

Annexe

Etat des connaissances sur l'impact des incendies de forêt : mise en place de protocoles expérimentaux pour le suivi des incendies et de la reconstitution des écosystèmes forestiers

par le Groupement d'Intérêt Scientifique "Incendies de Forêt" *

Quel est l'état des connaissances sur l'impact des incendies ? Que faut-il connaître pour prédire le développement des peuplements incendiés ?

Afin de répondre aux nombreuses interrogations des gestionnaires, le Groupement d'Intérêt Scientifique "Incendies de Forêt" a été créé *, dans le cadre d'une étude financée par la DERF (Direction de l'espace rural et

de la forêt du Ministère de l'agriculture et de la pêche).

Il s'agit d'une synthèse ayant pour objectif d'envisager, sur la base des connaissances disponibles, un outil d'aide à la gestion.

Le débat sur l'après-incendie se devait d'être enrichi par l'important travail réalisé par le GIS, dont voici quelques extraits.

* Les travaux ont été coordonnés par l'INRA (Département Forêts et Milieux Naturels, Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes, Equipe de Prévention des Incendies de Forêt).

Ils ont été réalisés en collaboration avec les autres membres fondateurs du Groupement d'Intérêt Scientifique " Incendies de Forêt " :

- Agence MTDA, Aix en Provence.
- Cemagref, Unité de Recherches " Agriculture et Forêt Méditerranéennes ", Aix en Provence.
- Centre National de la Recherche Scientifique, Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, Montpellier.
- Ecole des Mines de Paris, Pôle Cindyniques, Sophia-Antipolis.
- Entente Interdépartementale en vue de la Protection de l'environnement et de la Forêt contre l'Incendie, Centre d'Essais et de Recherches, Gardanne.
- Météo-France, Direction Interrégionale sud-est, Bureau d'Etudes et de Développement, Aix-en-Provence.
- Université de Provence, Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels, Marseille et Institut Méditerranéen d'Ecologie et de Paléoécologie, Marseille.
- Office National des Forêts, Section Technique Interrégionale, Avignon.

1. Contexte de l'étude

Le devenir des peuplements forestiers parcourus par l'incendie suscite de nombreuses interrogations de la part des professionnels, gestionnaires publics (ONF, DDAF) ou privés (CRPF), de la part des " usagers " de la forêt et de la part des collectivités territoriales (régions, départements, communes).

Ces interrogations sont d'autant plus fortes que les incendies ont été dévastateurs, qu'ils ont touché des formations forestières aux usages multiples ou qu'ils ont détruit des reboisements artificiels toujours très coûteux à mettre en place et à entretenir.

De fortes pressions sont exercées sur les gestionnaires, en particulier les services de l'Etat, pour que les peuplements touchés soient réhabilités dans les délais les plus brefs.

Certes, la législation actuelle qui interdit que ces terrains incendiés soient constructibles, permet, par-là

même, d'envisager la reconstitution des écosystèmes forestiers.

Mais au-delà des aspects réglementaires, demeurent des interrogations quant aux capacités de ces écosystèmes forestiers de se reconstituer par eux-mêmes et, par conséquent, sur l'opportunité d'engager des travaux pour favoriser leur restauration.

En effet, si les processus de cicatrisation, puis de reconstitution après incendie des constituants majeurs des principaux écosystèmes forestiers méditerranéens, semblent connus du monde scientifique, des efforts de synthèse sont nécessaires.

L'incendie ne perturbe pas que les strates herbacée, ligneuse et arborée, mais également la litière, les diverses couches d'humus et les horizons superficiels du sol et, par voie de conséquence, l'ensemble de la faune, de la microfaune, de la flore, et de la microflore, qui toutes, participent au fonctionnement de ces écosystèmes.

De nombreuses observations et études ont été effectuées dans les domaines énoncés ci-dessus, en particulier durant les vingt-cinq dernières années au cours desquelles certaines caractéristiques des incendies ont été étudiées (Prométhée).

Concomitamment, de nombreux travaux de recherches ont été conduits tant par les universités que par les organismes de recherche et de développement de la façade méditerranéenne française sur des thèmes qui relèvent de l'approche décrite ci-dessus.

Ceci étant, les connaissances demeurent fragmentaires, soit parce qu'elles ont été approfondies sur des peuplements forestiers particuliers et ne peuvent pas être directement extrapolées, soit parce qu'elles ne concernent que quelques compartiments de l'écosystème forestier.

Les gestionnaires, mais également l'ensemble des acteurs, ne disposent pas d'outils leur permettant de prédire le devenir des formations incendiées, soit parce que les connaissances sont incomplètes sur des sites anciens, soit par manque de recul sur des sites récents pour lesquels les connaissances sont plus complètes.

Le Conservatoire de la Forêt

Méditerranéenne avait souhaité une étude descriptive multi-sites de l'évolution de massifs incendiés au cours des vingt dernières années.

Dans l'attente d'orientations précises du Conseil d'Orientation Scientifique du Groupement d'Intérêt Scientifique "Incendies de Forêt", les neuf membres fondateurs du groupement, ont tenu à concevoir un projet de recherches.

Ce projet constitue, à leurs yeux, un préalable indispensable pour répondre à la demande indiquée ci-dessus.

2. Objectifs de l'étude

Ce projet se propose de répondre aux besoins, plus ou moins diffus, du gestionnaire en matière de synthèses, de modèles et de simulateurs. Cependant, compte tenu de l'ampleur du problème posé, l'objectif de ce projet est plus prosaïquement d'identifier les connaissances nécessaires, pour être capable de prédire le devenir de peuplements forestiers incendiés.

Le premier résultat attendu est la mise au point de méthodes standardisées de recueil de données et d'information sur les incendies dans le but de constituer des bases de données structurées et cohérentes qui puissent être intégrées dans des systèmes d'aide à la décision.

Il en est de même pour ce qui concerne le suivi de la dynamique des écosystèmes forestiers dans le but de décrire des évolutions types en fonction tant des conditions de croissance après l'incendie, en particulier des séquences climatiques qui régneront au cours de la période de suivi, que des modes de gestion appliqués à ces écosystèmes.

