

## Modélisation et simulation de la propagation des incendies de forêts

Alexandrian D.

*in*

Chevrou R. (ed.), Delabrazé P. (ed.), Malagnoux M. (ed.), Velez R. (ed.).  
Les incendies de forêt en région méditerranéenne : constitution et utilisation des bases de données

Montpellier : CIHEAM

Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 25

1995

pages 165-172

Article available on line / Article disponible en ligne à l'adresse :

<http://om.ciheam.org/article.php?IDPDF=CI000465>

To cite this article / Pour citer cet article

Alexandrian D. **Modélisation et simulation de la propagation des incendies de forêts.** In : Chevrou R. (ed.), Delabrazé P. (ed.), Malagnoux M. (ed.), Velez R. (ed.). *Les incendies de forêt en région méditerranéenne : constitution et utilisation des bases de données*. Montpellier : CIHEAM, 1995. p. 165-172 (Options Méditerranéennes : Série A. Séminaires Méditerranéens; n. 25)



<http://www.ciheam.org/>  
<http://om.ciheam.org/>

# Modélisation et simulation de la propagation des incendies de forêt

## *Modelling and simulating of the spread of forest fires*

Daniel Alexandrian

Agence MTDA, Conseil en Environnement, Aix-en-Provence (France)

### I – Objet

Que peut-on attendre d'un outil de simulation des feux de forêts ? Son objectif n'est pas de remplacer la prise de décision humaine, mais de la rendre plus sûre dans les situations dont l'évaluation de la gravité est capitale. Les applications sont nombreuses :

- la formation des personnels,
- la cartographie des zones à risque,
- la mobilisation préventive,
- l'implantation des équipements dans les massifs,
- l'installation de pare-feu et de coupures,
- la gestion du combustible,
- la gestion des moyens de lutte.

Depuis 1991, nous avons commencé à développer le premier simulateur d'incendies de forêts, conçu en fonction du contexte du midi méditerranéen et du besoin de ses utilisateurs.

### II – Sources d'information utilisées

Le simulateur est construit autour d'une architecture en trois axes :

1. Une interface utilisateur conviviale, possédant de nombreuses fonctionnalités,
2. Un modèle de propagation tenant compte des derniers acquis de la recherche,
3. Une base de données dont la structure, le contenu et l'actualité conditionnent la rapidité et la qualité des simulations.

### I – Objective

*What can be expected of a system for simulating forest fires? The aim is not to replace human decision-making but to make it more reliable in situations in which appraisal of seriousness is of capital importance. There are numerous applications:*

