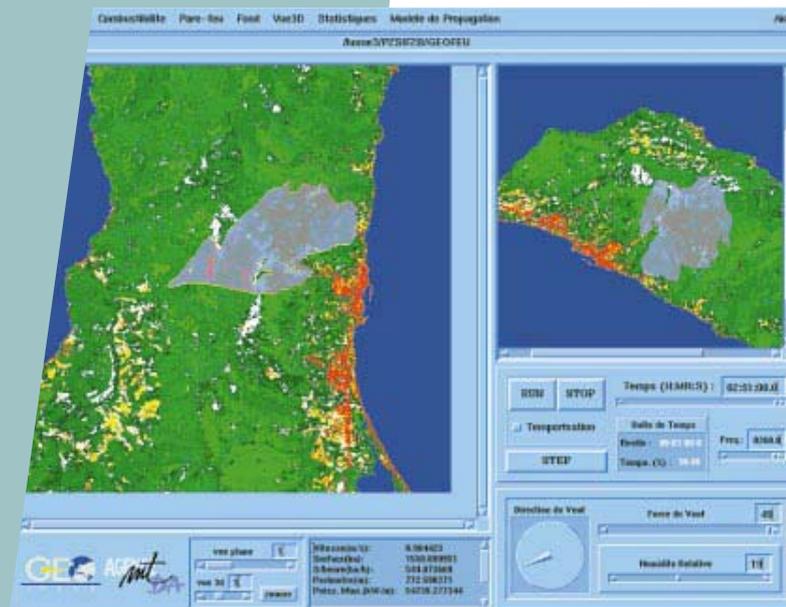


4

L'analyse du risque



Modèle de propagation des feux (MTDA, France)

- sommaire*
- 4.1 Estimation dans le temps :
la prévision des périodes à risque p 45
 - 4.2 Estimation dans l'espace :
l'évaluation des zones à risque p 49
 - 4.3 Prévision de la propagation du feu p 55

Introduction

Si un incendie de forêt a de fortes probabilités de se déclarer ou de se propager en un lieu donné, on dit alors que l'aléa feu de forêt est élevé.

*S'il peut causer des dommages sur certains biens (enjeux) du territoire concerné (habitations, équipements, patrimoine) on parle alors de **vulnérabilité** de ces enjeux. Cet aspect ne sera pas abordé dans ce guide.*

Il faut noter que la forêt, en tant que vecteur et victime du feu, participe à la fois à l'aléa et à la vulnérabilité. C'est le cas également pour les activités humaines qui sont sources de dépôts de feu et sont également vulnérables face au phénomène.

*En règle générale, les disciplines qui traitent des risques (inondations, séismes, accidents technologiques majeurs, ...) appellent **risque** le produit de la probabilité d'apparition du phénomène (aléa) par une valeur de dommage (vulnérabilité).*

*Toutefois, un usage usuel en matière de feux de forêts fait que l'on nomme **risque** le seul aléa. On conservera cet usage dans la suite de ce guide.*

Il faut distinguer les notions d'évaluation et de prévision du risque :

- Évaluer un risque, c'est chercher à le connaître, sans savoir quand le phénomène se produira.

- Prévoir un risque, c'est chercher à détermi-

ner les périodes pendant lesquelles le phénomène peut se produire.

*Le risque d'incendie varie dans le temps en fonction des conditions météorologiques et des conditions des végétaux. On parle de **prévision temporelle** du risque.*

*Le risque d'incendie n'est pas homogène sur l'ensemble du territoire. Son intensité dépend des conditions du milieu naturel et de l'occupation du territoire. On parle d'**évaluation spatiale** du risque.*

Il faut cependant remarquer que :

- Le risque temporel n'est pas forcément uniforme sur l'ensemble d'un territoire donné. Celui-ci peut alors être découpé en zones à chacune desquelles on attribue un niveau de risque temporel.

- Le risque spatial est analysé à une date bien définie, et peut évoluer dans le temps (implantation de nouvelles activités humaines, évolution de la végétation...).

*Certaines méthodes d'évaluation spatiale du risque utilisent des **modèles de propagation**. Ceux-ci sont développés en détail dans la fiche 4.3. Ces modèles sont également utilisés pour la formation des personnels responsables de la lutte. Des recherches sont en cours pour les rendre opérationnels en temps réel pour la lutte et permettre ainsi de prévoir le comportement de l'incendie pour positionner des moyens de lutte à des endroits stratégiques.*

4.1 Estimation dans le temps : la prévision des périodes à risque

Pendant toute la durée de la saison des feux, la prévision des périodes à risque permet de mobiliser complètement les moyens de lutte les jours à risque élevé, en donnant une estimation du niveau de ce risque.

La mobilisation préventive des moyens favorise la détection précoce et l'intervention rapide sur les feux naissants, limitant ainsi leur extension.

Un indice de risque, s'il est diffusé quotidiennement, permet également de sensibiliser la population ou de limiter l'accès à certains massifs en été ou certains jours à haut risque par exemple.

Le déclenchement et la propagation d'un feu sont conditionnés par l'état (température et humidité) des strates contiguës au sol (litière ou tapis herbacé), ainsi que par l'état hydrique de la végétation arbustive et par la vitesse du vent.

Différents paramètres permettent d'évaluer l'état de la litière : température et humidité de l'air, précipitations, couverture nuageuse.

Les sources de données sont variées. La combinaison des paramètres aboutit à un indice de risque.

Les facteurs de risque

FACTEURS CLIMATIQUES

Stations météorologiques

Les observations quotidiennes des stations météorologiques fournissent les paramètres météorologiques nécessaires à la prévision de l'état de la litière et de la vitesse du vent.

Exemple de données fournies : quantité d'eau tombée lors de la dernière pluie, nombre de jours sans pluie depuis la dernière pluie, température maximale de l'air du jour de la prévision, direction et vitesse du vent.

Prévision des conditions de vent

Il est possible de simuler le déplacement des masses d'air dans les terrains complexes.

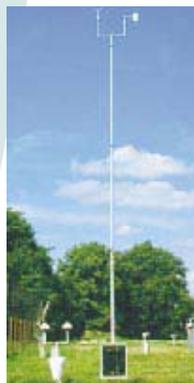
En effet, si l'orographie et les caractéristiques météorologiques des zones à fort risque d'incendie sont connues, des modèles météorologiques peuvent simuler les conditions de vent.

INFLAMMABILITÉ DES STRATES BASSES DE LA VÉGÉTATION

Mesures de terrain et en laboratoire

Des prélèvements peuvent être effectués sur le terrain et complétés par des mesures en laboratoire pour évaluer l'inflammabilité de la litière et des végétaux ou leur teneur en eau (cf. fiche 1.3).

A noter en France, le réseau INRA / ONF de mesu-



Station météorologique (France)

re de la teneur en eau des végétaux. Il permettra l'étalement des données satellitaires.

Ces mesures améliorent également les résultats bruts des calculs de teneur en eau des sols.

Télé-détection

La télé-détection satellitaire permet d'acquérir des données globales et répétitives sur la surface terrestre et donc sur la végétation. Cette acquisition se fait dans

Portugal

MEMO : un modèle météorologique de pronostic des déplacements de masse d'air

Principe : dans la zone d'étude, le flux d'air est influencé par des phénomènes de différentes échelles, en relation avec le relief.

Le modèle génère des pronostics de flux d'air à dix mètres au-dessus du niveau du sol, à trois échelles différentes : 5 x 5 km², 2 x 2 km², 1 x 1 km².

Application : le modèle MEMO a décrit la situation météorologique durant le feu de Poiaras, en utilisant seulement les données météo de la radiosonde de Lisbonne.



Prélèvement de bruyère sur le terrain (France)

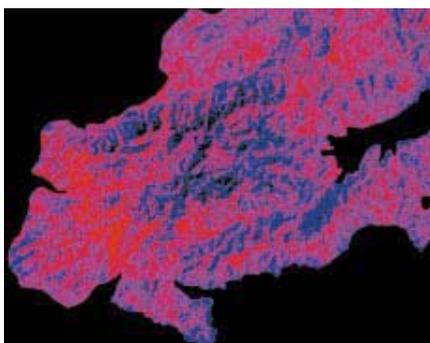
un ensemble de bandes spectrales, qui seules (moyen infrarouge, infrarouge thermique, hyperfréquences) ou combinées (par exemple indices de végétation construits à partir des bandes visible et proche infrarouge) donnent des informations sur le contenu en eau de la végétation ou sur son stress hydrique.

