalité. Enfin, les synthèses internationales, sur la base de ces données nationales ou régionales, peuvent être difficiles à produire. La nomenclature légale peut différer d'un pays à l'autre, et même au cours du temps. Certaines bases de données distinguent les feux agricoles (affectant les cultures), les feux de forêt et les feux de végétation (forêts et autres végétations avec des buissons, les herbacées et autres pâturages), ainsi que leur origine avec les feux intentionnels et gérés (pour défrichage, nettoyage, amendement des sols) souvent non référencés par les services d'intervention, et les feux accidentels ou « naturels ». S'ajoute à ceci la notion de forêt, aujourd'hui définie comme un couvert d'au moins 10 % d'arbres de hauteur supérieure à 5 m, une définition récemment standardisée mais bien loin d'être homogène entre les pays.

Ainsi, si les inventaires nationaux permettent d'étudier les tendances récentes des feux de végétation dans le monde, une expertise importante est nécessaire pour critiquer et utiliser ces données. Par ailleurs, une certaine prudence reste nécessaire quant aux interprétations issues de leurs analyses, notamment dans les régions ou pays où les informations sont les moins sûres.

ENCADRÉ 7. FOCUS SUR LE RECENSEMENT DES FEUX EN FRANCE

La base de données de feux Prométhée (<https://www.promethee.com/>) est la première base de données officielle pour les incendies de forêt dans la zone méditerranéenne française. Dès 1973, Prométhée a commencé à recenser des incendies sur papier, puis sur le Minitel, et maintenant sur Internet. Elle a été alimentée principalement par les services départementaux d'incendie et de secours (SDIS). Les localisation, date, heure de début et de fin, surface parcourue, nature probable de la cause de départ de feu et origine de l'alerte sont renseignés pour chaque feu inclus dans la base. Depuis 2012, Prométhée est devenue BDIFF (base de données sur les incendies de forêt en France, <https://bdiff.agriculture.gouv.fr/>), gérée par l'Inventaire forestier national et l'Institut géographique national. Elle couvre maintenant toute la France métropolitaine.

LES ÉVOLUTIONS RÉCENTES : Y A-T-IL PLUS DE FEUX QU'AUPARAVANT ?

Malgré la place grandissante accordée aux feux dans les médias au cours des dernières années, cette question reste complexe car il est difficile de quantifier les tendances sur le long terme. Comme nous l'avons vu dans la section précédente, les bases de données de feu sont très hétérogènes à travers le monde, les feux n'étant pas répertoriés systématiquement de la même manière dans les différents pays. Les satellites offrent aujourd'hui une couverture globale des incendies à la surface de la Terre, mais les données collectées de cette qualité n'ont réellement débuté qu'au début du ^{xxi}^e siècle. À l'échelle du globe, les données satellites montrent plutôt une réduction de la surface brûlée par les feux de végétation d'environ 25 % entre 1998 et 2015, passant de 500 millions d'hectares à moins de 400 millions d'hectares chaque année. Cette diminution est également observée pour le nombre de dépôts de feux.

Cette tendance à la baisse concerne avant tout les savanes tropicales d'Afrique et d'Amérique du Sud et semble due en grande partie à des facteurs sociétaux ainsi qu'à des changements d'utilisation des sols. La pression agricole s'est en effet considérablement accentuée dans la zone tropicale. Les surfaces occupées par les savanes se sont considérablement réduites et nous assistons en même temps à une déforestation massive. Ces changements induisent une fragmentation des paysages et une réduction des surfaces combustibles.

Mais cette diminution globale des surfaces brûlées cache des tendances opposées dans d'autres régions du monde. Nous observons par exemple en parallèle une forte augmentation de l'activité des incendies, et notamment de la fréquence des très grands incendies sur le continent nord-américain ou australien, où la saison des feux 2019-2020 a été sans précédent en Nouvelle-Galles du Sud ainsi qu'en Tasmanie. De même, l'année 2017 a été une année de record absolu à la fois au Chili et au Portugal. Mais l'exemple le plus emblématique est sans doute celui des États-Unis. Le territoire américain constitue un très bon laboratoire d'analyse, car les bases de

données remontent au début du xx^e siècle et sont relativement homogènes sur l'ensemble du territoire. Ces bases de données montrent que les feux ont fortement augmenté au début du xx^e siècle, puis diminué dans les années 1950, avant de repartir fortement à la hausse au cours des dernières décennies. Ainsi, la surface brûlée entre 2003 et 2012 a augmenté d'environ 1 200 % au sein des forêts de l'Ouest américain, comparé à la décennie 1973-1982. En Californie, les surfaces brûlées ont augmenté de 405 % entre 1972 et 2018. Les huit plus grands feux observés dans cet État se sont produits entre 2014 et 2018. Les analyses régionales, basées sur des enregistrements observationnels les plus longs possible, sont donc essentielles pour mieux comprendre les évolutions passées. La réponse à la question « y a-t-il plus de feux qu'auparavant ? » dépend donc tout simplement de l'endroit où l'on vit.

Précisons également que ces analyses de tendances sont généralement basées sur les surfaces brûlées ou sur le nombre de feux. Ces deux métriques regroupent souvent des feux de natures différentes, brûlant à des intensités différentes. Or les feux de surface dans les savanes africaines sont généralement moins intenses que les feux de cimes se produisant par exemple dans les forêts nord-américaines, australiennes ou méditerranéennes. Le développement récent de nouvelles bases de données sur l'intensité des feux, mesurant l'énergie émise par le feu, ou basées sur les impacts environnementaux du feu (tels que le degré de dommage sur les arbres), devrait permettre d'apporter de nouveaux éléments de réponse sur des changements de régimes de feu jusqu'à présent peu étudiés.

DES CONDITIONS CLIMATIQUES DE PLUS EN PLUS FAVORABLES AU FEU

Les émissions de gaz à effet de serre engendrées par les activités humaines modifient la composition de l'atmosphère terrestre et contribuent à une élévation de la température à la surface du globe. Lorsque la température et la sécheresse augmentent, la végétation (toutes choses égales par ailleurs) devient plus

inflammable et combustible. Les feux sont donc affectés par ces changements.

L'indice IFM (indice feu-météo, nom français du FWI) évalue le « danger météorologique » des feux de végétation. Il indique la probabilité de leur éclosion et leur potentiel de propagation. Il est calculé quotidiennement à partir de plusieurs variables climatiques : la température, les précipitations, l'humidité de l'air et la vitesse du vent. L'IFM augmente lorsque la température et la vitesse du vent augmentent, et lorsque les précipitations et l'humidité diminuent. Ce danger météorologique a fortement augmenté au cours des quatre dernières décennies au niveau mondial, comme le montre une étude publiée en 2015 dans laquelle les chercheurs ont calculé et compilé les données d'IFM de 1979 à 2013 sur toute la planète. L'étude montre que l'augmentation des températures à la surface de la Terre se traduit par un allongement de la saison propice aux feux, par une extension spatiale des zones à risque, mais aussi par une augmentation de la fréquence des conditions météorologiques extrêmes généralement associées aux grands feux. Dans certaines régions, dont le pourtour méditerranéen, une tendance à la baisse des précipitations durant la saison estivale se combine à l'augmentation des températures, amplifiant l'augmentation de l'IFM. Dans d'autres régions, notamment certaines portions des forêts boréales, les pluies plus fréquentes durant la saison des feux tendent au contraire à limiter l'effet de l'augmentation des températures.

Il existe cependant des régions du globe qui vont à contre-courant de cette tendance générale. Un dixième de la planète végétalisée a des saisons d'incendies plus courtes aujourd'hui qu'au début de la période d'étude. L'Afrique de l'Ouest est ainsi plus arrosée depuis la fin des sécheresses du Sahel des années 1970 et 1980.

LE RÔLE DES FACTEURS NON CLIMATIQUES

Les changements climatiques ne sont pas les seuls facteurs expliquant les évolutions récentes des régimes de feux à travers la

planète. Des changements abrupts (en moins de dix ans) dans les surfaces incendiées ont parfois été observés dans certaines régions du monde, des variations difficilement imputables aux changements climatiques. Quels sont donc ces processus qui causent de tels changements ?

Une des causes principales est la modification de la végétation. Le feu étant sensible à la structure de la végétation et nécessitant une continuité horizontale de la biomasse dans le paysage pour se propager, une réduction ou une augmentation de la biomasse peut entraîner, à son tour, des modifications, parfois brutales, de l'activité historique des feux. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces transformations de la végétation : le climat, l'homme ou parfois des interactions plus complexes pouvant faire intervenir le rôle des insectes et l'herbivorie.

Un exemple particulièrement frappant de changement de végétation à l'échelle d'un territoire est l'abandon des usages agricoles et pastoraux en Europe après la Seconde Guerre mondiale. Cela a permis une recolonisation massive des garrigues (chêne-kermès, cistes) et des forêts de pins et de chênes autour du bassin méditerranéen, et une augmentation des grands feux, comme dans l'est de l'Espagne.

Les modifications de composition en espèces induites par des espèces invasives, souvent introduites volontairement (plantations) ou accidentellement (transport) par l'homme, peuvent également contribuer à diminuer ou augmenter l'activité des feux. La plantation d'eucalyptus en dehors de l'Australie est l'exemple le plus notoire, notamment au Portugal.

Les interactions entre la végétation et ses consommateurs herbivores constituent la deuxième cause de changement abrupt dans le risque incendie. En effet, une invasion, ou la disparition rapide de ces consommateurs de biomasse foliaire, la plus inflammable, peut fortement modifier la disponibilité de matière combustible. Les grands herbivores comme les ongulés (vaches, bisons, chevaux, moutons ou antilopes et zébus...) sont de gros consommateurs de biomasse herbacée. Dans les zones de prairie (les grandes plaines américaines emblématiques des westerns, ou les plaines d'Asie centrale) et de savane,

zones les plus affectées par les incendies au niveau global, les fluctuations de ces populations animales sont un facteur clé pour comprendre les tendances sur les surfaces incendiées.

