



**HAL**  
open science

# Formalisation et gestion des connaissances dans la modélisation du comportement des incendies de forêt

Aldo Napoli

► **To cite this version:**

Aldo Napoli. Formalisation et gestion des connaissances dans la modélisation du comportement des incendies de forêt. Géographie. Université Nice Sophia Antipolis, 2001. Français. NNT : 2001NICE2044 . tel-00532631

**HAL Id: tel-00532631**

**<https://theses.hal.science/tel-00532631v1>**

Submitted on 4 Nov 2010

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **THESE**

présentée devant

**l'Université de Nice - Sophia Antipolis**

pour l'obtention du

**DIPLOME DE DOCTORAT**

(arrêté ministériel du 30 mars 1992)

**Spécialité : Géographie**

par

**Aldo NAPOLI**

**Formalisation et gestion des connaissances dans la  
modélisation du comportement des incendies de forêt**

**soutenue le 13 décembre 2001**

**Jury :**

Pierre	CARREGA	directeur
François	CUQ	rapporteur
François	HOULLIER	rapporteur
Franck	GUARNIERI	examineur
Jean-Charles	VALETTE	examineur

**Laboratoire d'Analyse Spatiale**

**Equipe « Gestion et Valorisation de l'Environnement »**

**U.M.R. « ESPACE » du C.N.R.S.**

**Université de Nice-Sophia Antipolis - 98, Bd. E. Herriot – 06200 Nice**



*Cette thèse est dédiée à*

*Emmanuelle GARCIA*

*et*

*Bruno RICHARD*



*Puisqu'on ne peut être universel et savoir tout ce qu'on peut savoir sur tout, il faut savoir un peu de tout. Car il est bien plus beau de savoir quelque chose de tout que de savoir tout d'une chose ; cette universalité est la plus belle.*

*Pascal, Pensées.*



## **Remerciements**

*Je tiens en premier lieu à remercier les membres du jury qui ont accepté de critiquer et juger le présent travail :*

*- Pierre Carréga (Professeur à l'Université de Nice-Sophia Antipolis), qui m'a accordé sa confiance en prenant la direction de cette thèse et qui m'a fait part de ses connaissances en climatologie et en incendie de forêt, sur lesquelles repose une grande partie de ces travaux,*

*- François Houllier (directeur de recherche à l'INRA de Montpellier) qui, malgré ses multiples charges et obligations, a accepté d'être rapporteur de ce travail et qui m'a fait l'honneur d'assurer la présidence de ce jury,*

*- François Cuq (directeur de recherche au CNRS de Brest) également rapporteur de cette thèse, manifestant ainsi son intérêt pour mes travaux,*

*- Franck Guarniéri, (responsable scientifique au Pôle Cindyniques de l'Ecole des Mines de Paris, à Sophia-Antipolis), qui a accepté d'être examinateur de cette thèse, qui m'a encouragé et guidé tout au long de ces travaux et qui m'a initié à de nouveaux thèmes de recherche tels que les zones ateliers et les systèmes de modèles,*

*- Jean-Charles Valette (responsable de l'équipe Prévention des Incendies de Forêt de l'INRA d'Avignon), également examinateur de cette thèse, qui a suivi mes travaux et avec qui j'ai eu plaisir à collaborer lors de projets nationaux et européens.*

*Je remercie également tout le personnel, chercheurs et étudiants des laboratoires de recherches qui m'ont accueilli et qui ont contribué à ces travaux de par leur aide intellectuelle, logistique ou financière :*

*- Le Laboratoire d'Analyse Spatiale (Université de Nice-Sophia Antipolis), Emmanuelle Garcia, Nassima Mouhous, Christelle Gauché, Céline Tritz, Sandra Perez, Sylvie Autiero, Gourguen Davtian, Mustapha Touazi, Christophe Chamoux, Eric Bailly et Jean-Pierre Laborde (Professeur à l'UNSA), avec qui j'ai partagé mon goût du travail dans la bonne humeur durant les premières années de cette thèse,*

*- Le Pôle Cindyniques de l'Ecole des Mines de Paris (Sophia-Antipolis), Raphaële Blanchi, Eric Mathieu, Eric Rigaud, Samuel Olampi et Jean-Luc Wybo (leur directeur) avec qui j'ai pleinement partagé mon goût pour la recherche,*

*- Le « Space Applications Institute », Ana Sebastian, Pierre Cantelaube, Santiago Saura, Emmanuel Garbolino, Pere Serra, Jesus San-Miguel (responsable de l'activité Feux de Forêt), Giorgio Liberta, Alfred de Jager et Steve Peedell avec qui j'ai eu plaisir à travailler durant mon année au Joint Research Centre (Ispra, Italie).*

*Je tiens à remercier Bernard Robion de l'ONF de Valbonne (Alpes-Maritimes), qui m'a permis de suivre son équipe de brûlages dirigés sur le terrain afin de pratiquer des expérimentations sur les incendies de forêts, et Jean-Yves Perez du SDIS des Landes qui nous a associés à sa campagne d'expérimentations conduite en collaboration avec l'INRA d'Avignon.*

*Un grand merci à Jeanine Magnet, ma sœur, pour l'immense travail de relecture qu'elle a effectué, ainsi qu'à toute ma famille qui m'a « supporté » par ses constants encouragements. Je remercie également mes amis qui m'ont soutenu, mais à qui je n'ai montré malheureusement, que les mauvais côtés de la réalisation de cette thèse.*

*Je tiens également à remercier l'ensemble des personnes qui, de près ou de loin, m'ont permis de mener à terme ce travail.*

*Les travaux présentés dans cette thèse n'auraient pu être menés à bien sans l'aide financière de la Commission Européenne (DG XII Environnement et Climat). Je remercie les différents responsables de laboratoires de recherches, de m'avoir associé aux programmes R&D européens suivants : Risk Sensor, Efaistos, Fire Torch, Control Fire Sat, Natural Hazards.*

# SOMMAIRE

<b>Introduction générale</b> .....	<b>13</b>
------------------------------------	-----------

## Première Partie

### **Analyse du système incendie de forêt et Démarche de formalisation des connaissances**

#### **Chapitre 1**

<b>Analyse du système incendie de forêt et recours à l'expérimentation en milieu naturel</b> .....	<b>23</b>
--	-----------

1.1. Le système incendie de forêt.....	23
--	----

1.1.1. Notion de systèmes.....	24
1.1.2. La complexité du phénomène incendie de forêt.....	25
1.1.3. Analyse du système incendie de forêt.....	26

1.2. La modélisation du comportement des feux de forêt.....	33
---	----

1.2.1. L'expérimentation : un outil de modélisation.....	34
1.2.2. Les formes de modélisation du comportement du feu de forêt.....	35
1.2.3. La validation des modèles de propagation.....	37

1.3. Les expérimentations pour l'étude du comportement des feux de forêt.....	37
---	----

1.3.1. Typologie des sources d'information pour la modélisation du comportement des feux de forêt.....	38
1.3.2. L'expérimentation en laboratoire.....	38
1.3.3. L'expérimentation en milieu naturel.....	39
1.3.4. Complémentarité de ces deux types d'expérimentations.....	41

1.4. La zone atelier comme outil d'étude d'un système complexe.....	41
---	----

1.4.1. Les « Long Term Ecological Research » (LTER).....	42
1.4.2. Le programme « zones ateliers de recherche sur l'environnement » du CNRS.....	44
1.4.3. L'information issue des zones ateliers.....	48

1.5. Conclusion du Chapitre 1.....	49
------------------------------------	----

## Chapitre 2

<b>Démarche de formalisation des connaissances et contribution du langage de modélisation UML</b> .....	<b>51</b>
2.1. Données, informations, connaissances et compétences .....	51
2.1.1. Les données .....	52
2.1.2. Les informations.....	52
2.1.3. Les connaissances.....	53
2.1.4. Les compétences.....	54
2.2. L'acquisition des connaissances .....	54
2.2.1. Les acteurs de l'acquisition des connaissances.....	55
2.2.2. Les modes d'acquisition des connaissances.....	56
2.3. La formalisation des connaissances.....	57
2.3.1. Les méthodes de modélisation des connaissances issues de l'intelligence Artificielle.....	58
2.3.2. Les méthodes de modélisation des connaissances issues du Génie Logiciel.....	59
2.4. Le recours au langage UML de modélisation des connaissances.....	63
2.4.1. Les caractéristiques d'UML.....	64
2.4.2. Comment modéliser avec UML ?.....	65
2.5. Les différents types de systèmes d'information pouvant intégrer des connaissances.....	70
2.5.1. Définitions et caractéristiques des systèmes d'information.....	70
2.5.2. Les Environnements de Résolution de Problèmes.....	72
2.6. Conclusion du Chapitre 2.....	75

## Deuxième Partie

### Acquisition et formalisation des connaissances de l'expérimentation en milieu naturel pour la modélisation des incendies de forêt

## Chapitre 3

<b>Acquisition des connaissances : état de l'art et pratique de l'expérimentation en milieu naturel</b> .....	<b>79</b>
3.1. Etat de l'art des expérimentations en milieu naturel dédiées à la modélisation des feux de forêt.....	80
3.1.1. Les expérimentations dédiées uniquement à l'étude de la propagation du feu.....	81
3.1.2. Les expérimentations dédiées à la fois à l'étude de l'intensité du feu et à sa propagation.....	86

3.2. La pratique des expérimentations en milieu naturel.....	97
3.2.1. Les expérimentations dans le département des Alpes-Maritimes.....	97
3.2.2. Les expérimentations dans le département des Landes.....	103
3.3. Conclusion du Chapitre 3.....	104

## **Chapitre 4**

### **Formalisation à l'aide d'UML, des connaissances issues d'expérimentations en milieu naturel.....105**

4.1. Modélisation de la démarche expérimentale.....	106
4.1.1. La démarche expérimentale.....	106
4.1.2. La préparation de l'expérimentation.....	107
4.1.3. L'exécution de l'expérimentation.....	111
4.2. Modélisation d' un système de gestion des connaissances pour la modélisation du comportement des feux de forêt.....	115
4.2.1. La saisie des données concernant l'expérimentation.....	116
4.2.2. La saisie des informations concernant le dispositif de mesure.....	117
4.2.3. La saisie des informations concernant les éléments géographiques.....	122
4.2.4. La saisie des informations concernant les paramètres de l'expérimentation.....	125
4.2.5. Structure générale du système d'information.....	130
4.3. Conclusion du Chapitre 4.....	137

## **Troisième Partie**

### **Système de gestion des connaissances et zone atelier pour la modélisation des incendies de forêt**

## **Chapitre 5**

### **Vers un système de gestion des connaissances pour la modélisation des feux de forêt.....141**

5.1. Vers un prototype d'Environnement de Résolution de Problème d'aide à la modélisation des incendies de forêt.....	141
5.1.1. L'ERP d'aide à la modélisation des incendies de forêt.....	142
5.1.2. Le prototypage de l'ERP.....	144
5.2. MODELLIS : un système de gestion des données et connaissances d'une zone atelier.....	146
5.2.1. Présentation du prototype exploratoire MODELLIS.....	146
5.2.2. Les fonctionnalités de MODELLIS.....	146
5.2.3. Exemples de modélisation à partir des données de MODELLIS.....	156

5.3. Perspectives de couplage avec d'autres systèmes d'information traitant de la problématique Incendie de Forêt.....	158
5.3.1. Perspective de couplage de MODELLIS avec des bases de modèles de propagation.....	158
5.3.2. Perspective de couplage de MODELLIS avec des ERP à référence spatiale .....	161
5.4. Conclusion du Chapitre 5.....	163
<b>Chapitre 6</b>	
<b>Vers un réseau de zones ateliers pour l'étude du comportement des feux de forêt en France.....</b>	<b>165</b>
6.1. Les facteurs favorables à la création de zones ateliers.....	166
6.2. Les Zones Ateliers pour l'étude des paramètres climatologiques.....	168
6.2.1. Les principales méthodes d'interpolation de paramètres climatologiques à mettre en œuvre sur une zone atelier.....	168
6.2.2. Un exemple de zone atelier : les Alpes-Maritimes.....	175
6.2.3. La zone atelier du Var.....	178
6.2.4. Commentaires sur les résultats obtenus.....	182
6.3. Les Zones Ateliers pour l'étude du comportement des feux de forêt.....	183
6.3.1. Les principaux types d'expérimentations et de modélisation à mettre en œuvre sur une zone atelier.....	183
6.3.2. La zone atelier des Alpes-Maritimes.....	183
6.3.3. La zone atelier des Landes.....	184
6.3.4. Le laboratoire de l'INRA d'Avignon : une zone atelier pour l'étude du comportement d'un feu.....	185
6.4. Les équipes de modélisation du comportement des feux de forêt.....	187
6.5. Les équipes de conception d'outils informatiques spécialisés pour l'étude du comportement des feux de forêt.....	187
6.6. Les équipes de recherche pouvant être intégrées au réseau de zones ateliers pour l'étude du comportement des feux de forêt en France.....	188
6.7. Conclusion du Chapitre 6.....	189
<b>Conclusion générale et Perspectives.....</b>	<b>191</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>197</b>
<b>Table des figures.....</b>	<b>209</b>

## **Introduction générale**



## Introduction générale

*Penser ne suffit pas : il faut penser  
à quelque chose.*

*Jules Renard*

Nous proposons de traiter dans cette thèse, une partie de la recherche dans le domaine des incendies de forêt. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'acquisition et la formalisation des connaissances (structuration des connaissances et de leurs interrelations) pour l'analyse du comportement des feux de forêt et plus précisément pour la modélisation de la vitesse de propagation d'un front de flammes. La propagation d'un incendie de forêt a été décrite par plusieurs auteurs (Mc Arthur, 1967 ; Rothermel, 1972 ; Hétier et Lilin, 1989 ; Trabaud, 1989 ; Dupuy, 1991, 1997). Nous considérons dans cette thèse comme « feu de forêt », tout incendie se propageant dans une végétation arborée ou arbustive (forêts, garrigues, maquis...).

L'incendie constitue une menace pour les espaces « naturels », les personnes (habitants, pompiers...) et leurs biens (habitations, zones agricoles, équipements...). Chaque année, les feux brûlent près de 500.000 ha en moyenne dans le Sud de l'Europe -France, Espagne, Grèce, Portugal, Italie- (Commission Européenne, 1996). A chaque feu de forêt, peut être associé un impact économique (coût de la prévention, de la lutte...). Il est donc nécessaire de comprendre le phénomène incendie de forêt afin de le prédire et limiter ainsi ses dégâts.

Le système incendie de forêt, de par sa complexité, doit être appréhendé dans une démarche modélisatrice du phénomène (expérimentation, modélisation et validation). Nous proposons dans cette thèse, par la formalisation du corpus de connaissances issues d'expérimentations en milieu naturel, d'apporter une aide à la modélisation du comportement des incendies de forêt. Un prototype de système de gestion des connaissances est élaboré afin d'assister les scientifiques chargés de conduire des

---

expérimentations en milieu naturel. Ce système de gestion des connaissances étant partie intégrante des outils informatiques à mettre en œuvre dans une zone atelier, nous nous permettrons d'imaginer ce que pourrait être une zone atelier pour la modélisation du comportement des incendies de forêt en France.

## **Recours à l'expérimentation en milieu naturel pour la modélisation du système incendie de forêt**

Trabaud (1989) propose la définition suivante d'un incendie: « *l'incendie est une combustion qui se développe sans contrôle, dans le temps et dans l'espace* ». Par extension de cette définition, nous pouvons écrire qu'une expérimentation d'un phénomène naturel (l'incendie de forêt) est une phase du phénomène sous contrôle total (parcelle expérimentale) ou partiel (brûlage dirigé). L'expérimentation en milieu naturel peut donc être analysée de la même manière que le phénomène.

L'expérimentation, quelle que soit sa nature (en laboratoire, en milieu naturel ou lors d'une simulation informatique), se doit de fournir au scientifique l'ensemble des informations et connaissances utiles à la modélisation du phénomène. De la simple observation à la mise en place d'un dispositif de mesure conséquent, la démarche expérimentale doit être reproductible dans l'espace et dans le temps, dans les limites fixées par le scientifique.

Si l'unicité temporelle et spatiale est difficile à respecter, il n'est toutefois pas impossible de tendre vers elle. Pour cela, les modélisateurs ont recours à des sites expérimentaux (unicité spatiale) et à des périodes de référence (unicité temporelle). Les expérimentations se déroulent alors sur les parcelles expérimentales d'un site choisi pour être le plus représentatif du milieu qui intéresse le modélisateur (maquis sur un versant, molinie sur terrain plat...). Ainsi, les mesures des différents paramètres du phénomène sont comparables d'une parcelle à l'autre et peuvent donc être utilisées dans un objectif de modélisation.

Les grands projets expérimentaux se déroulant sur plusieurs années, les modélisateurs choisissent des périodes de référence (par exemple le printemps en ce qui concerne la modélisation des feux de forêt) afin de pouvoir comparer les résultats d'expérimentations conduites sur un même site et sur plusieurs années. Nous parlerons alors de périodes expérimentales en adéquation avec la notion de sites expérimentaux.

## **Recours à la formalisation des connaissances dans la démarche de modélisation des incendies de forêt**

Nous avons vu que le système incendie de forêt devait être analysé au travers de la démarche de modélisation. Nous proposons d'assister le modélisateur dans l'acquisition, la formalisation et la gestion des connaissances issues de l'expérimentation en milieu naturel.

L'aide à la modélisation a été constituée par la spécification de la démarche effectuée par l'expérimentateur. Cette démarche de capitalisation de l'expertise a consisté à :

- Etudier l'expérimentation en milieu naturel par un état de l'art et la pratique de l'expérimentation,
- Décrire à l'aide du langage de modélisation UML<sup>1</sup> la démarche expérimentale,
- Formaliser à l'aide d'UML, les connaissances issues des expérimentations en milieu naturel.

Cette « Modélisation Métier » (modélisation des activités de l'expert) est suivie par une étape de modélisation objet des éléments du système d'information. La spécification de ce système d'information a contribué au recueil et à l'organisation des connaissances du domaine. UML a été choisi afin de spécifier le système de gestion des connaissances issues d'expérimentations en milieu naturel.

Ce travail de double formalisation, tant de la démarche d'expérimentation que des connaissances qu'elle permet d'acquérir, participe à l'aide à la modélisation du comportement des feux de forêt.

## **Apport des systèmes d'information dans la modélisation des incendies de forêt**

De nos jours, les systèmes d'information, de par la place de plus en plus importante qu'ils occupent au sein même des travaux de recherche, sont des outils indispensables aux scientifiques. De par son évolution constante, aussi bien logicielle que matérielle, l'informatique constitue une source inépuisable de moyens technologiques mis au service de la science. Les systèmes d'information sont particulièrement utilisés lorsqu'il s'agit de gérer l'information, de la traiter ou de la restituer sous une forme appropriée.

---

<sup>1</sup> Unified Modeling Language

---

Une notion en matière de systèmes d'information, de plus en plus utilisée dans les domaines scientifiques, est celle d'Environnement de Résolution de Problème (ERP). La spécificité des ERP est de fournir tous les outils informatiques nécessaires à la résolution d'une classe de problèmes (Gallopoulos et al., 1992). La résolution du problème se fait indépendamment de la structure informatique de l'outil utilisé et indépendamment des connaissances spécialisées du système étudié. La notion d'ERP a été retenue dans cette thèse et plus particulièrement l'un de ses composants, le système de gestion des connaissances. Ce dernier participe à la capitalisation des connaissances issues d'expérimentations en milieu naturel, afin de modéliser le comportement des incendies de forêt.

Les systèmes de gestion des connaissances participent à la création de « sites expérimentaux numériques ». Il permet de décrire toutes les caractéristiques de l'expérimentation (espace géographique, dispositif expérimental, mesure). Le déroulement de l'expérimentation est alors fondé sur une simulation informatique (Guarniéri et al., 1998, 2001a). Les paramètres du phénomène étant simulés par des scénarios et son comportement par un modèle, cette simulation spatiale et temporelle constitue une nouvelle étape dans la démarche de modélisation. Une fois le modèle conceptuel défini avec précision, ou du moins de la manière la plus satisfaisante à la problématique étudiée, les simulations informatisées peuvent se substituer aux expérimentations en milieu naturel ou en laboratoire. Il en résulte alors un gain de temps et d'argent, ainsi qu'une grande portabilité des expérimentations qui peuvent être conduites sur une multitude de sites expérimentaux (Sud-Est de la France, Nord-Ouest de l'Espagne...) et ce avec différents scénarios (période sèche, période très sèche...). Cependant, la nécessité d'avoir une documentation suffisante du site reste primordiale. La base de données et des connaissances servant aux modèles (modèle numérique de terrain du site, carte de la végétation, information météorologique spatialisée...) doit être la plus complète possible. Son élaboration doit donc faire l'objet d'une attention particulière si l'on veut que la simulation réponde aux attentes des expérimentateurs ou des modélisateurs.

## **Structure et composants du manuscrit de thèse**

Ce manuscrit se compose de trois parties, chacune structurée en deux chapitres.

La première partie de ce manuscrit a pour objet de présenter le système incendie de forêt, la démarche de modélisation pour l'analyser ainsi que le recours à la démarche de formalisation de connaissances pour assister le modélisateur. Le premier chapitre se propose d'analyser le système incendie de forêt. Nous étudions ensuite le recours aux expérimentations en milieu naturel pour la modélisation. Nous énonçons le concept de

zones ateliers (espace géographique, équipes de chercheurs, méthodologies, outils informatiques...) dédiées à l'étude d'un phénomène environnemental, qui peut constituer l'une des infrastructures pour sa modélisation. Nous analysons dans le deuxième chapitre la démarche de formalisation des connaissances et les qualités du langage de modélisation UML qui constitue un outil idéal pour la conception d'un système d'information fondé sur des connaissances environnementales. Nous présentons également dans ce chapitre les différents modes de traitement et de représentation de la connaissance, ainsi que sa possible intégration dans des systèmes d'information. Il est expliqué comment un Environnement de Résolution de Problème (ensemble d'outils et de méthodes spécifiques à un domaine) peut contribuer à l'aide à la modélisation, si peu évoquée en Géographie et en quoi celle-ci pourrait être un outil de première importance pour le modélisateur.

La deuxième partie présente l'acquisition des connaissances dans le domaine de l'expérimentation en milieu naturel pour l'étude du comportement d'un incendie de forêt et leur formalisation à l'aide d'UML. Le troisième chapitre présente un état de l'art non exhaustif des expérimentations en milieu naturel pour la modélisation du comportement des feux de forêt. Cette analyse bibliographique fait référence aux travaux réalisés par les équipes européennes et aux grands programmes internationaux de recherche dans ce domaine, notamment ceux menés en Australie, au Canada et en Afrique. Sont également étudiés les protocoles expérimentaux établis pour des campagnes de mesures sur des sites expérimentaux de grande échelle, composés de parcelles de plusieurs hectares. Nous présentons finalement dans ce chapitre le protocole de mesure élaboré par l'équipe «Gestion et Valorisation de l'Environnement» de l'Université de Nice-Sophia-Antipolis (UNSA), ainsi que les pratiques d'expérimentations menées dans les Alpes-Maritimes et les Landes, en collaboration avec l'ONF<sup>2</sup> de Valbonne et l'INRA<sup>3</sup> d'Avignon. Le quatrième chapitre traite de la formalisation des connaissances à l'aide du langage de modélisation UML. Un modèle conceptuel de la démarche expérimentale, issu de l'acquisition des connaissances présentée dans le troisième chapitre, est exposé. Nous avançons également dans ce chapitre, un modèle conceptuel du système de gestion des connaissances issues d'expérimentations en milieu naturel. Le modèle servira à la conception de l'outil informatique chargé d'assister le modélisateur.

La troisième partie présente, un prototype d'un système de gestion des connaissances issues d'expérimentations en milieu naturel : MODELLIS (MODELLED-Information System). Nous traitons la manière d'intégration de celui-ci dans ce que pourrait être une zone atelier pour l'étude du comportement des incendies de forêt dans le Sud de la France. Dans le cinquième chapitre, nous détaillons l'étape de prototypage

---

<sup>2</sup> Office National des Forêts

<sup>3</sup> Institut National de la Recherche Agronomique

---

du système d'information, en expliquant les choix technologiques faits pour un développement adapté le mieux possible à la capitalisation des connaissances. Les mesures effectuées lors de la campagne d'expérimentations en milieu naturel conduite par l'INRA d'Avignon et l'UNSA, servent de bases de données à MODELLIS. Un modèle expérimental statistique développé par l'UNSA dans le projet R&D européen « EFAISTOS » (projet n° ENV4-CT96-0299) est présenté, démontrant ainsi l'intérêt de la capitalisation des connaissances au sein d'un système d'information. Enfin, nous présentons dans le sixième chapitre, à titre purement didactique, ce que pourrait être le réseau de zones ateliers pour l'étude du comportement des feux de forêt en France et dans lequel s'intégrerait MODELLIS. Le réseau en question serait spécialisé dans l'analyse de la relation entre le comportement des incendies de forêt et les paramètres climatologiques. Bien que de nombreux rapprochements entre équipes scientifiques se soient déjà réalisés, la mise en place d'un tel réseau de zones ateliers constituerait un élément fédérateur des travaux réalisés à ce jour et à venir.

En conclusion, nous discuterons des apports de la formalisation de connaissances pour l'aide à la modélisation des incendies de forêt, de l'apport du langage UML dans le domaine de l'Environnement, de l'élaboration du prototype du système de gestion des connaissances (MODELLIS) et de son intégration au sein d'un ERP. Nous discuterons également des perspectives de formalisation des entités géographiques à l'aide d'un langage de modélisation plus adapté à la dimension spatiale, de l'apport d'UML pour formaliser l'étape de modélisation de la démarche modélisatrice et de la création d'une véritable zone atelier pour la modélisation des incendies de forêt.

## **Première Partie**

### **Analyse du système incendie de forêt et Démarche de formalisation des connaissances**



## Chapitre 1

### Analyse du système incendie de forêt et recours à l'expérimentation en milieu naturel

*C'est une méchante manière de  
raisonner que de rejeter ce qu'on ne  
peut comprendre.*

*Chateaubriand*

Nous étudions dans ce chapitre l'intérêt de recourir à l'expérimentation en milieu naturel et au concept de zone atelier comme cadre d'étude d'un système complexe tel que l'incendie de forêt. Il est important, avant même de parler de support d'étude, de définir en quoi le phénomène feu de forêt représente un système complexe qui nécessite la mise en place de zones ateliers spécialisées.

#### 1.1. Le système incendie de forêt

Un feu de forêt est un système complexe où des paramètres environnementaux sont en permanente interrelation. Cette notion de système et de relation entre sous-systèmes, permet de définir les connaissances sur les modèles : les paramètres et les lois qui régissent le phénomène.

Une analyse des paramètres intervenant lors des différents processus du phénomène (ignition ; propagation, saute ; extinction) peut être réalisée à l'aide de l'expérimentation, qui permet de procéder à une quantification de ces derniers. L'expérimentation intervient dans l'analyse des composants du système. Elle va permettre lors de l'observation, de recueillir les informations indispensables à la modélisation.

### 1.1.1. Notion de systèmes

Le dictionnaire Hachette (1997) donne les définitions suivantes d'un système :

1. Ensemble cohérent de notions, de principes liés logiquement et « considérés dans leur enchaînement,
2. Classification méthodique,
3. Ensemble organisé de règles, de moyens tendant à une même fin,
4. Ensemble d'éléments formant un tout structuré ou remplissant une même fonction. »

Tout objet, action, ensemble d'objets ou ensemble d'actions peuvent être analysés en ces termes. Un système n'est pas unique. Il dépend étroitement de son contexte et de son état à un instant  $t$ . Le système dépend non seulement de l'objet d'étude (angle de vue) mais aussi de sa propre image à l'instant de l'analyse (vision à l'instant  $t$ ). L'analyse systémique est donc orientée.