Son emploi est cependant actuellement limité, car les résultats encourageants obtenus doivent faire l'objet d'un effort de validation. De plus, il est difficile d'obtenir des données quotidiennes en raison des couvertures nuageuses fréquentes.

Les recherches s'orientent aujourd'hui vers l'utilisation de données radar.

Pour choisir le satellite à utiliser, il faut faire un compromis entre :

- La résolution au sol, c'est-à-dire la taille de la plus petite surface au sol qui peut être détectée par le satellite (pixel). Ex : 20m x 20m pour SPOT en multispectral, 1km x 1km pour NOAA
- Le temps de retour, c'est-à-dire l'intervalle de temps entre 2 passages du satellite au-dessus du même point. Ex : tous les jours pour NOAA
- Les canaux de longueur d'onde. C'est le canal Infra Rouge Thermique qui permet d'évaluer la température de surface de la végétation, et donc le stress hydrique. Ex : Landsat-TM ou NOAA



Variation temporelle du stress hydrique - Source : Cemagref, UMR 35
Les zones rouges indiquent un stress hydrique important. Ce stress, présent à l'ouest en juillet (à gauche) est visible sur toute la côte en août (à droite). L'intérieur du massif reste peu stressé (en bleu).

Calcul de la réserve en eau du sol

Il s'agit ici d'une méthode de calcul basée sur les données météorologiques.

La réserve en eau du sol correspond à la quantité d'eau disponible dans le sol pour les plantes. Elle est exprimée en millimètres d'eau. Plus elle est faible, plus la plante est en état de stress hydrique, et plus le risque d'incendie est élevé.

Le calcul de la réserve en eau du sol permet d'approcher l'état hydrique de la végétation pendant l'été. Cependant, il peut exister un décalage entre l'état de la végétation et l'eau contenue dans le sol. La réserve en eau est parfois utilisée comme paramètre d'entrée dans les modèles d'évaluation du risque.

France

Exemple de calcul de la réserve en eau du sol

Calcul : la réserve en eau du sol est alimentée par les précipitations quotidiennes et réduite par l'évapotranspiration réelle des végétaux (ETR), calculée à partir d'une formule dépendant de la température moyenne de l'air (Thornthwaite). La réserve en eau du sol peut être déterminée quotidiennement par la formule suivante :

$$R_j = R_{j-1} + \text{PLUIES}_{j-1} - \text{ETR}$$

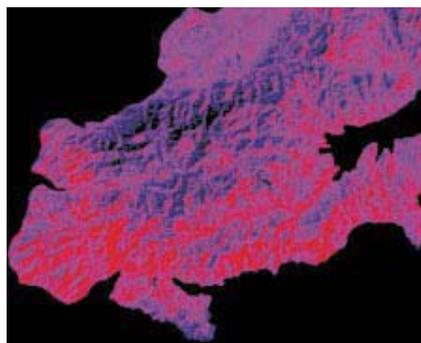
R_j : réserve en eau du jour j

R_{j-1} : réserve en eau du jour précédent

PLUIES_{j-1} : précipitations du jour précédent

ETR : évapotranspiration réelle

Quelques valeurs : en région méditerranéenne française, la réserve maximale est arbitrairement évaluée à 150 mm. Les feux deviennent virulents quand la réserve en eau est inférieure à 50 mm. En dessous de 30 mm et en présence d'un vent violent, la probabilité d'avoir des feux catastrophiques est élevée. La réserve en eau du sol n'a de signification que l'été. L'hiver, une valeur moyenne peut être fixée à 45 mm.



L'estimation du risque

Estimé quotidiennement, le risque météorologique peut être exprimé **qualitativement**.

Ex : au Maroc, la présence du Chergui, vent d'est sec et chaud, induit un risque d'incendie plus élevé. Il est indiqué dans un bulletin quotidien transmis par fax de la Météorologie Nationale vers la Sécurité Civile et les Eaux et Forêts.

Tunisie

Bulletin météorologique spécial Risque d'incendie de forêt

L'Institut National de la Météorologie édite quotidiennement, entre le 1er mai et le 31 octobre, un bulletin météo spécial "Risque incendies de forêt".

Contenu du bulletin : Ce bulletin comporte 2 parties :

- Un tableau contenant des données météorologiques du jour précédent pour chaque gouvernorat
- Un tableau contenant des données météorologiques du jour, ainsi que le degré d'alerte (Degré Météorologique Risque Incendie de Forêt ou DMRIF) avec 4 niveaux (quasi nul, faible, assez sévère, sévère).

Calcul du Degré Météorologique Risque Incendie de Forêt :

Paramètres

- R = Réserve en eau du sol (en mm)
- Vm = Vitesse moyenne du vent (en m/s)
- Nj = Nombre de jours sans pluie depuis la dernière pluie
- Tmax = Température maximale de l'air sous abri (en °C)
- Q = Quantité de la dernière pluie (en mm)

Equations

- Si l'on est à plus de 6 jours de la dernière pluie
 $DMRIF = -131,7 * R + 5,9 * Vm + 26,8 * Nj + 1,4 * Tmax - 32,8 * Q$
- Si l'on est à 6 jours ou moins de la dernière pluie
 $DMRIF = -26,3 * R + 4,6 * Vm + 0,5 * Tmax$

Destinataires :

- La Direction Générale des Forêts
- La Direction de la Protection Civile
- Les subdivisions météorologiques
- Les centres météorologiques régionaux de télécommunication.

Le risque gagne en précision quand il est exprimé **sous la forme d'indices**, à partir de données météorologiques prévues la veille ou mesurées le jour même. Des prévisions à plus long terme sont aussi possibles.

Il existe de nombreuses méthodes de calcul qui donnent soit un indice numérique soit directement un niveau d'alerte qui augmente avec les conditions à risque. Le plus souvent l'indice numérique est également traduit, pour des raisons pratiques, sur une échelle de danger possédant 3 à 6 niveaux.

Espagne

Méthode de calcul d'un indice de danger

La méthode employée ici n'est pas cumulative. Elle procède par tableaux croisés en donnant des niveaux d'alerte.

Le 1er tableau donne la probabilité d'éclosion en fonction de l'ombre (4 classes), de la température (9 classes) et de l'humidité du combustible fin mort (16 classes). Le 2ème tableau donne le niveau d'alerte en fonction de la probabilité d'éclosion (4 classes) et de la vitesse du vent (4 classes) en distinguant les vents desséchants et les vents non desséchants.

Les niveaux d'alerte sont les suivants :

Préalerte : Danger bas ou modéré. Pas de précautions spéciales

Alerte : Danger modéré. Moyens prêts à être mobilisés

Alarme : Danger élevé. Vigilance intensifiée

Alarme extrême : Danger extrême. Grande probabilité de nombreux et grands incendies et de sautes de feux.

Quand ces indices sont communiqués aux responsables de la lutte, ils permettent la mobilisation préventive des moyens de lutte. L'indice est cependant tributaire de la qualité de la prévision météorologique. Les erreurs sur la prévision du vent peuvent avoir des conséquences graves sur le déploiement des moyens de lutte.

France

Utilisation d'un indice canadien, l'Indice Forêt Météo (IFM)

Malgré son origine outre-Atlantique, l'Indice Forêt Météo (IFM), a des applications en régions méditerranéennes.

La méthode comporte 6 indices normalisés.

Elle est constituée à un premier niveau de 3 indices qui indiquent les variations journalières de la teneur en eau de 3 types de combustibles forestiers ayant différentes vitesses de dessèchement.

Un deuxième niveau présente 2 indices qui se rapportent au comportement du feu et sont représentatifs de la vitesse de propagation et de la quantité de combustibles brûlés.

L'indice IFM combine ces deux derniers indices.

Les trois indices de la teneur en eau des combustibles sont calculés en deux phases, l'une pour le mouillage par la pluie, l'autre pour le dessèchement. Ce sont :

- L'indice du combustible léger (ICL), qui représente la teneur en eau d'une couche de litière et d'autres combustibles légers séchés pesant environ 250 g par m². C'est avec cet indice que l'existence d'incendies présente une meilleure corrélation.
- L'indice de l'humus (IH), qui représente la teneur en eau d'une couche de matière organique en décomposition et peu compacte pesant environ 5 kg par m².
- L'indice de sécheresse (IS), qui est représentatif d'une couche profonde de matière organique compacte pesant environ 25 kg par m².