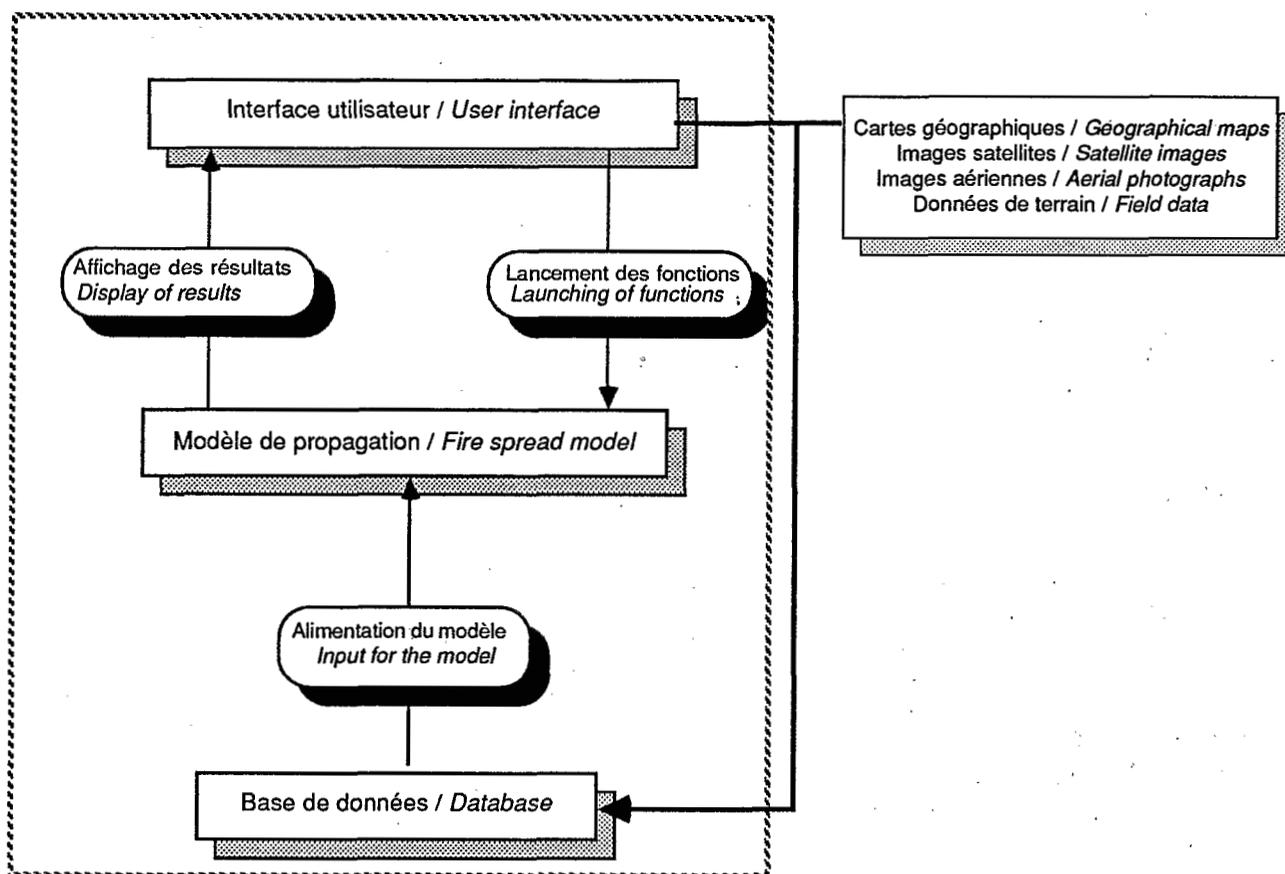
- training personnel,*
- mapping risk zones,*
- preventive mobilisation,*
- disposing equipment in forest areas,*
- installing firebreaks and fuelbreaks,*
- fuel management,*
- management of fire control facilities.*

*We started to develop the first forest fire simulator in 1991. It is designed for the context of the French Mediterranean region and according to the requirements of its users.*

### II – Information sources used

*The simulator is designed using architecture with three axes:*

1. *a user-friendly interface with numerous functions,*
2. *a fire spread model using the latest research achievements,*
3. *a database whose structure, contents and updating govern the rapidity and quality of the simulations.*



### 1. L'Interface utilisateur

L'interface utilisateur regroupe sous forme de boutons et de menus déroulants l'ensemble des commandes accessibles à la souris.

### 1. The user interface

The user interface groups all the mouse-accessible commands in the form of buttons and draw-down menus.

Fonctionnalité <i>Functions</i>	Actions possibles <i>Possible actions</i>
Projet <i>Project</i>	Changement de site géographique (département, massif...) <i>Change of geographical location (department, forest, etc.)</i>
Fronts de feu (feux en cours) <i>Front lines (fires in progress)</i>	Allumage de départs de feu (à des instants différents) ou de fronts multiples <i>Ignition (at different moments) or multiple front lines</i>
Scénarios de feu <i>Fire scenarios</i>	Sauvegarde, rappel et retour en arrière possibles (scénarios à « rejouer ») <i>Saving, recall and return possible (replay of scenarios)</i>
Etat du combustible <i>State of fuel</i>	Modification d'une zone (pare-feu) ou d'un type (peuplement) <i>Modification of a zone (firebreak) or a type (stand)</i>
Conditions météorologiques <i>Weather conditions</i>	Changement de vent (force et direction) et de l'humidité de l'air <i>Change in wind (speed and direction) and air moisture content</i>
Statistiques <i>Statistics</i>	Affichage de la surface et du périmètre brûlés, de la puissance du front et de la hauteur des flammes <i>Display of the burned area and zone, the power of the fire front line and the height of flames</i>
Vue en 3D <i>3-D view</i>	Affichage du feu « vu d'hélicoptère » <i>Display of "helicopter view" of the fire</i>
Zoom <i>Zoom</i>	Agrandissement de la zone en train de brûler <i>Enlargement of the burning zone</i>