Forrester (1984) distingue deux sortes de systèmes :

- Système ouvert : les extrants n'ont pas d'influence sur les intrants, l'action passée n'a pas d'influence sur l'action future ; le système n'observe pas et ne réagit pas à son propre fonctionnement,
- Système à rétroaction (ou clos) : influencé par son propre comportement passé.

Un système est donc représentatif d'une multitude de données, informations, connaissances, actions et réactions. Il est donc très important, avant d'effectuer une analyse, de bien délimiter sa portée afin de ne pas alourdir le modèle. Le choix de la méthode d'analyse est donc fondamental car c'est lui qui va orienter l'analyse et déterminer les propriétés du système.

Un système est généralement perçu comme un simple instrument de description. Il peut aussi être avantageusement considéré comme un outil d'aide à la résolution d'un problème. Il permet de déterminer une ou plusieurs solutions. Certaines peuvent le résoudre en totalité, d'autres vont en proposer une résolution partielle. Certains systèmes peuvent donc s'avérer être des systèmes partiels, modules d'autres systèmes, c'est à dire des sous-systèmes de systèmes plus globaux. Afin de ne pas multiplier le nombre de solutions à l'analyse systémique, nous pouvons délimiter l'étude des sous-systèmes et ainsi alléger le modèle global.

L'analyse d'un phénomène complexe par découpage en sous-systèmes a favorisé la spécialisation des études et donc des équipes de chercheurs. La démarche scientifique évidente consiste à comprendre le phénomène en évitant l'interdisciplinarité. La recherche tend aujourd'hui à réunir les scientifiques et à créer des équipes multidisciplinaires afin d'avoir une vision plus globale du phénomène étudié et de proposer des modélisations complémentaires les unes par rapport aux autres.

L'énoncé d'un problème est souvent multidisciplinaire. Le système global, l'est tout aussi. Il sera donc composé de sous-systèmes en interaction et spécialisés dans chaque problématique, chaque sous-système ne pouvant être unique comme nous l'avons vu précédemment. Il est évident que les propriétés des sous-systèmes vont dépendre du degré d'analyse appliqué : plus le sous-système est important pour le système global, plus il sera détaillé.

L'environnement du système correspond à tout ce qui est extérieur au système. Les objets de cet environnement sont en interaction avec le système qui cependant, n'a pas de contrôle total sur ces objets. Nous dirons donc qu'ils font partie de l'environnement du système (Walliser, 1977).

### **1.1.2. La complexité du phénomène incendie de forêt**

Avant de définir si le système feu de forêt est un système complexe, il convient de définir la complexité elle-même. Un problème est considéré comme complexe lorsqu'il est défini par au moins l'une des trois caractéristiques suivantes (Barraqué, 1997) :

- Il y a plusieurs décideurs en jeu et leurs systèmes de valeurs sont différents, parfois opposés,
- Le contexte décisionnel est incertain,
- Les variables s'influencent réciproquement les unes les autres, au point qu'il y a rétroaction des conséquences sur les causes, ce qui rend difficile le découpage du problème en entités plus simples.

La complexité du système incendie de forêt a été maintes fois démontrée (Guarniéri, 1995 ; Dupuy, 1997). Elle revêt différentes formes :

1. Ses composants sont multiples et complexes et le système est alors difficilement descriptible dans sa totalité ; par exemple : les paramètres environnementaux qui influencent un feu de forêt sont nombreux (topographie, météorologie, végétation...),

2. Les interactions entre composants sont nombreuses et complexes ; par exemple : les paramètres topographiques ont une influence sur les paramètres météorologiques et sur le feu de forêt,
3. La dynamique du système est complexe et il est difficile de définir sa logique de comportement ; par exemple : les variations de la vitesse de propagation et du front de flammes sont difficilement explicables,
4. Les outils et méthodes à mettre en œuvre pour son étude sont nombreux et complexes ; par exemple : les expérimentations en milieu naturel sont difficiles à organiser et à conduire,
5. Les thèmes de recherche sur ce système sont nombreux et complexes ; par exemple : étude de la vitesse de propagation et de l'intensité des flammes,
6. Les acteurs du domaine sont nombreux ; par exemple : forestiers, climatologues, écologues, géographes, pompiers, physiciens, informaticiens,
7. Les interactions entre acteurs du domaine sont nombreuses et complexes ; exemple : difficulté de communication entre les chercheurs et les pompiers.

Le système incendie de forêt est donc un système complexe. Les lois physiques qui régissent ce phénomène peuvent être modélisées à différents degrés de complexité.

### **1.1.3. Analyse du système incendie de forêt**

L'étude du système incendie de forêt participe à différents thèmes de recherche en environnement :

- L'évolution de la composante de l'atmosphère, notamment du taux de CO<sub>2</sub> à cause des grands feux de forêt (Afrique du Sud, Amérique du Nord, Indonésie...),
- L'évolution des climats,
- L'amélioration du cadre de vie en préservant les espaces naturels,
- La gestion des ressources naturelles renouvelables.

Les interactions entre le système feu de forêt et son environnement sont multiples. Tous les facteurs n'agissent pas de façon similaire, en même temps et avec une même intensité sur les composants du feu. Il en est de même pour les actions du feu sur les paramètres environnementaux. Les interactions ne sont pas forcément liées à l'événement feu. Ainsi, les paramètres environnementaux jouent un rôle important dans la probabilité d'éclosion (haute température, vent fort, combustible sec) et les effets du feu peuvent modifier considérablement l'environnement (accélération de l'érosion, disparition de certaines espèces végétales).

Le système incendie de forêt se trouve au centre d'un système complexe formé par les interactions des facteurs suivants (Fig. 1.1) :

- L'Homme,
- Le climat,
- La topographie,
- La végétation,
- La faune.

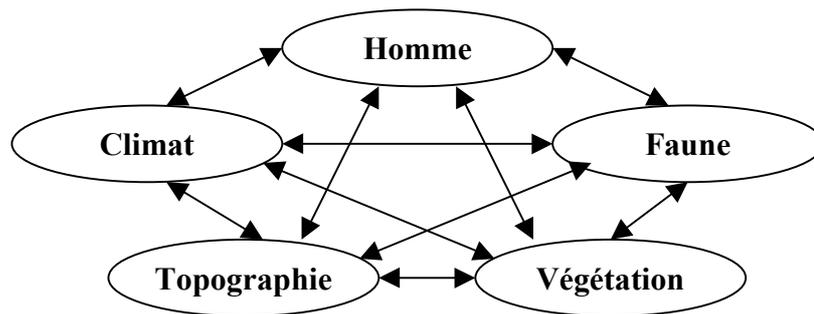


Figure 1.1 : L'environnement du système incendie de forêt

L'analyse spatio-temporelle du système feu de forêt permet, par analogie avec l'expérimentation en milieu naturel, de préparer la modélisation de la démarche expérimentale. Elle contribue également à définir le type de sites expérimentaux qui permettra d'étudier le phénomène.

Afin de mieux comprendre ces interactions et de bien définir les étapes de l'évolution d'un feu de forêt et de ses effets, nous décomposerons l'analyse en quatre étapes :

1. L'avant événement, comparable à la préparation de l'expérimentation,
2. La phase d'éclosion, comparable à l'allumage du combustible,
3. La phase de propagation, comparable au déroulement de l'expérimentation,
4. L'après événement, comparable à l'étude des effets du feu à court, moyen et long terme.

L'analyse portera sur les facteurs cités précédemment et leurs interactions sur le phénomène incendie de forêt (Fig. 1.2). Cette analyse s'appuie sur les travaux effectués par les différentes équipes de chercheurs qui ont étudié et expliqué le phénomène à travers le monde (Mc Arthur, 1967 ; Rothermel, 1972 ; Trabaud, 1989 ; Dupuy, 1991, 1997).

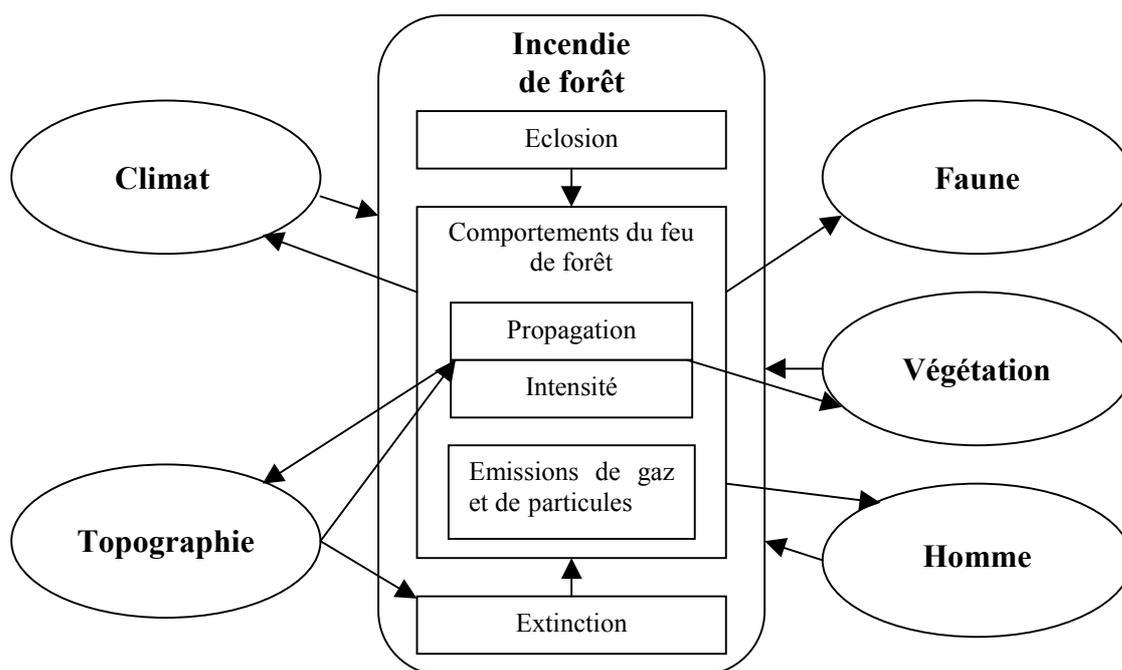


Figure 1.2 : Représentation graphique du système Incendie de Forêt

L'objet de cette analyse est de présenter les différentes interactions entre les paramètres environnementaux et le feu en fonction de son évolution, afin de préparer une modélisation de la démarche expérimentale et définir les critères de sélection d'une zone atelier. L'expérimentateur pourra se fonder sur cette analyse afin de décomposer les différentes étapes d'une expérimentation.

### 1.1.3.1. L'avant événement feu de forêt

Le climat, la topographie, l'Homme et la végétation jouent un rôle très important dans la probabilité d'écllosion d'un feu de forêt (Fig. 1.3). Le phénomène, bien qu'il ne se soit pas encore manifesté, est influencé par ces différents facteurs (Tab. 1.1). Un phénomène non observable peut être étudié au travers d'indicateurs environnementaux (De Marsily, 1994, 1997). L'incendie de forêt, avant son écllosion, peut donc être appréhendé au travers de facteurs jouant un rôle essentiel dans la probabilité d'écllosion (paramètres météorologiques, végétation...).

Cette approche avant l'incendie est particulièrement importante dans les études menées pour caractériser l'exposition d'un territoire au risque feu de forêt. Des secteurs peuvent donc être ainsi définis en fonction de la présence et de l'importance de certains facteurs (importance de l'interface forêt/habitat, végétation de type méditerranéen...). Il est également possible d'orienter l'étude sur les possibilités de non-survenance du

phénomène et d'étudier les capacités inhibitrices de certains facteurs (débroussaillage, mise en place d'un dispositif de surveillance, etc....).

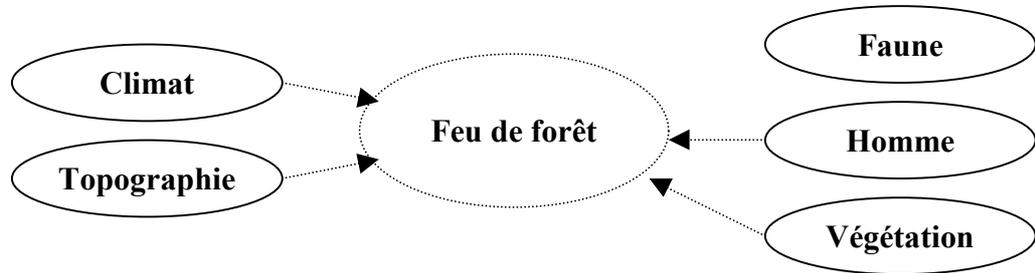


Figure 1.3 : L'avant événement feu de forêt

Tableau 1.1 : Influence des facteurs ci-dessous sur le feu de forêt, avant l'événement.

<i>Effet de</i>	<i>Effets</i>	<i>Exemples</i>
<b>Homme</b>	Indirect, +/-	<i>Activités anthropiques</i> : aménagement de routes DFCI, de réservoirs d'eau ; campagne de prévention ; étude du risque feu de forêt ; aménagement de coupures de combustible ; verre abandonné dans une forêt qui déclenche une mise à feu ; construction d'une route ; augmentation de l'interface forêt/habitat.
<b>Végétation</b>	Indirect, +/-	<i>Etat de l'écosystème</i> : inflammabilité de l'espèce qui va favoriser ou défavoriser un départ de feu.
<b>Climat</b>	Indirect, +/-	<i>Etat du climat local</i> : température haute ou basse qui va favoriser ou défavoriser la sécheresse du végétal.
<b>Topographie</b>	Indirect, +/-	<i>Etat du secteur</i> : exposition sud ou nord qui favorise ou défavorise la sécheresse du végétal.

### 1.1.3.2. Pendant la phase d'éclosion d'un feu de forêt

Cette phase permet de comprendre comment les facteurs environnementaux participent à l'éclosion d'un feu de forêt et à sa propagation durant les premières minutes (Fig. 1.4). Son analyse permet de définir avec précision les interactions entre le feu et les autres paramètres (Tab. 1.2 et 1.3).

L'analyse de cette étape peut donc servir de référence pour la préparation d'une expérimentation et le choix d'une zone atelier sur laquelle des tests sur l'éclosion d'un feu pourront être réalisés. L'objet de nombreuses recherches est de pouvoir aboutir à des modèles de propagation simulant l'évolution d'un feu durant les minutes qui suivent l'éclosion (le temps d'intervention des pompiers étant de l'ordre d'une dizaine de

minutes). Il est donc intéressant de dissocier l'écllosion d'un feu de sa phase de propagation.

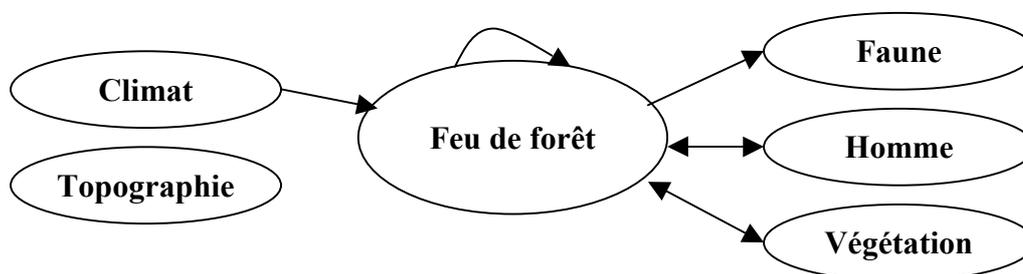


Figure 1.4 : Pendant la phase d'écllosion du feu de forêt

Tableau 1.2 : Influence du feu de forêt sur les facteurs ci-dessous, durant l'écllosion.

<b><i>Effet sur</i></b>	<b>Effets</b>	<b>Exemple</b>
<b>Homme</b>	Direct	<i>Atteinte aux personnes</i> : traumatisme
<b>Faune</b>	Direct	<i>Modification de l'écosystème</i> : mort ; blessures ; repli de populations.
<b>Végétation</b>	Direct	<i>Modification de l'écosystème</i> : mort du végétal.
<b>Climat</b>	Nul	
<b>Topographie</b>	Nul	

Tableau 1.3 : Influence des facteurs ci-dessous sur le feu de forêt, durant l'écllosion.

<b><i>Effet de</i></b>	<b>Effets</b>	<b>Exemples</b>
<b>Feu de Forêt</b>	Direct, +	<i>Modification du comportement</i> : augmentation progressive de l'intensité.
<b>Homme</b>	Direct, +	<i>Activités anthropiques</i> : mise à feu volontaire ou involontaire (travaux agricoles).
<b>Végétation</b>	Direct +/-	<i>Etat de l'écosystème</i> : espèce qui empêche ou qui permet le départ d'un feu.
<b>Climat</b>	Direct, +/-	<i>Etat du climat local</i> : foudre qui provoque un départ de feu ; pluie qui empêche le départ du feu.
<b>Topographie</b>	Nul	

### 1.1.3.3. Pendant la phase de propagation d'un feu de forêt

Elle est bien évidemment la plus intéressante à étudier en raison des nombreuses interactions entre le feu et les paramètres environnementaux (Fig. 1.5 ; Tab. 1.4 et 1.5). Elle est également la plus complexe et la moins facile à appréhender. Il est donc important de bien définir les objectifs de l'étude et de cibler les caractéristiques du

comportement à analyser (vitesse de propagation, intensité des flammes, émissions de gaz et de particules).

Cette phase est sans doute la plus étudiée. De nombreuses équipes de chercheurs à travers le monde se sont intéressées à son étude et à sa modélisation (France, Canada, Etats-Unis, Australie). Elle reste cependant la plus difficile à analyser en raison de la complexité des interactions entre les différents paramètres qui s'expriment lors de cette phase et des difficultés à observer le phénomène en milieu naturel et à le reproduire dans des conditions proches de la réalité (Dupuy, 1991).

L'analyse de cette phase permet donc de définir les paramètres à mesurer lors d'une expérimentation ou de définir les caractéristiques de la zone sur laquelle doivent avoir lieu les mesures. Le déroulement de l'expérimentation est donc dépendant des paramètres que l'on décide d'étudier.

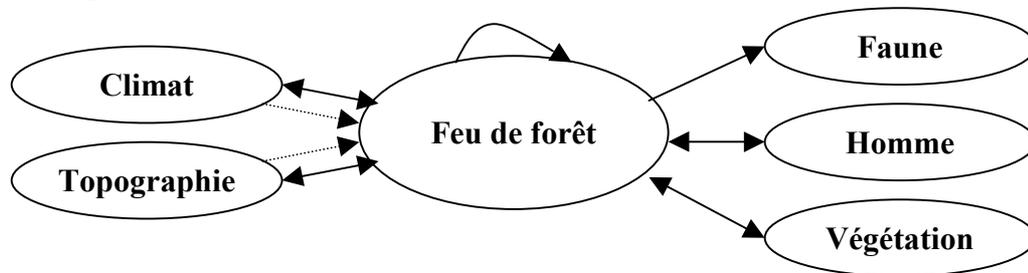


Figure 1.5 : Pendant la phase de propagation du feu de forêt

Tableau 1.4 : Influence du feu de forêt sur les facteurs ci-dessous, durant la propagation.

<b><i>Effet sur</i></b>	<b>Effets</b>	<b>Exemples</b>
<b>Homme</b>	Direct	<b><i>Atteinte aux personnes et aux biens</i></b> : mort ; blessures ; repli de population.
<b>Faune</b>	Direct	<b><i>Modification de l'écosystème</i></b> : mort ; blessures ; repli de population.
<b>Végétation</b>	Direct	<b><i>Modification de l'écosystème</i></b> : mort des végétaux ou germination de certaines espèces.
<b>Climat</b>	Direct, +	<b><i>Modification du climat local</i></b> : augmentation de la température locale ; diminution de l'humidité relative ; modification des vents locaux ; instabilité de l'air qui va favoriser la pollution des différentes couches de l'atmosphère ; modification de la composition de l'atmosphère.
<b>Topographie</b>	Direct	<b><i>Modification du secteur</i></b> : action sur le sol ; érosion accentuée.

**Tableau 1.5 : Influence des facteurs ci-dessous sur le feu de forêt, durant la propagation.**

<b>Effet de</b>	<b>Effets</b>	<b>Exemples</b>
<b>Feu de Forêt</b>	Direct, +	<b>Modification du comportement :</b> influence de l'intensité ; vent local induit par le feu et qui pousse le front de flammes.
<b>Homme</b>	Direct, -	<b>Activités anthropiques :</b> détection du départ de feu puis lutte contre le feu.
<b>Végétation</b>	Direct, +/-	<b>Etat de l'écosystème :</b> inflammabilité de l'espèce et siccité du végétal qui vont avoir une influence sur la vitesse de propagation, l'intensité du phénomène, ainsi que sur la composition des émissions de gaz.
<b>Climat</b>	Direct, +/-	<b>Etat du climat local :</b> vent qui pousse le front de flammes ; pluie qui ralentit la progression du feu.
	Indirect, +/-	<b>Influence sur les états des autres sous-systèmes :</b> température haute ou basse qui va favoriser ou défavoriser la siccité du végétal et donc la progression du feu.
<b>Topographie</b>	Direct, +/-	<b>Etat du secteur :</b> pente qui favorise la progression du front de flammes ; zone brûlée qui peut devenir un pare-feu en cas d'inversion du vent et stopper le front de flammes ; obstacles naturels qui ralentissent le front de flammes (barres rocheuses, lacs).
	Indirect, +/-	<b>Influence sur les états des autres sous-systèmes :</b> exposition sud ou nord qui favorise ou défavorise la siccité du végétal.

#### **1.1.3.4. Après l'événement feu de forêt**

Cette phase correspond à l'étude des effets du feu. Bien qu'il n'agisse plus directement sur l'environnement, le feu a une action indirecte à court, moyen ou long terme sur celui-ci (Fig. 1.6 ; Tab. 1.4 et 1.6).

Les effets du feu restent un thème de recherche de premier ordre et de nombreuses équipes de chercheurs travaillent sur les conséquences des incendies de forêt sur le plan écologique, économique ou social. Cette phase n'est donc pas négligeable même s'il a été volontairement décidé de ne pas la traiter dans la suite de nos travaux.

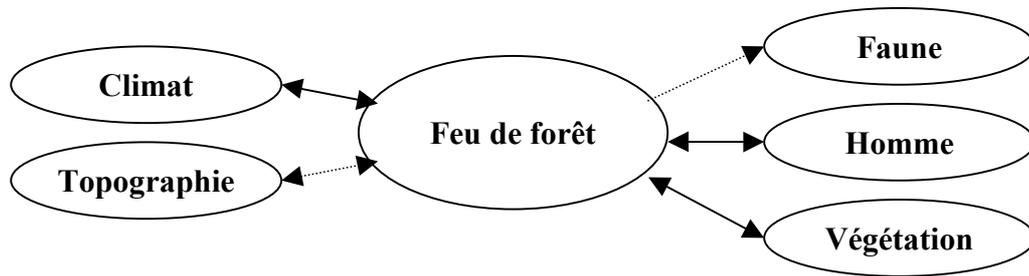


Figure 1.6 : Après l'événement feu de forêt

Tableau 1.6 : Influence du feu de forêt sur les facteurs environnementaux, après l'événement.

<i>Effet sur</i>	<i>Effets</i>	<i>Exemples</i>
<b>Homme</b>	Indirect	<i>Atteinte aux personnes et aux biens</i> : traumatismes ; déplacement de population ; influences sur le tourisme, sur les activités socio-économiques d'une commune.
<b>Faune</b>	Indirect	<i>Modification de l'écosystème</i> : migration de populations ;
<b>Végétation</b>	Indirect, +/-	<i>Modification de l'écosystème</i> : disparition d'une espèce ; apparition d'une autre espèce ; développement (Ex : ciste)
<b>Climat</b>	Indirect, +/-	<i>Modification du climat local</i> : augmentation de la vitesse du vent sur les zones brûlées.
<b>Topographie</b>	Indirect	<i>Modification du biotope</i> : érosion anticipée des sols brûlés.

## 1.2. La modélisation du comportement des feux de forêt

Le comportement des feux de forêt est étudié par le biais de la démarche de modélisation qui se décompose en trois phases (Pavé, 1994, 1997) :

1. L'expérimentation,
2. La modélisation,
3. La validation.

Nous reprenons et détaillons chacune de ces phases.

### 1.2.1. L'expérimentation : un outil de modélisation

L'expérimentation consiste à provoquer un phénomène pour l'étudier. La démarche méthodologique de l'expérience scientifique est établie par le chercheur. Cette méthodologie de l'expérimentation, tout comme le phénomène dont elle se veut représentative, est entièrement modélisable. Avant même d'étudier les lois qui régissent un phénomène, il est important de définir une abstraction, un modèle de l'expérimentation élaboré pour étudier celui-ci. Une décomposition du processus expérimental permet alors de définir les différents éléments qui le composent. L'analyse des entités de la démarche expérimentale et leurs interactions permettra de définir un modèle optimal de reproductibilité du phénomène. Les sources d'erreurs doivent également figurer dans le processus expérimental (Ruegg, 1983).

Parce que le phénomène n'est pas uniforme en tout point de l'espace et que son comportement est fortement lié au site géographique sur lequel il s'exprime, il est important de proposer un modèle unifié de la démarche expérimentale. En effet, si le phénomène doit être étudié sous ses différents aspects, un nombre suffisant d'expériences scientifiques suivant le même modèle doit être réalisé. Et, puisqu'une expérimentation ne peut pas toujours être reconduite sur le même site géographique (c'est le cas pour les feux expérimentaux), son modèle de l'expérimentation doit être dans une certaine mesure, indépendant de l'espace. De son fort degré d'abstraction dépendra le degré de reproductibilité de l'expérimentation.

L'expérimentation est liée au dispositif de mesure mis en place. Les appareils de mesures devront avoir les mêmes caractéristiques. Et, même si le dispositif de mesure varie d'une expérience à l'autre, il ne peut être fondamentalement différent. L'expérience ne peut être reconduite que si le protocole de mesures est appliqué totalement ou partiellement. On ne peut modifier fondamentalement un protocole dans le temps. En revanche, on peut se permettre de ne prendre en compte que partiellement ou plus superficiellement le phénomène, en mettant en place un dispositif de mesures plus léger que celui décrit dans le protocole. Cette version de dispositif devra toutefois comporter les mêmes caractéristiques afin que les mesures réalisées soient comparables aux autres données mesurées.

L'expérimentation est aussi, dans une certaine mesure, un reflet de la réalité sur la modélisation. Elle représente un lien entre la réalité du phénomène et le côté abstrait de la démarche scientifique. Bon nombre de méthodes de modélisation font appel aux sciences mathématiques. Il est vrai que les processus physiques sont souvent représentés dans les modèles, par des équations mathématiques souvent trop abstraites pour que les non-initiés puissent comprendre en détail, ce que le scientifique a souhaité modéliser. L'expérimentation permet alors de fournir des données directement issues de la réalité,

masquant ainsi le côté abstrait du modèle plutôt utilisé comme une « boîte noire ». Elle permet donc de s'affranchir, en quelque sorte, du modèle et des lois du phénomène.

### **1.2.2. Les formes de modélisation du comportement du feu de forêt**

Dupuy (1997) rappelle les trois grands types de démarches pour l'élaboration de modèles de propagation du feu, décrites notamment par Van Wagner (1985), Catchpole et De Mestre (1986) et Weber (1991) :

- La modélisation empirique,
- La modélisation physique,
- La modélisation semi-empirique.