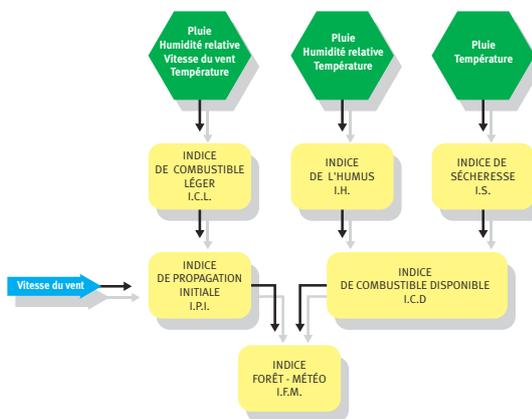
En combinant deux à deux les trois indices d'humidité et le vent, on obtient deux indices intermédiaires qui, combinés, donnent l'indice final IFM.

- L'indice de propagation initiale (IPI) représente uniquement la vitesse de propagation sans tenir compte de l'effet des quantités variables de combustibles. C'est avec cet indice que l'étendue des incendies est le mieux corrélée.

- L'indice du combustible disponible (ICD) représente la quantité totale de matières forestières disponibles au feu en progression.

L'indice IFM final représente l'intensité du feu en progression d'après la quantité d'énergie produite par unité de longueur du front.

Le calcul des différents indices se fait à l'aide de fonctions mathématiques. Chaque indice a une échelle de valeurs qui lui est propre. La fonction rendant compte du vent dans l'IPI est une exponentielle simple qui double la valeur de l'IFM pour chaque augmentation de 19 km/h de la vitesse du vent.



L'IFM donné seul convient pour l'information du public en général, car il rend compte au moyen d'un seul chiffre de tous les effets combinés du mieux possible.

L'IPI et l'ICD, donnés séparément, sont particulièrement recommandés pour les besoins généraux de la lutte contre les incendies, car ils renseignent directement sur la vitesse de propagation et la quantité de combustibles brûlés.

Lorsque l'on communique les estimations du danger d'incendie, on donne habituellement la classe de danger, surtout lorsqu'on s'adresse au public.

Les classes de danger utilisées au Canada sont les suivantes :

Classe de danger	Intervalle de l'IFM
Extrême	30 et plus
Très élevé	17 à 29
Élevé	9 à 16
Modéré	5 à 8
Bas	2 à 4
Très bas	0 à 1

Si l'échelle de l'IFM est uniforme à l'échelle du pays, la gamme des conditions météorologiques propices aux incendies ne l'est certes pas. Il est donc logique que chaque organisme responsable d'un territoire établisse son propre système de classes de danger, fixant pour chacune de ses classes l'intervalle approprié de l'IFM.

En France, pendant l'été, un expert des services de Météo-France se rend quotidiennement au CIRCOSC. Les départements du sud de la France sont découpés en 90 zones homogènes du point de vue climatique. Un niveau de risque journalier, dont les valeurs sont données en 5 classes (de faible à très sévère), est fourni pour chacune de ces zones. L'expert utilise une adaptation de la méthode canadienne, une vitesse de propagation estimée et d'autres éléments plus subjectifs.

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

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

Variable dans le temps, le risque d'incendie varie aussi dans l'espace. Pour avoir une action ciblée et adaptée, il est donc important de connaître les zones présentant un risque élevé. Ces zones correspondent à des parties du territoire où une ou plusieurs des caractéristiques suivantes sont présentes : la probabilité de départ d'un feu est élevée ; les conditions du milieu naturel sont favorables à la propagation d'un feu ; des enjeux importants pourraient être affectés.

L'évaluation spatiale du risque propose un zonage du territoire en différents niveaux de risque. La cartographie est la traduction de ce zonage sur une carte.

Elle constitue un outil d'aide à la décision pour :

- Le choix des sites à équiper ou à réaménager en priorité pour faciliter la prévention et la lutte. Le choix de la nature et de la localisation des équipements de Défense des Forêts Contre les Incendies.
- La gestion de l'espace : traitement des zones d'interface, prise en compte de la contrainte incendie dans les règlements d'urbanisme.

Dans la suite de ce chapitre, seule l'évaluation spatiale de l'aléa feu de forêt sera développée. L'analyse des enjeux ne sera pas abordée.

L'évaluation spatiale du risque d'incendie nécessite de connaître la variation spatiale des facteurs qui contribuent à l'éclosion et à la propagation des incendies et la façon dont ils y contribuent. Généralement, la contribution au risque de chaque facteur du milieu est traduite par un indice de risque intermédiaire. Un indice de risque global peut ensuite être construit à partir des indices intermédiaires correspondant aux différents facteurs.

Les facteurs de risque

Le risque d'incendie est d'autant plus élevé que l'on se trouve en présence de facteurs favorisant l'éclosion et la propagation d'un feu. Il s'agit alors de déterminer les facteurs qui interviennent dans le risque et d'évaluer comment, quand et où ces facteurs se combinent.

On peut distinguer les facteurs de déclenchement des incendies, qui sont généralement d'origine anthropique (voir fiche 3.1) et les facteurs du milieu naturel qui déterminent des conditions favorables à l'éclosion et à la propagation des incendies.

La contribution de ces facteurs au risque peut être estimée à partir de l'observation de phénomènes passés et de l'expérience des personnels de terrain, ou encore de données expérimentales.

FACTEURS ANTHROPIQUES : ACTIVITÉS ET INSTALLATIONS HUMAINES

Un indice de risque peut correspondre simplement à la présence d'activités (ruchers, pastoralisme par exemple) ou d'équipements tels que les routes, les voies de chemin de fer, les lignes électriques, les habitations...

ou bien prendre en compte l'éloignement par rapport à ces installations.

Ces facteurs peuvent être cartographiés par exemple à partir de l'interprétation de photographies aériennes, ou par recensement sur le terrain.

FACTEURS DU MILIEU NATUREL : CLIMAT, VÉGÉTATION ET TOPOGRAPHIE

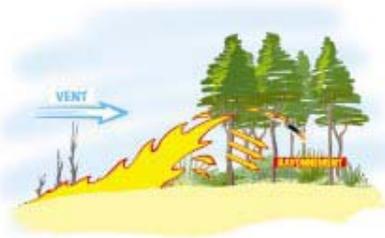
Dans le Bassin Méditerranéen, la **foudre** et les **éruptions volcaniques** sont les seuls facteurs naturels pouvant déclencher un feu.



Habitat au contact de la forêt (France)

Le vent

Le vent renouvelle l'oxygène de l'air, réduit l'angle entre les flammes et la végétation au sol et favorise le transport des particules en avant du front de flammes. La vitesse du vent influence celle de la propagation d'un feu. La direction du vent détermine la forme finale du feu par rapport au point d'éclosion.



Effet du vent sur la vitesse de propagation du feu

Le vent local au sol dépend du vent en altitude, du relief et de la rugosité de la végétation.

Il peut être modélisé et cartographié par divers moyens :

- Cartographie du vent local à partir de l'expérience des hommes de terrain et de mesures in situ.
- Interpolation des relevés de stations météorologiques.
- Simulation numérique : modélisation du vent à l'aide d'équations mathématiques et calculs sur ordinateurs.
- Simulation physique en laboratoire : mesures sur une maquette en veine hydraulique en assimilant le flux d'air à un écoulement d'eau.

La végétation

La végétation est un facteur important à double titre : par son inflammabilité et sa combustibilité.

L'**inflammabilité** des végétaux joue un rôle indirect sur la mise à feu. L'inflammabilité d'un végétal est déterminée par sa teneur en eau, en relation avec les paramètres climatiques (température de l'air, humidité, vent), ainsi que par sa composition chimique (cf. fiche 1.3) en relation avec le type d'essence.

La structure (distribution verticale et horizontale) et la composition de la végétation déterminent sa **combustibilité** (cf. fiche 1.3) et conditionnent la puissance atteinte par le feu lors de sa propagation.

La cartographie peut être réalisée à partir de :

- Relevés sur le terrain
- Interprétation de photographies aériennes ou d'images satellitaires.

Ex : indices de végétation fournis par le satellite NOAA-AVHRR. Le plus répandu est le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), indice corrélé avec la surface foliaire et la biomasse. Les zones à risque correspondent à celles où l'on observe une baisse importante du

NDVI dans le temps. Cet indice est calculé à partir des canaux Rouge (R) et Proche Infra Rouge (PIR) : $NDVI = (PIR - R) / (PIR + R)$.

