

# Sautes de feu : analyse des mécanismes et modélisation

## *Modèle probabiliste développé dans le cadre du programme SALTUS*

par Daniel ALEXANDRIAN

***Les sautes de feu sont un phénomène fréquent, et dont la prise en compte dans les actions de prévention des feux et de lutte contre les incendies est importante. Le programme européen Saltus, qui regroupe cinq pays du bassin méditerranéen, a pour objectifs d'acquérir des connaissances aussi exhaustives que possibles sur ce phénomène et sur ses mécanismes, et de développer ainsi des modèles de prévision des sautes de feu. C'est ce que nous décrit cet article.***

### Introduction

Les sautes de feu sont des projections de particules enflammées (brandons), emportées par la colonne de convection et projetées en avant du front de feu, où elles sont à l'origine de foyers secondaires (phénomène d'essaimage).

Le programme SALTUS, financé par la Communauté européenne (ENV98-CT98-0701), a réuni du 1<sup>er</sup> avril 1998 au 31 mars 2001, sous la coordination du Cemagref, dix équipes qui ont conjugué leurs efforts pour améliorer les connaissances dans ce domaine, au départ très lacunaires.

En compléments d'approches théoriques et expérimentales, une approche probabiliste a permis de **construire un modèle probabiliste de prévision des sautes de feu à partir d'un échantillon de cas réels** judicieusement réparti dans les cinq pays de l'Europe du sud impliqués dans le projet.

Par modèle probabiliste, il faut entendre modèle qualitatif, non déterministe, bâti sur le retour d'expérience, discriminant un ensemble de situations types. Le but est de dégager les conditions favorables aux sautes de feu en collectant systématiquement des données sur un grand nombre de feux passés.

## Méthodologie

### Sélection de l'échantillon de feux

#### Photos 1 et 2 :

Les sautes de feu peuvent atteindre des distances considérables.

Ci-dessous, dans le Massif des Calanques près de Marseille, les sautes ont traversé des bras de mer.

Photos D.A.

Pour être en mesure de fournir des résultats à la fois au niveau national et au niveau européen, il était prévu de stratifier l'échantillon étudié de la manière suivante :

- limitation aux 4 mois d'été - juin, juillet, août et septembre - suivant le démarrage du contrat. Bien que la majorité des feux de certaines régions du nord de l'Italie, de la Grèce et de l'Espagne ait lieu en hiver, c'est en été que se produisent les feux les plus graves et

les plus difficiles à maîtriser, ainsi que les projections à longue distance désorganisant les dispositifs de lutte ;

- pas de limite géographique. A l'intérieur de chaque État du sud de l'Union, il existe des zones à haut risque, particulièrement exposées aux incendies, à cause de conditions naturelles ou d'un environnement socio-économique défavorables. Pour bien mesurer le rôle joué par les conditions naturelles (végétation, climat,...), il était intéressant de mener l'enquête sur l'ensemble des pays concernés, sans se limiter à des régions pilotes ;