#### ***1.2.2.1. La modélisation empirique***

Elle permet de déterminer et de quantifier les relations entre les différents paramètres. Cette modélisation repose à la fois sur l'observation du phénomène et sur les mécanismes qui le composent (Van Wagner, 1985). Ce type de modélisation est fondé sur les deux types d'expérimentations, l'une en laboratoire, l'autre en milieu naturel. La qualité de la modélisation dépend étroitement des paramètres et du nombre d'expérimentations réalisées. Les modèles établis sont évolutifs. En effet, puisqu'ils dépendent des expérimentations, ces modèles peuvent être affinés ou élargis à d'autres conditions expérimentales. Les modèles peuvent être utilisés afin de prédire partiellement le phénomène. Même si la modélisation statistique permet de définir les facteurs influant sur le feu, elle n'explique pas la relation entre les paramètres et le comportement du feu. La qualité de la relation peut cependant être quantifiée afin de définir les paramètres jouant les plus grands rôles lors d'un incendie de forêt. Le développement de ces modèles étant étroitement lié aux données sur lesquelles ils se fondent, il est difficile de les extrapoler à un autre espace géographique.

#### ***1.2.2.2. La modélisation physique***

Elle est principalement fondée sur les expérimentations effectuées en laboratoire. En effet, l'objet de cette modélisation est d'expliquer le phénomène par certains facteurs (Catchpole et De Mestre, 1986). Un contrôle quasi absolu de ces paramètres est donc nécessaire pour déterminer les lois physiques qui régissent le phénomène. Cette qualité de contrôle ne peut être atteinte qu'en laboratoire par validation sur banc d'essai. La modélisation physique permet de définir et d'expliquer les relations entre paramètres, en

s'intéressant plus particulièrement à la composante physique et chimique. Le modélisateur fait donc abstraction de la composante géographique pour se consacrer essentiellement au feu de forêt en tant que phénomène physico-chimique. Ces modèles sont difficilement exploitables dans le cadre de la prévision des incendies. Toutefois, ils permettent de mettre en évidence et d'expliquer certains aspects du phénomène (pyrolyse, transfert d'énergie, émission de suie....).

### ***1.2.2.3. La modélisation semi-empirique***

A l'interface entre les deux méthodes précédemment décrites, la modélisation semi-empirique repose à la fois sur l'observation du phénomène étudié au cours d'expérimentations et sur la prise en compte d'un minimum de principes et de mécanismes physiques intervenant dans le phénomène. Les modèles ainsi construits sont aptes à prédire certains aspects du phénomène ou à défaut, à en interpréter certaines observations. Les modèles semi-empiriques ont pour principal représentant le modèle de Rothermel (1972).

### ***1.2.2.4. Complémentarité de ces trois formes de modélisation***

Les trois formes de modélisation précédemment définies sont complémentaires. Parce qu'il existe différents objectifs de modélisation (les phénomènes étudiés et les besoins des utilisateurs étant disparates), un seul modèle ne peut répondre à l'ensemble des demandes des services opérationnels, il est important de poursuivre les recherches pour établir différents modèles. A un besoin correspond un modèle. Bien souvent, les modèles descriptifs suffisent pour fournir une première information sur le devenir d'un incendie de forêt, même s'ils ne sont pas explicatifs.

Les trois formes de modélisation sont utilisées dans les différents thèmes de recherche sur les incendies de forêt. Parce qu'ils couvrent plusieurs aspects de la modélisation (description, explication, prédiction), ces trois types de modèles sont complémentaires. En effet, le choix de développer ou d'utiliser un modèle dépend étroitement du type de données pouvant être mesurées.

Ces modèles ont déjà été implémentés dans des systèmes de simulation du comportement des incendies de forêt (Andrews, 1998 ; Hargrove et al., 2000). Associés à d'autres modèles tels que les méthodes d'interpolation des paramètres climatologiques ou les modèles de combustibles, ils participent à la création de véritables systèmes de modèles (Guarniéri, 1995).

### **1.2.3. La validation des modèles de propagation**

Plus qu'une simple validation de modèles, la démarche de validation consiste à démontrer que les objectifs de la modélisation ont été totalement ou partiellement atteints. Ainsi, afin d'être évalué, un modèle doit être replacé dans son contexte initial. Toute la démarche modélisatrice doit alors être analysée, en fonction des objectifs que le modélisateur s'était fixés.

La qualité de la prévision dépend de la validité de la mesure sur le terrain et de l'aptitude du modèle à décrire ou à expliquer le phénomène. Toutes les mesures effectuées lors des expérimentations ne peuvent pas toujours être reconduites dans des conditions de véritables incendies de forêt. En raison d'une insuffisance ou d'une absence de données, l'exploitation d'un modèle opérationnel de prédiction du comportement d'un feu de forêt peut être compromise.

La validation des modèles repose sur les problèmes de calage par rapport à la réalité (De Marsily, 1994, 1997) ou par rapport à des résultats d'expérimentations (Buscaglia, 1983).

Nous avons vu que les expérimentations étaient une composante essentielle à la modélisation du système incendie de forêt. Nous allons donc étudier plus en détail cet aspect de la modélisation.

## **1.3. Les expérimentations pour l'étude du comportement des feux de forêt**

L'expérimentation est induite par la modélisation du phénomène et elle contribue à valider un modèle. Sans une approche théorique des processus à modéliser, il est impossible de déterminer quels sont les paramètres susceptibles d'intervenir dans le phénomène. Une simple observation du comportement d'un phénomène ne peut aboutir qu'à une modélisation descriptive, certes nécessaire, mais souvent insuffisante.

Si nous voulons modéliser de manière explicative un phénomène, il est important d'appliquer une métrologie sur celui-ci. Bien sûr, les mesures ne sont effectuées seulement si les paramètres à mesurer ont été déterminés par avance, après réflexion apportée sur les processus générateurs du comportement observé.

### **1.3.1. Typologie des sources d'information pour la modélisation du comportement des feux de forêt**

Afin de modéliser le comportement du feu, les modélisateurs ont recours à différentes sources d'information :

- Le suivi de vrais feux de forêt,
- L'utilisation de secteurs de brûlages dirigés,
- L'expérimentation en milieu naturel,
- L'expérimentation en laboratoire,
- La simulation d'incendies de forêt assistée par ordinateur.

A ce jour, les deux principales sources de données sont issues des expérimentations en laboratoire et des mesures effectuées sur des parcelles expérimentales. Une typologie du cadre des expérimentations (Tab. 1.7) permet de définir le degré de pertinence que l'on souhaite atteindre. Toutefois, la qualité de la mesure étant fortement dépendante du type d'expérimentation, il convient de définir à l'avance les caractéristiques de la modélisation.

Nous nous intéressons plus particulièrement dans ce chapitre, aux expérimentations en milieu naturel. C'est grâce à ces expérimentations qu'ont pu être élaborés la plupart des modèles de propagation existants (Mc Arthur, 1967 ; Rothermel, 1972 ; Van Wagner, 1985 ; Albin, 1985, 1986).

### **1.3.2. L'expérimentation en laboratoire**

Elle consiste à reproduire artificiellement le phénomène sur un banc d'essai de quelques m<sup>2</sup>. L'objet de ces expériences scientifiques est d'étudier le phénomène et d'analyser son comportement. Les bancs d'essais sont lourdement instrumentés (thermocouples, caméra InfraRouge, système de pesée...), afin de mesurer tous les paramètres de comportement du feu (vitesse de propagation, angle et température de la flamme...). Les expérimentations sont réalisées en milieu homogène. Les variations de la température de l'air, de la vitesse du vent et de la charge de combustible, la teneur en eau, capitales dans le comportement d'un feu de forêt, sont mesurées lors d'expérimentations en laboratoire.

Toutes les conditions expérimentales sont parfaitement contrôlées par l'expérimentateur. Les valeurs des paramètres liés au combustible, tels que le type et la charge de combustible, sont décidées par avance. En effet, il est important d'avoir une quantification très précise de tous les paramètres agissant sur le feu. Leurs interactions

avec les paramètres de comportement du feu sont alors plus finement étudiées afin de mieux analyser et comprendre les mécanismes physiques et chimiques.

Les expérimentations en laboratoire sont principalement réalisées pour étudier en détail l'intensité du phénomène, plus facile à appréhender sur banc d'essai. L'objet de ces expériences n'est pas de simuler l'intensité d'un vrai feu de forêt, beaucoup trop complexe à analyser, mais d'étudier les lois fondamentales qui régissent le phénomène.

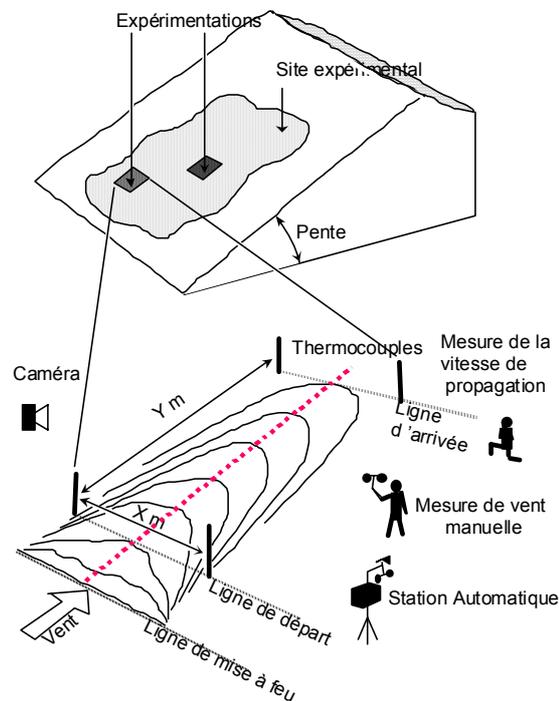
**Tableau 1.7. : Typologie du cadre des expérimentations**

	<b>Abstraction par rapport au réel</b>	<b>Météorologie</b>	<b>Facilité d'instrumentation</b>	<b>Paramètres étudiés</b>
<b>Feux de forêt</b>	Très faible	Très légère	Très difficile	Feu de forêt, Végétation, Climatologie, Topographie, Homme
<b>Brûlages dirigés</b>	Faible	Légère	Assez difficile	Feu de forêt, Végétation, Faune, Climatologie, Topographie
<b>Expérimentation en milieu naturel</b>	Assez faible	Assez lourde	Difficile	Feu de forêt, Végétation, Faune, Climatologie, Topographie
<b>Expérimentation en laboratoire</b>	Forte	Lourde	Facile	Feu, Végétation, Climatologie, Topographie
<b>Simulation assistée par ordinateur</b>	Très forte	Très lourde	Très facile	Feu de forêt, Végétation, Faune, Climatologie, Topographie, Homme

### 1.3.3. L'expérimentation en milieu naturel

Le phénomène est provoqué volontairement en milieu naturel sur une parcelle expérimentale pouvant atteindre plusieurs hectares. L'objet de ces expérimentations consiste à étudier et à analyser le phénomène dans des conditions normales de propagation. Les parcelles sont alors instrumentées afin de recueillir un maximum

d'informations sur les paramètres agissant sur le feu (paramètres climatologiques, topographiques, combustible...) (Fig. 1.7).



**Figure 1.7 : le site expérimental pour l'étude de la vitesse de propagation du front de flammes**

En raison des difficultés à appréhender le phénomène, dues à l'échelle spatiale choisie et à leur grande variation spatiale et temporelle, beaucoup de paramètres de comportement du feu ne sont que partiellement mesurés (vitesse de propagation et intensité des flammes). La plupart d'entre eux sont estimés par des observateurs durant l'expérimentation. Il en est de même des paramètres végétaux impossibles à quantifier précisément sur la totalité de la parcelle expérimentale. Ceux-ci, telle la charge de combustible ou la teneur en eau de la plante, sont alors estimés en fonction de mesures ponctuelles effectuées avant et après l'expérimentation. Les données ponctuelles sont alors utilisées pour calculer une moyenne sur l'ensemble de la parcelle.

Toutefois, la composante climatologique peut être étudiée en détail durant ces expérimentations ; c'est en effet l'un des facteurs les plus influents sur la vitesse de propagation. Les paramètres météorologiques et plus particulièrement la vitesse du vent, sont mesurés afin de déterminer et quantifier leurs relations avec les paramètres de comportement du feu. Ils font ainsi l'objet d'une métrologie particulièrement précise.

Les expérimentations en milieu naturel sont réalisées afin d'étudier en détail la propagation du phénomène, très proche de la réalité dans ce genre d'expériences scientifiques. En effet, à cette échelle spatiale, les expérimentations en milieu naturel

sont comparables à des feux de forêt de faible ou moyenne intensité, les expérimentations ne pouvant être conduites les jours de risque d'incendie sévère (sécheresse, vent fort...). L'étude en détail de la composante climatologique permet donc d'étudier l'influence des paramètres climatologiques sur un « vrai » feu, et de quantifier celle-ci.

#### **1.3.4. Complémentarité de ces deux types d'expérimentations**

Ces deux types d'expérimentations sont nécessaires à la modélisation du phénomène. Alors que l'hétérogénéité des paramètres est trop forte sur une parcelle expérimentale pour étudier le phénomène physique, le banc d'essai peut fournir une homogénéité de certains paramètres (combustible) ou peut faire abstraction d'une certaine classe de paramètres (météorologie).

Parce qu'une expérimentation conduite en milieu naturel est comparable à un vrai feu de forêt, l'étude et l'analyse des variations spatio-temporelles des paramètres permet de comprendre le comportement des incendies de forêt, et de déterminer ces différentes formes d'expressions (propagation, intensité, émission de gaz et de fumée).

Le concept de zone atelier, support de l'expérimentation, se présente comme étant particulièrement bien adapté à l'analyse des systèmes complexes. La zone atelier doit être une composante de l'analyse systémique au même titre que les méthodes employées.

### **1.4. La zone atelier comme outil d'étude d'un système complexe**

Nous proposons dans cette thèse, de définir les modalités de constitution d'un réseau de zones ateliers sur le Sud de la France afin d'organiser les connaissances et modèles acquis ou développés sur cette zone. Nous nous intéressons plus particulièrement aux expérimentations sur le comportement des feux de forêt menées en milieu naturel et sur les méthodes d'interpolation des données climatologiques (température et humidité relative de l'air, données de vent). La portée de cette approche méthodologique peut évidemment être étendue à d'autres thèmes de recherche dans le domaine des incendies de forêt. D'autres types de coopérations entre équipes sont possibles afin d'élargir le plus possible ce concept de zone atelier.

L'approche interdisciplinaire dans les zones ateliers n'est cependant pas nouvelle. En effet les interactions thématiques dans le domaine de la recherche en environnement ne sont pas rares (Mathieu, 1992 ; Godard, 1997). Les différentes disciplines ont

souvent œuvré ensemble et coordonné leurs équipes et travaux pour analyser et comprendre un phénomène naturel sous différents points de vue.

L'approche spatio-temporelle du phénomène à différentes échelles de temps et d'espace est également parmi les domaines les plus importants de la recherche en environnement. Même si des réflexions sur l'organisation et l'emboîtement des échelles ont déjà été menées, elles restent une préoccupation toujours d'actualité.

Le concept de zone atelier : « Long Term Ecological Research » (LTER), né aux Etats-Unis dans les années 70, est à l'origine du programme « Zones Ateliers de recherche sur l'environnement » du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

#### **1.4.1. Les « Long Term Ecological Research » (LTER)**

Les LTER ont été financées dès le début des années 80 par la NSF<sup>1</sup>, l'équivalent en France du CNRS. Ce programme de recherche s'est inspiré des nombreux programmes d'études des écosystèmes initiés dans les années 60. Des sites expérimentaux furent établis afin d'analyser et comprendre les interactions entre les écosystèmes et les activités humaines. Des études ont été initiées afin de comprendre le lien entre l'utilisation des ressources non renouvelables et les bouleversements dans les écosystèmes existants.

Au départ, cinq sites pilotes ont été choisis et financés afin de mener une étude de faisabilité sur l'apport de ce nouveau concept, dans la recherche en environnement. Aujourd'hui, le programme LTER regroupe 24 zones ateliers aux Etats-Unis (source : site web LTER).

Les objectifs des LTER sont :

- L'analyse à long terme des phénomènes écologiques spécifiques à un site,
- La comparaison d'observations à travers l'étude de divers écosystèmes,
- La mise en place de sites d'observation instrumentés.

L'approche des LTER s'est révélée très efficace dans la comparaison de processus similaires, dans diverses conditions. Ces LTER ont permis aux scientifiques de comprendre les étapes de ces processus environnementaux à travers l'étude de différents milieux.

---

<sup>1</sup> National Science Foundation

Un effort de formalisation des connaissances sur ces sites a permis la création de bases de données pour la modélisation des phénomènes environnementaux étudiés (Henshaw, 1997 ; Holmes et Poole, 1997 ; Michener, 1997 ; Porter, 1997 ; Statford, 1997 ; Swain, 1997).

Des modifications du programme ont été progressivement suggérées afin de mieux répondre à la demande scientifique. Les LTER doivent désormais mettre en place des campagnes de mesures à plus long terme afin d'analyser les effets durables d'un phénomène environnemental et d'en déduire un modèle global applicable sur plusieurs sites et à différentes échelles de temps et d'espace.

Les décideurs et gestionnaires de ressources naturelles doivent être associés à ces programmes de recherche. L'un des objectifs assigné à ce programme est de fournir la meilleure information possible afin de fonder les décisions sur des prédictions issues de l'expérience. L'information la plus utile en terme de gestion de l'environnement est définie comme suit :

1. Les données sont assez suffisantes pour distinguer les variations à court terme de celles à long terme,
2. Les données sont recueillies dans différentes conditions afin de fournir aux scientifiques et décideurs des intervalles de conditions dans lesquels les analyses des résultats peuvent être extrapolées et appliquées,
3. Les données doivent également être caractéristiques d'autres domaines telles que les sciences économiques ou sociales,
4. La qualité des données doit être évaluée afin de crédibiliser leur utilisation par les scientifiques ou les décideurs.

Afin de prendre en compte les diverses suggestions établies par les experts chargés de la validation de ce programme de recherche, le programme LTER s'est poursuivi aux Etats-Unis par la création d'un réseau de sites expérimentaux : le LTER Network (LTERN). En plus des objectifs cités précédemment, le programme LTERN s'est vu assigner les suivants :

- Ajouter des sites expérimentaux pour enrichir la panoplie d'écosystèmes existants,
- Mettre en valeur la dimension spatiale du programme afin de rendre applicable l'apprentissage acquis sur d'autres sites expérimentaux,
- Etendre les recherches à d'autres disciplines telles que les sciences physiques ou les sciences sociales,
- Développer de nouvelles technologies pour améliorer la métrologie existante,

- Utiliser ces recherches dans le cadre de programmes d'enseignement spécialisés.

Le programme LTER a inspiré d'autres pays à travers le monde (Royaume-Uni, Chine, France...). C'est grâce aux recherches initiées aux Etats-Unis ainsi qu'aux améliorations et recommandations suggérées par les experts chargés d'évaluer les recherches en cours, que sont nés les programmes suivants :

- Le « United Kingdom's Environmental Change Network » (ECN) au Royaume-Uni,
- Le « Chinese Ecological Research Network » (CERN) en Chine,
- Les « zones ateliers de recherche sur l'environnement » en France.

#### **1.4.2. Le programme « zones ateliers de recherche sur l'environnement » du CNRS**

Nous avons vu que le système feu de forêt et par analogie les expérimentations en milieu naturel, sont complexes du point de vue du nombre de facteurs (topographiques, climatologiques...) et d'échelles spatiales et temporelles (du versant au massif... ; perte immédiate de la forêt, effet du CO<sub>2</sub> dégagé dans l'atmosphère...) qui le caractérisent. Il est donc impossible de l'étudier dans sa globalité. Il convient dès lors, de mettre en place un réseau d'expérimentations qui permettra de décomposer le système, en sous-systèmes dont chaque expérimentation sera spécialisée ou non (mesure des émissions de gaz dans l'atmosphère, mesure de l'intensité du front de feu...).

A chaque site expérimental ou parcelle expérimentale sera associée une météorologie appropriée. La constitution d'un réseau de sites expérimentaux, que nous appellerons Zone Atelier en accord avec les concepts énoncés dans le Programme « Environnement, Vie et Sociétés » (PEVS) du CNRS (source : site web CNRS/PEVS), répond donc à une réelle attente des chercheurs du domaine des feux de forêt.

Afin d'unifier les recherches menées par les différentes équipes de chercheurs en France, en Europe et à travers le monde (Australie, Canada, Etats-Unis), il convient d'organiser les connaissances et données acquises afin de les rendre comparables, cohérentes et bien évidemment complémentaires. La recherche en modélisation du comportement des feux de forêt se dote depuis quelques années de différents sites expérimentaux dans le monde.

#### **1.4.2.1. Description d'une zone atelier**

Afin de décrire avec précision le concept de zone atelier (Fig. 1.8), il est important de définir les différentes notions énoncées :

- **La zone atelier** : c'est un espace géographique souvent à l'échelle régionale présentant des caractéristiques intéressantes dans une problématique scientifique ; par exemple dans une problématique de modélisation du comportement des feux de forêt, les départements du Sud de la France comme les Alpes-Maritimes, le Var et les Landes, constitueraient des zones ateliers idéales « à cause » de leur grand nombre de feux de forêt enregistré chaque année ; c'est également dans le Sud de la France que les feux font le plus de dégâts.
- **Le site expérimental** : la zone atelier se décompose en sites expérimentaux (ou sites ateliers) instrumentés présentant des propriétés recherchées par les scientifiques (par exemple un massif forestier, un type de relief ou un type de végétation...) ; différents types de sites expérimentaux sont étudiés dans cette thèse : un site du département des Landes dans lequel ont été réalisées des expérimentations en milieu naturel, un site du département des Alpes-Maritimes dans lequel ont été définies des parcelles expérimentales à l'intérieur des secteurs de brûlages dirigés et dont le protocole de mesure était proche des expérimentations en milieu naturel, ainsi qu'un site du département du Var dans lequel ont été réalisés des essais d'interpolations de paramètres climatologiques ; cet ensemble de sites non exhaustif, peut être complété par d'autres sites expérimentaux spécialisés.
- **La parcelle expérimentale** : à l'intérieur d'un site expérimental, nous retrouvons la parcelle expérimentale instrumentée sur laquelle nous allons observer et/ou reproduire le phénomène (le feu de forêt dans notre problématique) ; sa superficie varie de quelques mètres carrés à quelques hectares ; le type de métrologie mis en place dépend des propriétés du phénomène à étudier (vitesse de propagation du front de feu, intensité des flammes...) ; généralement, les parcelles d'un site sont semblables afin de respecter une certaine unicité dans les expérimentations et permettre une analyse plus cohérente et une modélisation bien ciblée.
- **Le réseau de zones ateliers** : nous pouvons organiser ces réseaux à différentes échelles : internationales, nationales, régionales ou départementales. La constitution de ces réseaux permet de partager les connaissances à ces différentes échelles. L'information n'est donc plus l'exclusivité d'un ensemble

de chercheurs qui l'a recueillie, mais est mise à la disposition de la communauté scientifique du domaine.

Les réseaux de zones ateliers permettent ainsi, non seulement de capitaliser et partager les connaissances, mais aussi d'enrichir les groupements scientifiques d'idées nouvelles apportées par d'autres équipes, soucieuses de faire partager les informations issues de leur zone atelier. Le rapprochement scientifique est donc capital pour qu'une avancée dans un domaine soit possible. Plus qu'un simple échange, il est nécessaire de mettre en place de véritables coordinations d'équipes afin d'accroître le potentiel de recherche ou de déterminer de nouveaux thèmes de recherche en fonction du regroupement de spécialités.

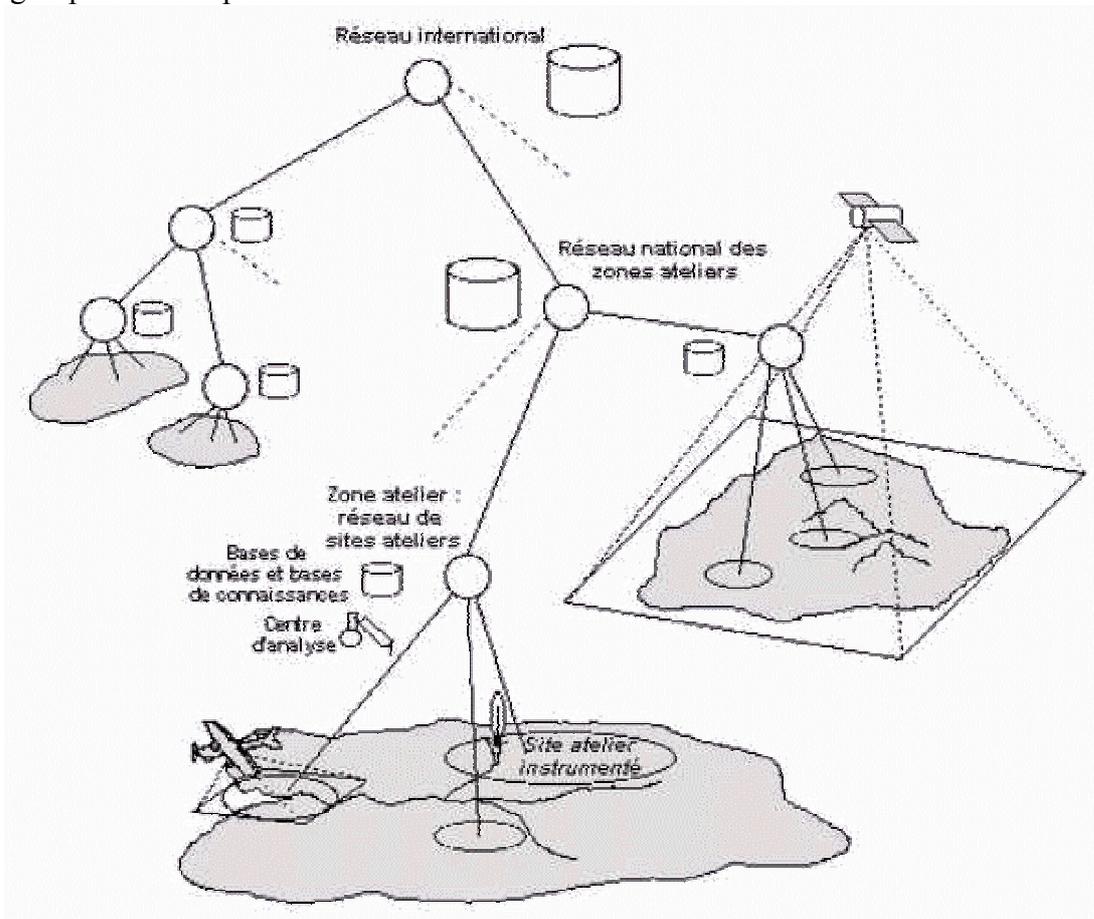


Figure 1.8 : Le concept de zone atelier (source : site web du CNRS/PEVS)

Les réseaux de zones ateliers participent également aux transferts de modèles d'un domaine vers un autre. La spécialisation d'un modèle peut s'avérer être un handicap au transfert méthodologique. L'objet du réseau est donc de mettre à la disposition de la communauté scientifique, non seulement l'ensemble des données, des informations et des connaissances, mais aussi les modèles développés. Ainsi, une équipe de chercheurs peut décider de transférer un modèle spécialisé à d'autres types de problématique ; par

exemple : comment un modèle de propagation de feux de forêt développé pour la région méditerranéenne pourrait-il être utilisé dans le département des Landes ?

La zone atelier se doit d'être une interface entre différentes disciplines. Différentes équipes de chercheurs sont amenées à travailler ensemble, en même temps et sur une même zone dans le but d'appréhender un phénomène par une approche multidisciplinaire. La complémentarité scientifique doit permettre d'étudier de manière globale et le plus précisément possible le phénomène et son environnement. Cette approche permet, non seulement de recueillir des informations sur les différents sites de la zone atelier, mais aussi de varier la métrologie de celle-ci ; chaque métrologie étant spécialisée dans une discipline.