Le relief

Le relief joue également un rôle à double titre :

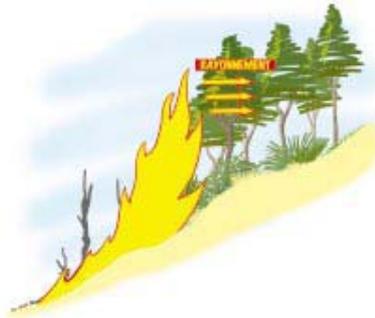
- La **pen**te modifie l'inclinaison des flammes par rapport au sol, ce qui favorise les transferts thermiques vers la végétation située en amont.

- L'**exposition** détermine des versants chauds ou frais, et donc une végétation plus ou moins combustible. Elle individualise également des zones exposées au vent.

Le relief peut être élaboré sous la forme d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Celui-ci peut être constitué à partir de :

- La numérisation des courbes de niveaux et des points côtés.
- Des couples stéréoscopiques d'images satellitaires.

Le MNT, calculé par ordinateur, fournit un maillage régulier de l'espace qui donne altitude, pente et exposition.



Effet de la pente sur la vitesse de propagation du feu

Méthodes d'évaluation spatiale du risque

Certaines méthodes distinguent le risque d'éclosion et le risque de propagation, d'autres ne considèrent qu'un seul risque qui intègre ces 2 composantes.

L'élaboration de la carte finale de risque passe en général par plusieurs étapes :

- Définition et analyse des paramètres influençant l'éclosion et la propagation d'un feu.

- Constitution d'un indice de risque traduisant la contribution d'un ou plusieurs paramètres au risque d'incendie.

- Estimation du niveau de risque : les résultats obtenus à partir des indices de risque sont classifiés en niveaux de risque. Ces seuils sont généralement définis à dire d'experts.

- Cartographie du risque : l'indice est cartographié avec une précision qui dépend de celle des données de départ.

L'évaluation du niveau de risque peut être réalisée selon deux approches :

- **A dire d'experts.** On recueille l'avis de personnes compétentes dans le domaine des feux de forêts (forestiers, pompiers, scientifiques ...).

L'expert intervient en apportant ses connaissances issues de sa pratique et du retour d'expérience de la prévention et de la lutte contre les incendies de forêts. Il évalue les impacts possibles d'un feu. Il indique les niveaux possibles de risque. Cette dernière étape repose principalement sur une analyse historique. Cette approche présente l'avantage d'être mise en œuvre rapidement et avec peu de moyens. Néanmoins, elle ne permet pas d'identifier formellement le raisonnement suivi par les experts pour apprécier en définitive les niveaux de risque.

- Recours à des **modèles mathématiques.** C'est le cas dans beaucoup d'études aujourd'hui. Le risque est réduit en un jeu d'équations ou de formules dans lesquelles ne figurent que quelques paramètres.

Si l'on souhaite réaliser des simulations, le modèle doit être associé à des bases de données géographiques et l'usage d'un SIG est indispensable. Cette méthode présente l'avantage d'être applicable à d'autres sites d'étude et d'assurer la continuité géographique.

ANALYSE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DU RISQUE D'ÉCLOSION

Différentes méthodes sont développées :

- La plus simple consiste à cartographier les points d'éclosion des feux passés sur une période déterminée.

- A partir de la connaissance des causes de mise à feu, il est possible de reporter sur une carte les éléments liés à l'activité humaine qui sont le plus souvent à l'origine des incendies. Ces éléments peuvent être pondérés en fonction de leur contribution au risque dans le passé.

ANALYSE DE LA VARIABILITÉ SPATIALE DU RISQUE DE PROPAGATION

Les modèles utilisés peuvent être classés en 2 grands types :

- Les **modèles de propagation** : ils permettent de simuler le parcours des incendies (voir fiche 4.3). Les départs de feu sont simulés soit de façon aléatoire, soit sous la forme d'une grille d'allumage régulière, soit en choisissant des zones privilégiées connues historiquement (bords de route).

- Les modèles fondés sur la **combinaison de couches de données.** Ces couches sont en général combinées par une expression algébrique. Ces modèles utilisent les fonctions classiques des SIG. Il est possible d'affecter un coefficient aux paramètres pris en compte afin de les

hiérarchiser.

Ces méthodes nécessitent pour certaines phases d'avoir recours à un expert.

LE CAS DES DONNÉES HISTORIQUES

Elles sont utilisées de plusieurs façons :

- Pour caler les modèles précédents en choisissant un feu passé comme événement de référence.

- Pour valider les résultats de l'évaluation du risque à partir d'études statistiques sur les feux passés. Noter alors qu'il ne faut pas utiliser les mêmes données historiques pour définir le risque et le valider.

- Pour caractériser la zone étudiée, si aucun modèle n'est utilisé ou si peu de données sont disponibles. Les

Italie

Un exemple de méthode appliquée à une région (Toscane – Monte Argentario)

Les facteurs de risque sont cartographiés au $1/15\ 000^{ème}$, avec une maille de 1 km sur 1 km.

Facteurs

Surfaces brûlées : à chaque pixel on attribue un indice de 1 à 5, en fonction du pourcentage de surface brûlée.

Réseau routier : 3 types de routes sont distingués (carrossables et entretenues, carrossables et non entretenues, non carrossables). Pour chaque pixel, on donne la longueur et le type de route.

Exposition (orientation des versants par rapport aux vents dominants) : 4 expositions sont déterminées à partir des courbes de niveau. On calcule la fréquence mensuelle du vent de juin à septembre dans chaque direction.

Végétation (inflammabilité / combustibilité) : une note est attribuée aux différentes formations végétales, en fonction de la végétation dominante du pixel :

- Bois feuillus = 1

- Taillis = 2

- Vignes, oliviers = 3 Reboisements conifères et maquis fermé > 2m = 4

- Prairies, steppes, garrigues, maquis ouvert < 2m = 5

Climat : interpolation des données de température et de précipitation entre 2 stations météo

Calcul de la sécheresse (diagramme ombrothermique).

Indices intermédiaires et indice final

Indice IAI (Indice Annuel d'Incendie) : c'est la somme des 5 facteurs précédents notés de 1 à 5, lui-même subdivisé en 5 classes

Fréquence F : Nombre annuel d'incendies / nombre total d'incendies sur 30 ans (divisé en 5 classes)

Indice de risque = IAI + F. Cet indice est lui-même subdivisé en 5 classes.

France

Méthode mise au point par le Cemagref

Domaine d'étude : massif des Maures (135 000 ha dans le département du Var).

Les facteurs de risque sont cartographiés au 1/50 000^{ème}, avec une maille de 250 mètres.

La méthode repose sur une analyse détaillée de chaque facteur.

L'indice d'éclosion combine les différents facteurs anthropiques (activités et installations humaines) d'une part et le facteur végétation d'autre part. Les facteurs humains sont cartographiés et on calcule une zone d'influence de 50m autour de chaque élément (cf. fonctions SIG). Une note est ensuite attribuée à l'intérieur de ces zones.

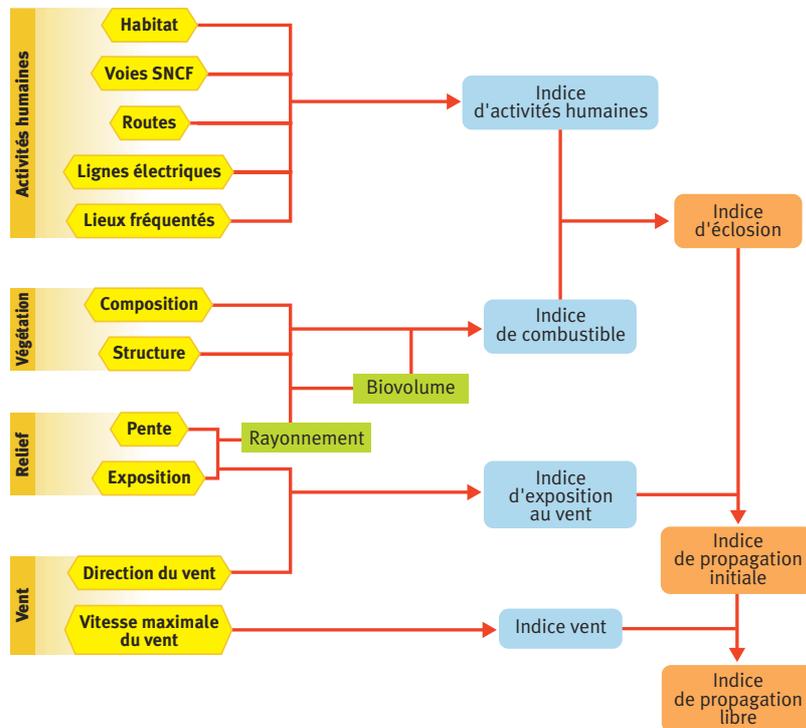
L'indice de propagation initiale est le résultat de la combinaison de l'indice d'éclosion et de l'exposition du vent au relief.

