

Incendies de forêt : bilan des connaissances et des besoins pour la recherche et l'action

par Michel VENNETIER

La forêt est l'objet de nombreuses idées reçues qui orientent les choix des financeurs privés et publics. Certaines sont à nuancer, d'autres à éliminer. Les connaissances scientifiques sur l'après-feu, permettront de faire le point sur ces questions. Or, l'auteur nous montre qu'en la matière, la part d'inconnu est la plus importante. Il faut donc se doter d'un dispositif de recherche à long terme pour pouvoir répondre aux nombreuses questions que se posent les décideurs et la population, et aider à des prises de décisions les plus justes possibles.

Cette note reprend et synthétise le contenu scientifique et l'état de l'art de programmes et projets de recherche auxquels ont contribué dans leurs spécialités de très nombreux collègues de l'INRA, du CNRS, du Cemagref, du CEA, de l'ONF, des Universités d'Aix-Marseille, Avignon, Lyon I, Montpellier et Corte. Il est impossible de les citer tous.

Introduction

Objectifs et contexte

L'objectif de cette note de synthèse est de faire un point sur les connaissances scientifiques qui manquent dans le domaine de l'impact des incendies de forêt sur l'écosystème méditerranéen. Nous en tirons des priorités pour la recherche et des suggestions pour rendre plus opérationnelles et efficaces les interventions des chercheurs et gestionnaires juste après incendie.

Cette synthèse s'appuie sur des travaux de bibliographie et d'état de l'art technique réalisés à la création du Groupement d'intérêt scientifique (G.I.S.) "Incendies de forêt", puis en préparation de l'Observatoire de recherche en environnement (O.R.E.) "Incendie" et des projets de recherche qui en sont issus. Elle n'a pas la prétention d'être exhaustive. D'une part parce qu'elle a été réalisée rapidement pour une présentation orale à vocation pédagogique, et qu'elle ne cherchait à présenter que les grandes lignes des priorités pour la recherche qui sont ressorties des travaux bibliographiques ci-dessus. D'autre part parce que des travaux de bibliographie de grande envergure sont en cours de réalisation dans d'autres cadres (notamment le projet européen "Eufirelab") et qu'ils apporteront des conclusions mises à jour, plus précises et plus complètes. On peut cependant considérer que les principaux manques de connaissance pointés par cette note, qui demandent un travail de fond sur le moyen et long terme, ne sont pas comblés par les travaux en cours.



Photo 1 :
Les incendies créent dans les paysages des patchwork mouvants de peuplements à des stades variés d'évolution.
Photo Guillaume Tixier

Les feux de l'été 2003 dans le Sud-Est de la France ont ravivé le débat sur les incendies de forêt. Ce débat a souvent été passionnel, et les initiatives qui en découlent ne sont pas toujours rationnelles (certains projets de reboisements...). Les médias diffusent parfois des messages caricaturaux et contradictoires, les deux principaux étant :

- le feu est une catastrophe totale pour la forêt,
- le feu est un événement bénin et normal pour la forêt qui se régénère rapidement à l'identique.

La vérité est comme souvent entre ces extrêmes, et demande à être nuancée en fonction du contexte.

L'équilibre du feu et de la forêt

Dans beaucoup de forêts naturelles du monde, des zones tropicales aux zones boréales, le feu fait partie du fonctionnement normal de l'écosystème. Il contribue à son adaptabilité et au maintien de la biodiversité en permettant la régénération des espèces pionnières et des espèces héliophiles, nécessaires à la cicatrisation rapide des zones perturbées. Il est même parfois nécessaire à la régénération d'une majorité des espèces d'une formation végétale, comme dans le cas du "Fynbos" un type de maquis d'Afrique du Sud particulièrement riche. Il crée des paysages en mosaïque où s'imbriquent des peuplements à divers stades d'évolution (ODION

et DAVIS, 2000), favorables au maintien d'un maximum d'espèces animales et végétales. Mais la fréquence naturelle des feux dans ces écosystèmes forestiers est faible : au plus un ou deux par siècle en général, souvent un toutes les quelques centaines d'années (LARSEN et MACDONALD, 1998 ; JOHNSON et GUTSELL, 1994). Le retour à un certain équilibre entre la végétation et la reconstitution de la fertilité du sol sont possibles entre deux incendies. La fréquence naturelle des feux s'accroît dans les formations arbustives pour atteindre quelques dizaines d'années (BOND *et al.*, 2004) et encore plus dans les formations de savanes plus ou moins arborées. Il existe un lien et un équilibre entre la forme de végétation et la fréquence des incendies.

En provoquant des feux beaucoup plus fréquents que les seuls incendies naturels, l'homme a déséquilibré le système forestier : la répétition rapide des feux multiplie les risques d'érosion, déclenche une dégradation physique et chimique du sol et la disparition d'une partie des espèces animales et végétales. L'écosystème devient plus ouvert, parfois au point de n'être plus forestier du tout. Dans certains cas, on aboutit à un équilibre secondaire : une structure simplifiée de végétation se reproduit à l'identique après le feu, même quand il est fréquent en raison de l'adaptation des espèces résiduelles à cette perturbation (garrigues, savanes). La nature reproduit localement, dans un temps assez court avec les feux anthropiques, le phénomène de sélection/adaptation qui s'est produit, dans des temps plus anciens, avec les différents régimes de feux naturels. Mais l'impact de feux répétés a été très peu étudié : on ignore à partir de quels seuils de fréquence et d'intensité d'incendie se crée une dégradation irréversible à court terme, ou bien se produit le passage à un nouvel équilibre.

La violence des feux est un autre critère important. Elle détermine la gamme des perturbations et destructions, qui peuvent, dans les meilleurs cas, n'être que très superficielles et transitoires. Les feux de 2003 ont été particulièrement violents à cause des niveaux très élevés de température et de sécheresse du sol et de la végétation. Ils donnent une idée de ce qui pourrait se reproduire plus souvent avec le réchauffement climatique à venir. L'impact particulier des feux de 2003 en France n'a pas pu être étudié correctement faute de crédits.