#### ***1.4.2.2. Extension du concept de zone atelier***

Nous avons vu que la zone atelier avait une réalité physique correspondant au terrain sur lequel elle est définie. Cependant, nous proposons, dans cette thèse, d'ajouter deux autres notions au concept de zone atelier défini par le CNRS :

- Le laboratoire,
- La zone atelier « numérique » ou « virtuelle » (Guarniéri et al., 2001a).

Même si ces deux entités n'ont pas de réalité terrain, elles participent pleinement à la problématique d'étude du comportement des feux de forêt.

##### *1.4.2.2.1. Le laboratoire de recherche*

Le laboratoire peut être inclus dans une zone atelier en tant que zone atelier à part entière. En effet, les expérimentations en laboratoire peuvent se présenter sous différentes formes : une parcelle expérimentale (quelques paramètres sont modifiés, par exemple la charge de combustible ou la pente), un site expérimental (on s'intéresse à d'autres types de mesures où un paramètre fondamental a été modifié, par exemple un vent artificiel), une zone atelier (tous les paramètres sont modifiés afin d'étudier le phénomène dans un autre environnement).

De plus, les laboratoires constituent des plates-formes indispensables à la modélisation. C'est souvent en laboratoire que sont développés les modèles théoriques. Bien avant de passer aux expérimentations en milieu naturel, les scientifiques étudient le phénomène en laboratoire, plus facilement simulé et observé. Les laboratoires sont donc à inclure dans les réseaux de zones ateliers.

#### 1.4.2.2.2. La zone atelier « numérique » ou « virtuelle »

Un autre type de zone atelier peut être évoqué ici : la zone atelier « numérique ». Composée de données numérisées, elle présente les mêmes caractéristiques que les autres zones ateliers. Le phénomène est dans ce cas simulé à l'aide de modèles de propagation sur des parcelles expérimentales numériques. Le phénomène est observé en fonction de scénarios définis et représentant une situation réelle (conditions climatologiques particulières, type de végétation...) ou une situation extrême afin d'éprouver les modèles ou les moyens de lutte (comportement d'un pare-feu lors d'un feu violent...). Ces zones ateliers informatisées présentent de nombreux avantages :

- Les sites et parcelles expérimentales peuvent être définis sur n'importe quelle zone géographique,
- Les parcelles expérimentales peuvent être instrumentées sans limites,
- Les surfaces des parcelles n'ont pas de limite réelle,
- La durée de la simulation est sans limite,
- Les situations de simulation peuvent varier indéfiniment,
- Les coûts de simulation du phénomène sont faibles,
- Elles permettent de tester et valider n'importe quel modèle de propagation.

Elles présentent cependant quelques inconvénients majeurs :

- Il est indispensable d'avoir des bases de données en entrée des modèles de propagation (modèle numérique de terrain, données climatologiques...),
- Il est nécessaire d'avoir des modèles de propagation fiables,
- Les données ne sont pas toujours disponibles,
- Le prix de certaines données peut être élevé,
- Les erreurs de données sont répercutées sur d'autres données, engendrant de nouvelles erreurs et faussant les résultats du modèle (erreur d'altitude engendrant une erreur sur la pente et l'exposition qui en découlent...),
- Il est difficile de savoir si les écarts entre la réalité et la simulation sont dus aux erreurs dans les données ou à une imprécision du modèle.

### 1.4.3. L'information issue des zones ateliers

Les informations recueillies sur les sites expérimentaux doivent être soumises à une vérification et une validation afin d'y associer un critère de qualité et permettre leur utilisation et communication (source : site web CNRS/PEVS). Il faut pour cela définir des métadonnées documentant les informations et leur donnant le critère de qualité escompté. Les métadonnées sont :

- **La nature et le type de données** : par exemple des données de vent mesurées en km/h et codées en entier décimal,
- **Les conditions d'utilisation des données** : les données peuvent être communiquées à d'autres unités de recherche,
- **Le mode de stockage et de sauvegarde de l'information**,
- **L'identification des variables et des paramètres pertinents** pour l'étude du système et de ses composantes.

La masse de données étant souvent importante, le recueil des informations ne doit pas faire l'objet d'une tâche réservée à une seule personne ou unité de recherche. Toutefois, des précautions particulières devront être prises en ce qui concerne la vérification et la validation des données, ceci afin d'éviter toute redondance ou erreur. Le traitement des données recueillies doit permettre une production et une formalisation des connaissances. Pour cela, il est nécessaire :

1. De standardiser les méthodes et logiciels utilisés et mettre au point de nouvelles méthodologies ; par exemple, pour des données de même nature mais issues de protocoles différents,
2. De développer de nouveaux modèles et d'en constituer des bases (Guarniéri, 1995 ; Guarniéri et al., 1998).

Le concept de zones ateliers participe activement à la modélisation des phénomènes environnementaux. L'une des composantes, que nous avons décidé d'analyser en détail, est l'expérimentation en milieu naturel. Cette première étape de la démarche de modélisation s'appuie sur la définition de sites expérimentaux, partie intégrante des zones ateliers. Nous nous proposons donc d'exposer sommairement la démarche de modélisation du comportement des feux de forêt.

## **1.5. Conclusion du Chapitre 1**

L'étude du système incendie de forêt se présente donc comme un élément fédérateur des recherches menées dans ces différents thèmes. Le phénomène ne peut être étudié dans sa globalité que par une approche multidisciplinaire. La zone atelier et le réseau de zones ateliers peuvent représenter le support d'étude d'un phénomène complexe et permettent :

1. De préciser les relations entre modèles, expérimentations et métrologie, ainsi que leur niveau d'organisation,
2. De préciser les démarches, protocoles et dispositifs de mesure utilisés,
3. De préciser les échelles spatiales et temporelles utiles à la modélisation.

Nous avons vu qu'il est nécessaire de recourir à l'expérimentation en milieu naturel pour modéliser le phénomène incendie de forêt. Il est également nécessaire de formaliser les connaissances issues de ces expérimentations afin d'assister le scientifique dans sa démarche de modélisation. Nous allons donc étudier dans le chapitre suivant la démarche de formalisation afin d'en déduire le formalisme le plus approprié à notre problématique.

## Chapitre 2

### Démarche de formalisation des connaissances et contribution du langage de modélisation UML

*La suggestion consiste à faire dans l'esprit des autres une petite incision où l'on met une idée à soi.*

*Victor Hugo*

L'ingénierie des connaissances est issue des recherches en sciences cognitives et en intelligence artificielle. Elle permet de capitaliser et formaliser les connaissances d'experts d'un domaine. Ces connaissances multi-expertes, formalisées à l'aide de méthodes issues du Génie Logiciel telles que MERISE et UML<sup>1</sup> ou de l'Intelligence Artificielle telle que KADS<sup>2</sup> et KOD<sup>3</sup>, sont enfin intégrées dans des Systèmes d'Information (SI) tels que les Environnements de Résolution de Problèmes (ERP) ou les Systèmes à Bases de Connaissances (SBC) afin d'être manipulées par des utilisateurs initiés ou non au domaine d'expertise.

Nous étudions dans ce chapitre les modes d'acquisition, de formalisation et de représentation des connaissances multi-expertes pour la conception d'un système d'information. Nous définissons le rôle de chaque acteur dans la démarche d'acquisition des connaissances. Les méthodes de formalisation sont décrites et discutées. Nous voyons également quels sont les types de systèmes d'information susceptibles d'intégrer les connaissances acquises.

#### 2.1. Données, informations, connaissances et compétences

Les objets manipulés par un système sont des données, des informations et des connaissances en interrelation (Fig. 2.1). Les règles d'expertise ou les traitements

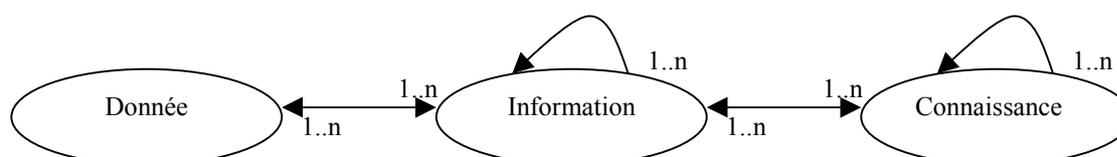
---

<sup>1</sup> Unified Modeling Language

<sup>2</sup> Knowledge Acquisition and Design System

<sup>3</sup> Knowledge Oriented Design

permettent de mettre en œuvre ces entités. Les données, informations et connaissances sont complémentaires. Elles participent à toutes les phases de la conception d'un système d'information : de l'acquisition des connaissances au codage des données. A ces connaissances, nous pouvons ajouter la notion de compétence propre à l'expert. La compétence associe les connaissances déclaratives et les connaissances procédurales (Micaelli et Perrin, 1997). Ces concepts sont définis ci-dessous.



**Figure 2.1 : Relations entre données, informations et connaissances**

### 2.1.1. Les données

Une donnée est une valeur stockée dans le système sous forme de valeur alphanumérique ou booléenne. Exemple : un anémomètre qui affiche « Vitesse = 100 » et « Direction = 260 ». Un ensemble de données peut permettre l'interprétation d'un phénomène ou contribuer à la détermination des informations les plus pertinentes pour sa compréhension.

### 2.1.2. Les informations

Une information peut être déduite de la donnée. Par exemple, pour l'agent de maintenance, la valeur « 100 » indique que l'anémomètre fonctionne, pour le climatologue, cette valeur lui indique que le vent souffle à 100 km/h. L'information est donc une donnée décodée.

Une information peut engendrer de nouvelles données. Exemple : « Le feu est en train de se propager » peut être codée sous une forme booléenne « Propagation : Oui ». Cette information est donc stockée dans la base de données. Une information peut également induire d'autres informations. Par exemple, si un forestier sait que la température est élevée, il peut alors en déduire que la végétation est sèche.

L'information est une connaissance statique et indépendante du contexte et de ses activités. Elle ne participe pas à la résolution d'un problème.

### 2.1.3. Les connaissances

Des connaissances peuvent alors être induites par ces informations ou connaissances déclaratives. Exemple : pour le responsable de l'expérimentation, l'information « le vent souffle à 100 km/h » lui indique que le risque de propagation d'un feu est très élevé ; le climatologue en déduira le type de vent en fonction de sa direction.

Les connaissances sont donc des informations interprétées et propres à un domaine. La connaissance procédurale par opposition à la connaissance déclarative, est inscrite dans l'action et étroitement dépendante de son contexte. Ce savoir est le plus opérationnel (Vinck, 1997). Les connaissances peuvent également engendrer de nouvelles informations et de nouvelles données. Ainsi, la connaissance « risque élevé » peut être transmise à un autre acteur qui la recevra en tant qu'information non utile à son domaine ou qui la stockera sous forme de données. Cette même connaissance peut alors engendrer d'autres connaissances. Par exemple, le responsable de l'expérimentation sait que si le risque est élevé, le responsable de la sécurité sur le site expérimental n'autorisera pas l'allumage de la parcelle.

Les connaissances sont propres à un domaine. Elles sont produites par le résultat d'un raisonnement humain ou simulé. C'est ainsi que le responsable de l'expérimentation en déduit après raisonnement, que si le vent est fort, alors le risque de propagation est élevé. Ce raisonnement est propre à son domaine. L'information peut donc être interprétée de différentes manières en fonction du domaine de connaissances. Les connaissances sont donc des produits d'experts du domaine.

Nous pouvons donc en conclure qu'à une donnée ou à un ensemble de données correspondent plusieurs informations et qu'à une information ou à un ensemble d'informations correspond une infinité de connaissances. Il est alors important de délimiter le système et de définir les objets manipulés afin de ne conserver que ce qui est propre au domaine du système. Nous avons vu que les frontières entre données, informations et connaissances peuvent être très minces voire floues.

Ces objets sont manipulés par différents acteurs du système. Une information peut donc devenir connaissance durant un état du système, lorsqu'elle est utilisée par un acteur qui va l'interpréter et redevenir une information à l'état suivant, si elle n'est pas utilisée durant cet état. Les données, les informations et les connaissances ont donc des durées de vie correspondant à certains états du système.

Dans une problématique de réalisation d'expérimentations, l'information « le feu se propage à 30 km/h » devient une connaissance si elle est transmise au responsable de

l'expérimentation. Cette connaissance redevient une information lorsque l'expérimentation est terminée car elle se retrouve alors, hors contexte.

#### **2.1.4. Les compétences**

La compétence peut être définie comme suit (Micaelli et Perrin, 1997) :

- Elle est relative à une action, par exemple : lutter contre un feu de forêt,
- Elle est dépendante d'un contexte donné, par exemple : réaliser une expérimentation afin de mesurer la propagation d'un feu,
- Elle est le résultat d'une interaction entre différents types de savoirs :
  - Les connaissances déclaratives,
  - Le savoir-faire ou les connaissances procédurales ou opératoires,
  - Les capacités cognitives et capacités conatives (juger de sa capacité à faire une action),
  - Le savoir être, par exemple la confiance du responsable de l'expérimentation vis-à-vis des exécutants.

La compétence fait donc partie intégrante de l'action. Des indicateurs peuvent évaluer les performances de la compétence. Par exemple, la compétence peut être analysée à travers sa capacité à innover, à coopérer ou à réutiliser les savoirs acquis (Micaelli et Perrin, 1997).

Nous avons vu que les données, les informations, les connaissances et les compétences participent à la résolution d'un problème. Nous allons donc nous intéresser aux modes d'acquisition de ces connaissances afin de les formaliser et proposer un modèle conceptuel de l'expérimentation en milieu naturel.

## **2.2. L'acquisition des connaissances**

L'acquisition des connaissances constitue la première phase de la conception d'un système d'information. Elle repose principalement sur une appropriation des méthodes et des informations manipulées par les experts d'un domaine. Le transfert de connaissances s'avère bien souvent empirique et il est difficile d'automatiser une telle tâche.

### **2.2.1. Les acteurs de l'acquisition des connaissances**

Les acteurs du processus d'acquisition des connaissances sont : les experts du domaine et les cognitivistes (Zelfani, 1993 ; Dieng et al., 2000).

#### **2.2.1.1. L'expert**

L'expert est reconnu comme le spécialiste du domaine. Il est capable de résoudre les problèmes de son domaine. Il détient les connaissances à modéliser ainsi que l'expérience et le savoir-faire qui vont lui permettre de définir les tâches et fonctions d'un système d'information.

Plus le système étudié est complexe, plus il met en œuvre de problématiques et plus les experts du domaine sont nombreux. Ainsi dans un système environnemental complexe tel que l'incendie de forêt, les acteurs du domaine sont nombreux et variés (forestiers, climatologues, pompiers, physiciens...). De plus, les informations manipulées par ces experts sont hétérogènes (température de l'air, type de combustible...).

#### **2.2.1.2. Le cognitiviste**

Le cognitiviste est chargé de modéliser la connaissance. Il recueille, analyse et formalise les connaissances de l'expert du domaine ; il participe au transfert d'expertise. Il est le lien entre les experts, détenteurs de la connaissance et l'informaticien, concepteur du système d'information gérant les connaissances de l'expert.

Le recueil des connaissances doit se faire en toute objectivité. Le cognitiviste doit extraire les connaissances sans les interpréter. Toutefois, afin de ne pas occulter certaines informations à cause d'une trop grande méconnaissance du domaine, il est nécessaire que le cognitiviste soit formé au domaine de l'expert.

Il va s'en dire que dans le cadre de cette thèse, nous avons tenu le rôle du cognitiviste. Les tâches d'acquisition des connaissances réalisées ont constitué une part importante de cette étude (interview et suivi des expérimentateurs de l'INRA<sup>4</sup> d'Avignon et de l'UNSA<sup>5</sup> ; pratique de l'expérimentation).

---

<sup>4</sup> Institut National de la Recherche Agronomique

<sup>5</sup> Université de Nice-Sophia Antipolis

### 2.2.2. Les modes d'acquisition des connaissances

Les méthodes d'acquisition des connaissances peuvent être hiérarchiquement classées ainsi :

1. **La pratique du métier de l'expert** : le cogniticien exerce lui-même le métier qu'il se propose de modéliser,
2. **L'observation de l'expert dans le cadre de sa fonction** : le cogniticien se propose de suivre l'expert dans l'exercice de ses fonctions afin de recueillir les connaissances tacites de l'expert,
3. **Les interviews d'experts** : le cogniticien pose les questions directement à l'expert,
4. **Les questionnaires** : le cogniticien laisse une série de questions à l'expert qui répondra en temps voulu,
5. **Les tests ou les simulations** : les connaissances tacites sont déduites à travers une série de tests de situation que le cogniticien propose à l'expert,
6. **La bibliographie** : le cogniticien étudie tous les ouvrages et articles parus dans le domaine,
7. **Les données** : le cogniticien déduit les connaissances tacites des données recueillies ou déduites par l'expert ; le cogniticien doit être un expert du domaine étudié.

Les connaissances manipulées et mises en œuvre dans cette thèse ont été acquises :

- Par une analyse bibliographique des expérimentations pratiquées à travers le monde afin d'en déduire un modèle conceptuel le plus générique possible,
- Par l'interview et l'observation des experts dans le cadre de leurs fonctions ; les spécialistes de l'INRA d'Avignon et de l'UNSA ont été choisis,
- Par la pratique des expérimentations en milieu naturel dans les départements des Alpes-Maritimes, du Var et des Landes.

La frontière entre le cogniticien et l'expert du domaine est donc plutôt perméable. La pratique du métier de l'expert a permis d'assimiler plus favorablement les connaissances ainsi que le contexte de recueil des informations. En effet, l'expérimentation en milieu naturel s'effectue avec une certaine tension : contrairement aux conditions en laboratoire, l'expérimentateur n'a pas le droit à un second essai lorsqu'il réalise son expérimentation en milieu naturel. Les informations recueillies sur le terrain permettent donc de placer les connaissances acquises dans leur contexte. L'acquisition de ces connaissances étant vaste, nous avons décidé de lui consacrer un chapitre (Cf. Chapitre 3).

Après avoir défini les différents modes d'acquisition des connaissances utilisés dans notre étude, nous allons nous intéresser aux méthodes qui permettent de formaliser les connaissances nécessaires à notre travail de conceptualisation.

### 2.3. La formalisation des connaissances

La première caractéristique de l'ingénierie des connaissances est d'expliquer les connaissances tacites issues des experts (Zacklad, 2000). De par l'investissement de l'expert et de ses interrelations avec l'ingénieur de connaissances (cogniticien), nous pouvons déduire que la formalisation, comme l'acquisition des connaissances, n'est pas purement descriptive, mais aussi une phase constructive.

Deux types de connaissances sont formalisables (Vinck, 1997) :

- **Les connaissances explicites** : ce qui peut être explicité est immédiatement formalisable,
- **Les connaissances implicites** : elles représentent ce qui pourrait être formalisé après avoir été explicité ; elles représentent la majorité de la connaissance.

La connaissance est formelle ou du moins formalisable (Vinck, 1997). Un phénomène, une règle ou un mécanisme  $X$  peut ainsi être représenté fidèlement dans un langage  $\lambda(X)$ . Le savoir peut être formalisé à l'aide d'un langage scientifique  $\lambda^S(X)$ , tel que le langage informatique ou le langage mathématique. Toutefois un savoir ou une compétence est souvent exprimé dans un langage ordinaire  $\lambda^O(X)$ , utilisé par une certaine communauté de scientifiques non initiés à la formalisation de la connaissance. Lorsque le savoir n'est pas explicité, on suppose son existence, tout au moins implicite ou tacite  $\lambda^T(X)$  : c'est le langage de l'expert, le détenteur de la connaissance à formaliser. Le modèle de l'extraction du savoir et de la capitalisation des connaissances peut donc être représenté par (Vinck, 1997) :

$$\lambda^T(X) \rightarrow \lambda^O(X) \rightarrow \lambda^S(X)$$

Parmi les méthodologies scientifiques employées afin de capitaliser la connaissance, nous pouvons distinguer deux sortes de méthodes de modélisation complémentaires :

- Les méthodes issues de l'Intelligence Artificielle,
- Les méthodes issues du Génie Logiciel.

### **2.3.1. Les méthodes de modélisation des connaissances issues de l'Intelligence Artificielle**

On distingue principalement deux approches méthodologiques de modélisation des connaissances issues de l'Intelligence Artificielle (Trichet, 1998) :

- La méthodologie descendante : des modèles génériques sont proposés afin d'intégrer les connaissances recueillies ; exemple : la méthode KADS,
- La méthodologie ascendante : le modèle est construit à partir des connaissances recueillies ; exemple : la méthode KOD.

Ces méthodes ont principalement été développées pour la conception de Systèmes à Base de Connaissances (SBC). Un SBC est un système informatique capable de séparer le plus nettement possible les connaissances nécessaires à la résolution d'une catégorie de problèmes et les mécanismes d'utilisation de ces connaissances (Rechenmann, 1992).

#### ***2.3.1.1. Un exemple de méthodologie descendante de modélisation des connaissances : la méthode KADS***

La méthode KADS (Knowledge Acquisition and Design System) permet de modéliser l'expertise. Elle repose sur plusieurs modèles prédéfinis, qui offrent un guide à la réalisation d'un SBC, et organisés selon quatre principes fondamentaux (Zelfani, 1993) :

1. La conception d'un SBC est appréhendée comme pour n'importe quel autre système d'information,
2. Le développement d'un SBC implique une spécificité propre à la gestion et à l'exploitation des connaissances,
3. La prise en compte des besoins et de l'organisation est aussi importante que la représentation des connaissances,
4. Un SBC peut être vu comme un système d'exploitation de règles d'expertise.

La conception du SBC selon KADS se fonde sur trois modèles :

1. Le modèle fonctionnel qui définit les fonctions du système afin de les mettre en adéquation avec les besoins des utilisateurs,
2. Le modèle logique qui décrit les techniques de conception du SBC selon les fonctionnalités définies dans le modèle fonctionnel,

3. Le modèle physique qui décrit l'architecture du SBC en fonction des techniques définies dans le modèle logique.

### ***2.3.1.2. Un exemple de méthodologie ascendante de modélisation des connaissances : la méthode KOD***

Comme la méthode KADS, KOD (Knowledge Oriented Design) permet de modéliser des SBC (Vogel, 1988). L'originalité de KOD réside dans son étude systématique du texte pour en extraire la connaissance. Contrairement à la méthode KADS, KOD ne propose pas de modèle prédéfini. Elle se fonde sur une démarche ascendante en proposant des cadres de collecte et de modélisation de la connaissance (Dieng et al., 2000).

La méthode KOD se décompose en trois étapes (Dieng et al., 2000) :

1. **La modélisation pratique** : conduire les entretiens ; effectuer la modélisation pratique des données, des traitements et des règles ; évaluer et valider le modèle pratique,
2. **La modélisation cognitive** : conduire l'entretien d'étude de cas, effectuer la modélisation cognitive des données, des traitements et des règles ; évaluer et valider le modèle cognitif,
3. **Le bilan** : dresser le bilan critique de la base de connaissances ; définir et choisir les orientations.

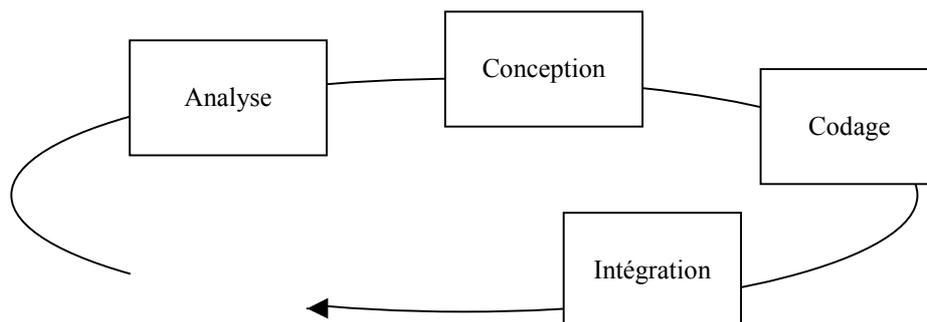
Ces méthodes issues de l'intelligence artificielle ont été développées afin de concevoir des SBC. Notre travail n'étant pas de reproduire le raisonnement de l'expérimentateur, mais de formaliser et gérer le corpus de connaissance qu'il met en œuvre, il a été décidé de ne pas retenir ces méthodes. Nous allons donc nous intéresser aux méthodes de formalisation issues du Génie Logiciel.

### **2.3.2. Les méthodes de modélisation des connaissances issues du Génie Logiciel**

Les méthodes du Génie Logiciel sont principalement fondées sur l'analyse systémique. Elles permettent de définir les différentes étapes de la conception d'un système d'information regroupées dans le cycle de vie du logiciel. Nous pouvons distinguer deux types de cycles de vie (Muller, 1997) :

- **Le cycle de vie en cascade :** décrit par Royce (1970) ; c'est une suite de phases qui s'enchaînent dans un déroulement linéaire des phases suivantes : Analyse, Conception, Codage et Test ; ce cycle de vie peut également être représenté en V : les tests de validation sont réalisés en parallèle des phases d'Analyse (tests fonctionnels), de Conception (tests d'intégration) et de Codage (tests unitaires),
- **Le cycle de vie itératif :** il est fondé sur l'évolution de prototypes évaluables à chaque étape du processus itératif (Fig. 2.2); il demande plus d'implication de la part des différents acteurs (utilisateurs, analystes, développeurs) .

Le cycle de vie itératif est donc plus adapté au prototypage de logiciel. Les besoins des utilisateurs et les fonctionnalités du système d'information peuvent être spécifiés de nouveau, à chaque phase itérative. Le système est constamment en évolution. La finalité de notre étude n'étant pas le développement d'un logiciel finalisé, mais d'un prototype en évolution, nous retenons donc cette démarche pour la conception de notre système d'information.



**Figure 2.2 : Le cycle de vie itératif**

La notion de modélisation de données est naturellement associée à des techniques de création de diagrammes. Il existe plusieurs techniques de création de diagrammes dans le monde. Une analyse par Olle (Olle et al., 1991 ; Olle, 1993, 1996) a permis de recenser près de 14 moyens de représenter les modèles de données les plus basiques et les plus utilisés. Un modèle de données peut donc être représenté en utilisant un ou plusieurs modes de représentation. Chaque représentation possède ses avantages et ses inconvénients. Nous allons nous intéresser à des méthodes de modélisation fondées sur la création de diagramme.

### ***2.3.2.1. La méthode de modélisation MERISE***

La méthode MERISE se fonde sur le modèle Entité-Relation, utilisé par l'INRA d'Avignon afin de modéliser les données issues d'expérimentations en laboratoire. Cette approche a été utilisée dans un premier temps afin de capitaliser les connaissances de ces experts. Bien que la méthode MERISE n'ait été utilisée pleinement dans cette étude, il est intéressant de citer ses principaux concepts, qui font de MERISE une méthode de conception de systèmes d'information (Tardieu et al., 1986 ; Gabay, 1989).

Cette méthode repose sur trois modes de formalisation :

- La formalisation conceptuelle,
- La formalisation organisationnelle,
- La formalisation opérationnelle.

#### *2.3.2.1.1. La formalisation conceptuelle*

Elle se fonde sur deux modèles :

- Le Modèle Conceptuel des Données : il permet d'établir une représentation claire des données du système d'information et de définir les dépendances fonctionnelles de ces données entre elles,
- Le Modèle Conceptuel des Traitements : il permet de formaliser les traitements en fonction des événements extérieurs sans s'intéresser à l'organisation qui régira ces traitements par la suite.