L'indice de propagation libre rajoute le facteur "vitesse du vent".

Dans chaque indice intermédiaire, les classes sont définies et une note est attribuée à chaque classe. Les indices de propagation dépendent de l'indice d'éclosion par un système de tableaux croisés.

Il existe d'autres méthodes indiciaires. C'est le cas de la méthode mise au point par l'ONF des Alpes Maritimes où 3 indices intermédiaires sont calculés (végétation, activités humaines, relief) et regroupés en un seul indice.

D'autres méthodes font appel à des modèles de simulation de la propagation des feux (Agence MTD), cf. Fiche 4.3.



observations faites sur les feux du passé permettent de caractériser qualitativement des zones qui ont connu régulièrement des grands feux. Cependant, il est nécessaire d'extrapoler les données du passé sur la structure présente et future de l'espace. Par exemple, des peuplements séparés autrefois peuvent avoir été regroupés par exten-

sion naturelle de la végétation. De même, des feux éclos en bordure de village correspondraient aujourd'hui au centre du bourg, alors que les feux aujourd'hui partiront près des maisons nouvelles au contact avec la végétation. Inversement, une zone peut être exposée à un risque élevé alors qu'aucun feu n'a été recensé.

Italie

Utilisation des données historiques pour la description synthétique d'un territoire

Le territoire est décrit par un ensemble de 7 paramètres statistiques basés sur les données historiques. Ces paramètres informent sur le danger auquel est potentiellement soumis l'espace géographique étudié.

Paramètres statistiques	Apports pour l'analyse de la zone étudiée
Nombre total d'incendies chaque année, rapporté à la superficie communale	Renseigne sur la concentration ou la dispersion des incendies
Nombre annuel des incendies dépassant une surface seuil ramenée à celle de la commune	Informe sur la concentration des événements exceptionnels
Nombre annuel d'incendies rapporté au nombre total sur une période de 10 ans	Indique si le phénomène incendie est continu ou épisodique
Superficie moyenne parcourue par feu, par commune	Décrit la grandeur du phénomène incendie, mais est fortement influencée par les valeurs extrêmes
Superficie médiane parcourue par feu, par commune	Exprime la valeur de la superficie d'un incendie au-dessous de laquelle se regroupent 50 % des événements
Superficie maximale parcourue	Représente les conditions les plus difficiles en terme de propagation et d'extinction
Moyenne des rapports entre la superficie parcourue et la durée de l'événement	Exprime les conditions de diffusion du front de flamme

Source : G. Bovio

Portugal

Les départs de feu

Au Portugal, depuis 1990, les coordonnées géographiques des départs de feu et leurs causes associées sont enregistrées, les premières étant reportées sur une carte topographique au 1/25 000ème.

A partir de ces données et de paramètres tels que la biomasse, la couverture végétale et la distance aux routes et aux installations humaines, un modèle empirique est développé sur SIG (voir plus loin le paragraphe "recours aux SIG"). Ce modèle estime spatialement les probabilités d'éclosion du feu. Il est fondé sur l'analyse des relations existant entre les départs de feu et les valeurs des variables considérées et ceci pour chaque cellule.

Maroc

en coopération avec l'Andalousie Analyse du risque d'éclosion

Données : végétation, relief, données climatiques sur les 20 dernières années, données sur les feux sur les 10 dernières années.

Les données sont reportées sur des cartes au 1/50 000ème, avec un quadrillage de 5 x 5 km. Dans chaque carré sont donnés l'incidence des incendies, les causes, l'infrastructure et le combustible.

Résultats : deux types de risque sont étudiés, le risque historique (à partir des statistiques) et le risque potentiel (calculé en fonction de la végétation, du vent, de la topographie, en utilisant des formules américaines, adaptées pour l'Andalousie).

Application : un schéma régional d'aménagement des forêts contre l'incendie est rédigé. Il évalue les besoins en équipements en fonction du risque prédit, oriente le choix de ces équipements et établit un ordre de priorité.

Le recours aux Systèmes d'Information Géographique (SIG)

Le SIG est un outil puissant qui permet non seulement de gérer des données géographiques ainsi que les données descriptives qui y sont attachées, mais aussi de réaliser leur analyse spatiale. Il permet d'identifier des relations spatiales entre cartes.

Capacités et fonctions des SIG :

- Stockage de grandes quantités d'informations.
- Rapidité des calculs.
- Mises à jour facilitées.
- Calculs de nouvelles variables : distance à la route la plus proche, distance au point d'eau ...
- Sélection, croisement de données...
- Intégration de données satellitaires.

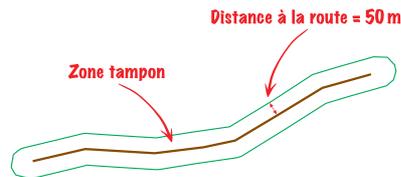
De nombreuses méthodes de cartographie du risque utilisent les SIG comme outils de stockage, de gestion et de traitement de l'information géographique.

- La démarche suivie est généralement la suivante :
- Acquisition des données spatiales et attributaires.
 - Gestion des données.
 - Manipulation et analyse des données (croisements, indices de risque).
 - Restitution cartographique des résultats issus des traitements.

Les zones d'influence ou "zones tampon"

Certains logiciels de SIG offrent la possibilité de cartographier des zones d'influence ("buffer" en anglais) de part et d'autre des linéaires tels que les routes, les voies SNCF ou les lignes électriques. Cela peut être utilisé pour définir et cartographier automatiquement des surfaces où le potentiel d'éclosion est plus élevé.

Ex : cartographie des surfaces qui bordent le réseau routier sur une profondeur de 50 m.



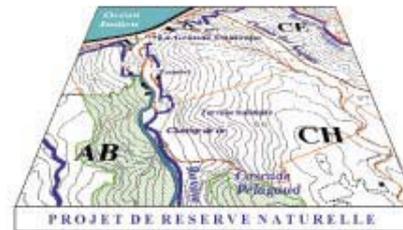
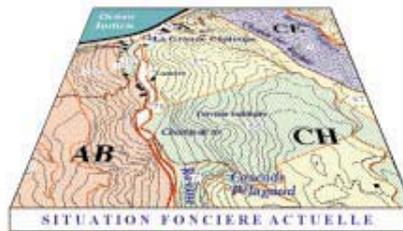
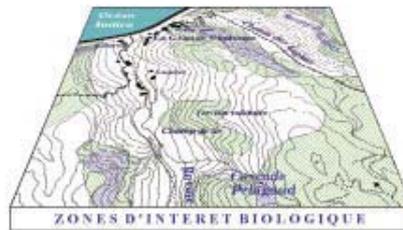
Exemple de combinaison de cartes dans un SIG

- Les données spatiales traitées dans un SIG peuvent être structurées selon 2 formats très différents :
- Format raster : la zone étudiée est représentée sous forme de cellules juxtaposées en un dallage régulier
 - Format vecteur : il décrit le monde réel à partir d'une série de points et de lignes.

La superposition des cartes est une opération qui consiste à déterminer quels éléments géographiques existent au même endroit.

Un croisement de plusieurs cartes vecteur aboutit à un nombre important de polygones de plus en plus petits.

La nature des cartes raster autorise des croisements nombreux et rapides. Elle permet, par exemple de combiner plusieurs indices de risque intermédiaires à partir d'une formule mathématique.



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

4.3 Prédiction de la propagation du feu

La simulation des feux de forêt, c'est-à-dire la prévision au cours du temps du développement du front de feu et du contour de la zone incendiée, ainsi que des caractéristiques du feu (puissance, longueur des flammes), a pour objectif d'améliorer les actions de prévision et de lutte :

- Utilisation pour certaines méthodes d'évaluation spatiale du risque.
- Implantation des équipements (pistes, coupures de combustible, points d'eau...).
- Formation des personnels.
- Mobilisation préventive.
- Aide aux responsables de la lutte, en temps réel, pour les choix stratégiques. L'évaluation de la surface à l'attaque et la prédiction de l'évolution du front de flamme sont des données importantes pour le déploiement des forces de lutte.