Les différents changements de politique de lutte et de pratique du feu ont également fortement marqué l'histoire récente des incendies. Aux États-Unis, la mise en place de moyens de lutte au début du ^{xx}e siècle a permis de diviser par dix, entre 1910 et 1930, les surfaces incendiées. En France, elles ont diminué d'un facteur 4 entre 1985 et 1995, après la mise en place de nouvelles pratiques de gestion des feux. En Amérique du Nord, en Australie et en Amérique du Sud, la colonisation et le remplacement des populations locales et de leur pratique du feu au cours du ^{xix}e siècle constituent la principale source de variation. De manière encore plus directe, les conflits sociaux, les guerres et révoltes peuvent déclencher du jour au lendemain des mises à feu importantes et affecter des surfaces de végétation considérables. Le peu de séries temporelles suffisamment longues et précises pour le recensement des incendies fait que ces impacts sont peu documentés. Des changements abrupts des surfaces incendiées d'un facteur 3 à 5 ont toutefois été observés en Algérie, et récemment en Tunisie et en Syrie après le Printemps arabe de 2011.

Ces facteurs non climatiques peuvent donc avoir un rôle prépondérant, parfois plus important que le climat, dans les tendances récemment observées des régimes des feux. Ils sont toutefois très variables d'une région à l'autre et interagissent entre eux et avec le climat de manière complexe et parfois contradictoire. Dans les deux sections suivantes, nous proposons d'examiner plus précisément ces interactions sur deux territoires emblématiques du risque incendie : l'Ouest américain et l'Europe du Sud.

À QUOI EST DUE L'AUGMENTATION SPECTACULAIRE DES FEUX DANS L'OUEST AMÉRICAIN ?

Dans l'Ouest américain, qui concentre la grande majorité des feux de forêt américains, le nombre de feux de forêt de plus de

400 hectares a été multiplié par six en trente ans, et les surfaces de forêt brûlées ont été multipliées par treize par rapport aux années 1970-1980 ! Quelles sont les causes de ces évolutions majeures ?

Trois facteurs peuvent expliquer cette tendance. D'abord, le réchauffement climatique du fait de nos émissions de carbone, qui se traduit par une augmentation de l'inflammabilité du paysage. Ensuite, l'accumulation de biomasse combustible et les changements de structure des forêts, qui ont succédé à une politique d'éradication des feux mise en place au début du xx^e siècle. Enfin, la pression démographique et la construction d'infrastructures (routes, lignes électriques) et de maisons proches de la forêt, qui contribuent à une augmentation des départs de feu.

De nombreuses études ont démontré le rôle majeur du réchauffement climatique dans l'augmentation de l'activité des incendies observée dans l'Ouest américain. L'approche classique pour évaluer l'impact des conditions climatiques sur les feux consiste à agréger les surfaces brûlées dans le temps (par exemple sur une année ou une saison) et dans l'espace (par exemple sur une région, un pays ou un biome), puis à regarder la corrélation entre les séries temporelles de surfaces brûlées et les variations climatiques. À l'échelle de l'Ouest américain, les variations du climat expliquent plus de 76 % des variations de surfaces brûlées d'une année sur l'autre ! En d'autres termes, il existe un lien très fort entre l'intensité de la sécheresse et la quantité de surface brûlée chaque année.

Or la température et les surfaces brûlées ont conjointement augmenté au cours des dernières décennies dans cette région. Des travaux ont montré que la moitié de l'augmentation des surfaces brûlées au cours des trois dernières décennies était attribuable directement au changement climatique. Si l'on cumule ces surfaces brûlées dans le temps, cela représente environ 4,2 millions d'hectares, soit la superficie de l'État du Massachusetts et du Connecticut réunis. Plus régionalement, l'augmentation de la température au cours de la saison estivale depuis les années 1970 en Californie a contribué pour près de

la moitié de l'augmentation des surfaces brûlées dans cet État sur la période 1972-2018.

Dans les forêts situées en altitude ou bien dans la zone boréale, la date de la fonte des neiges semble également corrélée à l'activité des feux. Plusieurs études ont montré un lien très fort entre la température du printemps et l'activité des feux. Des températures printanières élevées sont généralement associées à une fonte des neiges plus précoce, à une saison des feux plus longue et à une augmentation des surfaces brûlées. À l'inverse, si le printemps est tardif, la saison des feux sera plus courte et l'activité des feux réduite. C'est justement au cœur des forêts situées au-delà de 2 500 m d'altitude que l'augmentation des surfaces brûlées semble la plus forte. Ce recul de la « barrière d'inflammabilité » entre les zones de basses et hautes altitudes est ainsi à l'origine d'une extension de 11 % de la surface forestière potentiellement inflammable à travers l'Ouest américain. En zone boréale, les données observées sur la période 1979-2009 montrent que chaque degré supplémentaire ajouté à la température moyenne d'un mois de juin par rapport à la normale saisonnière calculée sur toute la période induit un triplement de la surface moyenne des feux au printemps.

Une autre conséquence du réchauffement climatique est l'augmentation des températures nocturnes. Lorsque la température chute durant la nuit, la sécheresse de l'air diminue et le feu a généralement tendance à ralentir. Une étude récente a montré que les feux sont devenus également plus intenses la nuit du fait du réchauffement, réduisant ce qui constituait jusqu'alors des moments préférentiels durant lesquels les pompiers parviennent à maîtriser le feu.

Si le changement climatique a joué un rôle essentiel dans l'augmentation des feux, les effets secondaires des politiques d'éradication des feux en sont aussi, et de façon paradoxale, une cause importante. Au début du ^{xx}e siècle, après des événements d'une ampleur exceptionnelle (feux de 1910), les services forestiers américains ont décidé de mener une politique d'extinction des incendies très agressive. Une baisse drastique de l'activité des incendies a effectivement été enregistrée après les

années 1930. Mais les incendies jouaient auparavant dans ces écosystèmes un rôle de régulateur de la biomasse combustible. Des feux fréquents et peu intenses permettaient de nettoyer régulièrement le sous-bois, préservant ainsi les arbres d'incendies plus intenses et plus destructeurs. L'éradication quasi systématique des feux a profondément modifié la structure de certaines forêts américaines, avec une reconquête des arbres sur les milieux ouverts et une uniformisation des paysages. Toutefois, des politiques plus nuancées ont été mises en place progressivement dans les années 1970, permettant de laisser brûler certains feux dans les grands parcs naturels ou encore utilisant le brûlage dirigé pour réduire la biomasse combustible et réouvrir les milieux.

Enfin, la pression démographique s'est traduite par une extension des zones tampons entre l'urbain et la forêt, souvent désignées comme « interfaces habitat-forêts ». Cette extension des zones d'interface a, d'une part, accru l'exposition aux incendies et le nombre de structures à protéger et, d'autre part, contribué à une augmentation du nombre de départs de feux. Ainsi, au cours des deux dernières décennies, 84 % des feux recensés aux États-Unis (à l'origine de près de la moitié des surfaces brûlées) avaient une origine humaine et étaient situés en zone d'interface. À l'inverse, les feux d'origine naturelle (déclenchés par la foudre) frappent essentiellement les forêts reculées de l'Ouest américain au cours de la saison estivale, saison où éclatent des orages convectifs secs. Les feux d'origine humaine sont ainsi responsables, en moyenne, de 40 000 incendies supplémentaires chaque année à travers le pays depuis les années 1970.

Sur une durée de plus d'un siècle, et malgré les politiques de gestion forestière et de suppression des feux, le climat semble être le premier facteur expliquant les évolutions des surfaces brûlées dans l'Ouest américain. Les politiques de gestion ont pu aggraver sur le long terme ces évolutions en laissant la biomasse combustible s'accumuler dans certaines régions, amplifiant en retour la sévérité des feux, c'est-à-dire les conséquences sur les écosystèmes. Mais les effets de ces politiques restent difficiles à quantifier précisément. Les pratiques de

gestion et leurs effets sont variables selon les contextes locaux, et il est par conséquent plus difficile de détecter leur influence à l'échelle régionale.

POURQUOI LES FEUX ONT-ILS DIMINUÉ DANS LE SUD DE L'EUROPE ET EN FRANCE ?

Il existe relativement peu de données d'observation permettant de retracer l'évolution des incendies de forêt en Europe du Sud sur un siècle, comme cela a pu être réalisé aux États-Unis. Les enregistrements des incendies ne sont en effet systématiques que depuis quelques décennies (depuis 1973 pour la France, voir l'encadré 7). On dispose toutefois pour certaines régions, par exemple la province de Valence en Espagne, de reconstitutions permettant de remonter jusqu'aux années 1960 pour les plus grands feux.

Ces données à plus long terme permettent de mettre en évidence une tendance à l'augmentation des surfaces brûlées sur la période 1960-1980 en Europe du Sud (Portugal, Espagne, France, Malte, Italie, Grèce, Chypre). La déprise agricole, après la Seconde Guerre mondiale, a conduit à l'enfrichement de territoires jusque-là lieux d'activités agricoles et pastorales intenses. Cette extension des surfaces combustibles, en même temps que le dépeuplement de ces territoires et la sous-exploitation des forêts, est sans doute la raison de l'augmentation des incendies sur cette période.

Depuis les années 1980, on assiste à une évolution opposée. Les surfaces brûlées ont en effet diminué dans de nombreuses régions et à l'échelle de plusieurs pays, à l'exception notable du Portugal. De nos jours, les incendies brûlent environ 500 000 hectares par an en Europe du Sud (la superficie moyenne d'un département français). En France méditerranéenne, la surface brûlée annuelle est passée de plus de 30 000 hectares pour la décennie 1980, à 6 700 hectares pour la décennie 2010, soit une diminution de facteur 4, pendant que le nombre total de feux a été divisé par deux. On observe aussi une diminution importante des surfaces brûlées en Espagne et en Italie sur la même période, d'un facteur 2 à 3 environ.