#### *2.3.2.1.2. La formalisation organisationnelle*

La formalisation organisationnelle consiste à spécifier l'organisation qui régira les données et les traitements étudiés lors de la formalisation conceptuelle. Elle repose sur la création de deux modèles :

- Le Modèle Organisationnel des Traitements : on s'intéresse aux notions de temps, de lieux et d'intervenants ; on dissocie les opérations manuelles des opérations automatisées,
- Le Modèle Logique des Données : on spécifie l'organisation des données en fonction des logiciels retenus.

### 2.3.2.1.3. *La formalisation opérationnelle*

La formalisation opérationnelle consiste à spécifier comment seront réalisés les éléments du projet. C'est une formalisation propre aux informaticiens et qui ne concerne qu'eux. Elle se fonde sur la création de deux modèles :

- Le Modèle Opérationnel des Traitements : on s'intéresse à la structure interne de toutes les applications du projet. Son objectif est la préparation du développement,
- Le Modèle Physique des Données : on s'intéresse à l'optimisation de la gestion des données en fonction de l'outil choisi pour cette gestion et surtout en fonction des traitements qui utilisent ces données.

### 2.3.2.2. *La Modélisation Objet*

La formalisation des connaissances à l'aide de la modélisation objet s'établit à l'aide d'un langage de description à deux niveaux : les classes et les objets. Les classes définissent la structure des objets manipulés et les objets décrivent un cas concret.

Le modèle objet dissocie les descriptions ensemblistes abstraites (les classes), des représentations individuelles concrètes (les instances) qui se distinguent entre elles par les valeurs respectives de leurs attributs.

Les classes sont des structures de données génériques qui décrivent les informations relatives à un ensemble d'objets. Une classe est donc un concept abstrait représenté par des instances. Chaque instance possède des valeurs locales pour chacune des caractéristiques du concept. Définir une classe d'objets revient donc à décrire un ensemble de propriétés relatives à ces objets.

L'objet représente quant à lui le module élémentaire de ce concept de modélisation. Il est décrit comme une entité regroupant un ensemble de données, les actions qu'on peut faire sur elles et leur comportement.

Devant la multiplicité des objets à manipuler, il convient de créer une structure en classes telles que nous l'avons précédemment décrite et permettant une gestion aisée des diverses entités. Le modèle objet est défini par les trois concepts suivants :

1. **L'encapsulation** des données qui permet de réunir les données internes de l'objet, les méthodes d'utilisation et de manipulation de ses données,

2. **L'héritage** des attributs qui permet d'éviter la redondance et ainsi faire hériter les données comme les méthodes,
3. **Le polymorphisme** qui permet de donner un nom identique à des fonctions similaires ne différant que sur le type de données.

Bien que la méthode MERISE soit parmi les plus utilisées lors de la phase de conception d'un système d'information, nous avons décidé de retenir l'approche de modélisation objet qui permet une meilleure hiérarchisation des connaissances hétérogènes en classes et sous-classes. Nous allons donc nous intéresser au langage de modélisation UML qui se fonde sur la Modélisation Objet.

## 2.4. Le recours au langage UML de modélisation des connaissances

Les méthodes permettent de construire et d'explicitier des modèles à partir des éléments du système ou phénomène que l'on veut étudier ou représenter. A une méthode est associé un formalisme. Le langage de modélisation UML (Unified Modeling Language) a été choisi pour son formalisme graphique qui permet de manipuler et représenter aisément tout modèle (Muller, 1997). De plus, ce formalisme constitue un excellent moyen de communication, contribuant ainsi à échanger les informations entre experts de domaines différents qui participent à la mise au point du modèle.

UML est un langage permettant de spécifier, visualiser, implémenter et documenter les systèmes informatiques (Rumbaugh et al., 1999). C'est un amalgame de trois langages de modélisation célèbres, faisant usage de nombreux aspects de la programmation orientée objet.

Au début des années 90, les langages de programmation orientée objet sont devenus très populaires. Beaucoup de personnes dans la communauté des ingénieurs en informatique ont adopté le C++ comme langage de programmation, couvrant la plupart des développements de logiciels. Les développeurs en informatique ont commencé à prendre conscience qu'un bon modèle du logiciel, tout comme le cahier des charges, était nécessaire pour assurer la stabilité de l'architecture logicielle. Un nombre important de techniques de modélisation a été utilisé alors que l'industrie des logiciels était à la recherche d'une standardisation de ces modèles. Le manque de méthode standard de modélisation adaptée au système informatique orienté objet, a fait que certaines sociétés de logiciels sont entrées prudemment dans le marché de l'orienté objet, compliquant ainsi l'effort des compagnies de logiciels à développer des outils de modélisation.

Fin 1994, Booch, concepteur de la méthode de modélisation BOOCH (Booch, 1994) et Rumbaugh, célèbre pour la méthode de modélisation objet OMT<sup>6</sup> (Rumbaugh et al., 1995), commencèrent à travailler dans la société *Rational Software* pour unir leurs méthodes de modélisation. En 1995, Jacobson, créateur de la méthode de modélisation pour l'ingénierie logicielle orientée objet OOSE<sup>7</sup>, se rallia aux travaux de Booch et Rumbaugh. Ces trois analystes représentaient les trois meilleurs systèmes de modélisation du moment. Ce n'est pas surprenant si cet effort de création d'un langage standard capta l'attention de concepteurs de logiciels. En 1996, un consortium de 20 sociétés telles que *IBM, Microsoft, DEC, Hewlett-Packard* et *Unisys*, a été formé afin de définir les spécifications d'UML. La version 1.0 des spécifications a été publiée en janvier 1997 et a été révisée en septembre 1997 (version 1.1).

Le langage UML a déjà été adopté par certains chercheurs développant des systèmes d'information pour les risques naturels (Napoli et al., 1999 ; Desconnets et al., 2000 ; Maurel et al., 2000 ; Villanova, 2000 ; Cranefield et Purvis, 2001). Il est donc adaptable aux problématiques environnementales.

#### 2.4.1. Les caractéristiques d'UML

UML est un langage de modélisation permettant de spécifier, représenter, construire et documenter les systèmes d'information. Le langage UML est :

- **Une méthode** pour développer un système d'information,
- **Un langage de communication** : c'est un moyen pour acquérir la connaissance sur un sujet et l'exprimer par rapport à l'objet de communication, le sujet étant le système en question,
- **Un langage de modélisation** : il se focalise sur la compréhension du système (et de son contexte) via la formulation d'un modèle qui est composé de la connaissance liée au système et de l'application appropriée de cette connaissance constituant l'intelligence du système,
- **Un langage standardisé** : il unifie les systèmes d'information et les meilleures pratiques des industries technologiques à travers différents types de systèmes (logiciels ou non), de domaines (commerce de logiciels) et de processus de cycle de vie.

---

<sup>6</sup> Object Modelling Technique

<sup>7</sup> Object-Oriented Software Engineering

Le langage de modélisation UML permet de :

- Spécifier des systèmes : il peut être utilisé pour communiquer ce qui est requis par le système et pour indiquer comment un système peut être réalisé,
- Représenter les systèmes : il peut être utilisé pour représenter un système avant qu'il ne soit réalisé,
- Construire des systèmes : il peut être utilisé en complément du cahier des charges, pour guider la réalisation,
- Documenter un système : il peut être utilisé pour acquérir l'information d'un système à travers tout son cycle de vie.

Cependant, UML n'est pas :

- Un langage visuel de programmation, mais un langage visuel de modélisation,
- Un outil de gestion de spécifications, mais un langage de modélisation de spécification,
- Une méthode de modélisation, mais permet toutefois d'y être associé.

L'objet de cette recherche étant la conception et la spécification d'un système d'information et non son développement informatique, nous avons choisi UML comme langage de modélisation.

#### **2.4.2. Comment modéliser avec UML ?**

UML fournit sept sortes de diagrammes permettant de représenter les différents aspects du système à modéliser. Nous pouvons classer ces diagrammes en trois catégories :

1. Les diagrammes dynamiques,
2. Les diagrammes statiques de structure,
3. Les diagrammes d'implémentation.

La totalité des graphiques présentés dans ce chapitre sont des écrans de saisie d'un logiciel graphique adapté à UML : *Rational Rose* de la société *Rational Software*. Cet outil permet d'assister le modélisateur dans sa phase de conception d'un système d'information. La société *Rational Software*, fortement impliquée dans le développement d'UML, est le leader sur le marché des outils de développement utilisant UML. Nous présentons des exemples très simples de diagrammes appliqués à la pratique de l'expérimentation.

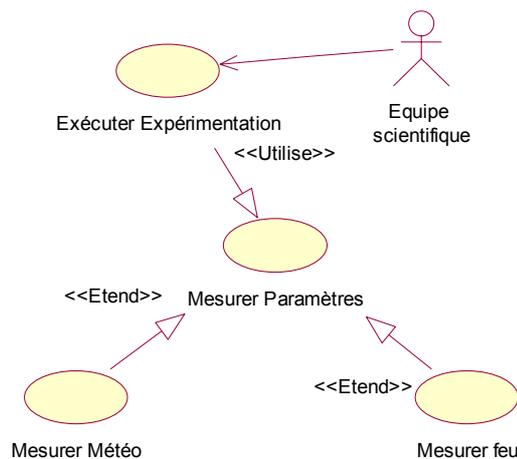
### 2.4.2.1. Les diagrammes dynamiques

Les diagrammes dynamiques se composent de :

- Diagrammes de cas d'utilisation,
- Diagrammes de séquence,
- Diagrammes de collaboration,
- Diagrammes d'états.

#### 2.4.2.1.1. Les cas d'utilisation

Ils modélisent les acteurs externes au système (mais en interaction avec lui : une personne, un autre système...) et leurs interactions avec le système (Fig. 2.3). Ce diagramme est utilisé pour la description des fonctions du système et il permet de connaître les besoins des utilisateurs. Les acteurs sont représentés par des personnages en bâtonnets et les cas d'utilisation par des ovales. Il est possible de définir plusieurs cas d'utilisation, un pour chaque acteur par exemple.



**Figure 2.3 : Diagramme de cas d'utilisation**

L'acteur est représenté dans cet exemple par une équipe scientifique. Sa participation est représentée par une flèche entre l'acteur et le cas d'utilisation. Il existe des relations entre cas d'utilisation :

- La relation d'utilisation (« Utilise ») : le cas d'utilisation source comprend également le comportement décrit par le cas d'utilisation destination,
- La relation d'extension (« Etend ») : le cas d'utilisation source étend le comportement du cas d'utilisation destination.

### 2.4.2.1.2. Les diagrammes de séquence

Ils décrivent chronologiquement les interactions (représentées par des flèches) entre les utilisateurs et les objets du système ou entre objets (Fig. 2.4). Ils peuvent être utilisés comme un document de cas d'utilisation ou pour préciser les interactions entre objets.

Dans l'exemple présenté, l'acteur (l'équipe scientifique) effectue deux actions sur l'objet (la parcelle).

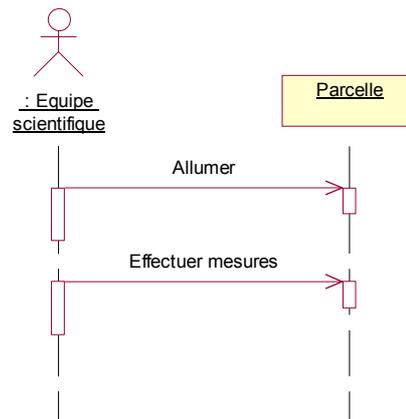


Figure 2.4 : Diagramme de séquence

### 2.4.2.1.3. Les diagrammes de collaboration

Ils permettent de représenter des messages (interactions) transitant, mais également de spécifier les objets créés ou détruits (Fig. 2.5). L'ordre chronologique des messages est spécifié par un numéro et la direction par une flèche.

La notation utilisée est différente de celle utilisée dans les diagrammes de séquence, mais l'information représentée est la même. Le diagramme de séquence insiste sur l'aspect chronologique des interactions.

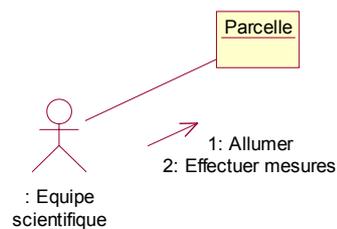


Figure 2.5 : Diagramme de collaboration

2.4.2.1.4. Les diagrammes d'état

C'est la représentation d'un automate d'état fini décrivant le cycle de vie des objets d'une classe donnée (Fig. 2.6). Il montre les états successifs d'un objet conformément aux événements externes et/ou aux interactions avec les autres objets.

L'état initial est représenté par un point noir, l'état final par un point noir encerclé.

Nous avons choisi de représenter à l'aide de ce diagramme, le déroulement d'une expérimentation.

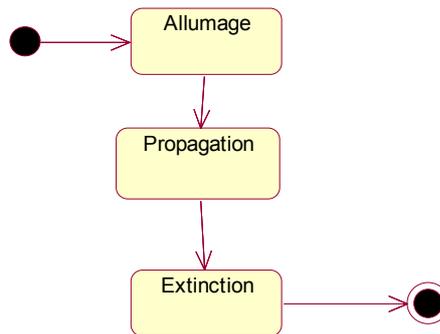


Figure 2.6 : Diagramme d'états

2.4.2.2. Les diagrammes statiques de structures

Le diagramme de classes représente les différentes classes du système, les opérations et les relations entre elles (Fig. 2.7). Il est la première vue du système. Les relations entre classes sont : des associations, des dépendances, des agrégations, des héritages. Il est possible de préciser le nom des relations, leur cardinalité ou le rôle de la classe donnée. Les classes sont représentées par des rectangles composés de trois parties : le nom, les attributs et les opérations.

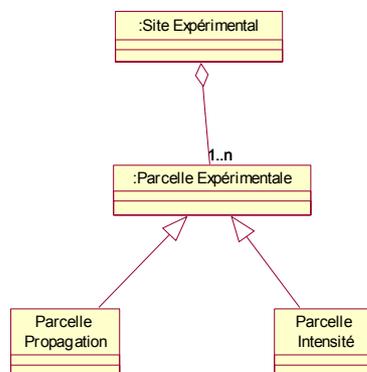


Figure 2.7 : Diagramme de classes

Dans cet exemple, nous pouvons distinguer

- Une agrégation entre classes : la classe « Parcelle expérimentale » appartient à la classe « Site Expérimental » (un site expérimental se compose de une ou plusieurs parcelles),
- Une généralisation entre classes : la classe « Parcelle expérimentale » se compose de deux sous-classes (les parcelles pour l'étude de la vitesse de propagation et celles pour l'étude de l'intensité).

### 2.4.2.3. Les diagrammes d'implémentation

Les diagrammes d'implémentation se composent de :

- Diagrammes de composants,
- Diagrammes de déploiement.

#### 2.4.2.3.1. Les diagrammes de composants

Ils montrent la structure du programme avec les différents composants (Fig. 2.8). Ils décrivent aussi les dépendances entre les différents modules, par exemple dans le but de définir l'ordre de compilation. Dans cet exemple, nous voyons comment sont reliés les programmes permettant la simulation d'un feu de forêt.

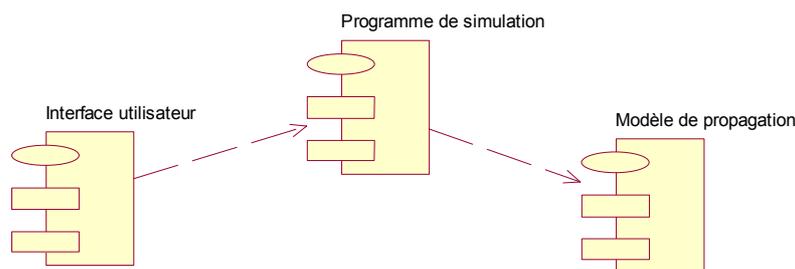
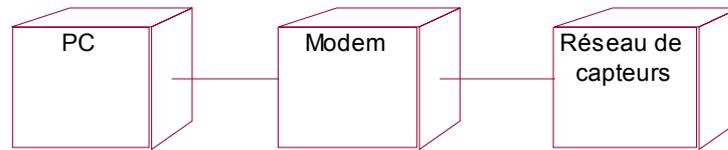


Figure 2.8 : Diagramme de composants

#### 2.4.2.3.2. Les diagrammes de déploiement

Ils permettent de représenter la structure physique d'un système en montrant la répartition de ses différents équipements (appelés nœuds et représentés par des cubes) et les liens existant entre eux (Fig. 2.9). Ils permettent aussi d'indiquer la disposition de

programmes exécutables sur cet équipement. Nous montrons dans l'exemple comment serait relié un PC à un réseau de capteurs automatiques.



**Figure 2.9 : Diagramme de déploiement**

Après avoir présenté la modélisation à l'aide du langage UML qui s'avère particulièrement bien adapté à notre problématique et à la recherche en Environnement, nous allons étudier les différents types de systèmes d'information pouvant intégrer et gérer des connaissances.

## **2.5. Les différents types de systèmes d'information pouvant intégrer des connaissances**

Il existe différents types de systèmes d'information pouvant intégrer les connaissances :

- Les Systèmes de Gestion de Bases de Données (SGBD),
- Les Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS) et Systèmes d'Information Géographique (SIG),
- Les Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision (SIAD),
- Les Systèmes à Base de Connaissances (SBC),
- Les Environnements de Résolution de Problèmes (ERP).

### **2.5.1. Définitions et caractéristiques des systèmes d'information**

Nous présentons dans cette partie les caractéristiques des différents systèmes d'information intégrant des connaissances.

#### ***2.5.1.1. Les Systèmes de Gestion de Bases de Données Relationnelles***

Les Systèmes de Gestion de Bases de Données Relationnelles (SGBDR) permettent à l'utilisateur de gérer une collection de données hétérogènes. Le SGBDR permet :

- La description des données selon un modèle, par exemple le modèle relationnel,
- La manipulation des données à l'aide d'un langage de requêtes tel que SQL (Structured Query Language) qui permet de sélectionner, mettre à jour, ajouter ou supprimer des enregistrements ou des attributs,
- Le maintien de données cohérentes en définissant les contraintes d'intégrité,
- L'usage des données par plusieurs utilisateurs ou applications,
- La sécurité des données en tenant à jour un historique de la base.

### ***2.5.1.2. Les Systèmes d'Information à Référence Spatiale***

Les Systèmes d'Information à Référence Spatiale (SIRS) et les Systèmes d'Information Géographique (SIG) sont à rapprocher du domaine des Nouvelles Technologies de l'Information (NTI) qui regroupent la télématique, l'informatique graphique, les Bases de Données, le Multimédia (Chevallier, 1993 ; Tufféry, 1997). Un SIRS est un ensemble puissant d'outils pour saisir, conserver, extraire, transformer et afficher les données spatiales décrivant le monde réel (Burrough, 1986, 1992 ; Goodchild, 1997 ; Openshaw, 1990).

Un SIG doit pouvoir organiser et structurer les informations que l'on a acquises et permettre leur interrogation (Laurini et Thompson, 1992). Il existe plusieurs possibilités, tant pour les informations graphiques que pour les informations non graphiques. Le principe d'organisation pour le stockage des données géographiques repose sur la distinction entre le raster et le vectoriel. Beaucoup de systèmes comportent ces deux modes de stockage.

Les données en mode raster sont organisées par adressage spatial, alors qu'en mode vectoriel, elles sont organisées par objet. Plus précisément, les modes de représentation et de gestion d'un plan en raster consistent à réunir les données dans un fichier matrice qui se compose d'une grande quantité de points ; à chacun d'eux on attribue un état qui correspond à un pourcentage de représentation. Par exemple, une parcelle sera représentée par un ensemble de points identiques.

Les données vectorielles correspondent à des données géométriques (lignes, arcs, cercles, polygones...) qui s'appuient sur des points connus (x, y). Ces données géométriques sont associées pour constituer des formes complexes qui sont des simplifications topographiques (maisons, parcelles...).

Le SIRS est donc l'un des outils privilégiés des recherches menées dans le domaine de l'environnement.

### **2.5.1.3. Les Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision**

Les Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision (SIAD) sont apparus dans les années 1970 sous l'impulsion des décideurs des domaines économiques et financiers, en réaction aux systèmes de gestion traditionnels. Ils se sont enrichis depuis, des fonctionnalités offertes par les SIG. Ce nouveau type d'outils appelé Système d'Aide à la Décision à Référence Spatiale (SADRS) intègre quatre fonctionnalités essentielles (Guarniéri, 1994a, 1994b ; Guarniéri et al., 2001b) :

- L'analyse et la gestion de l'information spatiale,
- L'analyse et la gestion de l'information attributaire,
- La réalisation de simulations à l'aide de modèles numériques ou symboliques,
- Le dialogue avec l'utilisateur grâce à l'Interface Homme/Machine (IHM).

### **2.5.1.4. Les Systèmes à Base de Connaissances**

Buisson (1990) définit le Système à Base de Connaissances (SBC) comme suit :

*« Un Système à Base de Connaissances est une machine virtuelle composée d'une base de connaissance et d'un moteur d'inférence. La base de connaissance est, à un instant donné, un ensemble dont les éléments sont des unités de connaissances de l'univers du discours d'un individu qui sera appelé utilisateur. En exploitant les connaissances déjà présentes dans la base, le moteur d'inférence est capable de produire éventuellement de nouvelles unités de connaissance, donc de modifier la base. Il y a alors inférence ou raisonnement. »*

### **2.5.2. Les Environnements de Résolution de Problèmes**

La notion d'Environnement de Résolution de Problèmes est apparue dans les années 60. Cependant, beaucoup de recherches ont été abandonnées dans les années 70, à cause des insuffisances dans le domaine des infrastructures technologiques ne pouvant fournir la puissance de calcul nécessaire au bon fonctionnement de tels outils. Depuis les années 90, avec le développement massif des nouvelles technologies (en particulier dans le domaine de la puissance de calcul d'un ordinateur), ce concept a été repris et de nombreux ERP ont pu être développés et distribués (Gallopoulos et al., 1992).

### **2.5.2.1. Définitions**

On distingue généralement trois grandes familles d'ERP (Guarniéri, 1995) :

- Ceux destinés à l'ingénierie,
- Ceux destinés à la formation,
- Ceux destinés aux scientifiques.

#### *2.5.2.1.1. Les ERP destinés à l'ingénierie*

Dans le domaine de l'ingénierie citons deux exemples significatifs :

- L'un dans l'évaluation du risque feu de forêt, le système MERIS (Guarniéri, 1995),
- L'autre dans le domaine de l'analyse des sites d'avalanches à des fins de prévention et de protection, le système ELSA (Buisson, 1990).

#### *2.5.2.1.2. Les ERP destinés à la formation*

La deuxième famille d'ERP traite des questions liées à la formation. Citons à titre d'exemple un prototype de tuteur intelligent dans le domaine de la lutte contre les incendies, le système NEWFIRE (Lovborg et Brehmer, 1991, 1992 ; Brehmer et al., 1992a, 1992b).

#### *2.5.2.1.3. Les ERP destinés aux scientifiques*

Les ERP destinés à des scientifiques ont une fonction d'aide à la modélisation. Citons à titre d'exemple les travaux de Rousseau (1988) et Chevenet (1994) qui proposent aux chercheurs en biométrie :

- Un poste de travail d'aide dans le calcul des solutions de systèmes d'équations aux dérivées partielles,
- Un environnement coopératif pour l'analyse statistique en écologie.

Dans le domaine des feux de forêt, citons les travaux conduits dans le cadre du projet EFAISTOS (projet n° ENV4-CT96-0299) où un ERP pour l'aide à la simulation de la propagation d'un feu de forêt a été élaboré (Guarniéri et al., 1998). Dans le cadre de cette étude, nous retiendrons cette troisième famille d'ERP.

### 2.5.2.2. Un ERP pour les scientifiques dédié à l'aide à la modélisation

Les objectifs d'un ERP dédié à l'aide à la simulation sont d'accroître les potentialités des utilisateurs dans la réflexion, le raisonnement et la prise de décision au cours de leurs processus de résolution d'un problème. Ses principales caractéristiques sont les suivantes (Rousseau, 1988 ; Gallopoulos et al., 1992 ; Guarniéri et al., 1998) :

- Offrir une collection organisée de données (mesure de terrain, cartes, résultats d'expérimentation...),
- Proposer une collection organisée de modèles (aussi appelée « système de modèles »), de natures différentes mais néanmoins cohérents entre eux, utilisés dans un contexte particulier,
- Faciliter la confrontation théorie/expérience et ainsi participer au processus complexe de validation d'un modèle.

L'ERP doit aussi être en mesure d'accueillir des informations de natures et de formats informatiques divers qui, si possible, ne remettent pas en cause sa structure. C'est bien là une tâche délicate.

Un ERP dédié à l'aide à la modélisation est généralement constitué de trois sous-systèmes spécialisés (Fig. 2.10) :

- Un système de gestion de bases de données, (les connaissances et mesures acquises lors d'expérimentations),
- Un système de gestion de bases de modèles,
- Une Interface Homme-Machine (IHM) permettant de manipuler l'ERP.

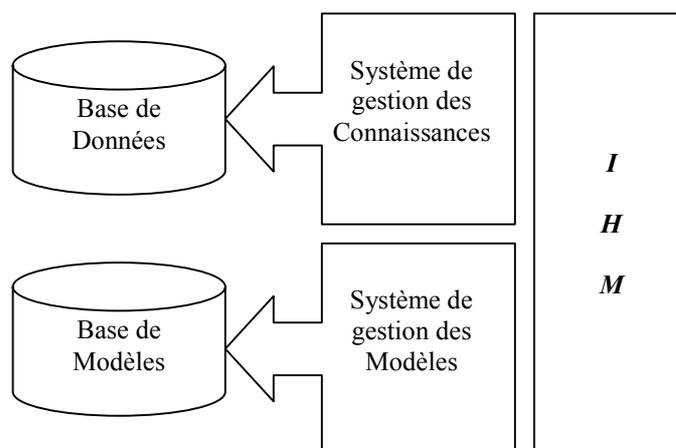


Figure 2.10 : Représentation graphique d'un Environnement de Résolution de Problème

## **2.6. Conclusion du Chapitre 2**

Ce chapitre nous a permis de faire le point sur les méthodes d'acquisition et de formalisation des connaissances. Nous avons retenu UML comme langage de modélisation indépendant de tout langage de programmation et utilisable à toutes les échelles de complexité architecturale et ce, dans tous les domaines. Ce langage de modélisation a donc été choisi afin de concevoir le système de gestion des connaissances d'une zone atelier.

Le concept d'Environnement de Résolution de Problèmes est le Système d'Information adapté à l'aide à la modélisation du comportement des incendies de forêt. Nous avons choisi de traiter dans cette thèse, la conception d'une composante de l'ERP pour les modélisateurs du comportement des incendies de forêt. Nous nous intéressons plus particulièrement à la gestion des connaissances dédiées au domaine des feux de forêt. Après l'acquisition des connaissances détaillée dans le Chapitre 3, nous présentons dans le Chapitre 4, un modèle en UML du système d'information pour la gestion des connaissances d'une zone atelier dédiée à la modélisation du comportement des incendies de forêt. Un prototype du système est détaillé dans le Chapitre 5.

---

## **Deuxième Partie**

### **Acquisition et formalisation des connaissances de l'expérimentation en milieu naturel pour la modélisation des incendies de forêt**



## Chapitre 3

### **Acquisition des connaissances : état de l'art et pratique de l'expérimentation en milieu naturel**

*Les vrais hommes de progrès sont ceux qui ont pour point de départ un respect profond du passé.*

*Ernest Renan*

Dans le cadre de cette thèse, nous nous intéressons plus particulièrement aux expérimentations conduites sur des sites expérimentaux (utilisation de secteurs de brûlages dirigés et d'expérimentations en milieu naturel). L'expérimentation en milieu naturel est définie par un dispositif de mesure en adéquation avec l'objectif du modélisateur. Elle est l'un des outils privilégiés du scientifique. Elle est à l'origine et à la conclusion de la modélisation. En effet, elle permet lors de la première étape de modélisation, de constituer le jeu de données nécessaire pour modéliser le phénomène étudié. Enfin, à la troisième et dernière étape de modélisation (la validation) l'expérimentation permet d'élaborer un jeu de données sur lequel les modèles proposés sont éprouvés.