## 2. La base de données

Le simulateur est un Système d'Information Géographique dynamique. La base de données contient une série de plans d'informations géo-référencés, divisés en deux groupes : **actives** et **passives**.

1. Les données actives regroupent celles qui interviennent dans la simulation : carte du combustible, variable dans le temps, carte du relief, carte du vent sur le relief, sur plusieurs directions.
2. Les données passives sont celles que l'on peut afficher à l'écran, bien qu'elles n'interviennent pas dans la simulation : carte de DFCI, carte forestières, carte des incendies passés, images satellite ou images aériennes.

Le Modèle Numérique de Terrain, nécessaire au calcul de la propagation du feu, permet aussi de visualiser le feu en 3D, comme d'un hélicoptère. Une carte des feux passés peut être affichée en même temps que le feu se propage à l'écran. Une image satellite permet de bien visualiser le couvert végétal.

## III – Méthodologie

Le modèle de propagation implanté dans la version actuelle combine de manière vectorielle les trois paramètres principaux agissant sur la progression d'un feu : le vent, la pente et l'état du combustible.

L'absence actuelle de modèle de propagation adapté aux conditions méditerranéennes nous a incité à engager un programme de recherche scientifique, soutenu par la Commission des Communautés Européennes.

Ce programme rassemble dix laboratoires publics ou privés, français ou étrangers :

- ARMINES, CERMICS, CIRAD, GEOIMAGE, INRA, Université de Nice (France),
- Université de Liège (Belgique),
- DIFT (Danemark),
- FISBAT (Italie),
- IAMC (Grèce).

Au plan scientifique, ce programme de recherche présente l'originalité de conduire les recherches dans deux directions complémentaires :

- la mise au point d'un ensemble de modèles représentatifs des différents phénomènes

## 2. The database

The simulator is a dynamic geographic information system. The database contains a series of maps of geo-referenced information divided into a **an active group** and a **passive group**.

1. The active data are those involved in simulation: fuel map, factors variable in time, map of the relief, map of wind on the relief in several directions.
2. The passive data are those that can be displayed on the monitor although they are not involved in the simulation: forest fire protection map, forestry maps, a map of past fires, satellite images or aerial photographs.

The digital field model required for calculating fire spread can also be used to display the fire in three dimensions, as seen from a helicopter. The map of past fires can be displayed while the fire spreads on the screen. A satellite image enables good visualisation of the plant cover.

## III – Methodology

The fire spread model in the present version combines in vector mode the three main parameters that affect the spread of fire: wind, slope and the state of fuel.

The current lack of a fire spread model adapted to Mediterranean conditions leads us to favour the undertaking of a programme of scientific research backed by the Commission of the European Communities.

This programme involves ten public or private French or foreign laboratories:

- ARMINES, CERMICS, CIRAD, GEOIMAGE, INRA, Université de Nice (France),
- University of Liège (Belgium),
- DIFT (Denmark),
- FISBAT (Italy),
- IAMC (Greece).

From the scientific point of view, this research programme has the originality of taking research in two complementary directions:

- the development of a set of models representing the different phenomena involved in the modelling of forest fires:

- climatology (especially aerology on a small scale),

intervenant dans la modélisation des incendies de forêts :

- climatologie (et plus particulièrement aérologie à petite échelle),
- comportement du feu (combustion et transfert d'énergie ou de matière),
- effets des moyens de lutte (troupes au sol, moyens aériens) ;

□ la prise en compte des connaissances existantes, qu'elles portent sur l'identification de la situation ou sur les connaissances des phénomènes physiques mis en jeu, et des modèles numériques disponibles.