Ces tendances à la baisse se sont produites en dépit des conditions climatiques plus favorables aux feux et sont principalement dues à une plus grande efficacité de la surveillance et de la lutte contre le feu par les pompiers. En France, une première baisse de l'activité des incendies au cours des années 1990 a succédé à la mise en place de la stratégie de prévention et de lutte au cours des années 1980. La baisse du nombre de feux peut aussi s'expliquer par la prévention des causes, avec une prise de conscience générale du risque incendie. Cette baisse est d'autant plus remarquable que la population ainsi que l'urbanisation proche ou en forêt se sont accrues, multipliant mécaniquement le risque de départ de feu. La baisse en proportion plus importante des surfaces brûlées peut être attribuée, quant à elle, à la doctrine d'attaque rapide et systématique des feux naissants par les pompiers pendant l'été. Après l'année 2003, on observe à nouveau une baisse de l'activité des incendies en France méditerranéenne. L'année 2003, avec plus de 60 000 hectares brûlés en région méditerranéenne, fut la pire année depuis 1973. Après ce bilan, la politique de lutte a été renforcée et, parallèlement, nous avons assisté à une professionnalisation de la mission des pompiers. Les surfaces brûlées ont encore diminué en moyenne d'un facteur 2 environ au cours des décennies suivantes.

À l'inverse, les enregistrements des feux au Portugal montrent une légère tendance à la hausse. Le Portugal est le pays européen le plus affecté par les incendies, avec une moyenne de 3 % des surfaces forestières et landes sauvages brûlées chaque année. Sous l'influence de l'océan Atlantique, le climat est favorable à la croissance d'une végétation abondante, qui va ensuite se dessécher fortement l'été. L'économie forestière du pays a favorisé le pin maritime et l'introduction de l'eucalyptus, au détriment des forêts de feuillus, pourtant réputées moins combustibles. Comme dans d'autres pays méditerranéens, la déprise agricole a été très forte après la Seconde Guerre mondiale, conduisant à une expansion considérable des surfaces combustibles. Ainsi, la continuité et la combustibilité élevée des forêts portugaises, qui non seulement favorisent l'extension des feux mais rendent aussi la lutte très

difficile, expliquent sans aucun doute les tendances actuelles. Une étude a montré que si les grands feux, qui représentent l'essentiel des surfaces brûlées, ont lieu dans des conditions météorologiques et de sécheresse sévères, la taille de ces feux est largement déterminée par la continuité horizontale et verticale du combustible. Enfin, les années 2003, 2005 et 2017, marquées par de fortes vagues de chaleur, représentent à elles seules près de 30 % des surfaces brûlées depuis 1980 au Portugal et contribuent en grande partie à cette tendance à la hausse au cours des quarante dernières années.

LES MÉGA-FEUX : UN PHÉNOMÈNE GRANDISSANT

Au cours des dernières années, nous avons assisté à travers le monde à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des feux les plus extrêmes. Ces feux représentent à eux seuls la majeure partie des surfaces brûlées, des émissions de CO₂ ainsi que l'essentiel des dommages aux biens, personnes et écosystèmes. Ce type d'événements a par exemple touché le Chili en 2017, la Californie en 2019 et 2020, le Portugal en 2003, 2005 et 2017 ou encore l'Australie en 2009 et en 2019-2020. Ces événements ont été largement relayés par la presse et constituent aujourd'hui la face émergée des changements de régimes des feux observés dans la plupart des écosystèmes de la planète. Les qualificatifs se sont multipliés : « très grands feux », « méga-feux », « feux extrêmes ». Mais comment les définir ? Quelles sont leurs caractéristiques et leurs causes ?

Qu'est-ce qu'un méga-feu ?

Le critère le plus simple pour définir un méga-feu est sa taille, c'est-à-dire la surface de végétation brûlée lors de l'incendie. Selon ce critère, les méga-feux seraient donc les plus grands feux enregistrés. En réalité, ils peuvent être plus ou moins grands suivant les régions : les méga-feux français sont plus petits que ceux de Californie, de Sibérie ou d'Australie. En effet, dans ces régions, les forêts sont beaucoup plus étendues qu'en France, où les paysages sont plus fragmentés. En Sibérie, la plupart des feux sont très éloignés des premières habitations,

dans des zones où la lutte n'est pas possible. Ainsi, les feux brûlent jusqu'à ce que le manque de combustible ou l'arrivée des précipitations y mette un terme (voir l'encadré 8). Le critère de la surface parcourue ne permet donc pas à lui seul de définir la dangerosité et les impacts du feu. Les méga-feux sont aussi ceux qui ont des comportements exceptionnels (vitesse de propagation, intensité du front de flamme, sautes de feux, comportement erratique) qui les rendent particulièrement dangereux, imprévisibles et difficiles à arrêter. Il est donc délicat d'appréhender ces phénomènes en dehors des contextes géographiques dans lesquels ils se produisent. Les différences nationales et régionales, dans les caractéristiques du paysage et la gestion des incendies, contribuent au caractère et à la gravité de ces événements. Ces considérations poussent donc à adopter d'autres visions et d'autres mesures pour tenter de définir ce phénomène.

De nombreuses recherches sont actuellement développées pour fournir un cadre conceptuel rigoureux à ce phénomène. Il faut pour cela s'appuyer sur plusieurs disciplines scientifiques (par exemple, l'écologie du feu, la foresterie, l'économie, la géographie, l'anthropologie, la psychologie, les sciences sociales). Dans cette perspective, comment peut-on, concrètement, définir un méga-feu ?

Regardons, à titre d'exemple, une définition proposée en 2018 par une équipe de chercheurs portugais. Ces derniers proposent de définir un méga-feu comme un « phénomène pyroconvectif dépassant la capacité de contrôle des forces de lutte (intensité de la ligne de feu supérieure à 10 000 kW/m), avec une vitesse de propagation supérieure à 3 km/h, présentant une distance de projection de brandons au-delà de 1 km de distance en avant du front, et un comportement et une propagation erratiques et imprévisibles. Il représente une menace accrue pour les services de luttés, la population, les biens et les valeurs naturelles, et entraîne probablement des incidences socio-économiques et environnementales négatives ». Bien que la terminologie des méga-feux ne soit pas universelle, les méga-feux présentent aujourd'hui un danger indéniable, quel que soit le niveau de préparation des services opérationnels.

ENCADRÉ 8. OÙ SONT LES FEUX EXTRÊMES DEPUIS 2001 ? UNE ANALYSE RAPIDE DES DONNÉES

Les feux ayant la durée la plus longue jamais enregistrée sont principalement situés dans le nord de l'Australie, dans des régions dominées par des savanes et le *bush*. Ils ont duré en moyenne 3 mois et demi ! Il faut dire que les pompiers n'interviennent pas ; les feux s'éteignent en général avec l'arrivée des pluies.

– Le feu ayant duré le plus longtemps depuis 2001 a duré 130 jours en Australie du Nord.

– En Asie, le feu le plus long a duré 78 jours ; en Afrique et en Amérique du Nord : 76 jours.

– Le feu le plus long en Europe a duré 41 jours (un mois et demi).

– Le feu le plus grand enregistré a brûlé 40 026 km², soit à peu près la surface des Pays-Bas ou de la Suisse ; il a eu lieu en Australie du Nord.

– L'intensité maximale des feux a été de 57 MW/m en Australie, et la vitesse maximale de 11 km/h.

– Le feu le plus au nord du globe a été enregistré dans le nord de l'Alaska (67°N), et le plus au sud en Argentine (50°S).

Selon Copernicus, le service européen de surveillance de l'atmosphère, les émissions liées aux méga-feux en Yakoutie (Russie) ont relâché dans l'atmosphère des quantités record de gaz à effet de serre : 839 Tg de CO₂ en 2021 (contre 450 en 2020 et 215 en 2019).

Cela équivaut à plus de deux fois les émissions totales de la France sur toute l'année 2020 (396 Tg).

La naissance des méga-feux

Quand démarre un méga-feu ? Le comportement d'un feu de forêt peut devenir extrême lorsque des nuages de type cumulus ou cumulonimbus sont générés par l'incendie lui-même, et viennent à leur tour influencer le comportement du feu, par des interactions entre le feu et l'atmosphère. On parle alors de « pyrocumulonimbus » (voir le premier chapitre). Ces types de nuages, comme nous l'avons vu, sont formés par des phénomènes de convection au sein du panache. La fumée chaude de l'incendie s'élève dans l'air, se refroidit et finit par condenser sous forme de vapeur d'eau et former des nuages. À leur tour, ces nuages sont susceptibles de déclencher des tempêtes et des

orages (secs) locaux, qui alimentent le feu en oxygène, créent des changements brusques de la direction du feu et favorisent l'allumage de foyers secondaires à des distances importantes (parfois jusqu'à plusieurs kilomètres) *via* le transport de brandons et la foudre.

L'exemple des méga-feux portugais de 2017

Depuis quelques décennies, le Portugal est régulièrement marqué par des incendies intenses parcourant de très grandes surfaces. En 2017, les feux portugais ont brûlé 520 000 hectares, soit plus de 60 % du total européen cette année-là. En juin, dans la région de Pedrógão Grande, un méga-feu a causé la mort de 66 personnes. Ce ne fut malheureusement pas le seul événement tragique de l'année 2017. Au cours de l'automne, plus de 600 feux ont parcouru environ 200 000 hectares à travers le centre du Portugal, tuant 51 civils dont 38 au cours de la journée du 15 octobre. Une fois de plus, ces méga-feux se sont propagés grâce à des conditions météorologiques sèches et ventées, notamment des vents violents liés au passage de l'ouragan Ophelia au large des côtes portugaises.