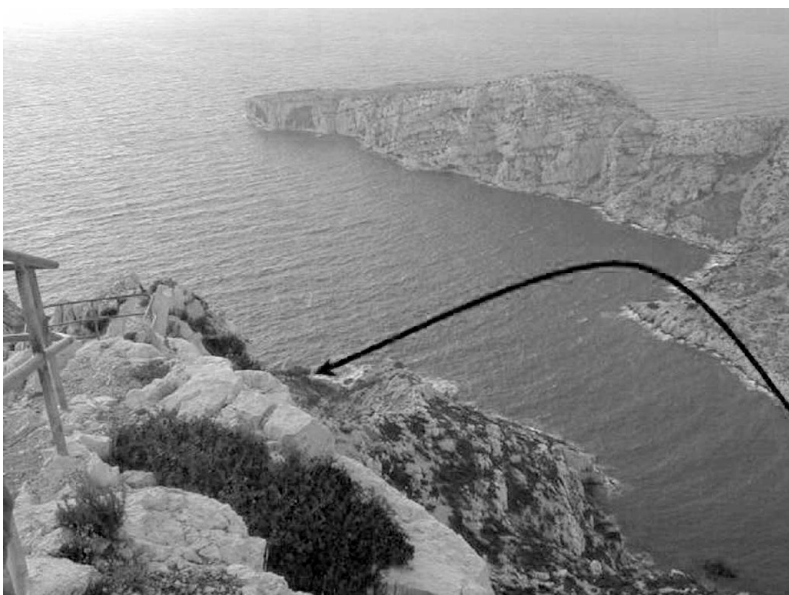
- stratification par surface brûlée. Les sautes de feu se produisent beaucoup plus fréquemment lors des incendies de masse. Mais l'expérience montre que les premières sautes dangereuses pour les moyens de lutte peuvent apparaître lorsque la surface brûlée n'est encore que de quelques hectares ou quelques dizaines d'hectares. Quatre classes de surface étaient prévues (de 1 à 10 ha, de 10 à 100 ha, de 100 à 1000 ha, plus de 1000 ha), les feux étudiés devant être répartis dans ces quatre classes dans les proportions suivantes : 10 %, 20 %, 30 %, 40 %.

Des difficultés ont été rencontrées pour mener à bien la sélection de l'échantillon telle qu'elle était prévue. Les principales raisons sont les suivantes :

- la disponibilité tardive des bases de données (Espagne, Portugal),
- la disponibilité des rapports des services forestiers seulement pour les feux étudiés par les brigades d'investigation forestière (Portugal),
- le transfert en 1998 de la responsabilité de la lutte du service forestier vers le service d'incendie (Grèce),
- l'absence de grands feux en nombre suffisant (France, Grèce).

Des modifications du protocole d'échantillonnage ont été décidées pour s'adapter à la difficulté rencontrée dans chaque pays d'avoir approximativement le même nombre de feux dans chaque classe de surface :

- identifier les plus grands feux significatifs qui se sont déroulés au cours de la période allant de juin à septembre 1998 (feux supérieurs à 10 ha),
- établir la liste des journées pendant lesquelles ont eu lieu ces feux,
- établir la liste de **tous** les feux qui ont eu lieu pendant ces journées,
- extraire un échantillon de 40 feux de cette liste, en les répartissant le mieux possible dans les quatre classes de surface, en



essayant d'abord de remplir « au maximum » (10 feux) la classe supérieure (plus de 1000 ha), puis la classe suivante (100 à 1000 ha),...

- compléter l'échantillon par un groupe de cinq feux, avec sautes, de moins de 1 ha et par un autre groupe de cinq feux, très bien documentés, choisis librement, y compris au cours d'années antérieures,

- abaisser le nombre de feux à étudier dans chaque pays (minimum 35),

- pour compenser cette diminution, augmentation du nombre de situations intermédiaires à étudier (minimum 70). Ces situations intermédiaires sont à choisir en vue de permettre des comparaisons intéressantes (avec/sans saute, jour/nuit, etc.). Elles sont à choisir sur des feux bien renseignés et doivent présenter un bon niveau de certitude : par exemple, une situation intermédiaire sans saute n'est à faire que si l'on est certain qu'il n'y a pas eu de saute.

Le choix des feux à étudier a été réalisé de façon autonome par chaque équipe :

- en Grèce, il a été décidé de pallier l'absence de grands feux en Crète par l'étude des nombreux feux sur le Péloponèse,

- en France, il a été décidé de couvrir toute la région sud-est y compris la Corse,

- en Italie, à cause de problèmes d'accessibilité, il a été décidé d'étudier des feux s'étant produits dans des zones proches,

- en Espagne, la sélection des feux a été conduite séparément en Galice et dans le reste du pays,

- au Portugal, il a été décidé d'incorporer à l'échantillon certains feux du WP240 et certains brûlages dirigés.