## 1. Identification des situations

L'approche proposée consiste à reprendre la logique utilisée par un expert face à la multiplicité d'échelles d'espace et de temps présentes dans les phénomènes naturels : identification de la situation, émission d'hypothèses, recherche de modèles pertinents, application. Si le résultat n'est pas satisfaisant, il fera d'autres hypothèses qui correspondront à une nouvelle combinaison de modèles.

Pour ce faire, les connaissances sont d'abord collectées et structurées, qu'elles proviennent des experts en modélisation ou des experts physiciens ou biologistes. Ces connaissances se répartissent en trois groupes :

1. identification des situations (végétation, terrain, climat),
2. association des phénomènes physiques aux situations,
3. association de modèles numériques aux phénomènes physiques.

A partir de ces connaissances, une méthodologie est développée, permettant :

- l'identification de la situation (par décomposition en situations élémentaires connues) ;
- l'assemblage des modèles numériques correspondants permettant de traiter une situation donnée.

Cette architecture basée sur les connaissances permet de justifier les raisonnements suivis et de guider les experts dans la remise en cause d'un raisonnement, lorsque les résultats de la simulation diffèrent notablement des observations faites en laboratoire ou sur le terrain.

## 2. Modélisation du combustible

La prévision du comportement des feux au travers des modèles de propagation dépend fortement d'une connaissance détaillée du combustible. Ne

- *fire behaviour (combustion and transfer of energy or matter),*
- *the effects of control facilities (brigades on the ground and airborne facilities);*

□ *taking into account existing knowledge concerning either identification of the situation or knowledge of the physical phenomena involved and the digital models available.*

### 1. Identification of situations

*The approach proposed consists in using the logic of an expert faced with the multiplicity of scales of space and time in natural phenomena: identification of the situation, hypotheses, search of pertinent models and application. If the result is not satisfactory, he will put forward other hypotheses corresponding to a new combination of models.*

*For this, knowledge from experts on modelling, physics or biology is first gathered and structured. This knowledge is in three categories:*

- 1. identification of situations (vegetation, terrain and climate),*
- 2. the combination of physical phenomena and situations,*
- 3. the combination of digital models and physical phenomena.*

*Methodology is developed on the basis of this knowledge to enable:*

- *identification of the situation (by breaking it down into known component situations);*
- *assembling the corresponding numerical models to handle a given situation.*

*This knowledge-based architecture justifies the reasoning used and guides experts in questioning reasoning when simulation results differ markedly from laboratory or field observations.*

### 2. Modelling fuel

*Forecasting the behaviour of fires using fire spread models depends to a considerable extent on detailed knowledge of fuel. As it is not possible to gain accurate knowledge of all the pertinent parameters at all points in a forest area, a fuel typology must be drawn up. In order that it should be generic and transposable to all European plant formations,*

pouvant appréhender avec précision en chaque point d'un massif forestier tous les paramètres utiles, il est nécessaire d'établir une typologie du combustible. Pour que celle-ci soit générique et transposable à l'ensemble des formations végétales européennes, elle doit :

- reposer sur des bases biologiques et physiques ;
- être conduite avec une méthode identique.

Dans un premier temps, les différentes méthodes existantes sont confrontées, afin de mettre au point un protocole commun sur l'ensemble des massifs pilotes retenus (France, Grèce, Belgique). Ce protocole devant permettre d'utiliser aussi les modèles de propagation existants.

Ce protocole commun d'échantillonnage est conçu de telle manière qu'il permette de passer de la façon la plus simple possible de la "particule" élémentaire que représente la feuille ou le rameau, à la forêt toute entière. Pour cela, certaines mesures sont faites séparément sur les principales espèces végétales dominantes.

Lors des phases d'échantillonnage de terrain, on veille à prendre en compte l'évolution dans le temps de la végétation : stades phénologiques, interaction avec l'atmosphère, âge... (utilisation des récents modèles de simulation de la croissance des végétaux).