La violence d'un feu dépend en partie du temps écoulé depuis le dernier incendie : plus le temps passe, et plus la biomasse donc le combustible s'accumule. Fréquence et violence des feux sont donc inversement liés. D'où l'idée, développée dans certains pays, de réaliser régulièrement des feux contrôlés pour éviter les grandes catastrophes, plus rares mais plus destructives. Si ce concept s'est révélé utile dans les peuplements de production, où l'on sauvegarde le capital géré, il est contesté dans d'autres situations comme les maquis de Californie (chaparrals) où la répétition de brûlages dirigés tous les 5 à 10 ans se révèle plus néfaste pour l'écosystème que des feux non contrôlés, beaucoup plus violents, mais trois fois moins fréquents.

Synthèse bibliographique

Les travaux en France ont porté surtout sur la végétation, notamment la recolonisation post incendie (TRABAUD, 1998), et sur les zones dominées par les roches calcaires ou basiques (écosystèmes à pin d'Alep, chêne vert, chêne blanc). Beaucoup moins d'études portent sur les écosystèmes développés sur substrats acides et cristallins (PRODON *et al.*, 1984 ; TRABAUD, 1993 ; PAUSAS, 1997) et notamment sur les Maures (MARSOL, 1994), dont aucune n'aborde l'aspect répétitif des feux.

Si ces études constatent globalement une résilience certaine de la végétation après le feu (TRABAUD et PRODON, 1993), c'est généralement sur des écosystèmes déjà dégradés ou simplifiés (garrigues à chêne kermès, peuplements pionniers de pin d'Alep, forêts ayant connus de nombreux feux dans le passé récent). La végétation couvre le sol en quelques années, avec une rapide prédominance des espèces présentes avant le feu dans les strates hautes, ce qui conduit à un retour rapide à l'état initial (GILLON et TRABAUD, 1997b ; TRABAUD et PRODON, 2002). Pour le pin d'Alep, une étude récente a cependant montré que la régénération n'était pas systématique en raison, certaines années, de la non production ou la non maturité des graines, ou bien en raison d'événements ultérieurs (exploitation mal conduite, passage de troupeaux, accidents climatiques), ce qui pouvait transformer

directement un écosystème de l'état de forêt à celui de garrigue sur de grandes surfaces (VENNETIER, 2001).

Les études des effets de l'incendie sur le sol sont plus rares (GILLON et TRABAUD, 1997b). Au plan quantitatif, ils semblent faibles sur les milieux déjà perturbés, mais ce suivi ne porte pas sur des feux répétés. Les changements fonctionnels observés à l'occasion d'un feu unique sont probablement (comme les effets quantitatifs), amplifiés par la répétition du phénomène.

La structure physique du sol est affectée par les incendies. L'impact sur l'humus dépend de l'intensité du feu et de l'état de dessiccation du sol au moment de l'incendie. Ces transformations modifient la perméabilité du sol et ses propriétés hygrophiles. Les éléments nutritifs mobilisés par l'incendie, et en partie restitués par les cendres, peuvent réintégrer l'écosystème. Cependant, dans les zones de pentes, et sous régime de vents et pluies méditerranéen, une partie non négligeable des cendres, voire des horizons superficiels, peuvent être emportés par l'érosion. L'activité des micro-organismes responsables de la minéralisation est perturbée, parfois activée, parfois réduite. La caractérisation des communautés et de leur dynamique reste à faire. Il en va de même pour les activités liées à la décomposition de la matière organique. Enfin, la teneur en eau du sol et le microclimat sont fortement modifiés (TRABAUD et PRODON, 2002).

La sécheresse et les températures exceptionnelles de l'été 2003 ont, par ailleurs, provoqué des feux d'une puissance totalement inconnue en France jusqu'alors, dont les conséquences sur le sol et la végétation pourraient être plus graves que ce qui a été observé dans le passé.

La composante animale du sol à faible profondeur a été beaucoup moins étudiée que la végétation. L'effet de l'incendie est dévastateur sur l'ensemble de ces communautés animales (TRABAUD et PRODON, 2002). Une bonne résilience de certaines communautés peut être observée, sans que le mécanisme ait été élucidé (par exemple KISS et MAGNIN, 2002). Il reste à définir les groupes ou communautés indicatrices de l'état d'évolution du sol et le retour à un certain équilibre fonctionnel, après une forte perturbation. Certaines communautés n'ont que peu ou pas été étudiées en zone méditerranéenne, alors qu'elles ont fait l'objet de travaux plus

importants en lien avec les incendies dans d'autres régions, principalement dans les forêts de conifères nord-américaines ou en Australie : les champignons, principalement mycorrhiziens ou comestibles (GIANNAKIS et ARIANOUSTOU, 1997, ABBOTT et BURROWS, 2003), les insectes, surtout pour leur rôle pathogène (McCULLOUGH *et al.*, 1998), etc.

Les études européennes qui prennent en compte la répétition des feux, portent presque exclusivement sur des brûlages dirigés, dont l'intensité est beaucoup moins forte que les feux sauvages, et qui sont réalisés dans des périodes froides de l'année et avec des niveaux élevés d'humidité du sol. Les conséquences pour l'écosystème et notamment pour le sol ne peuvent donc, en aucun cas, être généralisées aux grands feux d'été.

De façon générale, les études précises sur l'impact d'un incendie ont presque toujours porté sur une composante particulière de l'écosystème ou, au mieux, sur un nombre limité de facteurs biotiques ou abiotiques. De même, rares sont les suivis dépassant quelques années, et ceux qui dépassent cette limite ne portent que sur très peu de facteurs simultanément. Enfin, l'intégration de l'incendie dans la dynamique écologique des paysages, à l'échelle régionale, est balbutiante, notamment parce qu'elle ne tient compte : soit que des facteurs naturels, soit essentiellement des facteurs socioéconomiques, et pas de leur combinaison.

En conclusion, les données et études manquent sur plusieurs questions essentielles, qui doivent être maintenant plus particulièrement ciblées par la recherche :

- impact de la répétition des incendies non contrôlés et du régime des feux (fréquence, violence) ;
- étude intégrée de nombreux facteurs biotiques et abiotiques, afin d'en comprendre les interactions et d'en tirer des indicateurs de l'état et du fonctionnement de l'écosystème ;
- suivi à long terme d'une batterie d'indicateurs (espèces, groupes ou communautés d'espèces, caractéristiques physicochimiques, etc.) permettant d'évaluer globalement la dynamique de reconstitution ou de dégradation de l'écosystème (pas seulement la flore), certains de ces indicateurs étant très peu connus et étudiés jusqu'à maintenant ;
- l'intégration des échelles locales ou plus globales pour évaluer l'impact de l'incendie

sur l'écosystème méditerranéen, pris comme un tout et pas seulement sur des écosystèmes locaux, quelle que soit leur représentativité.