Lorsque certaines des connaissances acquises seront validées pour un écosystème donné, il sera possible de définir une première série de règles simples de gestion portant sur des interventions à réaliser à des stades bien définis de la reconstitution de l'écosystème.

Enfin, au travers de ce premier projet, seront identifiés des thèmes de recherche à conduire ultérieurement et concernant les impacts des incendies sur les différents composants des écosystèmes forestiers méditerranéens.

3. Composantes de l'étude

Plusieurs axes de travail ont été développés :

- Inventaire des besoins réels des gestionnaires.
- Synthèse des connaissances acquises, même si elles sont éparses et fragmentaires.
- Elaboration de protocoles expérimentaux types.
- Test de ces protocoles sur un cas concret, qui doit être un incendie suffisamment ancien et documenté, concernant un massif d'un écosystème méditerranéen bien représentatif.
- Elaboration de bases de données et de bases de modèles en vue de la réalisation d'un outil d'aide à la décision.

3.1 Etat de l'art

3.1.1. Etat des besoins des gestionnaires

Texte de : Philippe BOURDENET
Section Technique Interrégionale
Office National des Forêts

L'objectif est d'identifier, aussi précisément que possible, les besoins des gestionnaires en matière de prédition du devenir des peuplements incendiés.

Ces besoins évoluent dans le temps au rythme de leur reconstitution, ils dépendent de la nature et de la structure des peuplements, de l'intensité des dommages, des conditions édaphiques, du rôle que jouaient les peuplements avant l'incendie, des interventions sylvicoles, de la nature de la propriété....

Identification des différents types de gestionnaires d'espaces naturels forestiers

Les massifs forestiers situés en zone méditerranéenne au sens strict c'est-à-

dire potentiellement concernés par les incendies de forêt, appartiennent pour partie à des propriétaires privés et pour partie à des collectivités (Etat, Région, Département, Communes, Conservatoire du littoral).

Les gestionnaires qui interviennent de façon plus ou moins directe sont donc très variés :

- propriétaires privés, éventuellement regroupés en associations syndicales libres ou autorisées, groupements forestiers,
- collectivités locales : Régions, départements, communes, SIVOM, dotées de services spécialisés,
- l'Office National des Forêts,
- les parcs nationaux ou régionaux, localement cogestionnaires avec l'O.N.F.,
- les réserves naturelles,
- le conservatoire du Littoral.

De plus les D.D.A.F. interviennent au niveau des massifs forestiers (regroupant plusieurs propriétaires) pour l'établissement de PIDAF (Plans Intercommunaux de Débroussaillement et d'Aménagement Forestier).

De plus, la loi prescrit l'étude de Plans de Prévention des Risques dans les communes soumises au risque d'incendie de forêt.

Classement des objectifs assignés à la forêt

En fonction de la nature de la propriété (privée ou publique), les rôles assignés à chaque forêt pourront varier :

- En forêt privée : une enquête auprès des CRPF concernés (analyse des objectifs des plans simples de gestion) permettra d'identifier les principales fonctions dévolues à la forêt privée en zone méditerranéenne.

- En forêt publique : en fonction de la demande sociale, les objectifs assignés à chaque forêt seront multiples... et parfois contradictoires ; l'élaboration des aménagements forestiers devra viser à la satisfaction de l'ensemble des attentes sociales vis-à-vis de la forêt publique 1.

1 - NDLR : Il faut se rappeler cependant que les «forêts publiques» ne sont, en général, que des propriétés «privées» de l'Etat, des collectivités ou des établissements publics bénéficiant du régime forestier.

Le recensement exhaustif des besoins et des rôles assignés à la forêt pourra être réalisé auprès des organismes en charge de la gestion d'espaces forestiers publics, la hiérarchisation des différentes fonctions de la forêt pouvant varier d'un organisme à l'autre.

Recensement a priori des besoins des gestionnaires

Les points développés ci-après devront être précisés par enquête auprès des différents gestionnaires avec, pour chacun d'eux, une hiérarchisation en fonction de leurs propres priorités.

- Information sur les incendies.

Il semble important pour un gestionnaire de connaître les caractéristiques des incendies qui affectent le patrimoine dont il a la charge, et notamment les statistiques concernant les feux (surface, année, cause) et les types de peuplements endommagés ou détruits par les incendies.

Cet historique présente un intérêt essentiellement pour les gestionnaires des forêts publiques (O.N.F.) ou les D.D.A.F. mais aussi par les gestionnaires privés (CRPF).

Les sources d'information sont la base de données PROMETHEE, les documents de gestion forestière (sommier de la forêt) ou éventuellement des procès verbaux de gendarmerie ou des personnels forestiers assermentés, qui peuvent compléter l'information.

Une localisation précise (point d'éclosion, extension maximale du feu) des incendies peut permettre d'alimenter un Système d'Information Géographique.

- Définition d'un vocabulaire descriptif des peuplements

Afin d'optimiser l'efficacité du pilotage de la gestion des écosystèmes forestiers par rapport au problème des incendies, il semble qu'il soit nécessaire d'harmoniser une typologie des peuplements forestiers de la zone "sensible" méditerranéenne.

Cette typologie devra prendre en compte les structures horizontale et verticale, la composition floristique, les caractéristiques dendrométriques

des peuplements forestiers concernés.

Cet effort de classification préalable est indispensable pour permettre la mise au point dans l'avenir d'outils de prédiction du devenir des écosystèmes forestiers incendiés.

L'établissement d'une telle typologie des peuplements ou écosystèmes forestiers devra mobiliser les compétences conjointes des gestionnaires et des scientifiques (notamment ceux du GIS mais pas seulement).

- Connaissance du risque Incendie

Afin de mieux orienter leurs actions de gestion forestière par rapport aux contraintes des incendies de forêt, les gestionnaires ont besoin de connaître le risque feu sur un périmètre de taille à préciser (commune, massif, petite région).

Ce risque est principalement la résultante de l'inflammabilité - combustibilité des peuplements, de la topographie et des caractéristiques locales des paramètres météorologiques.