La typologie est réalisée par analyse statistique multivariable (analyse factorielle des correspondances, classification ascendante hiérarchique...) en utilisant la notion de « macro-particule » (volume de végétation contenant une quantité de « particules » de chaque type, selon un certain agencement).

### 3. Modélisation de la combustion

Deux grands types de modèles de propagation des incendies de forêts ont été développés dans le monde :

1. les modèles déterministes, privilégiant les processus physiques de combustion et paramétrés sur la base d'expérimentations contrôlées,
2. les modèles statistiques, mis au point par ajustement d'équations sur échantillon de feux réels.

L'analyse des modèles existants (modèles physiques, hypothèses et systèmes d'équations mathématiques qui en résultent, méthodes numériques utilisées dans les codes informatiques pour résoudre ces équations de manière approchée) est réalisée sous différents aspects : domaine physique de validité, propriétés qualitatives, qualité et capacité des méthodes numériques.

- it must have a biological and physical basis,
- and be performed with the same method.

*The different existing methods are first compared in order to develop a common procedure for all the pilot forests chosen (in France, Greece and Belgium). This procedure also makes it possible to use existing fire spread procedures.*

*This common sampling procedure is designed in such a way as to make as simple a transition as possible from the elementary component formed by a leaf or a shoot to the forest as a whole. For this, certain measurements are made separately on the dominant plant species.*

*Care is taken during field sampling phases to allow for the evolution of the vegetation in time with regard to phenological stages, interaction with the atmosphere, age, etc., with use of recent plant growth simulation models.*

*A typology is drawn up using multivariate analysis (factorial analysis of correspondence, order statistics, etc.) and the notion of "macro-particle" (the volume of vegetation containing a quantity of "particles" of each type in a certain pattern).*

### 3. Modelling of combustion

*Two main types of model of the spread of forest fires have been developed in the world:*

1. *determinist models that lay emphasis on the physical processes of combustion and parametered using controlled experiments,*
2. *statistical models developed by adjusting equations using samples of real fires.*

*Analysis of existing models (physical models, hypotheses and the resulting systems of mathematical equations, and the digital methods used in computer codes to solve these equations in a close manner) is performed from different angles: the physical field of validity, qualitative properties and the quality and capacity of digital methods.*

*This state of knowledge is extended to the mathematical models generally used to describe combustion: length of flames, smoke, smoke spread, heat radiation, surface ignition, etc.*

*New mathematical models specific to forest fires are developed in the light of the results. They*

Cet état des connaissances est étendu aux modèles mathématiques généralement mis en oeuvre pour appréhender les paramètres de la combustion : longueur de flammes, développement des fumées, diffusion des fumées, rayonnement de chaleur, ignition de surface...

En fonction des résultats obtenus, de nouveaux modèles mathématiques spécifiques aux feux de forêts sont développés, basés sur les modèles existants et sur des données expérimentales.

#### 4. Modélisation du vent

Des modèles de vent et de champs de turbulence en terrain accidenté sont disponibles à différents niveaux de complexité. Si la plupart des caractéristiques du champ de vent moyen sont prises en compte dans les modèles linéaires (appropriés aux écoulements des couches limites en terrain peu vallonné), les champs de turbulence ne sont que partiellement décrits. En présence de fortes pentes, la description complète n'est, en outre, qu'approchée avec des modèles non linéaires sophistiqués.

Les conditions météorologiques de la région méditerranéenne méritent une attention particulière pour la modélisation de phénomènes correspondant à certaines situations atmosphériques. Les caractéristiques topographiques complexes, les importants flux diabatiques, la forte variabilité saisonnière et spatiale, par exemple, doivent être prises en compte lors de la modélisation de l'évolution des couches limites de l'atmosphère et ses propriétés climatologiques.

Un état de l'art, focalisé sur les aspects mathématiques et numériques, est conduit sur les modèles et les codes existants pour la simulation des flux atmosphériques sur des terrains complexes, en l'absence de feu. La possibilité de relier ces modèles à des bases de données géographiques, notamment en ce qui concerne les modèles numériques de terrain, est étudiée.