C'est sur cette base, et pour combler les lacunes ci-dessus, que s'est construit en 2002 un grand programme intégré de recherche sur les incendies de forêt en région méditerranéenne : l'O.R.E. "Incendie". Cette note s'inspire largement de ce programme et la présentation de certains indicateurs est adaptée de son contenu scientifique.

La biodiversité, une notion complexe

La biodiversité cachée

Un écosystème forestier est comme un iceberg. On n'en voit, connaît et comprend qu'une petite partie "émergée". Bien que les végétaux supérieurs soient nombreux, et particulièrement diversifiés dans les milieux ouverts par les incendies, le maximum de biodiversité se trouve dans les espèces de petite taille (insectes, vers, nématodes, lichens, ...), dans la microflore et microfaune (microarthropodes, bactéries, algues, champignons) et particulièrement dans le sol. La partie souterraine de l'écosystème est primordiale pour son fonctionnement (cycle des éléments nutritifs et de la matière organique...) mais elle est très mal connue dans les systèmes perturbés, et l'impact de l'incendie sur les êtres vivants du sol est encore moins connu. Ces êtres vivants et les caractéristiques physico-chimiques du sol sont en équilibre et en interaction permanente, et de cet équilibre dépend, en grande partie, la résilience de l'écosystème face aux perturbations.

La biodiversité "élevée" (surtout végétale) des milieux ouverts par l'incendie, avec une liste complète de groupes animaux et végétaux, devrait donc être comparée à celle de milieux forestiers plus anciens, moins riches en végétaux supérieurs, mais probablement beaucoup plus riches en micro-faune et microflore, pour autant qu'on connaisse ces communautés.

Le chaînon manquant

Les incendies trop fréquents interdisent en France le vieillissement des forêts méditer-

ranéennes. Or les peuplements forestiers très âgés sont en général d'une grande richesse biologique, particulièrement pour les insectes, la microfaune, les champignons, les micromammifères... Cette référence fait défaut dans nos régions et ne peut être comparée avec les sites incendiés. L'aménagement du territoire devrait assurer la défense d'un réseau des forêts les plus âgées et les plus naturelles possibles. Il faudrait cependant encore plus d'un siècle ou deux de protection pour que des surfaces significatives de forêts "anciennes" puissent émerger des forêts actuellement les plus âgées. Le débat sur la structure des forêts méditerranéennes naturelles, n'est par ailleurs pas tranché. Des études récentes montrent que ces forêts étaient peut-être claires, au moins localement, ouvertes par des facteurs naturels ou par la pression des grands herbivores¹. Tout en modifiant le facteur de perturbation, les feux ne feraient alors que maintenir, d'une certaine façon, la structure ouverte d'un milieu qui l'aurait été depuis longtemps.

Echelles d'analyse

C'est la mosaïque des incendies dans l'espace qui crée l'intérêt du feu pour l'écosystème, en modélant des patchworks en changeant de milieu à des niveaux variés de dynamique et de perturbation, et en multipliant les lisières. Un feu très grave localement n'est qu'un événement banal à l'échelle d'un vaste territoire, où les espèces se succèdent dans le temps et dans l'espace. Un problème peut se poser, ponctuellement, pour la survie d'espèces rares et menacées, dont l'habitat est très localisé et de taille réduite. Mais il se pose surtout dans les zones envahies par l'homme où la circulation des espèces est entravée, et où d'autres pressions s'ajoutent à celles de l'incendie (piétinement, fragmentation, pollutions...). C'est encore la répétition rapide des feux sur les mêmes sites qui modifie cette analyse, en éliminant toute une partie de la dynamique et en banalisant des paysages homogènes sur des grandes surfaces. A l'échelle française, la part de la forêt dans le paysage méditerranéen est encore importante, même si, dans certaines zones côtières, elle est déjà réduite. Dans d'autres régions méditerranéennes, cette part est en forte régression et pose de véritables problèmes de conservation de la biodiversité.



Une nouvelle donne pourrait venir du réchauffement climatique qui, même en France, conduirait à l'augmentation sensible du nombre et de la surface des grands feux, avec des conséquences graves sur l'équilibre entre la forêt et les incendies.

Quelques indicateurs importants

Un incendie touche toutes les composantes de l'écosystème. Evaluer ses conséquences nécessite l'observation simultanée d'un grand nombre de paramètres physiques et chimiques, ainsi que de nombreux groupes d'être vivants, des plus grands aux plus

Photo 2 :

Mélange de pins centenaires, de grands chênes blancs et verts et autres feuillus. Dotées d'un sous-bois riche et denses, les forêts âgées de la région méditerranéenne française sont cependant très loin de l'équilibre et de la richesse d'une forêt mature.
Photo Michel Venetier

1 - NDLR : voir des populations humaines présentes depuis plus de 40 000 ans (grottes Cosquer et Chauvet)

petits. C'est ce suivi simultané et coordonné qui fait totalement défaut actuellement. Il permettrait d'une part, de comprendre véritablement le fonctionnement de l'écosystème, et d'autre part, de déterminer parmi tous les paramètres et espèces, ceux qui sont les meilleurs indicateurs de l'état de l'écosystème et de son niveau de dégradation ou de reconstitution. Ce nombre réduit d'indicateurs pourrait alors être utilisé sur l'ensemble des sites, à moindre coût, et des états de référence pourraient être établis. Lors de la conception de l'Observatoire de recherche sur les incendies de forêt, un groupe de scientifiques a tenté de déterminer les paramètres et indicateurs a priori les plus importants et les plus complémentaires, à toutes les échelles de taille et aux différents niveaux de fonctionnement de l'écosystème. Ils ont fait le point des connaissances et de ce qu'il serait important d'étudier, en

Photo 3 :

La végétation est à la base des cycles vitaux de l'écosystème.