## **Collecte des données**

Sur chaque feu étudié, la collecte des données a été réalisée en plusieurs étapes successives :

- recherche et collecte d'informations écrites (fiches, rapports, bases de données, cartes,...),

- recherche des personnes présentes au moment du feu, notamment sapeurs-pompiers,

- déplacement sur le terrain avec ces personnes et reconstitution des faits,

- collecte des données complémentaires et rédaction d'une monographie.

Pour chaque feu, lorsque les conditions changeaient (végétation, relief, vent,...), une situation intermédiaire a été décrite sur une fiche séparée même en l'absence de sautes.

Une cartographie descriptive a été réalisée (sur le fond de carte topographique le plus précis possible) en faisant apparaître les indications suivantes : types de végétation, direction du vent dominant, point de départ du feu, contour du feu au moment de l'apparition des premières sautes (s'il y a lieu), contour du feu final.

L'ensemble de ces informations a été saisi dans une base de données numérique (ACCESS), les documents annexes (cartes, photos,...) étant numérisés (format JPEG).

Chaque pays a rencontré ses propres difficultés pour reconstituer les feux. Parmi les problèmes souvent signalés, on citera :

- la faible disponibilité des pompiers ayant participé à la lutte (Portugal, Grèce),

- les rapports de feux souvent peu documentés (Grèce),

- la disparition des traces de l'incendie liée à la repousse de la végétation, à la coupe des arbres, en raison de la disponibilité tardive des statistiques d'incendies (Espagne).

L'obtention des données météorologiques a également posé des problèmes liés aux conditions d'accès (données payantes en France, données gérées par d'autres services en Italie), au faible maillage de stations d'enregistrement (Grèce), à l'absence d'enregistrement au moment des feux (Portugal).

Le remplissage de la fiche a aussi posé des problèmes comme la définition des contours intermédiaires du feu, la définition du point d'émission de la saute, la biomasse combustible avant le feu, le nombre d'arbres simultanément en feu,...

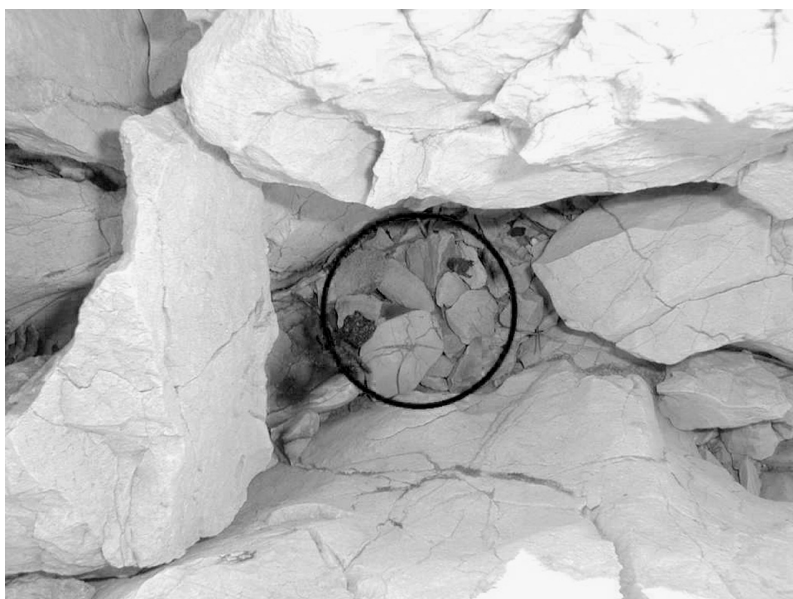
## **Traitement des données**

Le test du Khi-2 a été utilisé pour mettre en évidence les paramètres corrélés avec la probabilité de saute et comparer les pourcentages observés à ceux d'une situation théorique où ces pourcentages seraient égaux entre eux (et donc égaux au pourcentage moyen de l'échantillon).