Par la suite, deux sous-objectifs sont distingués :

1. établir des modèles de prévision de vent, de champs de turbulence, utilisables pour les besoins opérationnels, à petite échelle (quelques kilomètres). Ces modèles sont conçus pour permettre aussi la production d'estimation climatiques des paramètres appropriés (vent, rafales, température...), sur la base des données météorologiques disponibles.

□ Les modèles existants sont stationnaires et applicables aux conditions adiabatiques et aux ter-

*are based on existing models and experimental data.*

#### 4. Modelling wind

*Models of wind and turbulence in hilly ground are available at different levels of complexity. Although most of the characteristics of the average wind field are taken into account in linear models (appropriate for flows in boundary layers in fairly level ground), zones of turbulence are only partially described. Complete description when there are steep slopes can only be approached with sophisticated non-linear models.*

*The meteorological conditions in the Mediterranean region deserve special attention for the modelling of phenomena corresponding to certain atmospheric situations. For example, complex topographical characteristics, strong non-adiabatic flows, strong seasonal and spatial variability must be taken into account in modelling changes in the boundary layers of the atmosphere and its climatological properties.*

*The mathematical and digital aspects of existing models and codes for the simulation of atmospheric fluxes in complex terrain without fire are examined. The possibility of relating these models to geographical databases is studied, with special emphasis on digital models of terrain.*

*Two subsidiary objectives are then identified.*

*1. The development of models for forecasting wind and turbulent zones that can be used for operational purposes on a small scale (a few kilometres). These models are also designed for drawing up climatic estimates for the appropriate parameters (wind, gusting, temperature, etc.) using available meteorological data.*

□ *Existing models are stationary and applicable to adiabatic conditions and slightly rolling land. The aim is to extend the conditions of application to realistic situations.*

□ *These models are also simple, rapid and economic and can be proposed for use at local level. These features should be conserved in the developments planned in the face of certain instabilities in external forces.*

rains faiblement vallonnés. L'objectif est d'étendre les conditions d'application aux situations réalistes ;

□ par ailleurs, ces modèles sont simples, rapides et économiques à utiliser ; aussi, on peut proposer leur utilisation au niveau local. Ces caractéristiques sont à maintenir dans les développements prévus, en faisant face à certaines instabilités des champs de force externes.

2. tester les modèles avancés (modèles non linéaires basés sur différents champs de turbulence) pour améliorer la connaissance de l'effet sur le vent des incendies de forêts de grande taille.

Pour surmonter les limites des modèles précédemment décrits, des modèles non linéaires seront utilisés pour résoudre les équations de Reynolds, avec des modèles appropriés pour les turbulences. Des modèles de ce type peuvent être employés pour évaluer l'influence des importants flux de chaleur dus aux incendies, sur le vent et les champs de turbulence près du feu lui-même. D'aussi importants dégagements de chaleur seront analysés comme source de mouvement des masses d'air, afin d'améliorer la connaissance de ces interactions.

Pour ce faire, le couplage entre les premiers modèles issus uniquement de la mécanique des fluides et ceux provenant de la modélisation de la combustion sera prospecté, peut-être seulement pour des modèles de feux simples. La réussite de l'opération est étroitement liée à l'utilisation de données pour la validation du modèle de simulation global obtenu.

## 5. Validation des résultats

Dans le cadre de ce projet, cinq méthodes complémentaires de validation des résultats ont été retenues :

**1. Validation en laboratoire.** Pour compléter l'évaluation des modèles existants, un test des différentes variables du modèle FIRE 1 sera réalisé. Certaines hypothèses du modèle (stationnarité, homogénéité) seront vérifiées. Son domaine de validité sera déterminé en ce qui concerne les limites de teneur en eau et la quantité de combustible. Par la suite, les modèles élaborés seront testés lors d'opérations expérimentales sur banc de combustible.

**2. Validation climatique.** Une validation des modèles topoclimatiques sera réalisée par confrontation des résultats avec les situations réelles observées sur le terrain.