Elle est souvent l'un des premiers signes visibles du redémarrage de la vie après le feu.

Ici, rejet de chêne

Photo Catherine Tailleux / Fomedi



priorité, pour chacun d'eux. Ce sont ces indicateurs qui sont présentés ci-après.

Végétation : composition, structure, groupes fonctionnels

L'observation de la végétation est une étape incontournable d'analyse de l'impact des incendies. C'est, dans les milieux forestiers, l'indicateur le plus systématiquement observé et mesuré, le plus visible, et l'un des plus faciles à relever sans complication méthodologique, donc le plus comparable avec les travaux passés ou futurs. C'est un indicateur synthétique de l'état de l'écosystème. C'est aussi un des paramètres les plus faciles à spatialiser et extrapoler sur de grandes surfaces à partir d'observations ponctuelles, avec un minimum de risque.

La végétation constitue aussi un élément clef des cycles du carbone et des éléments nutritifs dans le sol, se situant au départ des cycles (absorption et fixation), et à la fin (restitution au sol par la litière et les racines), même si elle n'est pas le seul acteur de ces cycles. Le lien entre flore et caractéristiques physico-chimiques du sol (notamment compacité, éléments nutritifs, pH, matière organique, réserve en eau...) est fort et bien documenté.

La biodiversité végétale doit être évaluée, non seulement en terme de nombre d'espèces, mais aussi en termes de groupes fonctionnels et par rapport à la flore potentielle du milieu. On sait en effet que la diversité des végétaux supérieurs est maximale dans les 2 à 3 ans qui suivent un incendie, ainsi que dans les milieux ouverts, même dégradés, mais que cette diversité cache la perte de certains groupes fonctionnels.

L'effet des feux sur la structure de la végétation (étagement, recouvrement des différentes strates, composition par strates, densité...) n'est connu que dans un nombre restreint de cas simples. Or des différences de structure peuvent traduire des différences importantes du milieu physico-chimique, et les évolutions ou blocages dans le temps de la structure végétale, traduire des évolutions fonctionnelles de l'écosystème tout entier. D'autre part, la structure de végétation est un paramètre important du risque d'éclosion et de propagation du feu. L'évolution de cette structure après incendie, n'est donc pas sans rapport avec la récurrence des incendies.

La faune du sol

La faune du sol, en surface (épigée) et en profondeur (endogée) est très riche. Elle s'organise à plusieurs échelles de taille qui se complètent pour participer à la transformation directe ou indirecte de la matière organique produite par la végétation, et contribuent au recyclage des éléments nutritifs. Bien que certains groupes de cette faune soient particulièrement importants, soit pour leur rôle direct dans la dynamique du sol, soit par leur richesse, l'impact des incendies sur leurs communautés est très mal connu et a rarement été suivi au-delà de quelques années. Nous présentons ici quelques-uns de ces groupes clés de l'écosystème, par taille décroissante, pour illustrer leur complémentarité fonctionnelle dans les cycles vitaux. Ce choix est arbitraire : d'autres groupes très riches (insectes...) seraient tout aussi intéressants.

Les vers de terre

Les lombriciens (vers de terre) constituent un maillon-clé dans le fonctionnement et la résilience de l'écosystème forestier. La reconnaissance, parmi eux, des groupes fonctionnels renseigne sur la diversité des modes de fonctionnement des humus, et plus largement sur le statut et la distribution de la matière organique du sol, avec laquelle ils sont en forte interaction.

Ainsi, les vers de terre épigés sont actifs principalement au niveau de la litière et des premiers centimètres du sol ; ils participent à la fragmentation des litières. Les vers de terre anéciques, qui se déplacent verticalement dans le sol, entre les horizons de surface et de profondeur, prélèvent de la matière organique en surface et la mélangent à la matrice organo-minérale du sol prélevée en profondeur dans les galeries. Les vers de terre endogés sont présents en profondeur dans les sols et assimilent la matière organique fraîche des racines et la matière organique humifiée contenue dans les déjections des vers de terre anéciques (turricules). Ces deux dernières catégories de vers de terre ont une activité de brassage importante : elle se traduit en surface par la formation de turricules, et en profondeur par des galeries et déjections qui jouent un rôle majeur dans la structuration du sol et sa porosité. A ce titre, ils doivent participer activement à l'atténuation des conséquences néfastes de l'incendie sur les caractéristiques



physiques du sol et sa perméabilité, ainsi qu'à la redistribution de la matière organique entre les horizons ; mais ces points restent à démontrer en conjonction avec l'étude de la dynamique de leurs populations.

Vers anéciques et endogés sont qualifiés "d'ingénieurs de l'écosystème", car les déjections qu'ils produisent et les pores qu'ils créent sont pérennes, de quelques jours à plusieurs années. Ils mettent en contact la matière organique avec de nombreux organismes plus petits et moins mobiles dans le sol : les pores et agrégats sont de véritables micro-niches écologiques où s'activent des organismes de plus petite taille.

Microfaune et agrégats biostructurés

Les organismes (microarthropodes, nématodes, bactéries) qui utilisent en partie les structures créées par les vers de terre, les restructurent à une autre échelle. Ils produisent des microagrégats caractéristiques, qui sont un excellent indicateur de la variété et de l'activité de la microfaune. Ils sont étudiés par l'analyse d'images prises sous loupe binoculaire ou microscope. Ce travail permet de caractériser et d'isoler les différents systèmes d'agrégation biostructurés. Ils correspondent, grossièrement, aux tailles des déjections des différents organismes de la pédofaune, qui peuvent être identifiés. La structure de ces microagrégats peut être reliée aux autres paramètres physiques et biologiques. Ce travail, déjà réalisé dans

Photo 4 :

Le coléoptère *Chrysocarabus auronitens festivus* : c'est dans la faune du sol et du bois mort, et souvent chez les insectes, que se trouve une grande part de la biodiversité. Les conséquences des incendies sur cette faune sont pourtant largement méconnues. Photo Jean-Pierre Balmain

d'autres contextes, pourrait être développé sur le suivi de l'impact des incendies comme indicateur synthétique de l'activité de la microfaune et de sa dynamique.