La modélisation des risques naturels a depuis longtemps attiré l'attention de nombreuses unités de recherche. Étudié en laboratoire dans un premier temps, le phénomène a été par la suite observé en milieu naturel afin de le restituer dans son contexte spatial. En effet, si le phénomène peut être plus facilement recréé et contrôlé en laboratoire, il est cependant difficile de déduire de ces études des modèles prédictifs applicables à une aire géographique. Le recours à l'expérimentation en milieu naturel constitue donc un outil de modélisation des incendies de forêt.

Nous allons nous livrer dans ce chapitre, à une acquisition des connaissances par un état de l'art non exhaustif des expérimentations conduites à travers le monde ainsi que par la pratique de l'expérimentation en milieu naturel.

### **3.1. Etat de l'art des expérimentations en milieu naturel dédiées à la modélisation des feux de forêt**

La plupart des études de propagation de feux ayant été réalisées en laboratoire et à l'abri des variations climatiques (Valette et al., 1979 ; Guijarro et Valette, 1995 ; Hernando et al., 1995 ; Dupuy, 1997 ; Ventura et al., 1997), la composante climatologique est donc peu prise en compte dans ces analyses. Toutefois, bien que la vitesse du vent soit artificiellement créée par une soufflerie, les composantes naturelles que sont la turbulence thermique et mécanique ne sont malheureusement pas prises en compte.

Par ailleurs, un nombre assez restreint de chercheurs (Lopes et al., 1994 ; Viegas et al., 1994 ; Cheney et al., 1993, 1995, 1998 ; Marsden-Smeydley et al., 1995 ; Perez et al., 1995, 1996, 2000) a pu étudier dans des conditions réelles, la propagation d'un incendie de forêt ou de maquis. En effet, les expérimentations classiques de propagation d'incendies en terrain naturel nécessitent une logistique importante, coûteuse et longue à mettre en place, même en terrain plat. Or, l'obtention de mesures, effectuées sur le terrain avec des végétaux vivants et dans un contexte topographique naturel, paraît nécessaire pour mieux comprendre les processus de propagation des feux de forêt ou pour valider les résultats d'éventuels modèles physiques ou semi-empiriques.

Ces expérimentations s'attachent donc à mesurer les différentes formes de comportement du phénomène ainsi que les différents paramètres qui influent sur lui. Même si elles ont été réalisées en différents lieux (France, Espagne, Canada, Etats-Unis, Australie), bon nombre d'entre elles utilisent des protocoles de mesure quasi identiques. Il est donc possible d'identifier ces différents points communs afin de déterminer un protocole expérimental unique couvrant l'ensemble des expériences scientifiques du domaine.

Nous pouvons distinguer cinq sortes d'expérimentations dédiées au domaine des feux de forêt. Ces expérimentations permettent d'étudier :

- L'inflammabilité du combustible,
- La propagation du feu,
- L'intensité du front de flammes,
- Les émissions de gaz,
- Les conséquences d'un feu sur l'environnement.

A chaque type d'expérimentation correspond une métrologie spécifique. Le dispositif de mesure mis en place dépend de l'information que l'on veut recueillir et sur laquelle reposera la modélisation du phénomène. Toutefois, de nombreux travaux

scientifiques réalisés à travers le monde, regroupent ces différents types d'expérimentations afin de minimiser leur coût et leur nombre. La phase expérimentale est ainsi complète car elle couvre toutes les expressions du phénomène. Étant donné que l'objet de ce travail concerne l'aide à la modélisation du comportement des feux de forêt, nous nous intéressons seulement aux expérimentations dédiées à l'étude de la propagation et/ou de l'intensité d'un feu.

### **3.1.1. Les expérimentations dédiées uniquement à l'étude de la propagation du feu**

L'efficacité de la lutte contre l'incendie de forêt dépend étroitement d'une bonne connaissance de la vitesse de propagation du feu. Depuis des années, les modélisateurs se sont intéressés à ce paramètre et ont proposé des modèles permettant de prédire la vitesse de propagation d'un éventuel feu de forêt, sous certaines conditions et en admettant une certaine marge d'erreur. Ces études se sont appuyées sur des données mesurées lors d'expérimentations en milieu naturel. Une étude non exhaustive de différentes expériences scientifiques dédiées à l'étude des feux de forêt a été réalisée. Cette étude bibliographique a contribué à mettre au point le modèle de l'expérimentation (Cf. Chapitre 4).

#### ***3.1.1.1. Les expérimentations menées en Europe***

Certaines équipes de chercheurs se sont livrées en Europe à des expérimentations en milieu naturel. Il semblait donc important de faire un état de l'art des protocoles et des dispositifs de mesures existants. Plus qu'une simple description d'expérimentations en milieu naturel, cette analyse bibliographique a pour objet de démontrer que le champ de l'expérimentation peut se montrer très vaste et qu'une normalisation de l'expérimentation pourrait devenir rapidement l'un des besoins majeurs du modélisateur.

En 1998, l'INRA<sup>1</sup> d'Avignon et l'UNSA<sup>2</sup> se sont livrés à des expérimentations en milieu naturel, conduites dans les départements des Alpes-Maritimes et des Landes. La participation à ces campagnes de mesures ayant constitué une part importante de l'acquisition des connaissances du domaine, nous détaillons ces expérimentations dans la seconde partie du chapitre.

---

<sup>1</sup> Institut National de la Recherche Agronomique

<sup>2</sup> Université de Nice Sophia-Antipolis

*3.1.1.1.1. Les expérimentations menées par le Centro de Investigaciones Forestales (Espagne)*

Le centre de recherche forestière de Galicia (Espagne) a mené des expérimentations sur la vitesse de propagation du feu en milieu naturel, dans la région de Galicia (Vega et al., 1998). Trois types de combustible à base d'arbustes ont été sélectionnés en sept localisations représentatives et sujettes à des feux fréquents. Finalement 30 feux ont été conduits sur des sites composés d'ajoncs. La taille des parcelles variait de 20×20 m à 200×200 m. Un inventaire de la charge de combustible a été effectué sur l'une des quatre sous-parcelles de 4×4 m, adjacentes à la parcelle à brûler.

La température et l'humidité de l'air ainsi que la vitesse et la direction du vent ont été mesurées pendant les expériences par une station automatique à 6 m de hauteur placée près des parcelles et au vent. Une corrélation a été préalablement calculée entre le vent à 1,7 m et le vent à 6 m. La vitesse du vent en surface (1,7 m) a donc été calculée durant les expériences.

La couverture au sol et la hauteur des végétaux ont été mesurées pour chaque espèce sur un transect établi sur les côtés de la sous-parcelle. Toute la végétation, y compris la litière à l'intérieur de chaque sous-parcelle a été coupée et séchée à 100 °C jusqu'à l'obtention d'un poids constant. Le taux de combustion a été mesurée en calculant la différence de poids du combustible, avant et après le feu. Des paramètres physiques du combustible utilisés dans les modèles de propagation ont du être calculés en laboratoire. Le rapport surface/volume a été déterminé pour chaque espèce en mesurant des dimensions (finesse, largeur) de portions représentatives, et en utilisant un stéréo-microscope et des approximations à des graphes géométriques suivant Brown (1970). Le rapport surface/volume pour tous les complexes d'arbustes a été calculé selon Rothermel (1972) et le programme BEHAVE (Burgan et Rothermel, 1984 ; Andrews, 1986 ; Andrews et Chase, 1989 ; Andrews, 1998). Le rapport de densité a été calculé en considérant la hauteur pondérée par un pourcentage d'occupation au sol au lieu de la hauteur réelle.

Les vitesses de propagation ont été mesurées par deux observateurs en chronométrant le front de flammes atteignant certains repères. Elles ont été effectuées principalement sur l'avant du front de feux, mais aussi sur les côtés et à l'arrière. Pour les tests de propagation, 41 observations (avant et côté) ont été utilisées pour développer un modèle empirique de la vitesse de propagation. La hauteur et l'angle de la flamme des différents fronts du feu ont été enregistrés et estimés à l'aide de la vidéo, et ce, pour la totalité des feux expérimentaux (65 feux) afin d'élaborer un modèle empirique et de comparer ces mesures aux prédictions d'autres modèles.

### *3.1.1.1.2. Les expérimentations menées par l'Université de Coimbra (Portugal)*

L'Université de Coimbra a réalisé des feux expérimentaux sur six parcelles de 12×40 m (Viegas et al., 1994). Ces feux, gravissant et descendant la pente, se sont propagés sur des pentes uniformes. Le combustible était principalement composé de buissons.

#### *Le protocole de mesure des paramètres météorologiques :*

Deux stations automatiques de mesure de paramètres climatologiques ont été utilisées pour enregistrer la vitesse et la direction du vent durant les expériences. La première station a été placée sur le versant opposé au site expérimental, à une distance de 200 à 300 m des parcelles. Cette station a été positionnée de manière à surplomber les parcelles expérimentales. Deux anémomètres ont été placés sur le mât de la station météorologique à 3 m et 6 m sur sol, dans le but :

- D'obtenir un profil de vent,
- De calculer ainsi la vitesse du vent proche du sol,
- D'estimer les caractéristiques de friction du vent sur le site expérimental.

La seconde station automatique, placée à proximité de la parcelle à brûler, comprenait un anémomètre à une hauteur de 1,3 m sur sol. Dans le but de déterminer la vitesse de propagation, des piquets ont été placés tous les 2 m le long des deux côtés de la parcelle. Un fil en Nylon a été tendu à travers la parcelle entre deux piquets (un de chaque côté) et ce, pour chaque paire de piquets. L'intervalle de temps entre chaque progression du feu a été mesuré au moins par deux observateurs pendant l'expérimentation.

### *3.1.1.2. Les expérimentations menées hors d'Europe*

Les Australiens, les Canadiens et les Américains sont sans conteste, les leaders en matière d'expérimentation en milieu naturel. Leurs campagnes d'essais sont de véritables projets associant de nombreux centres de recherche internationaux.

#### *3.1.1.2.1. Les expérimentations menées par l'Université de New South Wales (Australie)*

Des expérimentations ont été réalisées dans l'Ouest et le Sud-Ouest de la Tasmanie sur des parcelles plates d'un hectare (Marsden-Smedley et Catchpole, 1995a, 1995b). Le comportement des feux de forêt est influencé par un grand nombre de

variables. Mais les influences majeures peuvent être attribuées à quelques facteurs critiques : la vitesse du vent, la topographie, la teneur en eau et les caractéristiques du combustible. La plupart de ces paramètres peuvent en retour être contrôlés par d'autres, plus facilement mesurables. Exemple : la teneur en eau du combustible est influencée par l'historique des précipitations, la température et l'humidité relative de l'air ; la charge de combustible dépend de l'âge du combustible et de la géologie (Marsden-Smedley et Catchpole, 1995a). Sur les sites qui n'ont pas brûlé depuis 20 ans, une vitesse de propagation de plus de 10 m/mn et des hauteurs de flammes de plus de 5 m ont été observées avec une température de l'air de 18 °C, une humidité relative de 50 % et une vitesse de vent de 12 km/h (Marsden-Smedley, 1993).

*Le protocole de mesure des paramètres climatologiques :*

Des données de température, d'humidité relative, de direction et de vitesse de vent (à 10 m sur sol) ont été enregistrées à l'aide d'une station automatique de mesure de paramètres climatologiques située dans un rayon de 250 m des parcelles expérimentales et au vent. Il a été considéré que la vitesse du vent en surface pouvait être représentée par la vitesse de vent à 1,7 m sur sol. Les données climatologiques enregistrées correspondaient aux moyennes sur une période d'une minute. Les enregistrements débutaient au moins 2 heures avant le début du feu.

*Le protocole de mesure de vitesse de propagation et de hauteur de flammes :*

La vitesse de propagation des feux de faible ou moyenne intensité a été déterminée en chronométrant lorsque le front de flammes atteignait des points de référence prédéfinis (marqueurs numérotés en métal...). Les mesures de comportement du feu ont été faites en utilisant deux observateurs, un de chaque côté du feu et en faisant la moyenne de leurs résultats. La hauteur, la largeur et l'angle de la flamme ont été vérifiés en utilisant des photos et des vidéos.

*3.1.1.2.2. Les expérimentations menées par le Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (Australie)*

Le CSIRO<sup>3</sup> a entrepris depuis des dizaines d'années plusieurs séries d'expériences sur différents sites expérimentaux en Australie. Ces expérimentations ont pour objet l'étude de la relation entre la vitesse de propagation d'un feu et les différents paramètres qui agissent sur le phénomène (paramètres climatologiques, paramètres de végétation...).

---

<sup>3</sup> Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation

*Le site expérimental de GunnPoint :*

Entre 1972 et 1973, le CSIRO mena une campagne d'expérimentations à GunnPoint (Cheney et Gould, 1995). Toutes les deux minutes, 5 observateurs notaient le périmètre du feu et toutes les minutes, un observateur donnait une estimation visuelle de la continuité du combustible, de la hauteur, de la profondeur et de l'angle de la flamme du front de feu. Les vitesses de vent (m/s) ont été enregistrées à un intervalle de une minute, par un anémomètre à 1,5 m sur sol et proche de l'origine du feu.

En 1976, le CSIRO continua la campagne d'expériences sur ce même site et réalisa 12 feux expérimentaux (Cheney et Gould, 1995). Des mesures de propagation et de comportement du feu ont été réalisées à des intervalles d'une minute en utilisant les mêmes techniques qu'en 1973. Les données de vent ont été mesurées en utilisant 6 anémomètres positionnés en ligne et au vent, à partir de la ligne de mise à feu et plus ou moins parallèle à l'axe principal du feu. Pour chaque intervalle de propagation, la modélisation prend en compte la vitesse de vent de l'anémomètre le plus proche du front de flammes. Ce dernier devant avoir une influence sur la vitesse du vent dans un rayon de 50 m, les six anémomètres ont été placés à des intervalles distants de 60 à 120 m.

*Le site expérimental d'Annaburoo :*

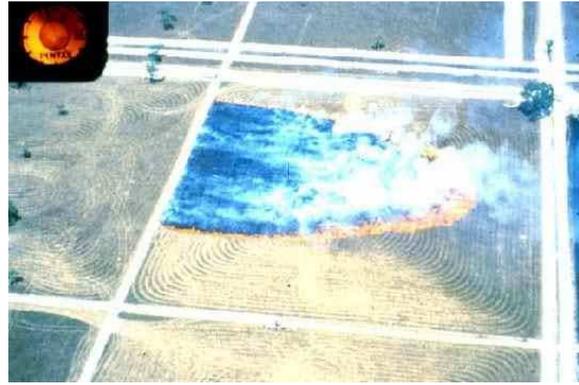
Une campagne de feux expérimentaux sur herbe a été conduite par le CSIRO dans les territoires du Nord de l'Australie afin de déterminer l'importance relative des caractéristiques du combustible sur la vitesse de propagation et en particulier l'importance de la charge de combustible (Cheney et al., 1993, 1995) (Fig. 3.1 et 3.2). Ces expériences ont porté sur 121 feux d'herbe. Les expériences ont été conduites durant juillet et août 1986. L'aire expérimentale, plate sur 2500 ha, a été subdivisée en 170 parcelles de 100×100 m, 200×200 m et 200×300 m. Le site contenait deux types distincts d'herbe :

- L'herbe « *Kerosene* » (couche compacte et horizontale de très hautes tiges),
- L'herbe « *Kangourou* » (herbe ordinairement largement répandue).

Une station météo a été placée au centre du site expérimental pour enregistrer la vitesse du vent et la température de l'air mesurées à 10 m et 2 m sur sol. Des mesures supplémentaires de vitesse de vent à 10 m et 2 m ont été effectuées dans un rayon de 800 m des parcelles, afin de déterminer un profil de vent sur le site expérimental. Durant chaque feu expérimental, la vitesse du vent a été mesurée à 2 m sur sol avec quatre anémomètres placés à chaque coin de la parcelle. Des observateurs ont également mesuré ponctuellement, la température et l'humidité relative de l'air, la vitesse du vent, le type d'herbe ainsi que la teneur en eau du combustible.



**Figure 3.1 : Le site expérimental\_d'Annaburoo ; 1995 (cliché de Phil Cheney/CSIRO)**



**Figure 3.2 : Vue aérienne d'une expérimentation, site expérimental\_d'Annaburoo ; 1995 (cliché de Phil Cheney/CSIRO)**

Pour chaque feu, une carte d'isochrones du périmètre de feu a été établie. La vitesse de propagation maximale a été déterminée en mesurant la distance maximale entre un isochrone et l'isochrone précédent. Pour chaque période, la vitesse de propagation maximale du feu et la largeur effective du front de flammes ont été mesurées et la forme du front (parabolique ou en flèche) a été estimée. La carte du périmètre de feu a été étudiée pour obtenir la largeur effective du front de flammes et la vitesse de propagation maximale.

### **3.1.2. Les expérimentations dédiées à la fois à l'étude de l'intensité du feu et à sa propagation**

Nous faisons un état de l'art des pratiques expérimentales menées en Europe et dans le reste du monde.

#### ***3.1.2.1. Les expérimentations menées en Europe***

##### ***3.1.2.1.1. Les expérimentations menées par le Centre d'Essais et de Recherche de l'ENTente (France)***

Dans le Sud de la France, le CEREN<sup>4</sup> a entrepris des expérimentations fondées sur le brûlage dirigé (Giroud et al., 1998). Parce que chaque année des milliers d'hectares sont brûlés par l'ONF<sup>5</sup> dans le cadre de brûlages dirigés, le CEREN a choisi d'effectuer des mesures de propagation et d'intensité lors de ces feux contrôlés.

<sup>4</sup> Centre d'Essais et de Recherche de l'ENTente

<sup>5</sup> Office National des Forêts

*Le dispositif de mesure mis en place :*

Une station météo a été placée en amont de la parcelle. La vitesse et la direction du vent, la température et l'hygrométrie ont été mesurées toutes les 10 mn. Le nombre de pieds de l'espèce végétale dominante a été compté et un élément représentatif de l'espèce a été mesuré et pesé afin de calculer la biomasse ( $\text{kg/m}^2$ ). Trente échantillons de végétation ont été prélevés afin d'évaluer la teneur en eau du combustible, l'inflammabilité et la combustibilité.

Différentes techniques ont été éprouvées afin de mesurer la vitesse de propagation du front de flammes :

- Un réseau de fusées de différentes couleurs a été installé dans la parcelle expérimentale afin de mesurer la vitesse de propagation pour chaque partie du front de flammes,
- Des lignes de fils électriques ont été placées parallèlement au front de flammes et reliées à des ampoules ; lorsque le front de flammes coupe le fil, l'ampoule s'éteint, donnant une indication sur la localisation de celui-ci.

Afin de mesurer l'intensité du feu, la température des flammes a été mesurée à l'aide de deux techniques :

- Une caméra thermique a été placée parallèlement à la propagation afin de montrer le développement de la propagation du feu ; la difficulté est alors de localiser la végétation et la position exacte du front de flamme,
- Des thermocouples ont été placés tous les 1,5 m à deux hauteurs différentes : 30 cm (dans la végétation) et 80 cm (juste au dessus de la végétation) ; les températures ont donc pu être mesurées lors du passage du front de flammes.

Les données recueillies ont fait l'objet d'une utilisation dans le cadre d'une modélisation mathématique du feu.

*3.1.2.1.2. Les expérimentations menées par l'Université de Valence (Espagne)*

Des expérimentations en milieu naturel ont été menées à La Concordia à 50 km au nord-ouest de Valence (Espagne) par l'université de Valence (Molina et Llinares, 1998). Six parcelles de 20×4 m, à une altitude de 550 à 575 m, ont été instrumentées pour mesurer la propagation et l'intensité du feu. Ce site expérimental a déjà été brûlé en 1978 par un feu de forêt.

Durant les expérimentations, la vitesse de propagation, les conditions météorologiques et les paramètres d'intensité ont été mesurés grâce à des thermocouples installés sur le sol. En juin 1995, des feux expérimentaux ont été réalisés sur un versant avec une pente de 30 à 40 % et exposée au sud-ouest. Ce versant a été choisi afin d'obtenir des parcelles de même pente.

Deux charges de combustible ont été considérées (trois parcelles par charge de combustible). Du combustible a été rajouté afin d'avoir une continuité spatiale sur les parcelles de 2 et 4 kg/m<sup>2</sup>. Le poids à sec des espèces a été mesuré. Les biovolumes et les poids à sec ont fait l'objet d'une régression linéaire. La biomasse présente a été déterminée en appliquant le résultat de la régression aux biovolumes mesurés des plantes présentes dans chaque m<sup>2</sup>.

Six thermocouples ont été placés sur chaque parcelle afin de mesurer la température des flammes. Les données de température de l'air, d'hygrométrie, de vitesse et de direction du vent ont été automatiquement enregistrées par une station météorologique. Afin de mesurer la vitesse de propagation, des piquets ont été placés tous les 2 m le long de la parcelle et ce, de chaque côté de celle-ci. Les temps de passage ont pu ainsi être chronométrés. En complément de cette méthode, la distance entre les thermocouples et les heures de début d'enregistrement ont également été utilisées afin d'obtenir plus d'informations sur la vitesse de propagation.

### ***3.1.2.2. Les expérimentations menées hors d'Europe***

#### *Le projet Vesta du CSIRO (Australie)*

Le CSIRO en collaboration avec le CALM<sup>6</sup> a entrepris un programme de cinq années de recherche ayant pour objet la réalisation d'expérimentations et l'étude du comportement de feux de forêt de grande intensité dans des forêts sèches d'eucalyptus, avec différents âges de combustible. Le projet *Vesta*, débuté en 1997, représente à ce jour le plus grand programme de recherche sur le comportement des feux de forêt mené en Australie.

Deux sites expérimentaux ont été choisis dans le sud-ouest de l'Australie. Chaque site est composé de combustibles différents :

- Le site McCorkhill (Fig. 3.3) est une zone boisée assez dense, composée d'arbustes de plus de 3 m de haut,

---

<sup>6</sup> Western Australian Department of Conservation and Land Management

- Le site Dee Vee (Fig. 3.4) est composé d'arbres dispersés sur une strate herbacée développée, étant donné que le feu n'a pas sévi dans cette région depuis plusieurs années.

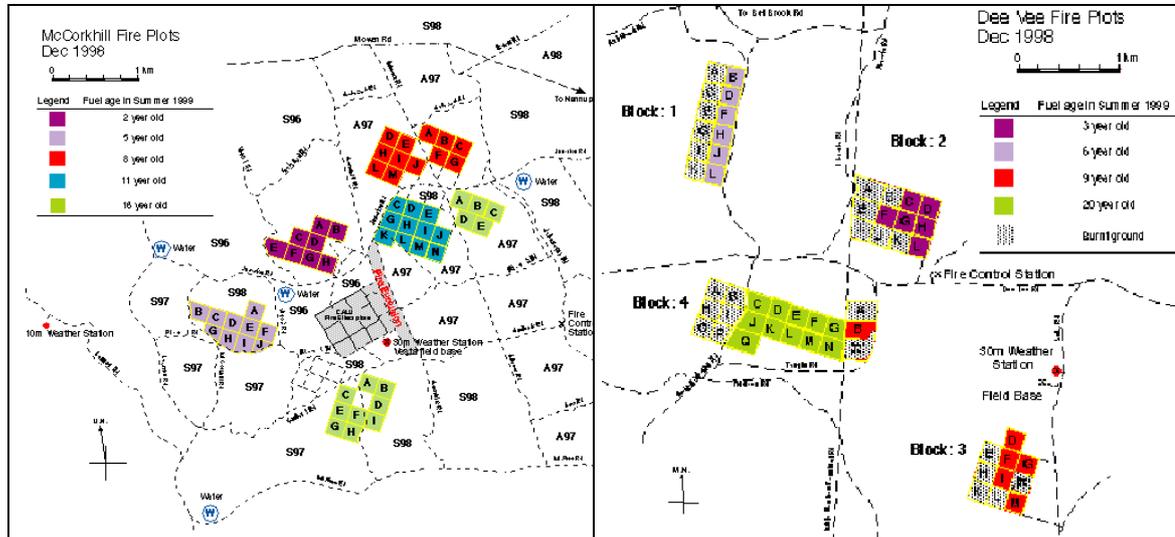


Figure 3.3 : Site expérimental de McCorkhill (source : site web du CSIRO/Vesta)

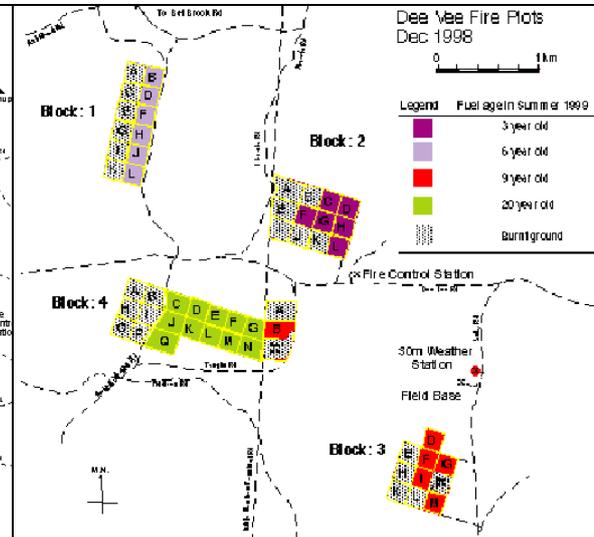


Figure 3.4 : Site expérimental de Dee Vee (source : site web du CSIRO/Vesta)

La litière, considérable, est composée de feuilles, de brindilles et d'écorces. Selon la parcelle, l'âge du combustible de ces sites expérimentaux variait de 2 à 20 ans (5 classes d'âge sur McCorkhill et 4 sur Dee Vee).

Chaque site a été divisé en 56 parcelles de 200×200 m. Une bande de sécurité de 5 km de large a été faite autour des parcelles afin d'éviter une saute de feu. Des mesures de charge de combustible, de densité de la végétation et du profil de vent à l'intérieur de la forêt ont été réalisées avant les feux expérimentaux.

Afin de mieux mesurer l'intensité du front de flammes, 28 thermocouples pour le terrain furent utilisés sur certaines parcelles. De plus, des tours de 3 m de hauteur équipées de thermocouples furent mises en place afin de mesurer la température des flammes à 0,5, 1, 2 et 3 m de hauteur et ainsi définir un profil vertical des températures d'un front de flammes.

Les expérimentations débutèrent en été 1998 (janvier à mars) (Fig. 3.5 et 3.6). Durant certaines journées favorables, plusieurs parcelles étaient allumées en même temps. Lors de très sévères conditions météorologiques, le feu se développait en feu de cimes et des sautes de feu pouvaient atteindre un kilomètre. Les paramètres climatologiques comme le vent, les radiations solaires, la température et l'humidité relative de l'air étaient mesurés durant les expérimentations.

Les journées avec un vent de 0 à 20 km/h ont été choisies pour brûler les parcelles. Seulement 23 feux expérimentaux sur les 48 prévus ont pu être réalisés. Les conditions climatologiques trop sévères pour les feux, ont perturbé le bon déroulement des expérimentations.