Ces deux événements extrêmes, survenus au début et à la fin de la saison typique des feux s'étendant généralement de mai à octobre, illustrent l'allongement de la saison à risque dans le sud de l'Europe. Ces catastrophes ont des impacts humains, économiques et médiatiques considérables ; ils marquent durablement les mentalités. Certains de ces incendies ont probablement été causés par des départs de feux volontaires, pour différentes raisons parfois difficiles à identifier. De plus, le Portugal est un pays extrêmement boisé, avec des plantations denses d'espèces hautement inflammables (eucalyptus, pin maritime, etc.) qui favorisent la propagation du feu. L'usage du feu pour les travaux agricoles et pastoraux y est courant, et les départs de feux sont donc nombreux. Les pompiers sont présents et efficaces, mais ils sont rapidement débordés par les incendies les plus violents, ou rencontrent parfois des difficultés pour accéder au site. L'apparition de quelques départs de feux au cours d'une période réduite peut suffire à déclencher une situation de crise. Il s'agit donc d'un ensemble de

processus qui rendent le paysage combustible et dangereux sur le long terme : l'apparition de méga-feux en est une conséquence logique et presque inéluctable.

Le réchauffement climatique contribue-t-il aux méga-feux ?

Les méga-feux qui se sont produits au cours des dernières années à travers le monde ont reçu une attention très forte du public. La responsabilité du réchauffement climatique d'origine humaine dans ces événements extrêmes est souvent débattue dans les médias. Comprendre les causes de l'augmentation des méga-feux est donc un défi à la fois scientifique et sociétal.

La complexité du risque incendie, incluant les processus écologiques, la gestion forestière, les causes de départs de feu, les changements d'utilisation des sols et la réponse des services opérationnels, rendent très complexe la séparation des impacts du changement climatique des autres facteurs qui affectent l'exposition et la vulnérabilité des biens, des personnes et des écosystèmes. De plus, le feu est un processus très aléatoire, ponctuel à la fois dans le temps et l'espace. Il est donc toujours délicat d'attribuer certains types de feux au réchauffement global. Ainsi, plutôt que d'établir un lien direct de cause à effet entre le réchauffement climatique et un feu, les scientifiques essaient de répondre à la question suivante : quelle est la probabilité d'observer ces méga-feux dans le monde réel (avec le réchauffement) et quelle est la probabilité pour que ces événements se produisent dans un monde hypothétique sans réchauffement climatique ? Le réchauffement climatique a-t-il favorisé les conditions atmosphériques propices aux feux ? A-t-il rendu ces feux plus ou moins probables ? Est-on sûr que tel ou tel feu n'aurait pas pu se produire sans réchauffement ?

Les études conduites jusqu'à ce jour montrent que le réchauffement global a joué un rôle majeur dans l'augmentation du risque incendie et dans l'occurrence des méga-feux dans de nombreuses régions du monde. Une étude canadienne a ainsi étudié les conditions météorologiques associées à l'incendie de Fort McMurray en 2016 au Canada, qui a brûlé plus de 590 000 hectares entre le 1^{er} mai et le 2 août. Les coûts

directs et indirects ont été estimés à 9,9 milliards de dollars. Il s'agit de la catastrophe naturelle la plus coûteuse de l'histoire du Canada. L'étude montre que les conditions climatiques enregistrées pendant ce feu sont devenues de deux à six fois plus probables ces dernières années à cause du réchauffement global. D'autres études ont analysé les conditions atmosphériques durant le *Creek Fire*, qui a brûlé plus de 150 000 hectares entre septembre et décembre 2020 dans le nord de la Californie, ainsi que celles associées à l'*August Complex Fire*, un ensemble de 38 feux différents déclenchés par la foudre entre le mois d'août et le mois de novembre 2020 dans le nord de la Californie et responsable de plus de 400 000 hectares de surfaces brûlées (le plus grand feu multiple jamais observé dans l'histoire californienne). Les chercheurs américains ont examiné la sécheresse de l'air lors de ces deux méga-feux et ont conclu que 30 à 50 % de l'augmentation de la sécheresse observée au moment des feux était directement attribuable au réchauffement climatique. Ces résultats nous permettent de mieux comprendre les effets du réchauffement sur l'activité des feux, mais aussi plus généralement de calculer la contribution du réchauffement planétaire dans les coûts associés à ces méga-feux. Comprendre le rôle des processus atmosphériques est donc crucial pour quantifier le risque actuel, mais aussi limiter le risque futur.

PEUT-ON PRÉDIRE LES ÉVOLUTIONS FUTURES ?

Pour prédire les tendances futures des feux, il faut analyser les conditions climatiques et météorologiques au moment où ces feux surviennent, et étudier comment ces conditions évoluent avec le réchauffement climatique en fonction de différents scénarios d'émissions. Nous savons que la hausse de la température entraîne un accroissement de l'évapotranspiration, qui à son tour entraîne un assèchement de la végétation, et que cet assèchement se traduit par une augmentation de l'inflammabilité du combustible, des départs de feux et des surfaces brûlées. La première étape consiste donc à formaliser mathématiquement cette relation entre le feu et le climat. C'est d'ailleurs

grâce à l'existence des bases de données de feux et des conditions climatiques à l'échelle du globe que les scientifiques ont mis en évidence le rôle d'une ou plusieurs téléconnexions (voir l'encadré 9) qui, dans certaines régions, permettent d'évaluer à l'avance la sévérité de la saison des feux d'après les températures océaniques de surface. La seconde étape consiste à coupler ces modèles feu-climat avec des projections climatiques simulant le climat futur en fonction de différents scénarios d'émissions de carbone jusqu'à la fin du siècle. Le couplage des modèles de feu avec les modèles climatiques permet d'estimer les changements futurs.

Si nous regardons un scénario dans lequel nous continuons sur la trajectoire actuelle en brûlant des énergies fossiles, les modèles simulent une augmentation de l'activité des feux dans la plupart des biomes actuellement soumis au feu, que ce soit sur le continent nord-américain, en Australie, dans la forêt boréale ou en Europe. Les hausses de la fréquence et de l'intensité des vagues de chaleur et de l'aridité de la végétation durant la saison des feux se traduisent donc par une augmentation de l'activité des feux.

À l'horizon 2100, les projections réalisées en Europe du Sud, aux échelles continentale, nationale ou régionale, montrent un accroissement du danger météorologique de 20 à 40 %, un allongement de la saison des feux et une multiplication des surfaces brûlées par trois. L'ampleur de l'augmentation des surfaces brûlées est toutefois très variable selon les méthodes employées et les régions, s'échelonnant de 50 à 600 % sur le siècle futur !

En termes plus qualitatifs, le scénario qui se dessine pour le futur est une augmentation importante des surfaces brûlées et de la fréquence des feux extrêmes dans les plaines et collines des régions méditerranéennes actuelles, ainsi que l'émergence d'un régime d'incendies significatif dans les régions situées plus au nord ou sur les territoires montagneux bordant l'aire méditerranéenne. Les phénomènes de dépérissement forestier, causés par des sécheresses répétées et des épidémies d'insectes ou de pathogènes, pourraient aussi accroître temporairement

le risque, y compris dans les régions du Nord, puisqu'ils entraînent une dessiccation brutale du feuillage des arbres. L'aridification accrue de certaines régions pourrait toutefois être un facteur limitant les incendies, faute de combustible, comme dans le sud de l'Espagne ou de l'Italie.

Ce scénario général s'applique également à l'échelle de la France. On s'attend à une multiplication par un facteur 3 des surfaces brûlées dans la zone méditerranéenne actuelle, qui est déjà la plus exposée au risque incendie. L'allongement de la saison à risque avec des conditions climatiques favorables aux feux ne se limitera plus aux mois de juillet et août, mais aura tendance à se produire plus tôt dans la saison, dès les mois de mai ou juin, et persistera plus tard dans la saison jusqu'aux mois de septembre ou octobre. Nous verrons très probablement plus de feux extrêmes comme ceux qui se sont produits lors de l'été 2003. L'autre conséquence majeure du réchauffement climatique est l'extension de la zone à risque, avec l'apparition de conditions météorologiques propices aux grands incendies dans des régions historiquement non soumises au feu comme les Alpes du Sud, la marge sud-est du Massif central, le Sud-Ouest et la façade atlantique. Nous assisterons également à l'émergence d'un régime d'incendies dans les régions du Nord, y compris dans les couverts agricoles. La probabilité d'occurrence des grands feux va également augmenter dans le massif forestier des Landes de Gascogne, qui présente une végétation continue et particulièrement combustible sur un million d'hectares.

Ainsi, c'est l'ensemble de la moitié sud de la France qui deviendrait un territoire à risque élevé d'incendie de forêt, pendant que la moitié nord connaîtrait des années propices aux incendies de forêt ou de cultures agricoles. Le développement d'incendies en montagne et au-delà de la région méditerranéenne pourrait induire des coûts supplémentaires pour la surveillance et la prévention de zones plus vastes. Pour la région méditerranéenne, la réduction de l'intervalle de temps entre deux incendies pourrait conduire à des conversions de la forêt vers des garrigues et des maquis, ou même à des formations herbacées.

Ce scénario sombre, il faut le rappeler, s'inscrit dans un scénario pessimiste d'évolution des émissions de gaz à effet de serre, et par conséquent du danger météorologique d'incendie. Si un scénario d'émissions moins pessimiste devait se réaliser, ces tendances seraient largement atténuées. Ainsi, pour la France, la hausse du danger météorologique serait réduite de moitié dans un scénario de stabilisation de la concentration en gaz à effet de serre à l'horizon 2100, par rapport au scénario pessimiste de trajectoire croissante. Les surfaces brûlées augmentant beaucoup plus vite que le danger météorologique, une réduction de moitié de la hausse du danger conduirait à une réduction plus drastique de la hausse des surfaces brûlées. Ainsi, la maîtrise des émissions anthropiques reste certainement le premier levier d'atténuation du risque futur d'incendie.