Champignons

Les champignons jouent un rôle particulier dans l'écosystème à plusieurs titres. D'une part, ils contribuent de façon décisive à la plupart des cycles biogéochimiques vitaux de la biosphère (eau, carbone, éléments nutritifs...), d'autre part ils participent activement à la transformation de la matière organique, et enfin ils sont indispensables à la vie de nombreux végétaux et particulièrement des arbres, par les associations qu'ils créent au niveau de leurs racines : les mycorhizes. Sans ces mycorhizes, peu d'arbres seraient capables d'extraire efficacement du sol l'eau et les éléments nutritifs dont ils ont besoin (notamment le phosphore). De plus, les champignons constituent un groupe extrêmement riche. Seule une petite partie des espèces, bien visible lors de la reproduction sexuée, est correctement connue. De nombreuses petites espèces ont été simplement décrites, et on ignore leurs exigences écologiques et leur fonctionnement. Les mycorhizes ont été bien étudiées pour quelques espèces d'arbres à intérêt économique, mais pas pour les autres. Enfin, l'impact des incendies sur les champignons n'a que très rarement été traité, et de façon incomplète. Pourtant, beaucoup de champignons dépendent de l'humus et de la matière organique, qui sont particulièrement affectés par l'incendie.

Il reste donc presque tout à faire sur ce sujet : suivis qualitatifs et quantitatifs, pour les parties aériennes, mais aussi particulièrement dans le sol, dynamique des populations et dynamique spatiale en lien avec les dynamiques végétales et la reconstitution de la litière et de l'humus, successions et stratégie de survie, suivi particulier des mycorhizes après le feu et leur rôle dans la survie des arbres, etc.

Bactéries du sol

Les bactéries jouent un rôle extrêmement important dans les sols, contribuant au recyclage des matières organiques en éléments minéraux utilisables par les végétaux. Or les incendies de forêts peuvent

affecter profondément et de façon plus ou moins durable l'activité des communautés microbiennes : soit directement par l'action de la chaleur sur les bactéries, soit indirectement par la modification des propriétés physico-chimiques de l'environnement. Dans les horizons superficiels du sol, la densité cellulaire diminue de manière drastique et ces horizons peuvent même être stérilisés par le passage du feu, créant un « vide biologique ». La reprise d'une activité ne peut alors avoir lieu qu'après recolonisation, à partir de l'air, de l'eau et des horizons plus profonds qui auront eux-mêmes été plus ou moins affectés (différence de résistance en fonction de la nature des micro-organismes, de leur localisation...). Les modifications au niveau des activités microbiennes après la perturbation, peuvent résulter de divers types de changements : de l'activité physiologique des cellules (moyenne), du nombre de cellules, ou dans la structure de la communauté microbienne. La reprise des diverses activités microbiennes, au bout d'un temps plus ou moins long et, à des niveaux pouvant varier par rapport à l'état initial, va donc affecter le fonctionnement ainsi que la stabilité de l'écosystème dans son ensemble. Il pourrait exister, dans certains cas, une redondance fonctionnelle entre espèces, permettant de récupérer des niveaux d'activités microbiennes satisfaisants, identiques à ceux observés en zones non perturbées, même si des différences de structure de communautés subsistent.

Au cours d'un incendie, l'azote, présent dans les végétaux et dans l'humus brûlé, est presque entièrement volatilisé. Parce que l'azote est un des éléments clés de la nutrition des végétaux, deux communautés microbiennes fonctionnelles, responsables de la dynamique de l'azote dans les sols, jouent un rôle essentiel pour la résilience de l'écosystème et pourraient être utilisées comme bio-indicateurs des perturbations :

- la communauté nitrifiante qui oxyde l'ammonium en nitrate via le nitrite, et fournit donc la source d'azote préférentielle des végétaux. Cette communauté est constituée d'un nombre restreint de genres et d'espèces, et elle est connue pour être très sensible aux facteurs de l'environnement,

- la communauté dénitrifiante qui peut réduire le nitrate en produits gazeux (NO , N_2O , N_2) et donc le soustraire à une partie de l'azote totale du sol. Cette communauté est constituée d'un nombre important de

genres et d'espèces, et est représentative de la microflore hétérotrophe du sol.

D'autres communautés microbiennes sont importantes, parce qu'elles participent au cycle des autres éléments nutritifs et de la matière organique, et à l'équilibre biologique du sol. Mais elles sont mal connues et l'impact des incendies sur ces communautés n'a jamais été étudié.

Caractéristiques physiques du sol

La chaleur intense de l'incendie (jusqu'à plus de 1000°C) qui cuit la surface du sol, les transformations et la disparition partielle de la matière organique, la disparition temporaire de certains animaux du sol, l'impact de la pluie sur les surfaces qui ne sont plus protégées, la présence de cendres hydrophobes, sont autant de facteurs qui modifient les caractéristiques physiques du sol, en surface et en profondeur. Ces modifications ont, en retour, des conséquences directes en terme : d'infiltration et de stockage de l'eau, de ruissellement et d'érosion, ce qui a été souvent étudié, mais aussi des interactions fortes avec les compartiments biologiques : germination des graines et enracinement, stress hydrique, positionnement et déplacement de la microfaune, etc. ce qui est beaucoup moins bien connu.

La structure du sol et sa stabilité sont des indicateurs majeurs du fonctionnement de ce sol et de sa résistance aux perturbations et à l'érosion. Le lien entre la quantité / qualité de la matière organique et les caractéristiques physiques du sol est fort bien documenté. La sensibilité des sols à la dégradation de surface et à l'érosion peut être quantifiée grâce à l'utilisation de tests de stabilité structurale et reliés à la qualité des matières organiques rencontrées. L'évolution inter-annuelle de cette sensibilité pourrait être mise en relation avec l'évolution mesurée des différentes fractions de matière organique et avec les données biologiques.

Matière organique du sol

La matière organique est un des facteurs clefs du sol. Elle a une influence importante, directe ou indirecte, sur toutes les caractéristiques physiques et chimiques du sol, et est en interaction forte avec les facteurs bio-



tiques, car elle constitue la base de toute la chaîne alimentaire. Elle contribue à la structuration du sol (agrégats), à la stabilité de cette structure et à la perméabilité des sols pour l'eau et les gaz, à la capacité de rétention en eau (jusqu'à 20 fois son propre poids). Elle tamponne le pH, améliore la nutrition des végétaux en fixant et rendant plus disponibles des éléments nutritifs, nourrit directement d'innombrables animaux et microorganismes, etc.