Le test a été systématiquement fait à la fois sur l'ensemble de l'échantillon et sur un sous échantillon constitué des situations les plus fiables, sélectionnées sur les coefficients de qualité des données collectées (représentativité de la station météorologique ou degré de certitude des données).

Puis, pour mesurer les interactions entre variables, a priori nombreuses, le recours aux techniques d'analyses multidimensionnelles a été nécessaire.





**Photo 3 :**  
Dans  
le Massif des Calanques  
près de Marseille, un  
brandon a été retrouvé  
très loin de sa source  
*Photo D.A.*

Parmi les méthodes envisagées, la technique de la Segmentation s'est avérée adaptée pour construire un modèle prédictif à la fois sur la probabilité et sur la distance d'essaimage. En outre, d'autres facteurs plus pratiques sont venus renforcer ce choix :

- la nécessité de tenir compte en permanence de la qualité des données collectées au travers des trois coefficients retenus : représentativité de la station météorologique de référence, degré de certitude des données relatives à la zone émettrice et degré de certitude des données relatives à la zone réceptrice,

- la nécessité de distinguer les peuplements arborés des peuplements non arborés. Les premières analyses réalisées ont montré que le comportement des forêts, quelle que soit l'espèce, était relativement différent de celui des landes, maquis et garrigues. L'arbre représente une source supplémentaire de particules, dont la nature et le comportement peuvent être différents des simples arbustes (notamment pour ce qui concerne les écorces),

- le fait que le type de végétation soit l'un des paramètres les plus fiables dans les enquêtes, ainsi que l'un des plus faciles à cartographier dans l'application d'un modèle à une forêt particulière.

De ce fait, la méthode de travail retenue peut être qualifiée de « série de sous-traitements assistés par ordinateur » sur des parties de l'échantillon au départ volontairement discriminés sur le type de végétation. Dans chaque type, on a ensuite recherché quels étaient les paramètres permettant :

- soit de discriminer le mieux d'éventuels « sous-types » vis-à-vis de la probabilité d'essaimage,
- soit d'obtenir le meilleur « sous-modèle » vis-à-vis de la distance d'essaimage.

## Résultats

### Importance du phénomène

Des 201 feux étudiés (301 situations intermédiaires), on retiendra que :

- **l'essaimage représente un phénomène très commun** : 56% du nombre de feux et 64% du nombre de situations intermédiaires ont connu au moins une saute d'au moins 10 m,

- **les distances d'essaimage peuvent être très longues** : jusqu'à 2400 m (en moyenne 228 m), avec des sautes longues (plus de 100 m) sur 32% des feux et des sautes très longues (plus de 500 m) sur 8% des feux,

- **les sautes très longues sont absentes des îles** (Sardaigne, Corse, Crète) **et des régions soumises à l'influence océanique** (Portugal, Galice), les sautes longues sont moins nombreuses en Crète dans les végétations basses et de très faible biomasse (phryganas),

- **les sautes observées hors saison estivale peuvent être exceptionnellement très longues** (France, Espagne),

- **les sautes sont plus fréquentes au cours de la journée**, mais peuvent se produire à n'importe quelle heure du jour et de la nuit (les sautes les plus longues, supérieures à 1 km, se produisent généralement l'après-midi),

- **les sautes longues sont plus fréquentes lorsque la surface brûlée est supérieure à 10 ha**, mais des sautes exceptionnellement longues ont été observées pour des feux de très faible taille (1 ha, 5 ha, 6 ha,...) en Espagne, en France et en Italie,

### Bilan de l'analyse des paramètres

De l'analyse élémentaire des paramètres, on retiendra que :

- \* **pour ce qui concerne la probabilité d'apparition des sautes :**

- **parmi les paramètres du feu**, il existe un effet aggravant significatif de la longueur

des flammes, de la vitesse de propagation et de l'intensité du feu ; les situations les plus propices aux sautes sont les flammes de plus de 6 m, les vitesses de propagation de plus de 0,07 m/s et les intensités de plus de 10 000 kW,