Enfin, au-delà de l'évolution des régimes d'incendies, la poursuite de l'augmentation de la population dans les zones littorales et son corollaire actuel, l'urbanisation croissante au contact des espaces combustibles, ne pourront qu'accroître mécaniquement l'exposition au risque incendie des biens et des personnes. À l'inverse, l'expansion des forêts au détriment de l'agriculture dans les territoires ruraux, si elle se poursuit, pourrait favoriser l'extension des grands feux, devenus plus probables dans les conditions météorologiques futures. Les politiques d'aménagement du territoire et les politiques agricoles sont par conséquent un second levier important de réduction du risque.

ENCADRÉ 9. LES TÉLÉCONNEXIONS, OU COMMENT ANTICIPER LES SAISONS DE FEUX DANS CERTAINES RÉGIONS

En climatologie, les téléconnexions font référence à des anomalies climatiques se déroulant (simultanément ou en différé) à de grandes distances, typiquement des milliers de kilomètres. La téléconnexion la plus emblématique est celle reliant, dans l'océan Pacifique, les variations de pression au niveau de la mer entre Tahiti et Darwin (Australie). Elle porte le nom d'« oscillation australe ».

Les téléconnexions influencent les conditions météorologiques sur des échelles régionales et parfois continentales, jouant ainsi un rôle majeur dans la modulation des températures et des précipitations à la surface du globe. Elles sont généralement cycliques par nature, et influencent la productivité primaire des écosystèmes et l'aridité de la végétation, deux éléments clés de l'activité des feux.

L'état hydrique du combustible répondant aux effets cumulés du climat lors des mois précédant la saison des feux, il est souvent possible d'anticiper les niveaux de surfaces brûlées plusieurs mois à l'avance dans les régions influencées en suivant une téléconnexion donnée. Ainsi, près de la moitié des variations de surfaces brûlées globales peut être anticipée plus de trois mois avant la saison des feux, essentiellement à travers les variations des températures de surface de l'océan Pacifique, un phénomène plus connu sous le nom d'El Niño. Ce potentiel de prévisibilité des surfaces brûlées est particulièrement élevé dans la zone tropicale, notamment en Amérique centrale, en Afrique (revoir l'encadré 3) et en Asie équatoriale jusqu'en Nouvelle-Calédonie et en Australie. Pour les régions boréales scandinaves, la téléconnexion responsable est l'oscillation nord-atlantique ; pour l'Ouest américain, en remontant jusqu'en Alaska et en pénétrant jusque dans le centre du Canada, les deux téléconnexions les plus actives pour les incendies sont l'oscillation décennale du Pacifique et El Niño.

DES PRÉDICTIONS SOUMISES À DE NOMBREUSES INCERTITUDES

Ces projections futures sont sujettes à de nombreuses incertitudes. Si les chercheurs peuvent évaluer certaines évolutions des feux dans le futur, ils n'ont pas encore réponse à tout. Dans l'ensemble, les projections climatiques s'accordent sur une augmentation de l'activité des feux en réponse au réchauffement, mais l'amplitude de ces changements reste très incertaine. Nous distinguons généralement trois sources d'incertitudes dans les projections climatiques.

La première réside dans le choix du scénario d'émissions. Combien de carbone allons-nous relâcher dans l'atmosphère dans les prochaines décennies ? Devons-nous considérer un

scénario optimiste ou plus pessimiste ? Cette question est éminemment politique.

La deuxième source d'incertitude réside dans le choix des modèles climatiques. Ceux-ci reposent sur les lois de la physique, mais diffèrent dans leur formulation et leurs hypothèses. En conséquence, la vitesse de réchauffement (et donc la quantité de surface brûlée) peut changer de façon substantielle d'un modèle à l'autre, c'est pourquoi on utilise généralement un ensemble de modèles, et les estimations présentées montrent la tendance moyenne ainsi que l'incertitude qui y est associée.

Enfin, la troisième source d'incertitude réside dans la variabilité naturelle du climat (voir l'encadré 9), c'est-à-dire dans les variations naturelles de température et de précipitations à la surface du globe (et leurs effets sur les feux), qui ne sont pas imputables aux émissions de gaz à effet de serre.

Enfin, il faut garder à l'esprit que ces projections sont basées purement sur les conditions climatiques, en faisant l'hypothèse (parfois forte) que la quantité de végétation disponible et les moyens de suppression futurs seront les mêmes qu'aujourd'hui. En effet, le réchauffement climatique, l'augmentation des feux, mais aussi les changements d'utilisation des sols peuvent modifier la végétation et altérer la relation fonctionnelle entre le climat et les feux. Par exemple, la répétition d'incendies et de sécheresses peut conduire certaines forêts méditerranéennes à disparaître et à être remplacées sur le long terme par des garrigues, limitant ainsi la quantité de combustible nécessaire à la propagation du feu. De même, les activités humaines sont souvent ignorées dans les projections futures, pourtant elles jouent un rôle essentiel à l'échelle locale.

L'homme modifie considérablement le couvert végétal. La déforestation se poursuit dans les régions du monde où de nouvelles terres à vocation agricole ou sylvicole sont recherchées, essentiellement dans les régions tropicales. Dans les pays à l'économie dite « développée », on assiste souvent à une progression des surfaces forestières, qui résulte du dépeuplement des territoires ruraux au profit de grands centres urbains.

L'urbanisation en forêt y progresse également, exposant une population de plus en plus nombreuse au risque d'incendie. La nature aléatoire et donc imprévisible de ces comportements humains ajoute de l'incertitude aux projections futures. De plus, la relation entre les activités humaines et les feux est très complexe et, dans tous les cas, mal reproduite par la majorité des modèles actuels. L'activité des incendies est parfois corrélée à la densité de population, à la distance à la route, au degré de fragmentation des paysages ou à la quantité d'interfaces entre l'habitat et la forêt, mais ces relations sont difficiles à anticiper. L'augmentation de la population dans les zones d'interface entre l'habitat et la forêt peut par exemple amplifier les effets du changement climatique en favorisant les départs de feux, mais aussi fragmenter les paysages et offrir plus de coupures de combustibles, limitant ainsi la propagation des feux. La dimension humaine reste donc la principale inconnue dans l'équation des feux futurs.

À quelles évolutions devons-nous donc nous attendre dans le futur ? Malgré les incertitudes liées aux données et aux modèles, le climat du futur devrait accroître la probabilité d'occurrence des feux extrêmes dans la grande majorité des biomes terrestres. Mais le feu reste très difficile à simuler, et prédire des événements extrêmes qui n'ont pas d'analogues dans le passé récent, tels que les méga-feux en Scandinavie en 2018 et en Australie en 2019-2020, représente un défi majeur pour la communauté scientifique. En effet, ces méga-feux sont le produit de divers facteurs, parmi lesquels une sécheresse sans précédent, la combinaison très rare de plusieurs modes de variabilité climatique, en lien avec différentes téléconnexions (voir l'encadré 9) qui ont contribué à des conditions feu-météo particulièrement chaudes et sèches à travers ces régions. De plus, les facteurs humains, les moyens de suppression et la réactivité des forces en charge de la lutte, ainsi que les dynamiques de végétation, compliquent la traduction de ce danger en activité réelle des incendies pour prédire le nombre de feux, leur surface et leurs conséquences sur les écosystèmes et les sociétés humaines. Il semble impossible à l'heure actuelle de capturer l'ensemble de ces facteurs dans un modèle unique, et la prédiction de ces

combinaisons spécifiques de comportement humain et d'extrêmes climatiques dépasse les capacités des meilleurs modèles de feu existants.

D'importants changements dans les régimes des feux ont été observés durant les dernières décennies. Les facteurs à l'origine de ces changements sont multiples. Le changement climatique, à l'évidence, tient un rôle prépondérant dans l'augmentation des surfaces brûlées, notamment sur le continent nord-américain et en Australie. Mais de nombreux autres éléments non climatiques viennent, localement, atténuer, contrecarrer ou renforcer l'effet du climat sur les incendies. Ils incluent des facteurs liés à la végétation (types d'espèces présentes, structure des peuplements, continuité des paysages, etc.) et aux activités anthropiques (forces de lutte, prévention, allumage). Malheureusement, les projections climatiques indiquent une hausse des surfaces brûlées ainsi que de la fréquence et de l'intensité des méga-feux dans un grand nombre de régions du globe, qu'il sera difficile de totalement maîtriser avec les politiques de gestion actuelles. Il est donc urgent de renforcer les mesures afin de limiter ces changements et d'adapter les territoires face à ce risque croissant.



LES SOLUTIONS POUR MIEUX GÉRER LES INCENDIES DE VÉGÉTATION À LONG TERME

De nombreuses personnes vivent dans des paysages hautement inflammables. Les missions d'assistance et de secours des services d'incendie y sont souvent difficiles. La société civile doit prendre conscience des risques d'incendie du paysage, et être disponible pour contribuer à la prévention des incendies. Cela passe par la protection des maisons, jardins et autres biens contre les incendies, en adoptant de bons réflexes, et par une sensibilisation aux causes des départs de feux les plus courantes (mégots de cigarette, barbecues, etc.). Mais, dans un contexte de changements climatiques globaux, pour faire face aux méga-feux et aux évolutions des paysages végétaux dans le futur, il est nécessaire d'aller plus loin que la prévention et la lutte par l'action des pompiers.

Dans ce chapitre, il s'agit d'expliquer comment on peut mieux gérer les incendies de forêt et de végétation. Quelles solutions peuvent être adoptées à long terme pour réduire le risque d'incendie et améliorer notre gestion des feux ? Nous verrons que des approches intégrées, faisant appel à diverses disciplines et techniques, à différents acteurs opérationnels et sur de multiples échelles, spécifiques à chaque région du globe, semblent être la solution. Inutile de chercher des moyens complexes : la nature est, comme toujours, source d'inspiration ! Des solutions basées sur la nature et bien maîtrisées par les populations locales sont mieux à même d'être appliquées dans le futur, alors que de nombreuses personnes sont actuellement démunies et mal préparées pour affronter des feux, même de moindre importance que les méga-feux.