La matière organique est très profondément affectée par les incendies, que ce soit sous la forme vivante des animaux et végétaux, sous la forme d'humus en surface du sol ou de matières complexes en profondeur. Bien qu'en général l'incendie ne touche directement que les parties aériennes et les premiers centimètres du sol, ses conséquences indirectes concernent aussi le sol en profondeur. Lorsque le sol est très sec, une partie importante des souches et racines mortes peuvent se consumer, pendant plusieurs heures ou même plusieurs jours, jusqu'à un mètre de profondeur. D'autre part, les racines des végétaux tués ou affaiblis par le feu, dont certaines descendent à plusieurs mètres de profondeur, meurent entièrement ou partiellement après le feu, ce qui a un impact particulier en région méditerranéenne, où les systèmes racinaires sont souvent aussi importants que les parties aériennes des plantes et sont très profonds (jusqu'à plus de 10 m pour les arbres²). Enfin, les modifications physico-chimiques et de fonctionnement de l'écosystème affectent directement les flux et la dynamique de la matière organique.

Photo 5 :

Une part importante de la matière organique contenue dans la biomasse aérienne, dans la litière et dans l'humus est directement détruite ou transformée par l'incendie. La matière organique plus profonde du sol est indirectement affectée (mortalité de racines, minéralisation accélérée).

Photo Catherine Tailleur / Fomedi

2 - NDLR : C'est cet enracinement profond qui leur permet de résister à la sécheresse estivale caractéristique du climat méditerranéen !

Un accent particulier doit donc être mis sur l'étude de la matière organique, afin de préciser non seulement l'impact quantitatif des incendies, qui a déjà été en partie mesuré, mais surtout l'impact qualitatif et fonctionnel : détermination des parts stables et instables, des parts biodisponibles ou non, des parts réactives participant plus ou moins efficacement à la structuration et à la cohésion du sol (aux échelles macroscopique et microscopique), des parts dissoutes et particulaires, du degré d'aromaticité des composés, des phénomènes et évolutions participant à la libération ou à la fixation des éléments nutritifs et des substances toxiques (vitesses de minéralisation, modifications structurales...), des quantités et qualités des charbons.

Il faut globalement améliorer la connaissance de l'impact des incendies sur le cycle du carbone et de leur contribution au bilan de carbone à l'effet de serre, et mettre en relation la dynamique de la matière orga-

nique avec l'ensemble des autres facteurs physiques, chimiques et biotiques.

La plupart des travaux sur la qualité et la fonctionnalité de la matière organique nécessitent de faire appel à des techniques de pointe qui ne sont maîtrisées que dans des laboratoires spécialisés.

Éléments nutritifs principaux

La "fertilité" du sol pour les végétaux supérieurs est largement conditionnée par l'abondance et la disponibilité de quelques éléments minéraux de base N, P, K, Mg, Ca, et divers oligo-éléments. Les incendies provoquent une mobilisation brutale de ces éléments, auparavant stockés dans la végétation et le sol, directement par combustion de la matière organique (on les retrouve en partie dans les cendres), et indirectement par accélération des processus de minéralisation de la matière organique et déstructuration des minéraux de surface. Cette mobilisation est favorable à la végétation pionnière qui peut en fixer une partie.

Une autre partie migre dans le sol où elle est adsorbée ou fixée sur différents composés organiques et minéraux. Une partie est perdue par les fumées et cendres emportées loin du site lors de l'incendie, lessivage en profondeur et érosion. La perte est grave quand le vent et la pluie entraînent loin de la zone brûlée, par le réseau hydrographique, une part importante des cendres ou des horizons superficiels du sol. L'azote qui est contenu dans la végétation et l'humus est presque entièrement volatilisé pendant la combustion. La répétition des feux ne peut qu'accentuer ces phénomènes.

Il n'existe pas à ce jour, à notre connaissance, d'étude qui fasse le bilan précis des pertes instantanées d'éléments nutritifs à la suite d'un incendie. Un des points de blocage est la difficulté d'estimer, a posteriori, la biomasse initiale, pour comparer les quantités de ces éléments avant le feu, avec celles retrouvés dans le sol, l'eau et les cendres après le feu. La moindre erreur sur les quantités de cendres, modifie le résultat de façon significative, car elles sont très riches en éléments nutritifs. Cette estimation ne serait de toute façon pas généralisable, puisqu'il faut tenir compte des pertes à court et moyen terme par érosion et lessivage, qui varient considérablement d'un feu à l'autre, et d'un territoire à l'autre, et qui dépendent

Photo 6 :

Les pins sont parfaitement adaptés au renouvellement de l'écosystème par le feu. Il arrive cependant que leur régénération échoue.

Ici, régénération de pin d'Alep sous arbres brûlés
Photo Catherine Tailleux / Fomedi



largement du statut de la matière organique. On peut estimer que les pertes conduisent, globalement à terme, à une baisse de la fertilité du sol, significative au moins au niveau de l'azote, d'autant plus rapide que les feux sont rapprochés, et que les cycles de ces éléments n'ont pas le temps de se stabiliser entre deux perturbations. La mesure de ces éléments, sur un dispositif permanent qui intègre la répétition des feux et une dimension temporelle à moyen terme, permettrait de répondre partiellement, mais objectivement à la question, indépendamment des phénomènes ponctuels et locaux qui sont variables.

Bio-accumulation d'éléments toxiques

Lors d'un feu de forêt, de grandes quantités de composés sont émis dont des hydrocarbures, composés organiques volatils (COV), hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), dérivés phénolés et particules de moyenne taille (suies, goudrons, etc). Des études ont montré, parmi les composés les plus fréquents, des dérivés benzéniques et phénoliques. Ces composés se déposent dans les sols, et certains comme les HAP entrent dans les chaînes trophiques des écosystèmes par deux phénomènes encore mal connus :

- la bio-accumulation, liée au fait que ces éléments sont très stables et qu'ils peuvent s'accumuler dans les sols, les eaux, les sédiments et les organismes vivants qui les absorbent ;
- la bio-amplitude, qui fait que les concentrations de ces polluants augmentent dans les organismes vivants à mesure que l'on s'élève dans la chaîne alimentaire.