La prévision de la propagation du feu utilise des modèles locaux et des systèmes de prédiction. L'objectif opérationnel des modèles de feu, c'est-à-dire l'utilisation en temps réel dans un cadre tactique, n'est pas encore atteint. En effet, compte tenu de la complexité du phénomène feu de forêt, due aux interactions entre les différents facteurs du milieu naturel et entre le feu et ces facteurs, et compte tenu de la puissance actuelle des ordinateurs, les temps de calcul sont aujourd'hui beaucoup trop longs.

La simulation est un outil d'aide à la prise de décision humaine. En aucun cas elle ne peut remplacer celle-ci.

Il faut distinguer plusieurs types de modèle :

Les modèles locaux

- Les modèles locaux de propagation sont des outils qui prédisent la valeur du déplacement local, c'est-à-dire en un seul point, de la propagation d'un front de feu en direction et en distance par unité de temps.

- Les modèles locaux de comportement du feu sont des outils qui donnent, en un point donné du front de l'incendie, la direction et la vitesse de progression du feu ainsi que sa puissance en fonction de certaines conditions locales de la végétation (type, état hydrique, densité, hauteur), du relief et de l'atmosphère (température et humidité de l'air, direction et force du vent). Le modèle américain BEHAVE en est l'exemple type.

Les systèmes de prédiction du feu

Ce sont des outils de simulation qui prédisent le contour du feu en fonction du temps, connaissant la vitesse de propagation en quelques points du contour. Ces systèmes de prédiction font appel à deux sortes de méthodes :

- Des méthodes simples ne faisant pas appel à des calculs complexes. Elles donnent les positions successives du front de flammes par des ellipses ou des segments dont les dimensions dépendent du vent et de la végétation moyenne.

- Des méthodes complexes de simulation développées sur ordinateur en utilisant la puissance et la rapidité de leurs calculs. Il est possible de simuler des départs de feu et d'observer où et comment le feu se propage. Ces outils permettent de faire varier certains paramètres ou de simuler les effets de l'implantation de nouveaux équipements.

Un système de prédiction du feu nécessite pour fonctionner l'utilisation d'un modèle local de propagation ou de comportement du feu.

Tous ces outils utilisent des modèles mathématiques qui doivent, en principe, prendre en compte la végétation locale et son état hydrique, le vent local et le relief. Certains de ces paramètres sont difficiles à connaître et à décrire donc à intégrer dans les modèles de propagation ou de comportement et dans les systèmes de prédiction. En pratique, les modèles les plus simples considèrent ces données (végétation, état hydrique, vent, relief) comme constantes dans l'espace et le temps, ce qui convient pour certains sites et certaines conditions météorologiques.

Les modèles locaux

LES MODÈLES LOCAUX DE PROPAGATION DU FEU

Ces modèles, très simples, sont fondés sur les conditions météorologiques (force et direction du vent) et sur des observations sur le terrain de la vitesse et du sens de progression du feu, à l'arrivée des secours ou en cours de lutte. L'extrapolation à partir des observations accumulées permet de prédire la progression des feux de façon grossière.

LES MODÈLES LOCAUX DE COMPORTEMENT DU FEU

Les premiers modèles de comportement ont été développés en Amérique du Nord. Ils mettent en œuvre

des fonctions complexes donnant l'énergie de la combustion et la progression du feu en fonction de différents paramètres. Ils simplifient le phénomène feu de forêt quant aux conditions atmosphériques et à la répartition de la végétation.

Les trois familles de modèles

Trois démarches de modélisation peuvent être distinguées : la démarche purement empirique (ou statistique), la démarche purement physique (ou déterministe) et une démarche intermédiaire (ou semi-empirique).

Les modèles statistiques

Ils s'appuient sur l'observation de feux expérimentaux ou réels. Leur principe est de construire, par régression, des relations mathématiques entre les variables explicatives prises en compte (végétation, vent...) et les résultats observés considérés (énergie et progression du feu). Ces modèles ne permettent pas de prédire les caractéristiques d'un événement réel, mais la valeur moyenne des caractéristiques de tous les évé-

nements possibles qui pourraient être obtenus ou observés pour les mêmes valeurs des variables. Ces modèles sont souvent utilisés pour prédire les risques journaliers d'incendie (cas de la France). Seuls les Canadiens les utilisent pour prédire la propagation des feux avec le programme "Canadian Forest Fires Danger Rating System" (CFFDRS).

Les modèles déterministes

Ils reposent sur des hypothèses concernant les phénomènes physiques et chimiques qui déterminent le comportement du feu et les traduisent par des équations mathématiques. La démarche est à l'opposé de la précédente. Cette approche n'a été que très peu utilisée pour les feux de forêt, en raison de la complexité des calculs qu'elle nécessite, et parce que les modèles ainsi élaborés seraient difficilement intégrables à des systèmes opérationnels. En revanche, cette démarche menée à terme permettrait une analyse précise et quantitative des processus mis en œuvre lors d'un feu de végétation.

Il existe un modèle basé sur le transfert de chaleur par radiation, qui considère que le rayonnement thermique est le mode dominant de transfert de chaleur. Le

Le modèle américain ROTHERMEL

Le modèle de Rothermel est un modèle semi-empirique dont la formulation originale date de 1972. Il est le fondement de nombreux systèmes de prédiction actuels (FARSITE, CARDIN...).

Ce modèle s'appuie sur la traduction énergétique du mécanisme de propagation vu comme une succession d'éclosions.

Hypothèse

Les hypothèses restreignant le champ d'application du modèle sont les suivantes :

- Le feu est décrit au niveau du front, supposé linéaire et infini.
- Le combustible est uniforme, une seule couche de combustible constituée d'un type ou d'un mélange homogène de types de particules est considérée.
- Un régime de propagation stationnaire est atteint, ce qui implique des conditions stationnaires (pente, vent).
- Le transport de particules solides n'est pas envisagé.

Un certain nombre d'hypothèses relatives aux mécanismes d'action (transfert de chaleur, effet de l'eau et des minéraux, effets du vent et de la pente...) sont également posées.

La prédiction du comportement du feu en présence de pente et de vent est déduite de la vitesse de propagation du feu sans vent ni pente, qui ne dépend que des caractéristiques du combustible. Les effets de la pente ou ceux du vent viennent s'ajouter à ceux du combustible.

Informations d'entrée

Ce sont les valeurs prises par les paramètres décrivant le combustible et les conditions de propagation :

- Caractéristiques physiques et chimiques des particules de combustible.

- Teneur en eau du combustible.
 - Caractéristiques du lit de combustible (épaisseur, charge sèche...).
 - Pente du terrain.
 - Vitesse et direction du vent.
- Les prédictions fournies par ce modèle n'utilisent pas d'information d'entrée relative au phénomène en lui-même.*

Paramètres intermédiaires

Des paramètres intermédiaires nécessaires à la modélisation, qui n'apparaissent ni à l'entrée ni à la sortie du modèle, sont entièrement déterminés à l'aide d'expériences en laboratoire, sur banc d'essais. Ces expériences ont d'abord été menées sur litière puis étendues à d'autres strates basses (tapis herbacé, rémanents). Le modèle de Rothermel prédit donc uniquement le comportement d'un feu brûlant des strates contiguës au sol.

Informations de sortie

Le modèle prédit la vitesse de propagation, le temps de résidence du feu, la profondeur de la zone en combustion vive et le dégagement énergétique.

Évolution

Ce modèle a ensuite été adapté par différents auteurs à d'autres conditions :

- Modèle BROWN (1982) : extension aux strates arbustives
- Modèle FRANSEN et ANDREWS (1979) : extension à un combustible non uniforme
- Modèle d'ALBINI (1982) : extension à des conditions non stationnaires.

Le modèle de Rothermel a été informatisé : le logiciel BEHAVE ainsi créé permet d'introduire les informations d'entrée et d'obtenir directement les informations de sortie.

modèle nécessite de connaître la température de la flamme et son inclinaison.