Les gestionnaires ont donc besoin des cartes existantes ou à défaut des méthodologies validées applicables pour l'élaboration de telles cartes à une échelle donnée.

Une synthèse bibliographique des travaux déjà réalisés sur le sujet est donc nécessaire.

L'échelle de travail pourra varier selon les gestionnaires en fonction de leurs contraintes propres.

- Erosion

La connaissance des zones à plus forte sensibilité vis-à-vis de l'érosion est également indispensable.

- Elaboration d'une typologie simple des incendies

Les impacts des incendies sur les écosystèmes forestiers sont variables selon le type d'incendie qui les a affectés (feux courants, feux de cimes,...).

Les gestionnaires peuvent souhaiter disposer d'une typologie des incendies leur permettant d'orienter de façon plus pertinente leurs actions, après le passage du feu, en fonction des caractéristiques de celui-ci.

- Connaissance des mécanismes de reconstitution des écosystèmes incendiés

Dans le cas de très grands incendies notamment, l'efficacité et le réalisme commandent de cibler au mieux les interventions et les travaux à mettre en œuvre après le passage du feu, afin d'améliorer ou d'accélérer (localement) les mécanismes de cicatrisation des écosystèmes forestiers parcourus.

Il apparaît donc indispensable pour le gestionnaire de disposer des connaissances précises sur les mécanismes naturels de reconstitution des écosystèmes forestiers incendiés afin de lui permettre de "donner les coups de pouce à la nature" de façon efficace et raisonnée.

- Mise au point d'un guide méthodologique d'intervention après incendie

La connaissance des mécanismes, celle du risque, la demande sociale, devraient permettre de procurer aux gestionnaires un guide qui soit à la fois :

- un guide de diagnostic écologique après incendie, permettant de prévoir par zones, l'évolution naturelle, après le passage du feu,

- un guide de prescriptions techniques permettant de hiérarchiser et localiser les interventions en travaux en fonction des différents estimateurs de la valeur du peuplement incendié et de l'utilité des travaux projetés (opportunité du reboisement après incendie, seulement sur des stations judicieusement choisies).

Ce document paraît indispensable au gestionnaire qui souhaite optimiser l'affectation des budgets dont il a la responsabilité à des travaux permettant une réelle plus value (gain "écologique", "économique" ou "social").

Il devra également préciser le pas de temps à respecter après l'incendie pour engager les différents travaux à mettre en œuvre.

- Connaissance des potentialités stationnelles du patrimoine géré

Cette connaissance sera également indispensable pour décider des opérations de reboisement ou pour cibler les

recépages dans les zones de meilleure fertilité.

Les cartes de stations existent localement. Des catalogues de stations sont également disponibles sur certaines zones géographiques.

Les documents de gestion les plus récents (plan d'aménagement ou plans simples de gestion) contiennent des cartes de stations ou au moins des cartes de peuplements indiquant la localisation des formations forestières jugées les plus "intéressantes" ce caractère pouvant être apprécié de façon multicritères (écologique, économique, social, etc.).

- Besoins d'outil méthodologique d'expertise de survie des arbres

Après le passage d'un incendie, en plus des mécanismes connus de régénération des peuplements incendiés (rejets de souche, libération d'un stock de graines prêtes à germer), les arbres adultes qui présentent une certaine qualité d'autorésistance au feu, peuvent survivre au passage du feu.

La connaissance et le maintien d'un outil d'expertise (cf. travaux d'Eric Rigolot - INRA) permettent de proportionner l'action après incendie à la capacité d'auto-cicatrisation de l'écosystème forestier touché par l'incendie de forêt.

- Connaissance de l'influence du type de sylviculture sur les incendies

Il est important que les gestionnaires puissent orienter leur sylviculture au moins dans les zones à fort risque d'incendie, de façon à diminuer l'inflammabilité et si possible la combustibilité des peuplements forestiers. L'interaction entre le type de sylviculture conduite et le niveau de dégâts infligés au peuplement est une donnée que les gestionnaires doivent connaître afin d'optimiser l'efficacité de la gestion forestière.

3.1.2. Etat des méthodes de caractérisation des incendies

L'objectif est de rassembler les méthodes classiquement utilisées pour, d'une part, caractériser le développe-

ment des incendies et, d'autre part, décrire (ou mesurer) :

- l'état des différentes composantes de l'écosystème avant l'incendie,

- la dynamique de l'incendie en particulier les caractéristiques physiques, chimiques et thermiques du front de feu, de la zone en combustion vive et des braises,

- et les caractéristiques environnementales (conditions météorologiques, état du combustible, ...), ces données permettent de qualifier l'intensité et la sévérité du feu.

3.1.3. Etat des méthodes de suivi des impacts des incendies

L'objectif est de rassembler les méthodes classiquement utilisées pour suivre l'évolution dans le temps des composantes de l'écosystème durant sa cicatrisation puis sa reconstitution.

Cette phase est essentiellement bibliographique, en orientant les recherches vers des documents techniques, en général plus précis sur les méthodes et plus riches sur les échecs que les publications scientifiques.

3.1.4. Etat des connaissances sur la cicatrisation et la reconstitution des écosystèmes

La reconstitution d'écosystèmes forestiers méditerranéens après incendie (pinèdes de pin d'Alep, taillis de chêne vert, formations à chêne liège...) a été étudiée tant en France que dans les autres pays méditerranéens.

La première étape est donc de recenser les acquis de ces travaux, d'en tirer les premières conclusions et d'identifier les recherches complémentaires nécessaires.

Par ailleurs, la modélisation de la reconstitution d'écosystèmes incendiés a été entreprise.

Les études en cours permettent déjà d'identifier quelques-uns des mécanismes qui entrent en jeu.

3.2. *Elaboration des méthodes et des protocoles expérimentaux types*

A partir de l'ensemble des pratiques, des besoins et des connaissances identifiés ci-dessus, des protocoles expérimentaux types sont élaborés pour couvrir les différentes étapes du suivi :

- l'ensemble des opérations à conduire pour connaître, voire pour reconstituer, les conditions qui régnait juste avant le feu, basées sur les caractéristiques structurelles (type de végétation, charge de combustible, recouvrement des différentes strates) et conjoncturelles (conditions climatiques, teneur en eau du combustible...).