Figure 3.5 : Expérimentation avec un feu de grande intensité  
(source : site web du CSIRO/Vesta)



Figure 3.6 : Expérimentation du 5 mars 1998  
(source : site web du CSIRO/Vesta)

En 1999, de nouvelles expérimentations ont eu lieu sur ces sites. Le protocole et le dispositif de mesure précédents furent à nouveau utilisés.

### 3.1.3. Les expérimentations dédiées à l'étude de la propagation, de l'intensité et des émissions gazeuses du feu

De grandes séries d'expérimentations ont été entreprises afin d'étudier les différents aspects du comportement du feu.

#### 3.1.3.1. L'International Crown Fire Modelling Experiment (Canada)

Le projet *ICFME*<sup>7</sup> sous la responsabilité de l'IBFRA<sup>8</sup>/SRFWG<sup>9</sup> a pour objet d'effectuer des expérimentations en forêts au nord du Canada, afin de modéliser les feux de cimes (Alexander et al., 1998). L'objet de l'IBFRA est d'étudier les changements climatiques globaux afin de mieux les comprendre. Elle étudie le fonctionnement des écosystèmes des forêts boréales, touchés par les feux de grande intensité (Fosberg, 1992 ; Goldammer et Furyaev, 1996). Cette association comporte également une

---

<sup>7</sup> International Crown Fire Modelling Experiment

<sup>8</sup> International Boreal Forest Research Association

<sup>9</sup> Stand Replacement Fire Working Group

activité de recherche primordiale dans le projet IGAC<sup>10</sup> mené par l'IGBP<sup>11</sup> en relation avec le projet BIBEX<sup>12</sup> (Goldammer, 1994 ; Goldammer et Furyaev, 1996).

Le site expérimental :

Le Canadian Forest Service (CFS) a été chargé de choisir le site d'étude localisé à 40 km au nord de la ville de Fort Providence, dans les Territoires du Nord-Ouest du Canada. Le site expérimental était constitué de Pins (*Pinus banksiana*) vieux de 65 ans, de 12 m de haut (environ 4100 arbres/ha) ainsi que de *Picea mariana* (4600 arbres/ha). Cette végétation constituait un combustible idéal pour étudier les feux de cimes de grande intensité, comme ceux qui ont lieu lors de conditions météorologiques estivales adéquates. L'aire d'étude était entourée d'une prairie, dominée par des buissons et d'une largeur de 0,5 à 1 km, qui avait brûlé en mai 1995 et dont certaines portions avaient été rebrûlées en mai 1997 afin d'assurer la sécurité autour des parcelles.

Dix parcelles expérimentales ont été établies durant l'été 1995 (Fig. 3.7 et 3.8) : huit parcelles de 150 m de côté, une de 100 m de côté et la dernière de 75 m de côté. Les parcelles ont été orientées en fonction de la direction principale du vent dominant. En 1996, trois parcelles supplémentaires ont été établies, adjacentes aux premières, dans le but d'analyser les différents aspects de traitement du combustible, tels que les effets d'élagage sur le comportement du feu et la validité de certaines espèces utilisées comme coupure de combustible. Suivant la première phase de brûlage de l'ICFME, quatre parcelles supplémentaires ont été ajoutées afin d'examiner l'efficacité :

- Des abris pare-feu sur une petite clairière en opposition à un grand éclaircies de la forêt (représentés sur la Fig. 3.7 par les écrans pare-feu S1 et S2),
- Des matériaux de construction de maisons, contre les feux de forêt (parcelles I1 et I2 contenant des maisons de simulation).

Préparatifs avant l'expérimentation :

Un pare-feu de 50 m de large a été réalisé autour de chaque parcelle afin de faciliter l'accès aux sapeurs pompiers. Différents types de données ont été recueillis avant les expérimentations :

- Des échantillons de sol, de charge et épaisseur de combustible ont été prélevés pendant les étés 1995 et 1996 en utilisant des techniques standardisées (Stocks, 1980 ; Nalder et al., 1997),

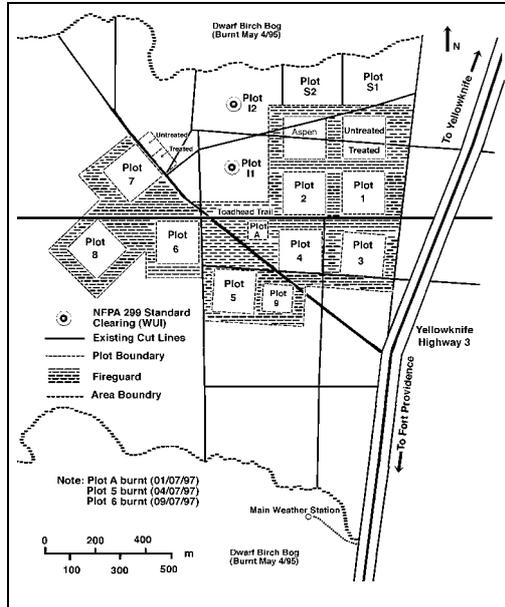
---

<sup>10</sup> International Global Atmospheric Chemistry

<sup>11</sup> International Geosphere-Biosphere Programme

<sup>12</sup> Biomass Burning Experiment

- Des données climatologiques ont été mesurées chaque jour grâce à une station météorologique très instrumentée, installée dans une grande prairie au sud des parcelles.



**Figure 3.7 : Disposition des parcelles en 1998 (source : site web du Service Canadien des Forêts/ICFME)**



**Figure 3.8 : Vue aérienne des parcelles (source : site web du Service Canadien des Forêts/ICFME)**

Les données de la station météorologique ont permis de calculer les six composantes du système Météo-Feu de Forêt canadien (Van Wagner, 1987), utilisé avec les prévisions météo afin de déterminer chaque jour, si l'expérimentation pouvait être réalisée.

Les prévisions d'éclosion de feux de forêt pour l'ICFME ont été estimées deux fois par jour (8h et 15h) :

- Les données de 8h, incluant des prédictions horaires de température, humidité relative, les probabilités de précipitation, les vitesses et directions de vent, étaient utilisées pour les prévisions de la journée,
- Les données de 15h, incluant la température maximale, l'humidité relative minimale, la probabilité des précipitations, la vitesse et la direction du vent dominant, étaient utilisées pour les prévisions à deux et quatre jours.

Les prévisions ont été préparées par un météorologiste basé à Edmonton (état d'Alberta) en utilisant les informations provenant de différents sites Web. Différents traitements ont été effectués : une analyse de surface et des couches hautes de l'atmosphère, des diagrammes thermodynamiques des couches supérieures de l'air sur trois stations proches du site (Forth Smith, Norman Wells et Fort Nelson), un traitement

d'images satellites (GEOS et NOAA, visible, InfraRouge). Ces traitements ont été effectués à l'aide de mesures de surface disponibles sur Internet et des données du CAES<sup>13</sup>, l'équivalent en France de Météo-France.

Une radiosonde portable a été utilisée durant les jours de brûlage de 1988 afin de déterminer la structure verticale de l'atmosphère au-dessus du site expérimental de l'*ICFME*. L'apport de ces nouvelles données permet d'affiner les prévisions météorologiques et de quantifier les émissions des feux dans la haute atmosphère lors de chaque expérimentation. Les prévisions étaient actualisées le jour même de l'expérimentation, via les communications satellites directement reliées à l'aire d'étude de l'*ICFME*.

#### Les expérimentations :

Après trois ans de préparation, la première phase des brûlages débuta en juin-juillet 1997. Les parcelles ont été allumées à l'aide d'un lance flamme monté sur un camion. La longueur de 150 m de ligne de mise à feu était allumée en moins de 1 mn. Toute une série de d'instrumentations au sol et embarquées sur hélicoptères a été utilisé afin de quantifier de différentes manières les caractéristiques des nombreux feux. Ces instruments ont permis de mesurer les composants chimiques des fumées émises, la hauteur et la géométrie des flammes, les températures et la vitesse de propagation en utilisant des caméras InfraRouge, des radiomètres et des thermocouples. Les expérimentations de cette première phase se succédèrent durant trois semaines. La seconde étape du projet *ICFME* se déroula durant l'été 1998. Divers scientifiques de différents pays (Etats-Unis, Russie, France, Australie...) participèrent aux expérimentations canadiennes.

Cinq parcelles expérimentales furent brûlées durant les deux périodes (Fig. 3.9 et 3.10). Les vitesses de propagation étaient comprises entre 2 et 3,5 km/h, avec une intensité de 35000 à 70000 kW/m et des hauteurs de flammes deux fois plus hautes que la cime des arbres. Ces feux ont permis de constituer la base de données sur les feux de cimes, la plus complète au monde et la mieux documentée à ce jour. Les chercheurs continuent à analyser les données recueillies lors de ces expérimentations.

La troisième phase du projet *ICFME* s'est déroulée en juin-juillet 1999 et la quatrième phase en juin-juillet 2000. Le protocole et le dispositif de mesure utilisés étaient identiques à ceux des phases précédentes.

---

<sup>13</sup> Canadian Atmospheric Environment Service



Figure 3.9 : Vue aérienne d'une expérimentation en 1997 (source : site web du Service Canadien des Forêts/ ICFME)



Figure 3.10 : Vue aérienne d'une expérimentation en 1998 (source : site web du Service Canadien des Forêts/ ICFME)

### 3.1.3.2. Le Programme BIBEX

*BIBEX* est l'un des plus grands programmes d'expérimentations menées sur la combustion de biomasse et son effet sur l'atmosphère. Ce programme est représenté par différents projets de recherche tels que *DECAFE*, *SAFARI* ou *FIRESCAN* (source : site web du Global Fire Monitoring Center/BIBEX).

#### 3.1.3.2.1. Le projet *DECAFE*

Ce projet représente la première expérience multidisciplinaire organisée en Afrique pour étudier les émissions de gaz et de particules par les feux de savanes (source : site web du Global Fire Monitoring Center/BIBEX). Il s'est attaché à l'étude expérimentale des sources de constituants mineurs atmosphériques émis par les écosystèmes tropicaux tels que les combustions de biomasse et des conséquences de ces émissions sur la chimie atmosphérique à l'échelle du continent africain, en particulier sur la formation des oxydants (ozone) et la composition des précipitations. Dans le cadre de ce projet, des expérimentations en milieu naturel ont eu lieu en Côte d'Ivoire en 1991 (projet *FOS/DECAFE 91*).

#### 3.1.3.2.2. Le projet *Southern African Fire-Atmosphere Research Initiative*

*SAFARI*<sup>14</sup> est un programme de recherche international ayant pour objet de quantifier le rôle des feux de savane dans le cycle du carbone et dans la production d'ozone (source : site web du Global Fire Monitoring Center/BIBEX). Le dispositif de mesure utilisé comprenait des stations de mesure au sol et des capteurs embarqués sur

---

<sup>14</sup> Southern African Fire-Atmosphere Research Initiative

des avions. En 1992, des feux dirigés expérimentaux eurent lieu en Afrique du Sud, dans le parc national *Kruger* (projet *SAFARI-92*). Deux brûlages dirigés de 2000 ha chacun ont été réalisés afin d'effectuer une série de mesures la plus complète possible. Des mesures de vitesse de propagation, d'intensité du feu et d'émissions de gaz et de particules furent effectuées. Ce projet fut suivi de *SAFARI-2000* qui débuta en 1999 et s'acheva en 2000. Le même type d'expérimentations eut lieu afin d'enrichir la base de données et d'affiner les modèles existants ; les chercheurs se sont toutefois plus intéressés aux écosystèmes et à leur changement après le passage d'un feu.

### 3.1.3.2.3. Le projet *African Fire-Atmosphere Research Initiative*

*AFARI*<sup>15</sup> est un projet intermédiaire entre *SAFARI-92* et *SAFARI-2000* (source : site web du Global Fire Monitoring Center/BIBEX). Des brûlages dirigés se déroulèrent sur deux sites expérimentaux au Kenya en 1997 (projet *AFARI-97*) (Fig. 3.11). Les parcelles expérimentales étaient de 50 à 200 hectares.



**Figure 3.11 : Lewa Downs, Kenya, Septembre 1997**

(source : site web du Global Fire Monitoring Center/BIBEX)

L'objet de ces expérimentations était de quantifier la relation entre la production d'aérosols et la formation de CO et CO<sub>2</sub> durant les brûlages dirigés expérimentaux et les feux de savanes. Des capteurs au sol et embarqués (sur avion ou satellites) furent utilisés afin de mesurer les paramètres environnementaux (météorologie, végétation avant et après le passage du feu) et les paramètres relatifs au comportement du feu. Ces données ont été stockées dans la base de données de l'IGBP.

Les projets de recherche *DECAFE* et *SAFARI* ont démontré que les effets des émissions de combustion de biomasse sont de même nature et de même ampleur que ceux des pays industrialisés de l'hémisphère nord.

---

<sup>15</sup> African Fire-Atmosphere Research Initiative

### 3.1.3.2.4. Le projet *Fire Research Campaign Asia-North*

FIRESCAN<sup>16</sup> a été organisé conjointement par l'IBFRA/SRFWG et l'IGBP du projet *IGAC*. L'objet de ce projet était d'effectuer une campagne de feux expérimentaux de grande intensité, dans la région de Krasnoyarsk, permettant ainsi aux chercheurs de comparer différentes méthodologies de recherche (FIRESCAN Science Team, 1994, 1996 ; IUFRO, 1995). Ces expérimentations ont donné lieu à des mesures de différents paramètres environnementaux (végétation, météorologie...), du comportement du feu (vitesse de propagation, intensité, émissions de gaz et de particules à l'intérieur du panache de fumée...) (Fig. 3.12 et 3.13).



**Figure 3.12 : Expérimentation dans la région Krasnoyarsk, Russie, 1993 ; (source : site web du Global Fire Monitoring Center/BIBEX)**



**Figure 3.13 : Colonne de convection (5 km) coiffée d'un cumulus, au dessus de la parcelle expérimentale à Bor Forest Island (1555 h) ; (source : site web du Global Fire Monitoring Center/BIBEX)**

### 3.1.3.3. Le projet *FROSTFIRE*

Ce projet a eu pour objet de mener en été 1998 et 1999, une série de brûlages dirigés de grande intensité (plus de 700 hectares brûlés), sur un bassin versant expérimental situé en Alaska (le Caribou-Poker Creek Experimental Watershed) (Fig. 3.14 et 3.15).

L'objectif du projet était d'étudier les effets à long terme d'un feu en fonction de son intensité et du taux de combustible consommé. Des mesures hydrologiques ont été menées sur ce site expérimental depuis des décennies. Ces mesures se poursuivront

<sup>16</sup> Fire Research Campaign Asia-North

après les expérimentations afin de définir les effets du feu sur les propriétés du bassin versant.



**Figure 3.14 : Vue aérienne du site expérimental**  
(source : site web de l'USDA Forest Service/FROSTFIRE)



**Figure 3.15 : Expérimentations en 1999**  
(source : site web de l'USDA Forest Service/FROSTFIRE)

Après avoir fait un état de l'art de la pratique de l'expérimentation à travers le monde, nous allons nous intéresser à l'acquisition des connaissances sur le terrain, par la pratique d'expérimentations en milieu naturel.

## **3.2. La pratique des expérimentations en milieu naturel**

L'équipe « Gestion et Valorisation de l'Environnement » de l'Université de Nice-Sophia Antipolis s'est livrée à des expérimentations en milieu naturel dans les départements des Alpes-Maritimes et des Landes afin d'analyser l'influence des paramètres climatologiques sur le comportement des feux de forêt. Nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'étude de l'influence du vent sur la vitesse de propagation du front de flammes. Ces expérimentations sont détaillées ci-dessous.

### **3.2.1. Les expérimentations dans le département des Alpes-Maritimes**

Dans le cadre du projet européen « EFAISTOS » (projet n° ENV4-CT96-0299), l'équipe « Gestion et Valorisation de l'Environnement » de l'Université de Nice-Sophia Antipolis s'est livrée à des expérimentations dans les Alpes-Maritimes (Napoli et Carréga, 1995 ; Carréga et Napoli, 1998). Ces expériences reposaient sur des brûlages dirigés effectués à la fin de l'hiver et au début du printemps par l'ONF<sup>17</sup> dans le

---

<sup>17</sup> Office National des Forêts

département des Alpes-Maritimes. En effet, dans certaines conditions qui seront exposées ci-dessous, un brûlage dirigé peut momentanément être assimilé à un feu de maquis ou garrigue et se rapprocher très fortement d'un feu de forêt. Afin de tester notre protocole de mesures de données climatologiques, nous avons accompagné durant les campagnes de brûlage des hivers 1997 et 1998, une équipe de l'ONF de Valbonne (Alpes-Maritimes) qui a gracieusement accepté quelques contraintes liées à nos mesures. Les communes concernées par cette étude se situent dans les Préalpes de Grasse (NW de Nice) vers 800-1100 m d'altitude, en relief accidenté. En contrepartie d'une perte d'informations acceptable, le protocole de mesure présentait le grand intérêt d'être facile à utiliser, peu coûteux et surtout pouvant être déployé très rapidement.

### **3.2.1.1. Le protocole de mesure**

Le protocole a été mis au point dans un souci de simplification des mesures et d'adaptation rapide à l'imprévu. En effet, pour chaque journée et pour diverses raisons (autorisation de brûler accordée ou non par les propriétaires des terrains concernés, conditions météorologiques, organisation du travail...), le site de brûlage était dans la plupart des cas choisi le matin même par l'ONF. Il nous était donc impossible de connaître à l'avance le lieu précis du feu et les caractéristiques topographiques, comme cela se produit dans le cas d'incendies réels. L'une des priorités du protocole devait donc être sa rapidité de mise en place et ce, quel que soit le type de terrain.

Nos terrains d'expérimentations étaient toujours exposés au sud (du fait de l'orientation est-ouest du relief dans les Préalpes de Grasse), sur des pentes comprises entre 10 et 30°. La végétation typique de la garrigue de l'étage « subméditerranéen » était composée selon les cas, de *Genista cinerea*, *Buxus sempervirens*, *Spartum junceum*, *Juniperus oxycedrus* pour la strate arbustive et de *Quercus pubescens* et *Pinus sylvestris* pour la strate arborée, la strate herbacée étant surtout composée de *Brachypodium phoenicoides*, le tout sur sols minces (rendzines ou sols bruns) développés sur calcaires massifs.

Les parcelles de terrain les plus homogènes possibles en terme d'environnement (végétation et topographie) étaient choisies pour les expérimentations. L'aire à brûler formait un rectangle d'une vingtaine de mètres de largeur (perpendiculairement à la pente), et d'une trentaine de mètres (ou plus) de longueur (parallèlement à la pente) dans le sens de la propagation du feu. La limite supérieure de ce rectangle était en général matérialisée par un changement d'environnement, en particulier une coupure naturelle dans la végétation. Cet espace de parcours du feu était délimité sur la parcelle sélectionnée, avec :

- Deux piquets facilement repérables (peinture alternée rouge et blanche) formant la ligne de départ (largeur inférieure de la parcelle),
- Deux piquets formant la ligne d'arrivée (largeur supérieure de la parcelle).

L'allumage était très rapidement effectué en ligne par un technicien de l'ONF sur toute la largeur de la parcelle expérimentale, à environ 3 ou 4 mètres en contrebas de la limite de départ, afin de mesurer un feu déjà lancé lorsqu'il franchit la ligne de départ.

### *3.2.1.2. Les mesures effectuées*

Afin d'étudier les facteurs de propagation des feux de forêt, quatre types de paramètres ont été mesurés :

- Les paramètres de propagation,
- Les paramètres climatologiques,
- Les paramètres végétaux,
- Les paramètres topographiques.

Seulement deux personnes étaient nécessaires pour effectuer les mesures. Pendant que la première personne mesurait la vitesse de propagation du front de flammes, la seconde mesurait les paramètres climatologiques. Les paramètres topographiques et surtout les paramètres végétaux étaient obtenus préalablement.

#### *3.2.1.2.1. Les paramètres du feu*

Si la parcelle se trouvait en pente (cas le plus fréquent), il était impératif que celle-ci soit dans l'axe du vent, ce qui est généralement le cas (brise de pentes). La durée de la propagation sur une longueur de 15 à 30 mètres a été chronométrée par un observateur. La hauteur des flammes, très variable (entre 1 et 4 m en général sur de la garrigue) a été estimée (Fig. 3.16). L'émission de fumée a pu être observée durant les expérimentations mais aucune mesure n'a été effectuée afin de la quantifier (Fig. 3.17).

Seule la vitesse du front de flammes (m/mn) a été chronométrée et retenue comme variable représentative de la propagation dans le cadre de nos expérimentations (Fig. 3.18 et 3.19).



**Figure 3.16 : Hauteur de flammes estimée à 4 m ; site expérimental de Tourettes-sur-Loup ; 11/02/1998 ; département des Alpes-Maritimes ; (cliché C. Crespon, 1998)**



**Figure 3.17 : Forte émission de fumée et de vapeur d'eau condensée sur des flammes de 30 cm ; site expérimental de Tourettes-sur-Loup ; 11/02/1998 ; département des Alpes-Maritimes ; (cliché C. Crespon, 1998)**



**Figure 3.18 : Propagation rapide et flammes hautes ; site expérimental de Tourettes-sur-Loup ; 11/02/1998 ; département des Alpes-Maritimes ; (cliché C. Crespon, 1998)**



**Figure 3.19 : Propagation lente et flammes basses ; site expérimental de Coursegoules ; 12/02/1998 ; département des Alpes-Maritimes ; (cliché C. Crespon, 1998)**

#### *3.2.1.2.2. Les paramètres climatologiques*

Deux moyens de mesures ont été mis en œuvre :

- Les mesures effectuées par une station automatique, située près de la parcelle à brûler, très légèrement en contrebas,
- Les mesures effectuées par un observateur, à quelques mètres du front de flammes, latéralement, pour enregistrer le vent représentatif de celui soufflant sur le feu.

La station automatique de mesure, montée sur un système aisément portable a enregistré, au pas de temps d'une minute, les paramètres suivants :

- La température moyenne, maximale et minimale de l'air,
- L'humidité relative moyenne de l'air,
- Le point de rosée,
- Les vitesses moyennes et maximales du vent à 2 m sur sol,
- La direction moyenne du vent,
- La pression moyenne de l'air.

Pendant que le premier observateur mesurait la vitesse de propagation des flammes, le second mesurait à l'aide d'un anémomètre portable les vitesses instantanées du vent à 2 m sur sol, à un pas de temps d'une à deux secondes et enregistrait vocalement sur dictaphone les mesures. De plus, la température et l'humidité relative de l'air ont été mesurées juste avant et immédiatement après l'expérience à l'aide d'un appareil portable. Les données retenues correspondaient à la moyenne sur une minute de chaque paramètre, mesuré durant la propagation. Étant donné les conditions difficiles d'accès aux parcelles à brûler, la station automatique n'a pu être installée que de rares fois sur les lieux du brûlage (trois fois sur 15 feux en 1998) ; les chemins d'accès souvent impraticables en automobile et la végétation parfois dense gênaient le transport de la station de mesure.

#### *3.2.1.2.3. Les paramètres végétaux*

Ce sont les paramètres les plus difficiles à quantifier. En effet, les protocoles de mesure existants, souvent lourds à mettre en place, n'ont pu être utilisés durant notre campagne de mesures. Là encore, les mesures devaient être effectuées en un minimum de temps, tout en respectant la qualité des informations recueillies. Notre priorité étant la mesure des paramètres climatologiques et pour ne pas perdre trop de temps (notre activité ne devait en aucun cas gêner le travail de l'ONF), nous avons décidé de donner seulement une estimation de la végétation. Plusieurs paramètres ont retenu notre attention :

- Le pourcentage d'occupation au sol de la strate arborée limitée à la surface des troncs d'arbres (la couronne ne concernant pas ces feux),
- Le pourcentage d'occupation au sol de la strate arbustive (projection au sol du plus grand diamètre de la couronne végétale),
- Le pourcentage d'occupation au sol de la strate herbacée,
- Les espèces dominantes et secondaires de chaque strate végétale,
- La hauteur moyenne de chaque espèce végétale représentative de sa strate,
- Le pourcentage d'occupation au sol de la couverture morte (principalement des feuilles d'arbres),
- Le pourcentage de sol nu.

Les aires des parcelles étant mesurées, il nous a été possible de calculer les surfaces et les volumes occupés par chaque strate sur la parcelle expérimentale, la strate arborée (très peu représentée dans notre étude) ne devant pas brûler durant les expériences. Nous avons considéré que la surface occupée au sol par les troncs d'arbre de diamètre approximativement supérieur à 8-10 cm, ne pouvait pas être considérée comme un combustible. Dans notre situation de fin d'hiver, cette strate se comportait comme un sol nu, ne favorisant pas la propagation des flammes. Malgré sa bonne représentativité du combustible, la phytomasse n'a pu être évaluée précisément par pesage (dû aux délais) ou par approximation, en effet, la documentation existante reste incomplète en ce qui concerne les masses volumiques des espèces méditerranéennes (*Brachypodium*, *Cistus albidus*...) (Crespon, 1998). Il serait donc intéressant de compléter le protocole de mesure par une nouvelle méthode d'estimation de la phytomasse en se donnant les mêmes contraintes de temps que pour la mesure des autres paramètres.

#### 3.2.1.2.4. Les paramètres topographiques

Les caractéristiques du terrain jouant un rôle non négligeable dans la propagation des incendies, les paramètres suivants ont été mesurés pour chaque parcelle :

- L'altitude,
- La pente,
- L'exposition,
- Le type de sol.

Seuls les deux premiers paramètres ont été retenus dans la phase de modélisation. Les deux derniers, qualitatifs et très semblables dans toutes les expériences (exposition sud, sol calcaire), n'ont été mesurés que dans un souci de documentation de la parcelle à brûler.

### 3.2.2. Les expérimentations dans le département des Landes

En avril 1998, l'équipe « Gestion et Valorisation de l'Environnement » (GVE) de l'Université de Nice-Sophia Antipolis a rejoint le programme d'expérimentations en milieu naturel initié par l'INRA d'Avignon et le Service Départemental d'incendie et de Secours des Landes (SDIS 40). Une campagne d'expérimentations en milieu naturel pour l'étude de la propagation des feux fut organisée. Ces expérimentations ont été organisées et coordonnées par l'INRA d'Avignon et le Corps des Sapeurs Pompiers de Pontenx-Les-Forges. Onze parcelles de 30×30 m ont été préparées à l'avance pour les

expériences (carroyage de chaque parcelle et mise en place des différents appareils de mesure). L'objectif de ces expérimentations était de fournir un maximum de données pour chaque feu (données climatologiques, contours du feu...) malgré la lourdeur de la logistique à mettre en place. Aucune contrainte de temps ne devait affecter ni la qualité, ni le nombre de mesures. L'équipe GVE de l'UNSA, spécialisée en climatologie, a été chargée des mesures des paramètres météorologiques. Afin d'étudier les facteurs de la propagation des feux de forêt, trois types de paramètres ont été mesurés :

1. La vitesse de propagation,
2. Les paramètres climatologiques,
3. Les paramètres de végétation.

Les paramètres de propagation et de végétation ont été mesurés par le personnel de l'INRA d'Avignon et par les pompiers mobilisés pour les expériences. Pour chaque expérience, la pente de la parcelle était nulle et la mise à feu a été effectuée rapidement en ligne sur une longueur de 30 m (la dimension du traçage exposé au vent). La fin de l'expérience était marquée par l'arrivée du front de flammes sur la ligne opposée à la ligne de départ (30 m plus loin). Toutes les expériences ont été filmées par l'INRA d'Avignon, afin de déterminer avec précision le contour du front de flammes et ceci, durant toute l'expérimentation. Les paramètres végétaux (teneur en eau du combustible, etc...) ont été mesurés par l'INRA d'Avignon. La végétation était principalement composée de molinie (*Molinia* : herbe dépassant les 60 centimètres) et d'Ajoncs (*Ulex* : arbuste de 1,2 m).