Les modèles intermédiaires

La démarche, située entre les deux précédentes, repose à la fois sur des observations de feux expérimentaux ou réels, ou sur des expérimentations en laboratoire, et sur la prise en compte partielle de la représentation physique et chimique du comportement du feu. Il existe donc toute une gamme de modèles intermédiaires dont le contenu expérimental et le contenu théorique sont plus ou moins importants. Ces modèles permettent de prédire certains aspects du phénomène et sont assez simples pour être introduits dans des systèmes de prédiction. Ils ne prennent que partiellement en compte les effets du relief sur la progression du feu. Le modèle de Rothermel est un exemple de modèle semi-empirique.

Modélisation des sautes de feu

Les sautes de feu sont des projections de particules végétales incandescentes ou enflammées susceptibles d'allumer de nouveaux foyers en avant du front de flamme.

Il existe un modèle prédisant la distance maximale parcourue par une particule enflammée qui repose sur des estimations de profil du vent et de la durée de combustion des brandons. Le modèle permet alors, connaissant la hauteur des flammes, de déterminer la trajectoire d'une particule qui s'éteint juste au contact du combustible non brûlé, c'est-à-dire la longueur maximale de la saute.

Les données expérimentales

L'élaboration des modèles nécessite de procéder à des observations de feux qui peuvent être réalisées dans différentes conditions.

Incendies de végétation

Ils constituent une partie des données entrant dans l'élaboration des modèles statistiques, et seulement des données de validation dans les autres approches.

Lorsqu'ils parcourent des grandes surfaces peu accidentées couvertes par une végétation uniforme, et que le vent est assez constant, ils permettent une description fiable de l'avancement du front de feu et des conditions qui y ont présidé. C'est le cas des grands incendies du centre et de l'est du Canada.

En revanche, dans le cas des incendies affectant la plupart des régions du Bassin méditerranéen, les observations tirées des incendies sont beaucoup plus ponctuelles dans l'espace et dans le temps, et s'accompagnent d'une grande incertitude sur les conditions météorologiques et les caractéristiques locales du combustible et de la topographie.

Les feux expérimentaux sur le terrain

Ils permettent de choisir et de connaître certaines conditions présidant au feu : topographie, type de combustible, conditions météorologiques. Le feu sera assez

bien décrit si on travaille sur des surfaces limitées (inférieures à 1 ha) et de géométrie favorisant les observations.

Les brûlages dirigés, destinés à entretenir l'espace naturel peuvent également donner lieu à des observations.

Les feux expérimentaux en laboratoire

Ces feux sont conduits sur des bancs d'essai dont la surface ne dépasse pas quelques mètres carrés. Les caractéristiques du combustible peuvent être choisies et décrites avec précision. Des dispositifs particuliers permettent de faire varier la pente ou de créer un vent artificiel. Différents types de capteurs (caméra vidéo, thermo couple...) sont utilisés pour mesurer les caractéristiques du comportement du feu.

France

Expérimentation en laboratoire : le banc d'essai de l'INRA

Les différents modèles utilisent des données expérimentales soit en entrée du modèle soit pour le valider.

Principe : les feux sont reproduits à échelle réduite de manière à maîtriser leur propagation et à faciliter l'observation de la combustion. Des vérins permettent de faire varier la pente.

Matériel : on dispose un lit de combustible de façon régulière sur un support de combustion plan. Le combustible est disposé en rectangle. Le feu est allumé sur une des largeurs du rectangle. Cette largeur est au maximum de 3 mètres. La longueur du rectangle est variable.

Mesures : on mesure le plus souvent la vitesse de propagation et la géométrie de la flamme.



Banc d'essai de l'INRA Avignon (France)

Les systèmes de prédiction des feux

Pour prévoir le comportement d'un feu au cours du temps, il faut disposer au minimum :

- Des variables d'entrée : cartes de végétation, du relief, du vent.

- D'un modèle local de propagation du feu ou de comportement du feu.

On fait partir le feu d'un point donné et on visualise la façon dont le feu se propage.

En fonction de la complexité des variables d'entrée et de celle du modèle local, on distingue des systèmes simples et des systèmes complexes.

LES SYSTÈMES SIMPLES : ELLIPSE, OVALE OU "CÔNE DU VAR"

La simulation du feu peut être réalisée de façon très simplifiée, en utilisant :

- Une végétation moyenne sur la zone étudiée, une direction et une vitesse du vent uniformes et constantes.
- Un report des positions successives du feu à la main sur une carte, ces positions successives étant représentées par une série de contours de même forme géométrique mais de longueurs différentes.

Ces modèles simples supposent un combustible homogène, un terrain peu accidenté et des conditions de vent uniformes et stationnaires, c'est-à-dire qui ne varient pas au cours du temps.

Les formes géométriques utilisées représentent l'enveloppe moyenne issue de l'observation de nombreux feux sur le terrain. Divers modèles de formes géométriques simples sont présentés ci-dessous. Leurs paramètres dépendent a priori des conditions locales, et doivent donc être déterminés localement.

Le modèle de l'ellipse

C'est le modèle le plus simple.

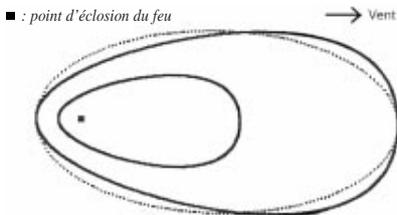
Il utilise des vitesses de propagation différentes pour la tête, pour les flancs et pour l'arrière de l'incendie.

Les caractéristiques de l'ellipse sont :

- Le point d'éclosion est situé sur l'un des 2 foyers.
- Le grand axe est orienté parallèlement à la direction du vent.

Avec :

- a : grand axe
- b : petit axe
- v : vitesse de propagation à la tête du feu
- w : vitesse de propagation à l'arrière du feu
- u : vitesse de propagation sur les flancs



Modèle de l'ovale, comparaison avec ellipse en pointillés
Source : R. Chevrou

- S : superficie du feu
- t : temps écoulé depuis l'éclosion

On obtient :

- $a = (v + w)t$
- $b = (2ut)$
- $S = \pi/2(v+w)ut^2$

On peut alors dessiner les enveloppes successives du feu qui sont des ellipses ayant un de leurs 2 foyers sur le point d'éclosion.

Le modèle de l'ovale

L'ovale est obtenu par une déformation de l'ellipse de même aplatissement.

Les caractéristiques de l'ovale sont les suivantes :

- Le point d'éclosion est situé sur le foyer de l'ovale, qui est l'un des 2 foyers de l'ellipse de même grand axe et de même aplatissement.
- Le grand axe est orienté parallèlement à la direction du vent.

Avec :

- a : grand axe de l'ovale
- b : largeur maximale de l'ovale
- b/a : aplatissement de l'ovale
- t : temps écoulé depuis l'éclosion

On a :

- $a = c_1 t$
- $b = c_2 t$

c_1 est un coefficient qui dépend de la force du vent, de la nature et de l'état hydrique de la végétation, de la température et de l'humidité de l'air et du relief.

Le rapport $b/a = c_2 / c_1$ dépend de la force du vent. Il varie entre 0,5 par vent violent et 1 par vent nul. On a alors un cercle.

On peut dessiner les enveloppes successives du feu, qui sont des ovales ayant tous leur foyer situé sur le point d'éclosion.

Le modèle "cône du Var"

Il a été imaginé par les pompiers français du Var. Il a été utilisé pour la formation des pompiers et pour la stratégie.

Le "cône du Var" représente l'enveloppe latérale moyenne d'un feu de forêt telle qu'elle ressort de l'observation de nombreux feux sur le terrain.

Le périmètre est représenté :

- Au vent du point d'éclosion, par un demi-cercle de 250 m de rayon centré sur le point d'éclosion, qui représente le développement maximal du feu vers l'arrière.

- Sous le vent du point d'éclosion, par deux droites formant entre elles un angle de 42 degrés, dont la bissectrice est parallèle à la direction du vent.

Ce modèle ne représente pas la progression du front entre les deux droites. Il peut être complété par un front formé par exemple d'un ensemble de segments de droite, et dont la forme et la vitesse de progression restent constantes tout au long du déroulement de l'incendie.

LES SYSTÈMES COMPLEXES

La simulation peut être effectuée de façon beaucoup plus élaborée si :

- Les cartes de la végétation, du relief et du vent sont détaillées.
- Le modèle local de comportement utilisé est complexe et nécessite l'utilisation de l'informatique.
- La visualisation de la progression du feu est faite sur un écran d'ordinateur.

Les variables d'entrée doivent alors être organisées en une base de données bien structurée pour permettre des simulations rapides et de qualité.