- L'ensemble des relevés physiques, chimiques et thermiques à effectuer lors du passage du front de feu, de la zone de préchauffage à celles des braises en veillant à rassembler le maximum d'éléments utiles à la modélisation du comportement du feu et à la caractérisation de son intensité et de sa sévérité.

- L'ensemble des observations et des mesures à effectuer au fil du temps, en adaptant leur fréquence à la vitesse de cicatrisation et de reconstitution et en veillant à collecter le maximum d'informations utiles pour analyser cette évolution.

Dans le cadre de cet axe de travail, des recherches ciblées sont entreprises sur certains mécanismes pouvant intervenir sur la dynamique de cicatrisation et de reconstitution de l'écosystème, par exemple le processus de dissémination des graines de pin d'Alep après incendie, dynamisme des rejets, utilité du recépage...

Toutes ces opérations sont consignées selon des normes standardisées de façon à élaborer une série de protocoles expérimentaux types.

3.3. *Application de ces méthodes et de ces protocoles sur une zone incendiée*

L'objectif de l'étude est de prédire le devenir des peuplements incendiés à

partir des éléments disponibles sur le milieu et sur le type d'incendie qui l'a atteint.

Les champs de recherche de cette étude sont larges et nombreux : ils couvrent les aspects météorologiques, l'analyse du milieu naturel, les aspects physiques du feu.

Plusieurs étapes sont nécessaires :

- Reconstituer les conditions qui régnait avant l'incendie : caractérisation de l'écosystème.

- Modéliser le comportement du feu pour caractériser son intensité et donc son impact prévisible sur la végétation.

- Suivre la réponse de la végétation : vitesse de cicatrisation, reconstitution.

Ces différentes étapes sont consignées dans des protocoles expérimentaux types. Ces derniers ont été testés sur une zone incendiée en 1998, la colline des Chapeliers (près d'Aix-en-Provence).

Les tableaux pages suivantes récapitulent l'ensemble des protocoles expérimentaux proposés :

A - Estimation des caractéristiques du milieu avant l'incendie

B - Description lors de l'incendie

C - Etat du milieu juste après l'incendie

D - Suivi de l'évolution du milieu après l'incendie

3.4. *Elaboration de bases de données et de bases de modèles en vue de la réalisation d'un outil d'aide à la décision*

Cet axe de travail, basé sur la méthode "entité - relation", consiste à définir les schémas conceptuels des bases de données ainsi que les modèles relationnels entre toutes les données nécessaires à la prédiction.

Il est fait de même pour les bases de modèles destinées à rassembler non seulement les modèles les plus pertinents pour prédire le comportement du

feu (modèles de propagation et modèles de contagion) mais également ceux qui prédisent la réaction des différentes composantes de l'écosystème aux échauffements, ainsi que ceux qui prédisent la dynamique de la cicatrisation et de la reconstitution de ces mêmes composantes.

Ces bases ne seront naturellement pas complètes à l'issue de ce projet mais elles sont très utiles pour construire l'outil d'aide à la décision du gestionnaire.

Cette étude souligne l'importance et la nécessité d'un diagnostic global mettant en œuvre des méthodes standardisées de recueil des données.

4. *Synthèse des résultats acquis*

Texte écrit par : Daniel Alexandrian
Agence MDTA, Aix-en-Provence.

4.1. *Impact des incendies*

Sous la pression médiatique, les incendies sont souvent assimilés à des catastrophes écologiques.

Si les "nuisances" liées au passage du feu sont bien réelles pour l'homme (destruction brutale du paysage, menace pour la sécurité des personnes, dommages aux biens, ...), l'impact sur la nature est beaucoup moins évident. Toutes les recherches conduites sur la cicatrisation puis la reconstitution des écosystèmes montrent au contraire qu'en région méditerranéenne, les impacts sur les écosystèmes sont en général assez faibles.

La végétation

Pendant longtemps le feu a été considéré par les scientifiques comme un facteur entraînant la dégradation de la végétation. La plupart des anciens auteurs n'étudiaient pas de façon détaillée l'impact du feu sur les communautés en place, ni leur devenir réel après cette perturbation.

Depuis une trentaine d'années, de nouvelles approches ont abordé le problème plus objectivement.

Pour chaque paramètre à étudier, une liste de données utilisables est fournie et la méthodologie à employer est détaillée.