RÉAGIR ET SE PROTÉGER FACE AU RISQUE

Les feux de forêt et de végétation constituent un risque pour les sociétés humaines. La période récente a montré une

augmentation des événements extrêmes comme les méga-feux, particulièrement destructeurs : le risque augmente donc, car, nous l'avons vu, il dépend à la fois de l'intensité de l'aléa et des impacts et dommages causés aux biens et aux personnes (voir les deuxième et quatrième chapitres). Pour réduire ce risque d'incendie, nous pouvons agir sur l'aléa, soit très en amont par la prévention – avec le débroussaillage régulier, ou en favorisant le développement d'espèces moins inflammables ou que leur structure rend moins propices à la propagation du feu –, soit au moment du feu par la lutte. Nous pouvons aussi agir pour diminuer la vulnérabilité des enjeux humains et matériels, par exemple en concevant des édifices plus résistants au feu, en réduisant drastiquement la construction en forêt ou au voisinage des forêts, en prévoyant un espace défendable et un refuge pour les personnes quand le feu arrive, ainsi que des voies bien entretenues pour s'échapper. L'éducation et la sensibilisation du public sont des éléments clés pour éviter les départs de feux et pour appliquer les bonnes règles en cas d'incendie. Mais ces actions sont encore trop rares. Toutefois, en Australie, aux États-Unis et au Canada, les habitants sont de nos jours bien informés sur le risque incendie grâce à l'affichage de panneaux en couleur et à des applications sur smartphone indiquant le niveau de risque quotidien et permettant d'alerter rapidement en cas de départ de feu. Celui-ci va de « faible à modéré » à « catastrophique » lors de journées propices aux méga-feux.

Lorsqu'on réfléchit à la réduction du risque, il faut se souvenir que les feux sont présents sur une grande partie du globe : les solutions pour les limiter ou les contrôler varieront donc selon les contextes régionaux et les pratiques humaines. Il existe différentes manières de concevoir le contrôle du feu, avec des technologies complexes, ou avec des solutions fondées sur la nature. Toute une panoplie de politiques de gestion des incendies, qui vont de l'interdiction totale des feux jusqu'à leur usage pour limiter d'autres feux, ont aussi été testées. Des solutions existent et sont efficaces ! Elles doivent être adaptées au régime d'incendie et aux moyens de lutte de chaque région du globe.

Les politiques de gestion du feu et d'aménagement : l'extinction systématique des feux par les pompiers

Dans les pays occidentaux, comme nous l'avons vu, la plupart des politiques modernes de gestion des territoires et des incendies reposent sur la stratégie d'exclusion des feux. Celle-ci s'appuie sur deux éléments-clés : éviter les départs de feu d'origine humaine et lutter énergiquement contre le feu dès qu'il se déclare. Dans le cadre de ces politiques, les opérations de lutte sont guidées par l'objectif de minimiser les surfaces brûlées, et partent donc du postulat que les pertes engrangées, qu'elles soient économiques, écologiques ou humaines, sont corrélées à la taille des incendies.

Les politiques d'exclusion du feu sont la conséquence d'une vision anthropologique du rapport de l'homme à la nature, considérant cette dernière comme un élément externe à maîtriser par le développement d'outils techniques et par le recours à des politiques de grande échelle. Un exemple illustre bien l'origine de ces politiques. En 1910, un important feu de forêt se déclara dans le centre-ouest des États-Unis. En deux jours, plus de 120 000 hectares partirent en fumée, et l'incendie fit 87 victimes, essentiellement parmi le personnel des services de lutte. Cet événement, abondamment relayé par la presse de l'époque, constitua un véritable électrochoc pour la population américaine, qui fut profondément marquée par sa violence. Des dénominatifs plus terrifiants les uns que les autres furent employés pour désigner l'incendie : *Big Burn*, *Big Blowup* ou même *Devil's Broom Fire* (le « feu de balai du diable »). Aujourd'hui encore, ce feu est resté dans les mémoires comme le « grand feu de 1910 » (*Great Fire of 1910*). Il a accéléré la mise en œuvre de politiques fédérales de suppression des incendies, qui se virent allouer de nouveaux moyens et prirent définitivement forme dans une loi nationale votée en 1914. Ces politiques furent plus tard relayées par le message *Only you can prevent forest fires* (« Vous seul pouvez empêcher les feux de forêt ») auprès du grand public, la campagne étant incarnée par l'ours Smokey Bear. La mascotte, qui tint l'affiche pendant plusieurs décennies, coiffée de son chapeau jaune de garde forestier, joua un rôle déterminant dans le succès des

politiques d'exclusion des feux, et cela bien au-delà des frontières étasuniennes.

Le succès des politiques d'extinction des feux de forêt est bien réel : elles réduisent les dommages et assurent la maîtrise d'une très grande majorité des feux. La France, notamment, bénéficie d'un système de lutte très efficace, les moyens aériens. Les avions Canadair et Dash, larguant de l'eau avec ou sans produit retardant sur le front des flammes, et les hélicoptères EC-145, en vol stationnaire pour surveiller les zones atteintes par les incendies, viennent en renfort des moyens terrestres (camions et équipes) engagés dans la lutte. Pendant les jours à risque, des camions de pompiers sont prépositionnés sur le terrain et prêts à intervenir très rapidement en cas de fumée repérée par un avion Dash ou par une tour de guet du réseau de surveillance. Chacun de ces moyens est un maillon du système d'alerte et de gestion des feux de forêt dont le commandement est fonctionnel 24 h/24 h pendant toute la saison estivale à risque.

Pourtant, ces politiques sont contestées, pour deux raisons. Leur principale limite réside dans leur incapacité à contrôler les feux dont l'intensité dépasse un seuil critique (autour de 5 à 10 MW/m). Au-delà de ce seuil, les forces de lutte sont dépassées car elles ne peuvent réduire la puissance dégagée. Les feux très rapides et les sautes de feu, favorisés par un vent fort, mettent aussi les forces de lutte à rude épreuve, d'autant que ces feux sont souvent intenses. Ces incendies sont rares en France, mais ils sont responsables de la majorité des dommages et des catastrophes de grande ampleur : c'est là toute la problématique des méga-feux que nous avons développée au chapitre précédent. Dans la plupart des pays développés confrontés à des problèmes d'incendies de forêt, les statistiques actuelles montrent que 1 % à 5 % des départs de feu y deviennent des incidents de grande ampleur, et cette faible fraction représente finalement environ 85 % des dépenses totales de lutte et jusqu'à 95 % des surfaces brûlées.

Les politiques de suppression des incendies présentent aussi un défaut : elles ignorent le rôle régulateur des feux de forêt dans le maintien des écosystèmes. Comme nous l'avons vu dans le

cas des forêts de séquoias géants de l'Ouest américain, cette ignorance est préjudiciable (voir le deuxième chapitre). Enfin, à la lumière des incendies marquants de la dernière décennie, observés sur tous les continents, il devient de plus en plus évident que la lutte seule ne peut résoudre durablement la problématique des grands feux, ni leurs impacts démesurés.

Faire face à des méga-feux : prévenir, se préparer, réduire les vulnérabilités

Le développement de méga-feux dans plusieurs régions du globe nous montre ce que pourraient être les incendies de forêt du futur : immenses, parfois multiples, très intenses et rapides, au comportement changeant, capables de traverser des zones urbaines, et fortement destructeurs (voir le chapitre précédent). Les réponses à ces feux qui défient la lutte doivent venir, d'une part, de la prévention, de la prise de conscience et de la préparation des habitants, et d'autre part, de la gestion de la végétation, des forêts, de l'urbanisme et des territoires.

Au cours des dernières décennies, dans les régions méditerranéennes d'Europe, la quantité de biomasse accumulée du fait de la déprise agricole a considérablement augmenté l'intensité et la vitesse de propagation des feux. La construction de maisons et d'infrastructures dans ces régions a conduit au développement massif de zones d'interface habitat-forêt particulièrement dangereuses. Elles augmentent la probabilité de départs de feux proches des maisons, du fait des activités humaines, et elles sont les premières zones brûlées lorsque les feux démarrent en forêt ! La lutte y est singulièrement difficile pour les pompiers, qui doivent accéder aux maisons et évacuer les personnes en même temps. Il s'agit d'un véritable syndrome dont souffre tout le bassin méditerranéen, mais aussi la Californie, l'Australie et l'Afrique du Sud : ces régions mélangent une forte densité d'habitat avec une forte densité de végétation inflammable, et le climat y est favorable à la propagation du feu.

Dans les communautés humaines bien informées sur le risque et proactives, les personnes sont conscientes du niveau

de risque de départ de feu quotidien ; elles connaissent les méthodes de débroussaillage et d'élagage des grands arbres, et les sorties de secours à emprunter. Cela permet de limiter la vulnérabilité des personnes et des biens. Face à un aléa qui augmente, réduire la vulnérabilité des personnes et des enjeux est essentiel.

LES SOLUTIONS ALTERNATIVES À L'EXTINCTION DES FEUX

Face aux incendies du futur, les forces de lutte elles-mêmes admettent qu'elles seront probablement débordées. Les habitants sont impuissants face aux feux les plus dynamiques et les plus intenses. De même qu'on n'imagine pas pouvoir arrêter un séisme, une avalanche ou un tsunami de grande ampleur, on n'imagine pas maîtriser aisément un méga-feu ! Dans les régions à fort risque, les solutions sont donc plutôt à chercher du côté de la préparation et de la prévention. Plusieurs approches complémentaires sont présentées ci-dessous.