Une interface conviviale et possédant de nombreuses fonctionnalités permet à l'utilisateur d'effectuer les simulations dans de bonnes conditions.

Ces systèmes de prédiction complexes sont appelés logiciels de simulation.

La qualité et la rapidité des simulations dépendent du modèle utilisé, de la structure de la base de données et de la puissance de l'ordinateur.

Les variables d'entrée

Quelques modalités d'utilisation des variables d'entrées pour les modèles de comportement et les systèmes de prédiction sont présentées ci-dessous.

Le relief

Le relief peut être cartographié sous la forme d'un modèle numérique de terrain, en format vecteur ou en format raster.

La végétation

La prévision du comportement d'un feu par simulation nécessite de connaître le combustible de façon détaillée. Les caractéristiques de celui-ci ne pouvant pas être appréhendées avec précision en chaque point de la zone étudiée, il est nécessaire d'utiliser une **typologie de combustible**.

De nombreux simulateurs utilisent en paramètre d'entrée des modèles de combustibles nord-américains, au nombre de 13, auxquels sont associés des comportements au feu différents (vitesse et longueur de flamme). D'après Albin, certaines formations herbeuses sont parcourues par le feu à la vitesse de 20 km/h. En France, la vitesse moyenne de propagation des grands feux est de l'ordre du km/h.

Ces modèles de combustible sont adaptés à la végétation du pays.

Ex : en Espagne, la DGCCN a adapté les 13 modèles de combustibles nord-américains à la forêt méditerranéenne. Une clé photographique permet de déterminer le modèle de combustible présent sur la zone à étudier.

Ex : en Italie, la végétation autochtone a été comparée aux types de combustible de BEHAVE dont on a retenu : le n°2 qui est assez répandu en bioclimat méditerranéen, et le n°9 présent dans les Apennins et les Alpes. Ces modèles permettent d'individualiser des couvertures végétales où l'attaque directe du feu est possible, en fonc-

États-Unis

Le simulateur de feu FARSITE (Fire Area Simulator)

FARSITE utilise le modèle de Roethermel. Son fonctionnement nécessite l'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG).

Données nécessaires

Données spatiales obligatoires :

- Altitude.
- Pente.
- Exposition.
- Types de combustibles (modèles de combustibles standards 1 à 13 ou plusieurs modèles personnalisés).
- Couvert forestier (en % ou selon 4 catégories).

Données météorologiques :

- Température et humidité (maxima et minima journaliers), pour le calcul de l'humidité des combustibles pendant la simulation.

- Vent (vitesse et direction par périodes horaires).

La simulation du passage du feu en cime nécessite :

- La hauteur de la base verte du houppier.
- La hauteur totale des arbres.
- La densité du houppier (masse/volume).

Principes de fonctionnement

Dans des conditions uniformes et homogènes, et sous l'influence d'un vent constant, un feu se propage, en théorie, comme une ellipse s'accroissant en chaque point avec une vitesse constante à partir du point d'ignition. En pratique, le logiciel ne prend en compte que l'axe principal de l'ellipse.

Entre un instant t et un instant $t + \delta t$, l'infinité de points qui forment l'ellipse se comporte comme autant de points d'ignition et sont à l'origine d'une infinité de petites ellipses dont l'enveloppe extérieure forme une ellipse à $t + \delta t$.

Lorsque ces conditions ne sont plus homogènes, ou lorsque le vent n'est pas constant, on considère que les conditions locales sont localement uniformes.

L'enveloppe de l'incendie, irrégulière, est alors donnée en théorie par celle d'une infinité d'ellipses qui correspondent chacune à la propagation du feu selon les conditions locales, mais en pratique seulement par les extrémités des axes principaux de ces ellipses.

FARSITE calcule la position de ces points et les connecte pour former le nouveau front de l'incendie.

Les résultats

Les résultats des simulations sont présentés, au choix de l'opérateur, sous les formes suivantes :

- Cartes du développement du feu, en 2 ou 3 dimensions.
- Tableaux ou graphiques de la surface du feu en fonction du temps.
- Fichiers SIG des caractéristiques du feu (direction et vitesse de propagation, puissance...).

La version 3.0.9 de FARSITE est disponible sur le site Internet : <http://www.montana.com/sem>

Un autre simulateur, IGNITE (Australie) est disponible sur le site Internet : <http://www.csu.edu.au/firenet/ignite.html>

tion des paramètres suivants : intensité linéaire du front de flamme, longueur et hauteur de la flamme, vitesse de propagation du feu, profondeur du front de flamme.

L'état hydrique de la végétation peut être modélisé en tenant compte de la réserve en eau initiale dans le sol et de la pluviométrie cumulée.

Le vent

La cartographie du vent peut être obtenue par simulation numérique, en tenant compte du vent synoptique, du relief et de la rugosité de la végétation. A défaut, des cartes peuvent être construites à l'aide de mesures sur le terrain.

Exemples d'utilisation des modèles locaux et des systèmes de prédiction

ANALYSE DE PROTECTION DES BIENS

Le modèle feu (qui peut être simplement BEHAVE), indiquera la puissance du feu à proximité du bien à protéger, et la largeur de la zone débroussaillée que ne franchiront pas les radiations thermiques. Il est possible de cartographier ce résultat sur l'ensemble du territoire.

ANALYSE DES SURFACES BRÛLÉES À L'ATTAQUE INITIALE

Le modèle, qui peut être très simple, indiquera la surface brûlée à l'arrivée des premiers secours, le temps d'accès pouvant être calculé à l'aide d'un SIG. Ce résultat peut être cartographié sur l'ensemble du territoire pour en déduire les emplacements et les types d'infrastructures à implanter (pistes d'accès, pare-feu, système automatique d'arrosage, poste de surveillance, etc.).

IMPLANTATION D'ÉQUIPEMENTS

Les systèmes de prédiction peuvent aider dans le choix de l'implantation d'équipements. La démarche de simulation peut être la suivante :

- Entrée des paramètres concernant le territoire que l'on veut étudier.
- Choix de conditions météorologiques favorables au feu parmi les valeurs extrêmes observées dans le passé pour déterminer un risque décennal, trentennal, centennal.
- Choix d'un point d'éclosion.
- Visualisation de la propagation du feu et informations sur ses caractéristiques.
- Répétition de la simulation pour tous les cas possibles d'éclosion.

Espagne

Le simulateur de feu CARDIN

CARDIN est un système de prédiction qui simule le comportement du feu sur une image numérique en format raster. Ce logiciel est un prototype fondé sur le modèle de Rothemel.

Le comportement du feu est analysé pixel par pixel : un pixel étant incendié, le modèle calcule la vitesse de propagation dans 8 directions.

Variables d'entrée

- Modèles de combustible. A chaque pixel est attribué un des 13 types de végétation nord-américains adaptés à la végétation en Espagne.

- Humidité du combustible divisé en 5 catégories :

- * Mort, très fin.
- * Mort, moyen.
- * Mort, gros.
- * Herbacés vivants.
- * Ligneux.

- Rugosité : effet de ralentissement du vent mesuré à 6 m de hauteur, et donné en 4 classes.

- Topographie (pente et orientation).

- Vitesse et direction du vent : mesurées à 6 m au-dessus du sol, le vent étant supposé constant sur la zone étudiée.

CARDIN permet la numérisation de la topographie et du combustible au moyen d'un système indépendant DIGICAR.

Résultats du modèle

Il donne le profil et le périmètre du feu.

Il est possible de changer certaines données pendant la simulation.

Inconvénient : une seule vitesse de vent est considérée.

- Simulation de l'implantation de pistes ou de coupures de combustible afin d'étudier leur impact sur le feu et sur la lutte (temps d'accès au front, conditions de lutte et de sécurité...).

Ces simulations permettent alors de déterminer la nature et la situation des équipements les plus efficaces et les moins onéreux.

Le plus souvent, on effectue des simulations de façon systématique sur l'ensemble du territoire étudié, avec un point d'éclosion tous les 50 à 500 mètres dans 2 directions perpendiculaires. On étend au carré (de surface 0,25 à 25 ha) contenant le point d'éclosion les résultats donnés par la simulation. On obtient ainsi une carte, plus ou moins grossière selon la taille du carré, de ces résultats qui représenteront certains types de risque, par exemple la valeur des dégâts occasionnés par le feu partant d'un carré (risque induit par ce feu), ou encore le degré d'exposition des biens contenus dans un carré (risque subi par ces biens).

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