A – Estimation des caractéristiques du milieu avant l'incendie

Paramètre	Type de données utilisables	Méthodologie
Caractérisation de l'écosystème		
Bases préexistantes	<ul style="list-style-type: none"> - Petites régions naturelles : Cemagref (PACA, LR) ou IFN (toutes régions) - Typologie des stations forestières - Etude autécologique - Relations station - production - Modélisation des relations milieus - végétation 	
Climat	<ul style="list-style-type: none"> - Cartes climatiques - Relevés de terrain 	<ul style="list-style-type: none"> - Noter l'exposition générale des grands versants, l'exposition locale, la position topographique, le confinement - Calculer l'indice de climat lumineux - Analyse des unités paysagères - Minimum de 3 relevés en zone homogène de 1 ha
Géomorphologie		
Sol et substrat	<ul style="list-style-type: none"> - Différentes cartes : sols, pédo-paysagère, géologique - Coupes de terrain : talus, fossés - Fosses pédologiques - Cadastre 	<ul style="list-style-type: none"> - Roche-mère : nature, pendage, fissures, ... - Matériau : nature, épaisseur, % cailloux, ... - Sol : description des différents horizons, humus, ... - Epierrage, tassemement du sol, travaux récents, traces d'activités anciennes (charbonnières, gommage, terrasses, ruines, ...) - Relevés dans les zones épargnées par l'incendie - Noter la repousse après l'incendie sur la zone brûlée
Perturbations anthropiques		
Flore	<ul style="list-style-type: none"> - Cartes de végétation - Cartes écologiques (ZNIEFF, réserves, ...) - Carte des peuplements de l'IFN 	<ul style="list-style-type: none"> - (voir aussi description des strates de végétation)
Description des strates de végétation		
	<ul style="list-style-type: none"> - Imagerie satellitaire - Photographies aériennes - Relevés floristiques sur les zones non brûlées adjacentes - Recherche d'indicateurs sur la zone incendiée 	<ul style="list-style-type: none"> - Cartographie de la végétation à différentes échelles (régionale, locale) : différentes strates et peuplements arborés - Notation pour chaque espèce de la strate dans laquelle elle se situe - Identification des ligneux et des principales espèces arbustives (présence de feuilles séchées, aspect des branches et des troncs)
Description du combustible		
	<ul style="list-style-type: none"> - Répartition spatiale de la phytomasse anhydre 	<ul style="list-style-type: none"> - Inventaire du combustible vivant et du combustible mort par type de combustible et par couche
Description de la faune		
	<ul style="list-style-type: none"> - Echantillon de litière et de sol 	<ul style="list-style-type: none"> - Extracteurs automatiques type Berlese - Tüllgren - Tri par groupes fonctionnels (prédateurs, phytophages, détritivores)
Caractérisation des interventions sylvicoles		
	<ul style="list-style-type: none"> - Plans d'aménagement pour les forêts publiques - Plans simples de gestion pour les forêts privées - Sommiers de la forêt ou calepins des propriétaires - Fiches de martelage, catalogues de vente de bois - Projets détaillés de reboisement, marchés de travaux 	<ul style="list-style-type: none"> - Caractériser les travaux à l'installation du peuplement (élimination de la végétation préexistante, densité de la population, dégagements ultérieurs, éclaircies, élagage éventuel) - Caractériser les travaux réalisés dans les peuplements naturels (dernière coupe, conditionnement des rémanents, coupes d'éclaircies, traitements sur rémanents, coupes de régénération) - Caractérisation des interventions sylvicoles sur les coupures de combustibles (densité des tiges, date de l'intervention, composition, hauteur des rejets, date du dernier broyage d'entretien, exploitation pastorale)
Description de l'humus et du sol		
Nutriments	<ul style="list-style-type: none"> - Echantillons de litière et du premier centimètre de sol 	<ul style="list-style-type: none"> - A prélever dans une zone témoin aussi semblable que possible à la zone incendiée, par le type de végétation, la pente, l'exposition - Peser après séchage 24h à l'étuve ventilée à 60°C
	<ul style="list-style-type: none"> - Mesures sur échantillon par un laboratoire spécialisé 	<ul style="list-style-type: none"> - Mesures par spectrométrie de réflexion Proche Infra Rouge (concentration en carbone, azote, phosphore) - Mesures de la stabilité structurale, de la perméabilité - Prélèvement à la tarière sur 10 cm - Conditions standards : mesures de la respiration et de la quantité d'azote minéralisé
Activité microbienne	<ul style="list-style-type: none"> - Echantillons de sol sans litière 	
Conditions météorologiques		
Températures, précipitations	<ul style="list-style-type: none"> - Archives services météorologiques 	<ul style="list-style-type: none"> - Calcul sur le poste le plus proche (plutôt que sur la zone)
Réserve en eau	<ul style="list-style-type: none"> - Données de télédétection 	<ul style="list-style-type: none"> - Historique des températures et précipitations
Vent	<ul style="list-style-type: none"> - Simulation numérique ou physique 	<ul style="list-style-type: none"> - Calcul de la réserve en eau - Comparaison entre le jour de l'incendie et la moyenne des années précédentes - Cartographie

B – Descriptions lors de l'incendie

Paramètre	Type de données utilisables	Méthodologie
Conditions météorologiques		
Températures	- Mesure locale	- Les mesures doivent être dégagées des obstacles les plus proches
Précipitations	(capteur sur véhicule)	- Les mesures sont faites en continu par station "fixe portable"
Rayonnement, vent	- Mesures existantes (Météo France, Vigie pour le vent)	- Faire plusieurs mesures en cas de relief accidenté
Caractéristiques du feu		
Vitesse de propagation	<ul style="list-style-type: none"> - Mains courantes des centres de secours ou du CODIS - Enregistrements des communications radio (bandes magnétiques) - Photos ou films pris par des professionnels (recherche systématique) ou des particuliers (annonces à faire paraître) - Informations diverses sur la vitesse de propagation 	<ul style="list-style-type: none"> - Replacer les informations sur un fond de carte topographique - Distinguer les vitesses moyennes calculées sur des distances de l'ordre du kilomètre (mains courantes) de celles calculées sur des distances de l'ordre de l'hectomètre (photos, films) - Faire attention aux effets du relief (une vitesse moyenne peut être le résultat d'une moyenne harmonique entre vitesse sur pente ascendante et vitesse sur pente descendante) - Recalculer les résultats sur des modèles de propagation
Puissance	<ul style="list-style-type: none"> - Carte forestière (IFN) - Photographie aérienne - Ouvrages permettant de définir des types de combustible - Informations diverses sur la quantité de biomasse avant le feu (photo prise au sol, recherche spécifique), - Visite de feux et mesure des parties imbrûlées - Enquêtes auprès des pompiers intervenus sur la tête du feu (difficultés de lutte, distance possible d'approche, longueur des flammes, etc.) - Visite du feu et analyse des traces des flammes sur les troncs (longueur) 	<ul style="list-style-type: none"> - Apprécier les formations en place (espèces dominantes, flammes sur les troncs (longueur) nombre de strates, taux de recouvrement), - Estimer la quantité de biomasse présentée par les parties forestières laissées indemnes par le feu (îlots ou lisières du feu), - Estimer les restes calcinés de la biomasse (dans la zone incendiée) - Utiliser une méthode de type destructif (coupe des parties aériennes calcinées et pesage), - Utiliser des clés permettant de définir des types de combustible et une quantité de biomasse - Faire la différence entre la biomasse disponible et la biomasse restante après le feu, - Affecter une valeur concernant la chaleur spécifique des espèces dominantes, - Etudier les photos et films pris en cours d'incendie pour apprécier la longueur des flammes (vérification des valeurs calculées de puissance)
Paramètres surfaciques	<ul style="list-style-type: none"> - Image satellite, photo aérienne - Rapports des services administratifs dans le cadre du retour d'expérience sur les grands feux de l'année 	<ul style="list-style-type: none"> - Traiter les images sur le plan géométrique et radiométrique - Effectuer un tour du feu aidé d'un GPS ou lever manuellement le contour du feu - Utiliser un SIG permettant d'avoir une comptabilité précise de la surface brûlée et du périmètre
Description du combustible	<ul style="list-style-type: none"> - Teneur en eau 	<ul style="list-style-type: none"> - Prélèvement, pesées avant et après passage à 60°C pendant 24 heures - Fine Fuel Moisture Meter pour le combustible mort très fin et fin
Humus et sol		
Teneur en eau	- Echantillons de sol à différentes profondeurs	- A prélever juste avant l'arrivée de l'incendie et à placer dans des boîtes d'aluminium étanches
Température	<ul style="list-style-type: none"> - Peintures thermosensibles sur mica - Thermocouples (mais problème pour protéger le matériel) 	- A disposer à des profondeurs variables. Attention à bien les repérer pour les retrouver
Fumées	- Mesures par spectromètre de masse	<ul style="list-style-type: none"> - Transport des appareils par camion ou hélicoptère - Mesure des teneurs en nutriments (qui se volatilisent et sont perdus pour l'écosystème) - Mettre en relation avec l'intensité du feu et le type de végétation qui brûle