La participation et l'éducation face au feu : les bons réflexes

Lorsqu'on examine des aléas exceptionnels, un aspect crucial à considérer est que l'impact n'est pas seulement financier et concret (par exemple, des maisons et des forêts brûlées), mais aussi psychologique et peut-être écologique (voir le deuxième chapitre). Le fait de prendre en compte ces impacts et de faire participer les habitants à une préparation et à une réparation est important et motivant. En gérant elle-même le débroussaillage et l'élagage des arbres ou en entretenant les voies d'accès et de secours, la population sent qu'il est possible d'éviter certains dommages, et aura plus tendance à s'investir. Là où existe une forte capacité de mobilisation de communautés humaines, par exemple au niveau d'un village, d'un hameau ou d'un lotissement, il est plus facile de sonner l'alarme, et la mobilisation sera plus rapide et coordonnée.

La lutte et l'extinction des feux par les pompiers ont évolué. Leur action est de plus en plus efficace : prépositionnement des forces

de lutte dans les zones d'intérêt, surveillance aérienne pendant les périodes à risque, intervention rapide par des moyens aéroportés, etc. Des progrès sont encore possibles dans la prévision des feux, notamment pour anticiper l'occurrence des méga-feux, et ainsi alerter les populations et mieux répartir les moyens de lutte. Une bonne préparation de la population est cruciale en situation de crise. La population doit connaître les bons réflexes (faut-il partir ou rester en cas d'incendie ? par quel chemin échapper aux flammes ? etc.). Pourtant, la préparation des populations reste, de manière générale, encore limitée. L'information et son partage, la surveillance mutuelle et l'alerte rapide sont des facteurs clés pour échapper aux feux dangereux. C'est pourquoi il est très utile de partager son expérience (voir l'encadré 10), d'acquérir des connaissances sur les incendies, et de communiquer avec les pompiers. À cet effet, de plus en plus d'applications sur smartphone permettent d'avoir des informations sur les bons réflexes en période à risque de feu. De même, les services de secours échangent leurs expériences et leurs techniques pour améliorer la lutte contre le feu, tout comme les scientifiques.

ENCADRÉ 10. LE RETOUR D'EXPÉRIENCE APRÈS LES MÉGA-FEUX DU « SAMEDI NOIR »

Le cas des méga-feux de brousse australiens du « samedi noir », en février 2009, montre qu'il est utile de faire des retours d'expérience, parfois sur plusieurs années. Après 2009, ces retours ont permis d'aboutir à des prévisions météorologiques optimisées, d'établir une meilleure information du public au sujet des incendies et de la météo, d'assurer des coordinations et des coopérations plus efficaces entre les agences d'intervention d'urgence et les gestionnaires des terres publiques, et d'élaborer des réglementations de construction et d'aménagement plus adaptées aux zones sujettes aux incendies. Cela a aussi accéléré l'accès fiable aux avertissements et aux messages d'alerte. Ces retours d'expérience ont sans aucun doute atténué certains des impacts des incendies de la saison de feu 2019-2020 dont les images ont fait le tour du monde, du fait de cette sensibilisation de la population australienne.

Réduire le combustible et cloisonner le feu

En France, il existe une obligation légale de débroussaillage autour des maisons et des bâtiments, généralement sur 50 m de distance, et si la maison est située à moins de 200 m d'une forêt. Les exemples sont nombreux pour montrer qu'un débroussaillage effectué dans les règles est très efficace en cas d'incendie : les dommages seront fortement réduits et l'effet sera même augmenté si plusieurs maisons débroussaillent un grand espace en commun. Sur le long terme, toutes les pratiques visant à gérer les forêts et la végétation combustible, ainsi qu'à entretenir les accès et les abords des maisons, sont utiles. Les *coupures de combustibles*, des infrastructures linéaires où l'abondance de la végétation est contrôlée, permettent ainsi de freiner la propagation des flammes par endroits, et de ménager des accès ou des sorties de secours.

Il existe tout un arsenal de solutions : aménager des éclaircies qui limitent la biomasse forestière, favoriser les essences locales moins inflammables et combustibles, opérer une revégétalisation avec des espèces peu inflammables, choisir des espèces à faible croissance et à faible proportion inflammable, bien espacer les arbres plantés, etc. Des pare-feu ou coupe-feu peuvent aussi être conçus par le maintien d'un sol nu ou d'une végétation naturelle très peu abondante (herbe rase), ou encore par des cultures précoces, après lesquelles on élimine les résidus végétaux pour éviter de créer du combustible. Des plantations et des zones arborées qui limitent la croissance de l'herbe et des buissons en sous-étage (oliveraies, arbres fruitiers) auront un effet similaire. L'ajout de troupeaux est souvent très profitable dans ces pare-feu : les animaux y maintiennent une végétation rase, ce qui limite fortement la propagation des flammes au sol et réduit la probabilité qu'elles montent dans la cime des arbres. Depuis des centaines d'années, le sylvopastoralisme (le pâturage de troupeaux en zone boisée) a l'intelligence d'associer deux sources de revenu (les produits du bois et des animaux), tout en nettoyant la végétation buissonnante.

Traiter le feu par le feu

Si la réduction de la biomasse végétale peut être opérée par des moyens mécaniques, tels que des engins broyeurs, elle peut aussi être réalisée... en utilisant le feu ! Comme nous l'avons décrit dans le cas de Madagascar (voir le deuxième chapitre, encadré 4), le feu sert souvent à réduire la biomasse végétale et à éliminer des buissons. Cette pratique nécessite une bonne maîtrise technique, et elle doit bien sûr être mise en œuvre en dehors des périodes à risque. En France, les *brûlages dirigés* sont souvent opérés en hiver ou au printemps, afin de diminuer la biomasse combustible sur pied. Ces brûlages sont très utilisés sur d'autres continents, en Amérique du Nord ou en Australie, pour gérer de vastes territoires faiblement peuplés.

En Europe, certains pays, dont la France, ont introduit cette pratique encadrée depuis les années 1990. Elle permet de réduire à moindre coût la biomasse combustible dans des zones non mécanisables souvent recouvertes de broussailles, d'herbe, de bois morts ou de litière. Toutefois, son application reste limitée : les fenêtres météo favorables sont de courte durée (pas de vent et un air humide), car le brûlage doit être faisable tout en restant contrôlable, et ces feux peuvent engendrer des nuisances liées aux fumées. Ils permettent de brûler la végétation sur pied ou résiduelle sur de petites surfaces en dégageant peu d'énergie, et donc de limiter le risque d'échappement du feu. Le fait de brûler successivement de petites surfaces permet d'obtenir un résultat qui restreint la végétation contiguë. Ces feux dirigés sont destinés à créer et entretenir des coupures pare-feu. Ils doivent être réalisés par des professionnels du feu, qui sont expérimentés. Un autre de leurs avantages est de permettre le maintien de la biodiversité.

Agir à l'échelle des politiques

Le problème des incendies s'inscrit dans un cadre multisectoriel à la croisée de plusieurs politiques publiques. Il nécessite donc d'être géré par des acteurs issus de secteurs multiples : forêt, urbanisme, protection civile, agriculture, économie, énergie, environnement. Pourtant, sa gouvernance est souvent conçue

secteur par secteur, ce qui est dommageable. Ainsi, si chaque secteur peut apporter sa part de solution pour réduire le risque, cela ne fonctionnera qu'à condition de s'intégrer à une vision d'ensemble, et de répondre à une diversité d'enjeux sociaux et environnementaux dépassant le seul problème des incendies. Dans cette vision nouvelle, les incendies catastrophiques sont la manifestation d'un problème plus profond de gestion des territoires et d'une culture du risque incendie insuffisamment développée. Pour expérimenter une gouvernance différente, une démarche participative a été conduite dans une collectivité locale de Catalogne, impliquant non seulement les institutions nationales et régionales, mais aussi les communautés locales à même d'évaluer la valeur sociale des composantes du territoire. Ces approches innovantes ont l'intérêt d'engager les différents acteurs de la gestion des incendies, locaux, régionaux et nationaux, plutôt que de laisser cette seule responsabilité à l'État. On voit bien qu'une telle évolution de la gouvernance constitue un choix politique fort.

La dynamisation de l'économie locale, notamment dans les secteurs agricole et forestier, constitue un autre moyen de créer les conditions – ici économiques – permettant une réduction du risque incendie sur le long terme, à travers la gestion du territoire. La réalisation de coupures de combustible a ainsi été promue dans les années 1990 comme un moyen essentiel de contrôle de l'extension des feux dans la région méditerranéenne française, puis largement délaissée depuis la fin des années 2000 pour des raisons essentiellement économiques. Pourtant, de nombreux travaux et études montrent que ces pratiques sont utiles, en particulier le pastoralisme et le brûlage dirigé, même si elles sont malheureusement moins efficaces dans des conditions climatiques extrêmes. Une valorisation agricole, pastorale et forestière plus forte des territoires concernés ainsi qu'une insertion dans une politique d'ensemble visant à rendre ces territoires plus résilients au feu auraient sans doute permis de soutenir l'effort financier que représentaient la création et l'entretien des coupures. Face à ces difficiles arbitrages budgétaires, l'évaluation du coût des incendies pourrait venir éclairer les décisions (voir l'encadré 11).

ENCADRÉ 11. LE COÛT GLOBAL DES INCENDIES DE FORÊT ET DE VÉGÉTATION

Il reste difficile d'évaluer de manière fiable les coûts liés au risque incendie, quelle que soit l'échelle de travail (locale ou globale). Les feux ont des impacts sur la végétation, sur les infrastructures, sur la vie humaine et ont également un coût en ressources humaines et matérielles mobilisées pour les combattre. À titre d'exemple, les dommages causés aux maisons lors des grands feux du Var en août 2021 ont été estimés à 100 millions d'euros. Les dommages environnementaux dans la Réserve naturelle nationale de la plaine des Maures ont été importants, puisque 80 % de son territoire a brûlé. Il faudra sans doute plus de dix ans pour que les écosystèmes récupèrent leur état d'avant ces incendies.