**2. The testing of advanced models (non-linear models based on different turbulent zones) to improve knowledge of the effect of wind on large forest fires.**

*In order to overcome the limits of the models described above, non-linear models are used to solve Reynolds' equations with appropriate models for turbulence. Models of this type can be used to appraise the influence of the large heat fluxes caused by fires on the wind and the whirling zones near the fire itself. Such substantial releases of heat will be analysed as the cause of movements of air masses in order to improve knowledge of these interactions.*

*For this, the combining of the first models derived solely from fluid mechanics and those from the modelling of combustion will be examined, possibly only for models of simple fires. The success of the operation is closely linked with the use of data for validating the general simulation model developed.*

## 5. Validation of the results

*Five complementary methods for validation of the results have been chosen for the project.*

**1. Laboratory validation.** *A test of the different variables of the model FIRE 1 will be performed to complete the evaluation of the existing models. Some hypotheses of the model (stationary features, homogeneity) will be verified. Its range of validity will be determined with regard to the moisture content and fuel quantity limits. The models developed will then be subjected to laboratory experiments on fuel beds.*

**2. Climatic validation.** *Topo-climatic models will be validated by comparing results with real situations observed in the field.*

**3. Validation using past fires.** *Available information will be collected on past fires whose spread was almost free in the various pilot forests.*

**4. Validation using controlled burning.** *Controlled burning will be performed in the various pilot forests as permitted by the administrations in each country.*

**5. Validation on real fires.** *This validation is more delicate by nature because of the random features (in time and space) of burned areas and*

**3. Validation sur incendies passés.** Le recueil des informations disponibles sur des feux passés dont la propagation a été presque libre sera faite sur les différents massifs pilotes.

**4. Validation sur brûlages contrôlés.** En fonction des autorisations obtenues auprès des administrations de chaque Etat, des brûlages contrôlés seront réalisés sur les différents massifs pilotes.

**5. Validation sur incendies réels.** Par nature, cette validation est beaucoup plus délicate, compte-tenu du caractère aléatoire (dans le temps et dans l'espace) des surfaces brûlées et de la difficulté d'enregistrer correctement certaines données. Dans la mesure du possible, les partenaires concernés par la typologie du combustible essaieront de récolter le maximum de données sur les feux ayant éclaté dans les massifs pilotes les concernant.

## 6. Intégration des résultats

L'ensemble des informations et des résultats obtenus par les participants à ce projet (données sur le combustible, modèles de propagation, architecture de gestion de ces informations...) sera intégré de manière à réaliser un outil commun de validation des résultats.

Pour cela, les bases de données nécessaires sur les massifs pilotes retenus (France, Grèce...) seront réalisées, notamment pour ce qui concerne le relief et l'occupation du sol, à partir d'images satellite.

Le traitement de toutes les informations sera réalisé sur écran, de façon à permettre les simulations nécessaires, lors de la validation des modèles et leur confrontation aux données enregistrées (brûlages, incendies...).

## IV – Résultats et conclusion

Le simulateur est développé sous UNIX dans le respect des règles des principaux standards (langage C, XWINDOW, OSF Motif). Il est disponible sur plate-forme SUN 4 (processeur Sparc).

Les premiers résultats sont très encourageants et de nombreuses applications sont en cours de développement.

*the difficulty of satisfactorily recording certain data. The partners concerned by fuel typology will do what is possible to gather as many data as possible on outbreaks of fire in the pilot forests that they are concerned with.*

## 6. Integration of the results

*All the information and results obtained by the participants in the project (data on fuel, fire spread models, management architecture for this information, etc.) will be integrated to form a common tool for the validation of results.*

*The necessary databases on the pilot forests chosen (France, Greece, etc.) will be developed and will concern in particular the relief and land use derived from satellite images.*

*All the information will be processed on the screen to perform the simulations necessary for validation of the models and comparison with the data recorded (burning trials, fires, etc.).*

## IV – Results and conclusion

*The simulator was developed under UNIX with respect of the rules of the main standards (C language, XWINDOW, OSF Motif). It is available for SUN 4 (SPARC processor).*

*The first results are very encouraging and numerous applications are currently being developed.*