Les résultats des recherches les plus récentes montrent qu'il n'y a aucune profonde modification des communautés actuellement en place : celles-ci, après le passage des incendies, tendent vers une structure et une composition spécifique identiques à celles d'origine.

Un bon exemple est celui du pin

d'Alep, objet de nombreuses études, du fait de la fréquence élevée des incendies dans les pinèdes.

Toutes les études s'accordent à dire que le nombre de plantules est relativement faible les premières années après un incendie, puis augmente pour atteindre un maximum, puis décroît au fur et à mesure

que la pinède approche de sa maturité.

Les communautés végétales du Bassin méditerranéen présentent une grande tolérance au feu, que l'on peut qualifier de différentes manières : résilience, stabilité, persistance, élasticité, inertie, ...

Ce sont des systèmes "dynamiques et robustes".

C - Etat du milieu juste après l'incendie

Paramètre	Type de données utilisables	Méthodologie
Conditions météorologiques		
Précipitations	- Pluviographe installé à proximité immédiate	- Calcul de l'intensité des précipitations (pour l'étude de l'érosion)
Caractéristiques de l'humus et du sol		
Nutriments	- Echantillons de restes de végétaux, de litière et de cendres, ainsi que de la couche superficielle du sol	- A réaliser le lendemain de l'incendie - Faire attention aux cendres qui sont légères (erreurs d'estimation) - Pesée au laboratoire après séchage (mêmes mesures qu'avant) - A relier à la quantité de végétation brûlée estimée et aux teneurs initiales - En déduire la perte en nutriments pour l'écosystème forestier - A faire à différentes profondeurs - Estimer la profondeur de l'onde de chaleur - Estimer la profondeur de stérilisation du sol
Teneur en eau		
Respiration		
Description des imbrûlés	- Répartition spatiale des imbrûlés - Détermination du taux de combustion	- Inventaire du combustible par type de combustible et par couche - Rapport de ces masses anhydres aux masses anhydres correspondantes avant l'incendie
Impact de l'incendie sur le couvert végétal	- Estimation sur le terrain - Banque de graines du sol - Relevés de terrain sur une zone témoin	- Mesure sur les strates endommagées : hauteur moyenne de dessèchement des houppiers, hauteur de carbonisation des troncs, % de volume desséché, profondeur de carbonisation de l'écorce - Méthode indirecte par tests de validité - Evaluation des réactions écophysiologiques

D - Suivi de l'évolution du milieu après l'incendie

Paramètre	Type de données utilisables	Méthodologie
Evolution des conditions météorologiques		
Températures		- Cf. avant incendie
Précipitations		
Rayonnement, vent		
Evolution de l'humus et du sol		
Caractéristiques physico-chimiques		- A mesurer sur le site incendié et dans le site témoin à des moments clés du cycle annuel (après les premières pluies de fin d'été, à l'automne pendant la première vague de végétation, au printemps, un an après l'incendie) - Mesures à différentes profondeurs Explique les différences d'activité biologique - Sur 2 lignes perpendiculaires, mesurer la hauteur des clous après chaque épisode pluvieux - Calculer les différences par comparaison avec la zone témoin - Calculer l'ampleur de l'érosion et son évolution dans le temps - Récolte de l'eau écoulée et des matières en solution et en suspension - Estimation de la quantité de sol déplacé - A combiner aux mesures d'un pluviomètre (% d'eau qui ruisselle)
Teneur en eau, température		
Erosion	- Technique des clous - Isolement des parcelles	
		- Suivi de la germination - Noter le % de repousse végétative, et le % de recouvrement
Evolution des différentes strates (cicatrisation, reconstitution)	- Relevés sur zone incendiée - Quadrats permanents	
		- Idem avant incendie
Evolution de la faune	- Idem avant incendie	- Idem avant incendie
Influence des interventions sylvicoles sur le processus de reconstitution	- Placette expérimentale de 15 à 20 ares pour suivre l'intervention sylvicole - Placette témoin sans intervention sylvicole	- Réaliser 3 ou 4 répétitions dans chacune des placettes - Installer 15 à 25 placeaux de comptage de 1 à 2 m ² pour les semis - Echantillon de 30 brins répartis par type de cépée (en fonction du nombre de brins des cépées) - Echantillon de 30 à 50 tiges dominantes - Exemple de mesures à réaliser, 1 an, 5 an ou 10 ans après l'incendie : Nombre de semis (par ha) du peuplement incendié Nombre de cépées (par ha) Hauteur du plus grand rejet par cépée Recouvrement des houppiers Biodiversité forestière

Le feu répété au cours des millénaires a détruit ou éliminé les individus les moins résistants, réduisant ainsi la compétition potentielle ; seules ont persisté les espèces et leurs populations adaptées au passage répété des perturbations, le feu étant l'une d'entre elles.