Il est donc nécessaire d'identifier et de quantifier les principaux composés organiques toxiques générés : d'abord au cours de l'incendie, ce qui a été partiellement fait pour étudier les risques auxquels sont soumis les pompiers (prélèvement dans le panache de fumée), puis au niveau des sols, dans les différents compartiments. Il faudrait ensuite suivre leur mobilisation dans l'eau de ruissellement et de percolation, pour connaître les flux entrants et sortants de ces composés et, enfin, dans les organismes vivants des sites incendiés :

- des végétaux, pour mesurer la bioaccumulation. Il serait intéressant de privilégier



les végétaux à croissance rapide, poussant ou rejetant juste après le feu, comestibles et récoltés, pour évaluer le risque sanitaire : les champignons qui sont connus pour leur capacité à concentrer certaines substances toxiques, et les asperges sauvages dont les pousses tendres sont très recherchées au printemps ;

- des animaux, pour évaluer la bio-amplitude. Les escargots peuvent être privilégiés car ils absorbent des quantités de végétaux très importantes relativement à leur poids, parce qu'ils ont une croissance relative assez rapide pour être présents à l'état adulte peu après le feu, et parce que leur faible mobilité permet de garantir qu'ils ne se sont nourris que dans la zone incendiée. En cas de présence avérée de certains composés toxiques dans les plantes, le dosage de ces composés dans certaines espèces gibier serait nécessaire.

Photo 7 :

La répétition trop fréquente des feux dégrade le milieu forestier par érosion et appauvrissement au point d'en faire disparaître toute végétation arborée. On aboutit à des paysages en "peau de léopard" ; la désertification n'est pas loin. En France, ces milieux sont cependant riches en espèces végétales. Ici, les Calanques à Marseille.
Photo Catherine Tailleux / Fomedi

Incendies et effet de serre

Les incendies contribuent à l'effet de serre en déstockant de grandes quantités de carbone : directement par combustion des végétaux, de l'humus et d'une partie de la matière organique du sol, et indirectement en accélérant les processus de minéralisation de la matière organique restante. Les processus de dégradation qui s'en suivent (érosion, pertes de fertilité, disparition parfois de la strate arborée), réduisent la productivité des écosystèmes et donc leur capacité à capturer,

lors de leur reconstitution, une partie du carbone libéré. Or chaque tonne de gaz à effet de serre libéré a maintenant un prix sur le marché international. Le coût des incendies en terme de flux de carbone dans les régions méditerranéennes n'a pas été précisément chiffré, ce qui fait défaut. On peut cependant estimer grossièrement la quantité de carbone fixée par la forêt méditerranéenne annuellement dans ses parties aériennes : 375 000 tonnes (MANLAY *et al.*, 2002), en sachant que les parties souterraines et le sol en fixent généralement au moins autant et souvent plus. Au prix actuel de 15 € la tonne de carbone (équivalent CO₂) sur le marché international, cela représente plus de 20 millions d'euros par an. Ce qui contribue à justifier financièrement la prévention des feux de forêts.

En guise de conclusion

Il y a deux échelles de temps pour la recherche et l'action après un incendie de forêt.

A court terme

Certaines interventions sont nécessaires immédiatement, pour assurer la sécurité des biens et des personnes : abattage des arbres dangereux, lutte contre l'érosion et les crues pour sécuriser les bassins versants urbanisés. Ces travaux sont en général réalisés sur des crédits d'urgence. Mais l'évaluation technique et scientifique, a priori et a posteriori, de ces travaux fait presque toujours défaut, en raison du manque de moyens initiaux et de l'oubli rapide dans lequel tombent la plupart des zones incendiées.

D'autre part, la bonne compréhension de certaines conséquences écologiques des incendies nécessiterait aussi l'intervention immédiate des scientifiques : réalisation de mesures, récoltes d'échantillons, installation de placettes d'observation et de suivi.

A condition que des moyens financiers, même réduits, soient disponibles préventivement, des protocoles, préétablis et validés par les instances compétentes, permettraient aux experts et équipes de recherche d'être opérationnels rapidement.

Les sommes nécessaires sont minimales par rapport au coût des travaux engagés : pour la sécurité, contre les inondations potentielles, pour le "gommage paysager", pour le reboisement de sites prioritaires, pour la reconstruction des infrastructures détruites.

La création d'un fond d'intervention pour les travaux d'accompagnement est donc nécessaire. Sinon, certaines questions resteront toujours posées et des leçons ne seront jamais tirées, avec des coûts induits très supérieurs aux montants économisés.

A long terme

Très peu de dispositifs dans le monde assurent le suivi global des conséquences écologiques à long terme des incendies de forêt, et aucun de ces dispositifs n'existe en zone méditerranéenne européenne. On manque donc crucialement de références pour répondre aux questions posées systématiquement par les élus, les journalistes et le public, après chaque incendie. La porte est ouverte aux extrémismes, et toutes les réponses contradictoires resteront possibles, tant qu'on ne se sera pas doté d'un véritable dispositif de recherche à long terme. Il est d'autant plus urgent de démarrer ces travaux, que l'on doit commencer à s'interroger sur l'avenir de nos forêts, et particulièrement prédire ce qui pourrait advenir avec le changement climatique et la multiplication potentielle de feux très violents.

De nombreuses équipes scientifiques de la région ont déjà conçu, ensemble, le dispositif et sont prêtes à relever ce défi.

M.V.