- **parmi les conditions météorologiques**, il existe un effet aggravant significatif de la vitesse moyenne du vent, de la vitesse maximale du vent et de la température de l'air sur la probabilité d'apparition des sautes ; les situations les plus propices aux sautes (supérieures à 10 m ou supérieures à 100 m) sont les vents moyens supérieurs à 2 m/s, les vents maximaux supérieurs à 10 m/s et les températures de l'air supérieures à 14,5°C,

- **parmi les paramètres topographiques**, il existe un effet aggravant significatif de la position topographique et de la pente de la zone émettrice, ainsi que de la dénivellée entre la zone émettrice et la zone réceptrice (le relief de la zone réceptrice est difficile à interpréter car l'information n'est disponible qu'en cas de saute) ; les situations les plus propices aux sautes (supérieures à 100 m) sont les sommets, les pentes de plus de 40% et les dénivelés de plus ou moins 20 m,

- **parmi les caractéristiques du combustible**, il existe un effet aggravant significatif de la hauteur, du couvert et du diamètre des arbres de la zone émettrice, ainsi que de la biomasse combustible ; les situations les plus propices aux sautes sont les forêts où les arbres font plus de 6 m de haut, occupent plus de 40 % du couvert, font plus de 40 cm de diamètre et où la biomasse combustible est supérieure à 50 t/ha,

- **parmi les types de végétation**, il existe un effet significatif du type de végétation de la zone émettrice et de la zone réceptrice ; les situations les plus propices aux sautes sont les forêts de résineux au point d'émission et les végétations non arborées au point de réception,

**\* pour ce qui concerne la distance maximale d'essaimage :**

- **parmi les paramètres du feu**, on n'observe pas d'effet, sauf pour les faibles intensités (moins de 1000kW) : les sautes très longues semblent requérir une énergie supérieure,

- **parmi les conditions météorologiques**, on observe un effet notable sur la distance maximale d'essaimage, surtout pour ce qui concerne le vent maximal instantané,

- **parmi les paramètres topogra-**

**phiques**, on observe un léger effet ; les sautes très longues semblent requérir du relief,

- **parmi les caractéristiques du combustible**, on n'observe pas d'effet, sauf pour les très faibles biomasses : une fois encore, les sautes très longues semblent requérir une énergie suffisante,

- **parmi les types de végétation**, on observe également un effet : les sautes très longues semblent requérir une énergie suffisante.

## Synthèse sur les types de végétation

Plusieurs conclusions peuvent être tirées de ces observations :

- **les types les moins générateurs de sautes sont les forêts de *Quercus pyrenaica* (F3)**. Aucun des cinq feux étudiés (trois en Espagne et deux au Portugal) n'a provoqué une saute supérieure à 100 m, La plus grande saute observée dans ce type de formation végétale est une saute courte (moins de 10 m),

- **les types (NA) non arborés (landes, maquis, garrigues, phryganas,...) sont également assez peu générateurs de longues sautes** : 15 feux sur 111 ont provoqué une saute supérieure à 100 m, dans l'ensemble des 5 pays couverts par l'échantillon. Toutefois, quand elles se produisent dans un type non arboré, les sautes peuvent atteindre des distances très importantes : jusqu'à 2400 m, c'est la plus longue saute observée au cours du projet). Inversement, les types non arborés sont des milieux récepteurs privilégiés : si 16 % des feux concernant les types non arborés ont été à l'origine de sautes de plus de 100 m, inversement, 32 % (exactement le double) des foyers secondaires allumés à plus de 100 m du front principal ont démarré dans des types non arborés. On constate, par exemple, que 33 % des sautes de plus de 100 m ayant un point d'émission dans le type R1 (forêt de *Pinus halepensis*) ont un point de réception dans le type NA (non arboré). Et même, 60% des sautes de plus de 100m ayant un point d'émission dans le type R3 (forêt de *Pinus sylvestris*) ont un point de réception dans le type NA (non arboré),