Force écologique ancienne², le feu, associé à l'action du climat et aux formes topographiques, a modelé la plupart des communautés végétales et des paysages de la Méditerranée.

Les nutriments

En brûlant la végétation et la litière qui recouvre le sol, le feu provoque des pertes en nutriments dans l'atmosphère et apporte au sol des cendres riches en éléments minéralisés. Il agit également directement sur le sol en l'échauffant.

L'impact du feu est hétérogène, non seulement dans son action sur des écosystèmes différents, mais également dans l'espace et dans le temps au cours d'un même épisode.

C'est une des raisons pour lesquelles on trouve des résultats différents, voire contradictoires, dans l'abondante littérature concernant l'impact du feu sur les sols et leur fertilité.

S'il y a globalement des pertes en nutriments pour l'écosystème forestier, il y a simultanément enrichissement du sol avec l'apport de cendres provenant de la minéralisation de la végétation et de la litière.

Les nutriments contenus dans les cendres déposées sur le sol sont très vulnérables aux pertes par érosion (vent ou ruissellement) et par drainage dans les couches profondes, au-delà des systèmes racinaires.

Ces pertes seront minimisées si la végétation repart rapidement après les feux et peut ainsi protéger le sol et mobiliser cet afflux de nutriments. C'est le rôle des espèces qui rejettent ou germent rapidement après les incendies.

Quel que soit le feu, ce sont les couches superficielles du sol, les plus

riches en matière organique et en nutriments et les plus actives biologiquement, qui sont les plus exposées à l'échauffement.

Sauf en cas de feux sévères, il n'y a pas d'altération immédiate des propriétés physiques du sol.

Les effets de l'incendie sur le caractère hydrophobe des sols et la stabilité des agrégats sont cependant controversés car les processus semblent dépendre de la nature et de la teneur en eau des sols, de la durée et de l'élévation de température auxquelles les sols ont été soumis au cours de l'incendie³.

L'érosion

De nombreux auteurs ont observé et mesuré des augmentations des taux d'érosion des sols après des incendies de forêt.

En effet, la réduction des différentes strates végétales qui ralentissent l'arrivée d'eau au sol et le protègent de l'impact direct des gouttes de pluie, ainsi que la modification des caractéristiques physico-chimiques des sols, entraînent une diminution des propriétés d'infiltration du sol.

Ceci favorise le ruissellement qui entraîne les débris incomplètement brûlés et les cendres laissées par le feu et même, dans les cas les plus sévères, les couches superficielles du sol.

L'érosion est d'autant plus forte que les feux sont sévères et que les sols sont de nature fragile, mais elle dépend également de nombreux facteurs locaux comme la pente ou la végétation restante.

Différentes études en région méditerranéenne française, ont montré que l'érosion avait surtout lieu au cours des violentes averses d'automne après un incendie d'été, et qu'elle n'était plus perceptible ensuite au cours des pluies du printemps suivant.

Par ailleurs, les aménagements forestiers réalisés après un incendie ne sont pas sans incidence sur l'érosion. Il semble conseillé d'attendre, avant d'abattre les arbres endommagés par

le feu, que toutes les feuilles ou aiguilles roussies soient tombées au sol ; il faut en outre étaler sur le sol les branches des arbres coupés pour le protéger de l'érosion pendant la période sensible des premières semaines après les incendies. L'abattage des arbres, suivi du travail du sol et de l'installation de plants, pourrait par contre être défavorable et multiplier les taux d'érosion, ceux-ci étant beaucoup plus faibles lorsqu'on laisse la végétation se réinstaller spontanément, même si on abat les arbres endommagés.

La microfaune et la microflore

Les animaux du sol et la microflore sont les moteurs du fonctionnement du sol. Ils sont obligatoirement touchés par le passage d'un incendie, au moins ceux des couches superficielles du sol.

En règle générale, il est admis que l'activité des micro-organismes est stimulée après les feux, en raison de l'augmentation du pH du sol dû à l'incorporation des cendres, à l'enrichissement du sol en matières organiques facilement minéralisables et aux modifications des conditions microclimatiques.

Cette stimulation de l'activité des micro-organismes, qui immobilisent les éléments minéraux libérés par le feu, est, avec la reprise de la végétation, un des mécanismes majeurs de conservation des nutriments après les feux.

Cicatrisation et reconstitution du sol

Les pertes en éléments minéraux au cours d'un feu sont généralement faibles si on les compare aux quantités stockées dans le sol et dans la biomasse aérienne qui ne brûle pas, mais tous ces éléments ne sont pas également mobilisables.

Or les feux affectent plus spécialement le pool des éléments les plus mobiles de l'écosystème forestier, ceux qui sont recyclés dans la litière pour être remis à la disposition de la végétation. Les études des effets à long terme d'un incendie sur le capital d'éléments minéraux du sol montrent

2 - Connue et utilisée par l'homme depuis des dizaines de milliers d'années (NDLR)

3 - La cuisson de l'argile peut donner de la brique ! (NDLR)

que les conséquences sont plus de caractère fonctionnel que quantitatif.

D'après plusieurs études réalisées après des incendies de forêt, les caractéristiques des sols et leur teneur en matière organique et en azote étaient reconstituées au bout de 2 ans.

Cependant, d'autres études montrent au contraire que les effets d'un incendie sur la biomasse microbienne et la matière organique d'un sol d'une forêt de pin d'Alep restent appréciables pendant plus de 10 ans.

A long terme, les pertes dues aux feux peuvent être compensées par de nombreux mécanismes : apports atmosphériques, minéralisation et mobilisation des réserves organiques résistantes du sol et, pour l'azote, fixation symbiotique et non symbiotique⁴.

Conclusions sur l'impact des incendies

La très abondante bibliographie répertoriée à l'occasion de ce projet montre la richesse et l'étendue des recherches déjà réalisées en matière d'impact des incendies.

Tous les compartiments de l'écosystème ont déjà fait l'objet d'investigations, depuis le sol jusqu'à la faune, mais la plupart des travaux mettent l'accent sur les aspects dynamiques de reconstitution des complexes végétaux après incendie.