Michel VENNETIER
Cemagref
UR "Ecosystèmes
méditerranéens et
risques"
Le Tholonet
BP31 13612
Aix-en-Provence
Cedex 1

Bibliographie

- Abbott Ian And Burrows Neil (ed.) - 2003. *Fire in ecosystems of south-west Western Australia: impacts and management*. Blackhuis Publishers, Leiden, The Netherlands, 466 p.
- Bond, W.J., Gueldenhuis, C.J., Everson, T.M., Everson, C.S. and Calvin, M.F. - 2004. *Fire Ecology: Characteristics of some important biomes of Sub-Sahara Africa*. In *Wildland Fire Management Handbook for Sub-Sahara Africa*. J.G. Goldammer and C. De Ronde (ed.), Global Fire Monitoring Center Publication, Freiburg, Germany : 11-26.
- Giannakis, N., and M. Arianoutsou. 1997. *Effects of fire on mycorrhizal fungi in Mediterranean type ecosystems*. Pages 383-388 in G. E. P. Balabanis, R. Fantechi, ed. *Forest fire risk and management*. European Commission, Porto Carras, Halkidiki, Greece
- Gillon D., Trabaud L., 1997a. *Etat des méthodes de suivi des impacts des incendies*. In INRA Avignon edt. « Etat des connaissances sur l'impact des incendies. Convention INRA-DERF 61.21.14/97, 30-37.
- Gillon D., Trabaud L., 1997b. *Etat des connaissances sur la cicatrisation puis la reconstitution des écosystèmes*. In INRA Avignon edt. « Etat des connaissances sur l'impact des incendies. Convention INRA-DERF 61.21.14/97, 38-58.
- Johnson, EA, Gutsell, SL. – 1994. Fire frequency models, methods and interpretations. *Advances in Ecological Research*, 25: 239-287
- Kiss L., Magnin F., 2002. *The impact of fire on land snail communities in the French Mediterranean region : preliminary results*. In L. Trabaud et R. Prodon eds : « Fire and biological processes », Backhuys, Leiden, Pays Bas, 197-213.
- Larsen, C. P. S., and G. M. MacDonald. - 1998. An 840-year record of fire and vegetation in a boreal white spruce forest. *Ecology* 79 : 106-118
- Manlay R. et Vennetier M. – 2002. *La forêt fixatrice de carbone*. In Vennetier M. (coord.) - 2002 : *Fonctions et usages multiples de la forêt méditerranéenne*. Guide technique du forestier méditerranéen français. Chap. 8. Cemagref édition, p. 49-50.
- McCullough, D.G., Werner, R.A., Neumann, D. – 1998. Fire and insects in Northern and boreal forest ecosystems of North America. *Annual Review of Entomology* 43 , 107-127
- Marsol Laurèns – 1994. *Etude des stations forestières des secteurs schisteux des Maures ; du cap Sicié et des îles d'Hyères, évaluation de leurs potentialités forestières et de leur dynamique après incendie*. Mémoire de DEA, Cemagref, ENGREF, Université Aix-Marseille III, 60 p.
- Odion D.C., Davis F.W., - 2000. Fire, soil heating and the formation of vegetation patterns in chaparral. *Ecological Monographs*, 70, 149-169
- Pausas JG. – 1997 Resprouting of *Quercus suber* in NE Spain after fire. *Journal of Vegetation Science* 8 (5): 703-706
- Prodon, R. 1988. *Dynamique des systèmes avifaune-végétation après déprise rurale et incendies dans les Pyrénées méditerranéennes siliceuses*. Thèse de doctorat d'Etat. Université P. et M. Curie. Paris
- Trabaud, L. 1993. Reconstitution après incendie de communautés ligneuses des Albères (Pyrénées Orientales françaises). *Vie et Milieu* 43: 43-51
- Trabaud L., Prodon R., 1993. *Fire in the Mediterranean Ecosystems*. Commission of the European Communities. Ecosystems Research Report 5, Luxembourg, 441 p.
- Trabaud L., 1998. *Fire management and landscape ecology*. International Association of Wildland Fire. Fairfield WA, 334 p.
- Trabaud L., Prodon R., 2002. *Fire and biological processes*. Backhuys, Leiden, Pays Bas, 345 p.
- Vennetier M. - 2001. *Dynamique spatiale de la régénération des forêts après incendie en Provence calcaire. Cas particulier du pin d'Alep*, Cemagref Aix en Provence, 32p

Résumé

Cette note de synthèse fait le point sur les connaissances scientifiques dans le domaine de l'impact des incendies de forêt sur l'écosystème forestier méditerranéen. Elle aborde les principaux niveaux fonctionnels et échelles de perception de l'écosystème, de la structure fine du sol aux paysages, des végétaux supérieurs aux bactéries, en intégrant les composantes vivantes et les facteurs physico-chimiques. De nombreuses études ponctuelles ont abordé l'impact à court terme des incendies sur la plupart des facteurs du milieu naturel, pris le plus souvent séparément. Mais ces études abordent rarement les effets à moyen ou long terme, et l'impact de la répétition d'incendies non contrôlés. On manque aussi cruellement d'études synthétiques faisant le lien fonctionnel entre les principales composantes biotiques et abiotiques, et leur interaction pouvant expliquer la résilience ou la dégradation de l'écosystème.

Summary

Forest fires : present state of knowledge and further needs for research and action

This article reviews the scientific knowledge in the field of the impact of forest fires on Mediterranean forest ecosystems. It addresses the main functional levels as well as the different levels of insight into the ecosystem, from the structure of the soil to the landscapes, from flora to bacteria, integrating biotic and physico-chemical factors. Numerous specifically directed studies have assessed the short-term impact of a forest fire on most of the environmental factors, mostly in isolation. But such studies almost never deal with long term effects, nor with the impact of repeated wild fires. There is also a total lack of synthetic studies making the functional link between the main biotic and abiotic factors and their interaction explaining the resilience or degradation of the ecosystem.

Riassunto

Incendi di foresta : bilancio delle conoscenze e bisogni per la ricerca e l'azione

Questa nota di sintesi fa il punto sulle conoscenze scientifiche nel campo dell'impatto degli incendi di foresta sull'ecosistema forestale mediterraneo. Affronta i principali livelli funzionali e scale di percezione dell'ecosistema, dalla struttura fine dei suoli ai paesaggi, dai vegetali superiori ai batteri, integrando le componenti vive e i fattori fisico-chimici. Numerosi studi puntuali hanno affrontato l'impatto a breve scadenza degli incendi sulla maggior parte dei fattori dell'ambiente naturale, presi il più spesso separatamente. Ma questi studi affrontano raramente gli effetti a termine medio o lungo, e l'impatto della ripetizione d'incendi non controllati. Manchiamo anche crudelmente di studi sintetici che facciano il legame funzionale tra le principali componenti biotiche e abiotiche, e la loro interazione che possa spiegare la resilienza o la degradazione dell'ecosistema.