C'est pourquoi, même s'il faudra peut-être aider certaines formations végétales qui auraient du mal à se régénérer naturellement dans les prochaines années, les coûts économiques nécessaires à leur restauration sont encore inconnus. Aux États-Unis, contrairement au continent européen où la majorité des feux sont contenus au cours de la journée, certains feux brûlent pendant plusieurs semaines, voire plusieurs mois. Le coût de la suppression excéderait parfois 100 millions de dollars pour un seul feu ! Ce coût a augmenté de façon exponentielle au fil du temps en réponse à l'augmentation des surfaces brûlées. Cependant, les évaluations n'incluent pas les coûts sociétaux indirects, qui dépassent parfois les coûts directs de la suppression du feu.



CONCLUSION

Nous habitons sur une planète inflammable, et tous les incendies ne peuvent pas être éliminés. Ce n'est d'ailleurs pas souhaitable. En effet, les feux de végétation jouent un rôle écologique et social considérable : ils sont à la fois des perturbations naturelles et un outil millénaire pour transformer la végétation, cultiver des plantes ou préparer des pâturages pour le bétail. Si le rôle des feux a bien entendu évolué au cours du temps, ces derniers restent essentiels pour la subsistance de nombreuses populations. Mais, comme Janus, le feu a deux visages : il est aussi destructeur et dangereux. Il constitue ainsi un risque majeur dans de nombreux pays, où il nécessite d'être surveillé et contenu. La lutte contre les feux y fait l'objet de politiques visant à protéger les personnes, les biens et l'environnement. Le feu est donc à la fois utile et dangereux, indispensable ou à éviter, désirable ou indésirable selon les régions du monde.

Une chose est sûre : aujourd'hui le feu est indissociable de l'homme. Ce dernier est le principal promoteur du feu, loin devant la foudre, première cause naturelle des feux. Sans l'outil feu, pas de subsistance pour les communautés humaines. C'est la maîtrise du feu par l'homme qui a permis le développement des populations et l'entretien des paysages. Depuis des millénaires, l'homme plonge donc son regard dans les flammes. La science s'est aussi intéressée au feu, d'abord pour comprendre sa nature, puis pour le dompter, et des progrès considérables ont été accomplis au fil du temps. Le feu est analysé par les physiciens, qui s'attachent à comprendre les processus d'écllosion et de propagation du feu, et les interactions du feu avec l'atmosphère. Les écologues étudient son rôle dans la biosphère, ses effets sur les plantes, la faune et les sols, et cherchent en retour comment adapter les régimes de feu à différents écosystèmes pour en préserver la biodiversité et les services. Les gestionnaires adaptent les pratiques du feu aux besoins dans chaque région du globe. Les causes des départs d'incendies, et les motivations lorsqu'ils sont allumés volontairement, sont

analysées par des experts afin de réduire leur part accidentelle ou criminelle. Les pompiers, quant à eux, ont développé des méthodes et des outils très puissants pour surveiller et prévenir les incendies de végétation, et lutter contre ces derniers quand ils se déclarent, avec pour objectif de protéger les enjeux humains et naturels. Ces efforts sont appuyés par les technologies de plus en plus présentes pour détecter, suivre et visualiser les feux en temps réel. Des satellites spécialisés, notamment, scrutent en permanence la Terre pour détecter les points chauds et suivre le développement des contours de feux. À l'ère du numérique, les données recueillies deviennent de plus en plus précises, et des bases de données de plus en plus fournies et volumineuses sont constituées.

La recherche est ainsi en pleine ébullition ; dans le futur, il s'agira de mieux mesurer l'intensité des feux de végétation, leur dynamique, leurs causes et leurs impacts. Les feux de végétation sont contrôlés par différents facteurs : certains sont naturels, comme le climat, la météo et la végétation ; d'autres sont humains, comme les départs de feux causés par l'homme et les allumages volontaires. Les interrelations entre l'homme, le climat et la végétation font que certains paysages brûlent fréquemment, et d'autres non. Une discipline dédiée, la pyrogéographie, étudie ces variations et tente de comprendre quelles combinaisons de facteurs sont les plus propices au feu. Comme de nombreuses autres disciplines scientifiques, la pyrogéographie est bouleversée par le changement climatique en cours. Le dernier rapport du GIEC nous alerte, encore une fois, sur la nécessité d'appliquer rapidement des solutions, et sur le long terme. Les feux de végétation participent à la libération de CO_2 dans l'atmosphère, à hauteur de 7 milliards de tonnes chaque année, soit environ 15 % des émissions totales. Au cours des dernières années, le réchauffement a favorisé le développement de grands incendies, dynamiques et intenses : les méga-feux. Ces incendies inédits sont révélateurs du changement climatique en cours, et ils ont des impacts humains et écologiques considérables. Ils remettent aussi en question nos politiques de prévention et de lutte. Si certaines régions du globe seront indemnes de feux, d'autres vont voir la saison

à risque s'allonger, subir une augmentation des extrêmes de chaleur, et traverser des périodes de sécheresse. Tous ces facteurs concourent à une augmentation de ces feux, rares mais extrêmes.

Face à cette menace que représentent les méga-feux, les meilleures réponses, au-delà de l'indispensable réduction de nos émissions de gaz à effet de serre, viendront de la coopération entre chercheurs, gestionnaires et citoyens pour élaborer et appliquer des solutions adaptées à chaque région du monde. La liste des tâches à mener est longue : gérer durablement la végétation, éviter les accumulations de combustible, débroussailler les forêts, construire autrement ou ailleurs, concevoir et mettre en œuvre des politiques transsectorielles, partager l'information sur les feux et leurs impacts, anticiper les évolutions futures des feux, revoir les stratégies de réduction du risque, adapter les paysages et les communautés humaines au feu... À nous de nous retrousser les manches pour domestiquer ce cadeau prométhéen !

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Andela N., Morton D.C., Giglio L., Paugam R., Chen Y., Hantson S., van der Werf G.R., Randerson J.T. (2019). The global fire atlas of individual fire size, duration, speed and direction, *Earth System Science Data*, vol. 11, n° 2, 529-552.

Chatry C., Le Gallou J.-Y., Le Quentrec M., Lafitte J.-J., Laurens D., Creuchet B., Grelu J. (2010). Rapport de la mission interministérielle « Changements climatiques et extension des zones sensibles aux feux de forêts », 89 pages + annexes.

Robinne F.-N., Burns J., Kant P., Flannigan M.D., Kleine M., de Groot B., Wotton D.M., editors and coordinators (2018). Global fire challenges in a warming world. Summary note of a global expert workshop on fire and climate change, *IUFRO Occasional Paper*, n° 32. IUFRO, Vienne.

Birot Y. (2009). Un plan stratégique de recherche pour la forêt méditerranéenne : une initiative d'EFIMED. *Forêt méditerranéenne*, n° 2, 181-184. Téléchargeable sur <http://www.foret-mediterraneenne.org/fr/catalogue>.

Curt T., Rigolot E. (2020). Prévenir les risques d'incendies de forêt dans un contexte de changement global. In *Adaptation de la forêt au changement climatique : comment on s'y prépare ? Sciences Eaux & Territoires*, n° 33. Téléchargeable sur <https://www.cairn.info/revue-sciences-eaux-et-territoires-2020-3-page-50.htm>

Ministère de l'Écologie et du Développement durable (2002). *Plans de prévention des risques naturels, risques d'incendies de forêt – Guide méthodologique*. La Documentation française. Commande possible sur <https://side.developpement-durable.gouv.fr/Default/doc/SYRACUSE/6967/plans-de-prevention-des-risques-naturels-ppr-risques-d-incendies-de-foret-guide-methodologique>.

Édition : Nathalie Brousse et Sylvie Blanchard

Révision : Juliette Blanchet

Mise en page : Paul Mounier-Piron

Imprimé par : Huma Print

Dépôt légal : septembre 2022



Chaque année brûle dans le monde une surface de forêts et de végétation naturelle équivalente à celle de l'Europe. Le climat, les activités humaines et la végétation sont les trois grands facteurs qui contrôlent les feux et en modifient parfois le comportement, voire la dangerosité. Aussi le danger s'accroît-il dans certains « points chauds » du globe où se concentrent la plupart des incendies, notamment avec le développement de méga-feux. Cependant, l'histoire millénaire des incendies dans le monde nous apprend que le feu constitue un processus naturel indispensable au maintien de beaucoup d'écosystèmes et d'espèces. Dans de nombreux pays, c'est aussi un allié pour cultiver la terre. Les effets des feux peuvent donc être dramatiques, mais aussi bénéfiques.

Peu d'ouvrages existent sur les incendies à l'échelle globale. S'adressant aux décideurs autant qu'à un plus large public, ce livre illustré de nombreux exemples est une synthèse des connaissances actuelles sur l'écologie du feu et sa géographie. Il suggère qu'il est possible de cohabiter durablement avec le feu à condition de s'adapter et de gérer intelligemment les paysages, afin de diminuer le risque incendie tout en préservant la biodiversité.

Directeur de recherche à INRAE Aix-en-Provence, **Thomas Curt** étudie les incendies de forêts autour du globe et leurs évolutions.

Les recherches de **Christelle Hély**, directrice d'études à l'EPHE-ISEM Montpellier, portent sur les incendies et la dynamique des écosystèmes passés et actuels face aux changements globaux.

Renaud Barbero, chargé de recherche à INRAE Aix-en-Provence, analyse particulièrement les effets du climat sur les feux.

Directeur de recherche à INRAE Avignon, **Jean-Luc Dupuy** étudie le comportement et la physique du feu, ainsi que les évolutions des régimes de feux et leurs facteurs.

Florent Mouillot, chargé de recherche à l'IRD-CEFE Montpellier, examine les feux à l'échelle du globe.

Chercheur post-doctorant à INRAE Avignon, **Julien Ruffault** s'intéresse aux dynamiques contemporaines des régimes de feux.

17 €

ISBN : 978-2-7592-3505-6

éditions
Quæ

INRAE



Éditions Cirad, Ifremer, INRAE
www.quae.com

ISSN : 2267-3032
Réf. : 02830