D'une façon générale, l'ensemble des résultats converge vers une faible incidence des incendies sur les écosystèmes méditerranéens. Des nuances doivent cependant être apportées dans quelques cas particuliers, notamment en cas de fréquences élevées de passage du feu ou en présence de milieux particulièrement fragiles, notamment du point de vue de l'érosion.

Mis à part ces quelques situations, on peut affirmer aujourd'hui que la végétation "détermine" le régime des incendies, qui à son tour modèle le type de végétation.

4 - Sans oublier les remontées d'éléments minéraux du sous-sol par les racines des végétaux et surtout des arbres à enracinement profond.
(NDLR)

4.2. Méthodes

Il est difficile de résumer l'ensemble des méthodes utilisables, étant donné leur nombre et le large éventail des disciplines qu'elles recouvrent.

Ce travail de recherche a cependant permis d'en dresser un inventaire assez complet dans les domaines suivants :

- caractérisation des incendies,
- suivi des impacts,
- caractérisation des écosystèmes,
- caractérisation des interventions sylvicoles,
- description des strates de végétation et du combustible,
- description de l'humus et du sol,
- caractérisation des conditions météorologiques,
- influence de l'intervention des équipes de lutte,
- intégration des résultats dans un Environnement de Résolution de Problèmes.

L'application de ces méthodes à un cas concret au cours de ce projet a révélé l'intérêt d'une approche pluridisciplinaire, malgré les difficultés rencontrées lors de la collecte des données.

De manière assez évidente, ces besoins portent beaucoup plus sur la gestion de l'après-incendie que sur la connaissance a priori des effets du feu sur le long terme.

5.2. Perspectives

Compte tenu des remarques précédentes, il est impératif de bien distinguer les deux champs de recherche que sont :

- la mesure de l'impact des incendies, visant à quantifier les pertes éventuelles liées au passage du feu,
- le suivi de la reconstitution des écosystèmes forestiers après l'incendie, destiné à observer, voire accompagner, les processus de cicatrisation.

Schématiquement, on peut considérer que le premier champ de recherche porte sur le long terme et vise essentiellement la connaissance des phénomènes : l'objectif est d'appréhender l'ensemble des mécanismes physiques et biologiques qui interviennent (on peut parler de recherche fondamentale). Le concept de "site atelier", déjà envisagé au sein du GIS, pourrait permettre d'améliorer la coordination entre équipes travaillant déjà dans ce champ de recherche.

A contrario, le suivi de la reconstitution des écosystèmes forestiers, bien qu'apportant aussi des éléments de réponse à la question de l'impact des incendies, porte beaucoup plus sur le court terme et correspond essentiellement aux besoins exprimés par les gestionnaires (on peut parler de recherche appliquée). Le concept de "réseau de références" semble dans ce cas mieux adapté à la mise en commun des expériences.

Site atelier

Quelle que soit la discipline scientifique, la mesure fine de l'impact des incendies se heurte au problème de la connaissance précise de l'état initial (avant l'événement) et des conditions de l'incendie (pendant l'événement).

De nombreuses méthodes ont été développées pour palier ce manque de données. Elles ont toutes le défaut d'être empreintes d'assez fortes incertitudes, notamment lorsque des par-

celles témoins sont choisies au voisinage du périmètre incendié ou lorsque la dynamique du feu est reconstituée a posteriori.

Le concept de site atelier permettrait de résoudre ces difficultés. Il faut l'entendre comme un laboratoire expérimental, grande nature, partagé par des équipes couvrant des disciplines complémentaires.

En pratique, le concept de site atelier peut se décliner de deux manières différentes :

- lieu unique supportant une instrumentation préalable relativement lourde et dans lequel des feux sont déclenchés et contrôlés en fonction des objectifs recherchés,

- lieux multiples, disséminés sur des territoires diversifiés et fréquemment exposés aux incendies, supportant une instrumentation préalable plus légère et dans lesquels seuls les feux sauvages sont étudiés, lorsqu'ils se produisent.

Réseau de références

L'exemple d'autres réseaux constitués au cours de ces dernières années est intéressant (réseau "brûlage dirigé", réseau "coupures de combustible").

Ces réseaux ont en effet permis de mettre en commun les connaissances et les résultats dans les domaines qu'ils recouvrent.

En matière de reconstitution naturelle ou artificielle après incendie, une démarche similaire permettrait, au travers d'une recherche/développement, d'enrichir les pratiques actuelles en matière de :

- diagnostic précoce de survie,
- travaux de protection des sols à mettre en place immédiatement après le passage du feu,
- coupes de bois brûlés à réaliser dans les mois suivants l'incendie,
- travaux de restauration à plus long terme

Un tel réseau pourrait évidemment rassembler à la fois des recherches synchroniques (suivi de parcelles expérimentales sur plusieurs années) et des recherches diachroniques (analyse de parcelles ayant connu le passage du feu à des époques différentes).

sances disponibles ainsi que les axes à approfondir.

Elle a montré également l'intérêt d'une approche pluridisciplinaire, compte tenu de la complexité des écosystèmes concernés, mais également les difficultés auxquelles les équipes doivent s'attendre compte tenu de la diversité des questions posées.

Enfin, les équipes de recherche doivent intégrer dans leur démarche, les demandes de l'utilisateur, ici les gestionnaires ou propriétaires forestiers, qui attendent des recommandations de gestion et qui ne peuvent se permettre de rester dans l'expectative d'ici à la livraison des résultats.

Intégrer les gestionnaires dans leur processus de réflexion, les associer (autant que faire se peut) à l'analyse des résultats intermédiaires de manière à bénéficier de leur expérience, leur rendre compte des travaux, est probablement la meilleure stratégie des chercheurs dans ce domaine.

Il reste cependant à déterminer, au travers notamment du Conseil d'Orientation Scientifique du GIS, quelle est la priorité à accorder à un tel axe de recherche, en précisant notamment les sujets sur lesquels l'accent doit être mis.

Conclusion

L'étude de l'impact des incendies et de la reconstitution des écosystèmes forestiers a montré l'étendue des champs de recherche et des connais-