- **les types feuillus (*Quercus ilex*, *Quercus pubescens*, *Quercus pyrenaica*, *Quercus suber*, *Eucalyptus*,...) sont à l'origine de sautes moins longues que les types rési-**

**neux** (*Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*, *Pinus sylvestris*...). Pour les feux ayant généré des sautes de plus de 100 m, la moyenne est de 100 à 300 m pour les feuillus (maximum 500 m), contre 300 à 800 m pour les résineux (maximum 2 000 m). Par contre, **en matière de probabilité, la différence entre les deux catégories n'est pas significative** : 37 % de feux avec saute de plus de 100 m pour les feuillus, contre 42 % pour les résineux.

- **les types présentant le plus fréquemment des sautes longues sont, dans l'ordre décroissant : *Pinus sylvestris* (63 %), *Pinus halepensis* (60 %) et *Eucalyptus* (50 %).** Ces sautes n'allument pas forcément des foyers secondaires dans le même type de végétation que celui dont elles sont issues : dans seulement 40% des cas pour les deux types de pins, jamais pour les *Eucalyptus*. Les types non boisés sont souvent le point de départ du nouveau foyer (de 25 à 60 % des cas), ainsi que le type à *Pinus pinaster* (75% des foyers issus du type *Eucalyptus*).

- **les feuillus divers** (*Quercus faginea*, *Castanea sativa*, *Acacia melanoxylon*, *Fagus sylvatica*, *Platanus orientalis*, *Prunus communis*, *Olea europea*) **et les résineux divers** (*Pinus nigra*, *Pinus pinea*, *Pinus radiata*) **ont un « comportement moyen »** : 38 et 42 % de sautes observées à des distances maximales de 300 à 2 000 m.

## Modèle probabiliste

Le modèle final est un modèle uniquement estival : les feux d'hiver et de printemps (notamment les brûlages dirigés) n'ont pas été conservés dans l'échantillon, étant donné leur trop grande différence avec les autres feux.

Le modèle complet est constitué de l'assemblage des sous-modèles étudiés pour chaque type de végétation de la zone émettrice. Au total, les paramètres pris en compte sont au nombre de sept :

- le type de végétation de la zone émettrice,
- le type de végétation de la zone réceptrice,

- la vitesse maximale du vent,
- le couvert des arbres,
- la biomasse combustible,
- la position topographique de la zone émettrice,
- l'heure de la journée.

44 incendies supplémentaires (98 situations intermédiaires) ont permis de valider le modèle et de fournir un indicateur de fiabilité (en probabilité et en distance) en fonction de chaque type de situation suffisamment représentée dans l'échantillon de validation.

## Conclusion

L'analyse fine de 245 incendies (échantillon principal et secondaire) répartis dans les cinq pays de l'Europe du sud représentés dans le projet a permis de construire un premier modèle probabiliste des sautes de feu capable de prévoir avec une précision satisfaisante la probabilité et la distance d'essai-mage dans les situations les plus courantes.

Les axes d'amélioration possible du modèle paraissent aujourd'hui être les suivants :

- pour ce qui concerne les données, travailler plus finement sur les paramètres qui sont apparus comme ayant une influence significative prépondérante (biomasse et vent) et collecter de nouvelles données sur des paramètres négligés lors de ce projet (bois mort dans la zone d'émission),
- pour ce qui concerne les situations, concentrer les efforts sur un nombre plus limité de types de végétation, choisis pour leur représentativité en surface dans chaque pays et abandonner ceux où les données seront encore pendant longtemps insuffisantes (*Pinus nigra* ou *Pinus pinea*),
- pour ce qui concerne les lieux, vérifier sur d'autres zones géographiques si les résultats obtenus restent valables (autres régions d'Italie ou de Grèce non couvertes).

**D.A.**

Daniel ALEXANDRIAN  
Agence MTDA  
298 avenue du Club  
Hippique 13090  
Aix-en-Provence  
Courriel : daniel.  
alexandrian  
@mtda.fr