Les paramètres climatologiques représentent également pour le département des Landes, les facteurs explicatifs principaux de la propagation du feu. Deux types de mesures ont été mis en application :

- Les mesures enregistrées par une station automatique, située près des parcelles expérimentales,
- Les mesures effectuées par deux observateurs, à quelques mètres du front de flammes, afin d'enregistrer le vent qui est le plus proche de celui soufflant sur le feu.

La station météorologique automatique a enregistré les mêmes paramètres que ceux mesurés pendant les expérimentations dans les Alpes-Maritimes, ceci afin de préserver une certaine similitude entre les deux types de protocoles. Les deux observateurs ont été chargés de mesurer des vitesses de vent instantanées à 1 et 2 m sur sol, à un pas de temps de 5 secondes. Deux anémomètres « à boule chaude » ont été employés pour mesurer ces données de vent qui ont aussi été enregistrées vocalement sur un dictaphone. Ces données ont été corrigées après une comparaison des mesures

effectuées par les deux appareils, qui ont fonctionné dans des conditions d'air instable. La température et l'humidité relative de l'air ont été mesurées juste après l'expérience par un appareil portable.

### **3.3. Conclusion du Chapitre 3**

Cette étude bibliographique et la pratique de l'expérimentation en milieu naturel ont permis de faire le point sur l'état des connaissances dans le domaine des expérimentations en milieu naturel dédiées à l'étude des incendies de forêt. Nous avons vu que ce vaste domaine est le fondement même de la modélisation du comportement des feux de forêt. Ces sites expérimentaux constituent déjà de véritables zones ateliers. La plupart de ces programmes de recherche ne sont pas terminés ou vont être poursuivis dans le cadre de nouveaux programmes.

Ces différents sites d'expérimentations en milieu naturel démontrent la richesse des mesures obtenues et la nécessité de recourir à diverses équipes d'expérimentateurs de disciplines différentes. L'état de l'art dans le domaine, ainsi que la pratique d'expérimentations en milieu naturel ont contribué à la phase d'acquisition des connaissances pour la modélisation de la démarche expérimentale, présentée dans le chapitre suivant.

## Chapitre 4

### Formalisation à l'aide d'UML, des connaissances issues d'expérimentations en milieu naturel

*A l'œuvre, on connaît l'artisan.*

*Jean de la Fontaine*

Nous avons vu dans le troisième chapitre, différents exemples d'expérimentations en milieu naturel à travers le monde. L'objet de ce chapitre est de présenter un modèle conceptuel de la démarche expérimentale pour l'étude de la propagation d'un feu de forêt. Seul le processus de l'expérimentation en milieu naturel est traité. Nous proposons également un modèle conceptuel du système d'information pour l'aide à la modélisation du comportement des feux de forêt. Le langage UML (Unified Modeling Language) a été choisi afin de définir un modèle général de l'expérimentation en milieu naturel. Les différentes étapes de la modélisation ont été réalisées à l'aide du logiciel *Rational Rose* de *Rational Software Company*. Le lecteur se référera au deuxième chapitre pour la signification des diagrammes de ce chapitre.

Rappelons qu'un Environnement de Résolution de Problème dédié à l'aide à la modélisation du comportement des incendies de forêt est généralement constitué de trois sous-systèmes spécialisés (Fig. 4.1) :

- Un système de gestion des bases de connaissances acquises lors d'expérimentations : le système d'information MODELLIS,
- Un système de gestion des bases de modèles de simulation du comportement des feux,
- Une Interface Homme-Machine (IHM) permettant de manipuler l'ERP.

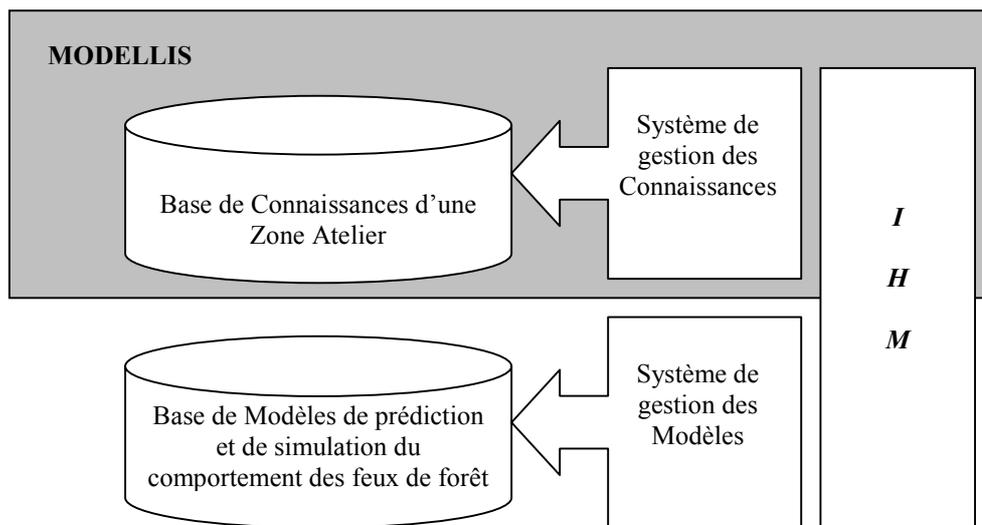


Figure 4.1 : Représentation graphique d'un ERP d'aide à la modélisation du comportement des feux de forêt

## 4.1. Modélisation de la démarche expérimentale

### 4.1.1. La démarche expérimentale

Ce travail de « Modélisation Métier » à l'aide d'UML, de la démarche expérimentale et du système d'information pour l'aide à la modélisation du comportement des feux de forêt est fondé sur l'état de l'art des expérimentations à travers le monde et sur la participation aux campagnes d'expérimentations en milieu naturel effectuées en collaboration avec l'INRA<sup>1</sup> d'Avignon et l'Université de Nice-Sophia Antipolis, dans les départements des Alpes-Maritimes et des Landes.

La démarche expérimentale se décompose en trois phases (Fig. 4.2) :

- **La préparation** : elle consiste à étudier le site expérimental à l'aide de documents préalablement recueillis, à mettre en place le dispositif de mesure, à assurer la sécurité sur le site afin d'éviter que le feu ne se propage à d'autres massifs forestiers, à mesurer les paramètres topographiques (altitude, pente...),
- **L'exécution** : elle consiste à mesurer les paramètres météorologiques (température, vent...) et de végétation (type de combustible, épaisseur...) avant le brûlage, à mettre le feu à la parcelle expérimentale, à mesurer les

<sup>1</sup> Institut National de la Recherche Agronomique

paramètres météorologiques et les paramètres du feu (intensité, vitesse de propagation...) pendant le brûlage,

- **Le suivi des effets** : il consiste à étudier les conséquences d'un feu sur la topographie (effet d'érosion accéléré), sur la végétation (vitesse de renouvellement ou disparition de certaines espèces, pourcentage de végétation brûlée, résistance d'autres espèces...), sur la faune (mouvement de population, arrivée de nouvelles espèces...).

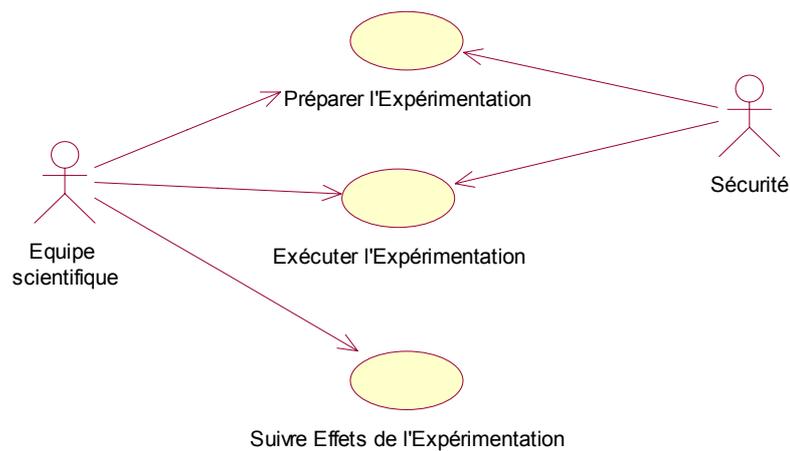


Figure 4.2 : Cas d'utilisation de la démarche expérimentale

Ces trois phases sont détaillées afin de définir les sous-étapes de la démarche expérimentale.

#### 4.1.2. La préparation de l'expérimentation

La préparation de l'expérimentation se décompose en trois étapes principales :

- Le recueil de documents papiers et numériques utiles à la définition de la zone ou du site atelier,
- La définition des caractéristiques géographiques et temporelles permettant de classer l'expérimentation dans un certain type d'expériences (hiver-garrigue-pente forte ; printemps-landes-pas de pente...),
- La mise en place du dispositif de mesure (capteurs météo, thermocouples, caméras...).

#### 4.1.2.1. Cas d'utilisation concernant la préparation de l'expérimentation

Le schéma ci-dessous permet de représenter les principales étapes de la préparation de l'expérimentation (Fig. 4.3). Ces étapes ne sont pas indépendantes. Ainsi, la phase de recueil des documents papiers et numériques va permettre de définir les caractéristiques géographiques de la zone et donc d'aider au choix et à la mise en place du dispositif de mesure.

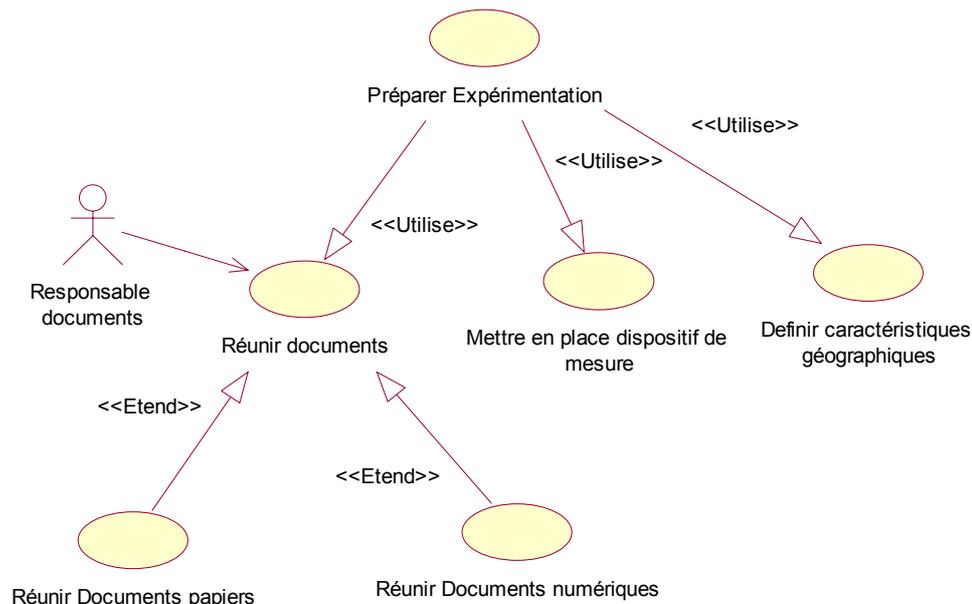


Figure 4.3 : Cas d'utilisation de la préparation de l'expérimentation

#### 4.1.2.2. Cas d'utilisation concernant la mise en place du dispositif de mesure

Etant donné l'importance de la métrologie lors d'une expérimentation, nous avons décidé de détailler la mise en place du dispositif de mesure (Fig. 4.4). Celui-ci se compose de différents appareils de mesures :

- Les capteurs météorologiques manuels : un responsable ou plusieurs personnes sont chargés de mesurer les paramètres météorologiques manuellement,
- Les stations de mesure automatiques des paramètres météorologiques,
- Le réseau de thermocouples permettant de mesurer la température des flammes,
- Les caméras permettant de suivre la propagation du front de feu.

A chaque phase de la mise en place du dispositif de mesure est désigné un responsable afin de superviser chacune des étapes.

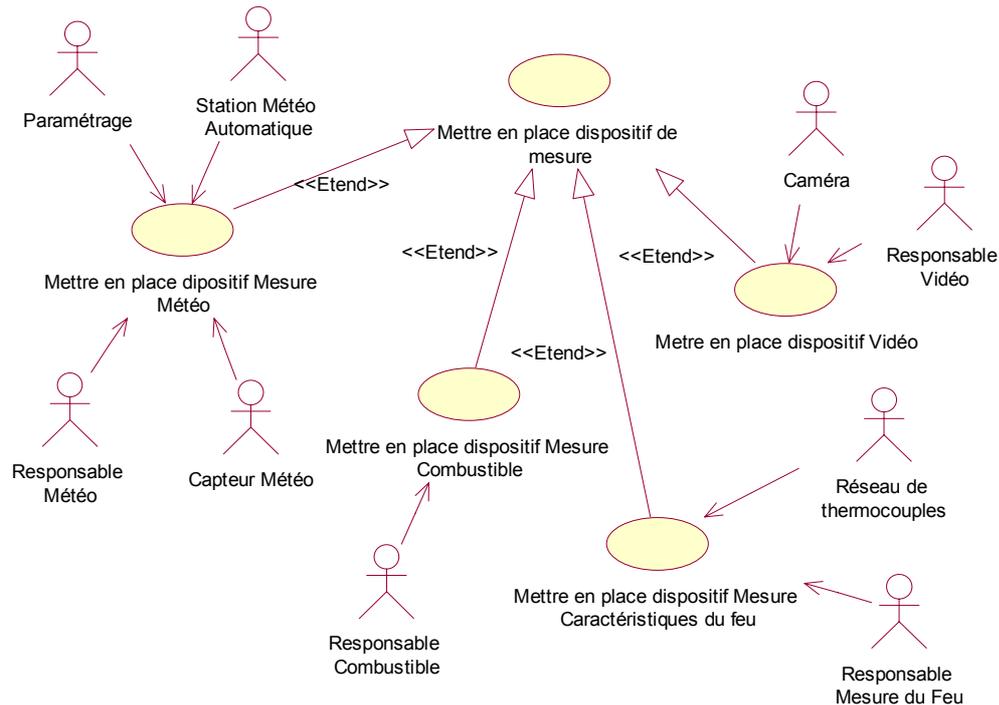


Figure 4.4 : Cas d'utilisation de la mise en place du dispositif de mesure

#### 4.1.2.3. Diagramme de séquence concernant la préparation de l'expérimentation

Le diagramme de séquence de la préparation de l'expérimentation permet de définir la chronologie de cette phase (Fig. 4.5). Elle permet de représenter le rôle des différents acteurs, leurs actions et la chronologie de leurs interventions dans le processus expérimental. La composante géographique est présente dans la préparation de l'expérimentation. En effet, il est important de prendre en compte les caractéristiques topographiques et climatologiques afin d'optimiser le protocole de mesure et le dispositif à mettre en œuvre. La préparation de l'expérimentation peut donc se décomposer en différentes étapes :

1. Recueillir des documents sur le site et la parcelle expérimentale,
2. Définir les caractéristiques géographiques des deux entités spatiales,
3. Paramétrer et positionner les capteurs météorologiques manuels sur la parcelle expérimentale,
4. Positionner les stations météorologiques automatiques sur le site expérimental,
5. Mettre en place le réseau de thermocouples pour la mesure de la température des flammes sur la parcelle expérimentale,
6. Mettre en place le dispositif de mesure sur la parcelle expérimentale,
7. Mettre en place le réseau de caméras pour suivre l'évolution du feu.

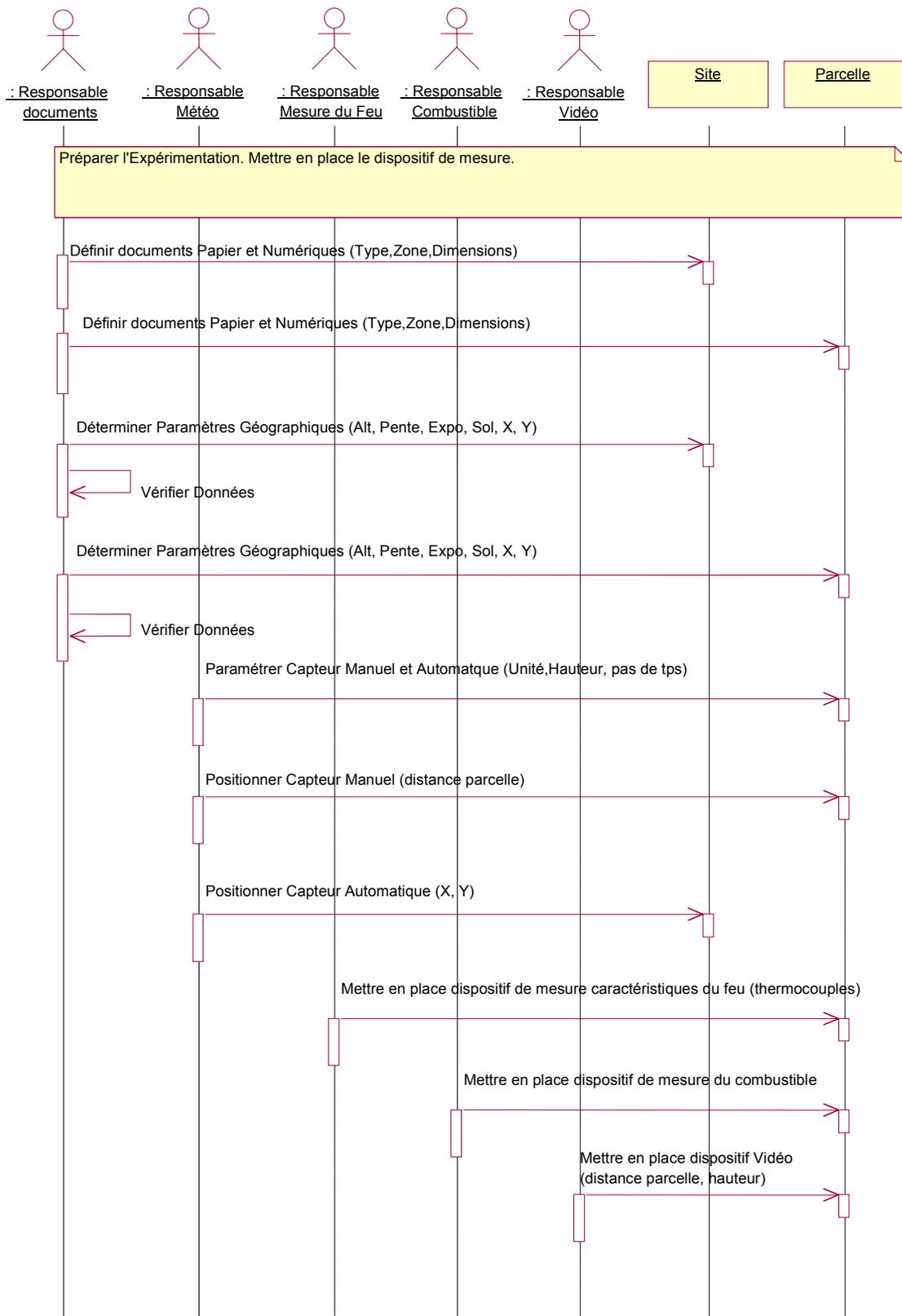


Figure 4.5 : Diagramme de séquence de la préparation de l'expérimentation

#### 4.1.2.4. Diagramme de déploiement du dispositif de mesure

Le diagramme de déploiement du dispositif montre les différents appareils de mesure et matériels informatiques connectés entre eux (Fig. 4.6).

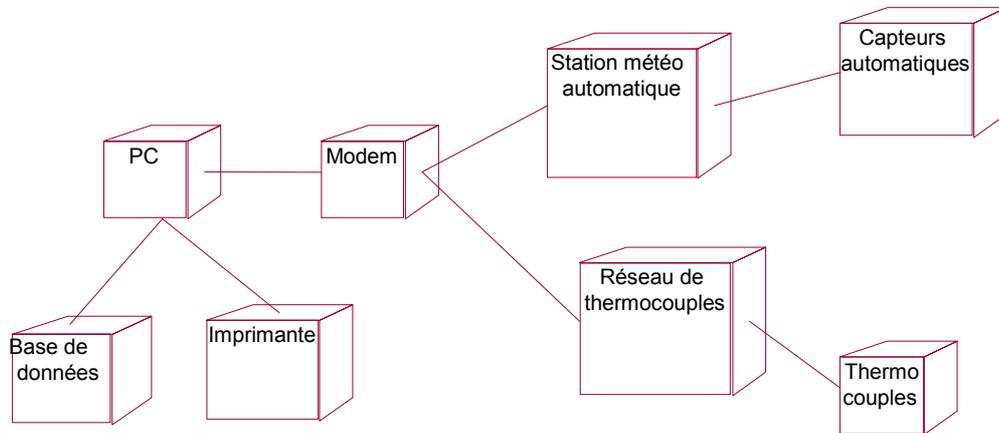


Figure 4.6 : Diagramme de déploiement du dispositif

#### 4.1.3. L'exécution de l'expérimentation

Seule l'étude du comportement du feu a été retenue pour la modélisation de cette phase (Fig. 4.7). Il n'a pas été tenu compte de l'action du dispositif de sécurité, celui-ci n'intervenant pas dans les mesures de propagation.

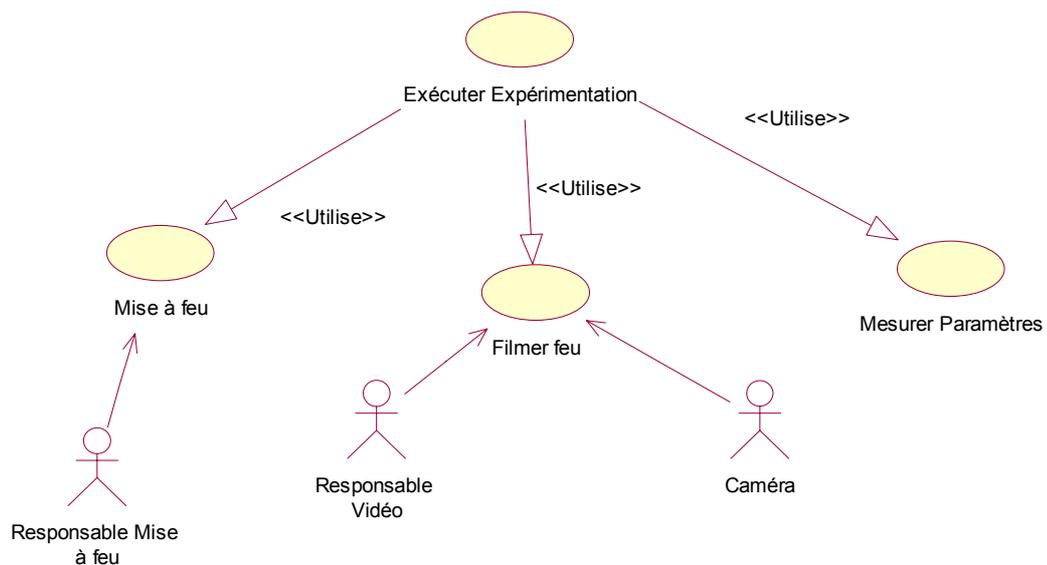


Figure 4.7 : Cas d'utilisation de l'exécution de l'expérimentation

L'une des composantes les plus importantes de cette phase est sans nul doute la mesure des différents paramètres du feu et de son environnement.

#### 4.1.3.1. Cas d'utilisation de la mesure des différents paramètres

Les mesures effectuées sont de trois types (Fig. 4.8) :

- Les mesures concernant le feu (vitesse de propagation, longueur du front de flammes...),
- Les mesures de combustibles (type de végétation, densité et épaisseur de la strate, teneur en eau...),
- Les mesures des paramètres météorologiques (vent, température de l'air...).

Ces phases de mesures des paramètres sont très spécialisées. Le personnel chargé de les effectuer doit réaliser cette tâche avec une extrême rigueur afin de ne pas introduire d'erreurs dans les données.

Il est important d'accompagner les mesures d'une description précise du protocole de mesure afin de pouvoir rendre comparable les mesures effectuées sur différents sites expérimentaux.

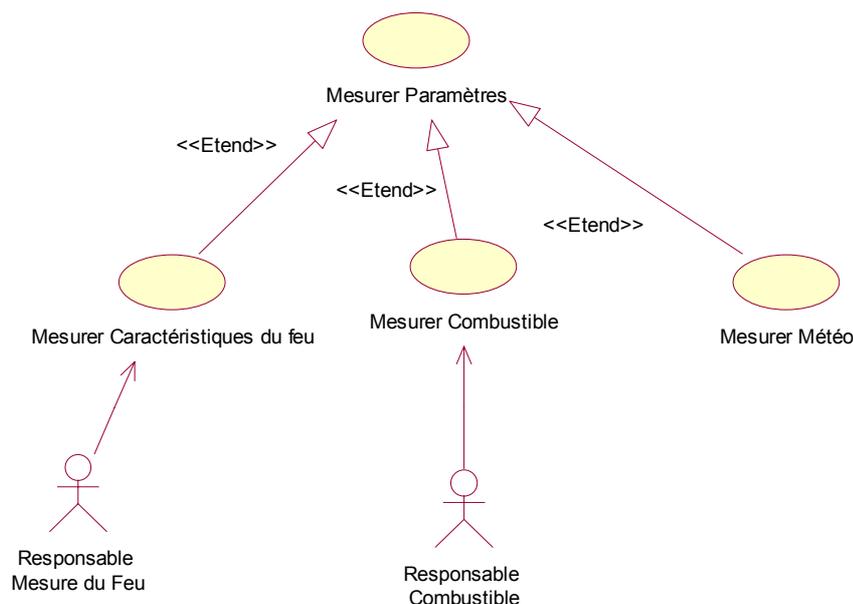


Figure 4.8 : Cas d'utilisation de la mesure des paramètres

#### 4.1.3.2. Exemple : Cas d'utilisation de la mesure des paramètres météorologiques

Nous nous sommes particulièrement intéressés à la mesure des paramètres météorologiques durant les expérimentations. Nous proposons donc de détailler cette composante (Fig. 4.9). Les mesures effectuées sont de deux types :

- Celles effectuées manuellement : une ou plusieurs personnes sont chargées d'effectuer les mesures à l'aide de capteurs météo portables,
- Celles effectuées automatiquement : une ou plusieurs stations météorologiques automatiques enregistrent les paramètres climatologiques à certains pas de temps.

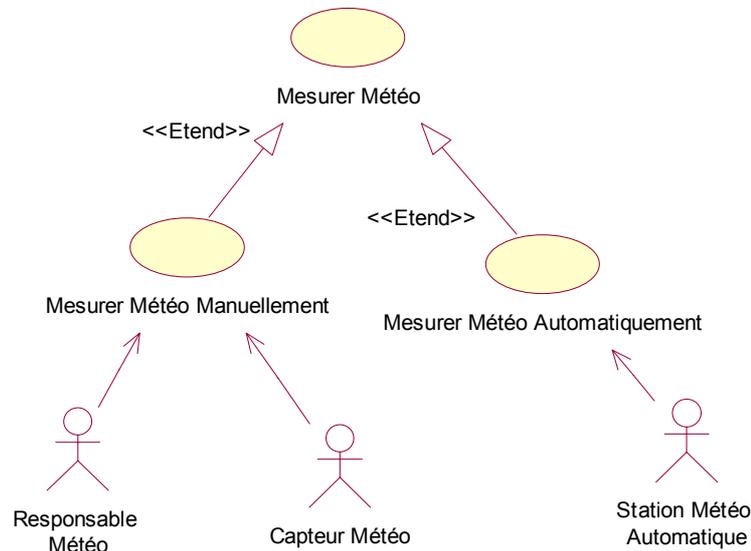
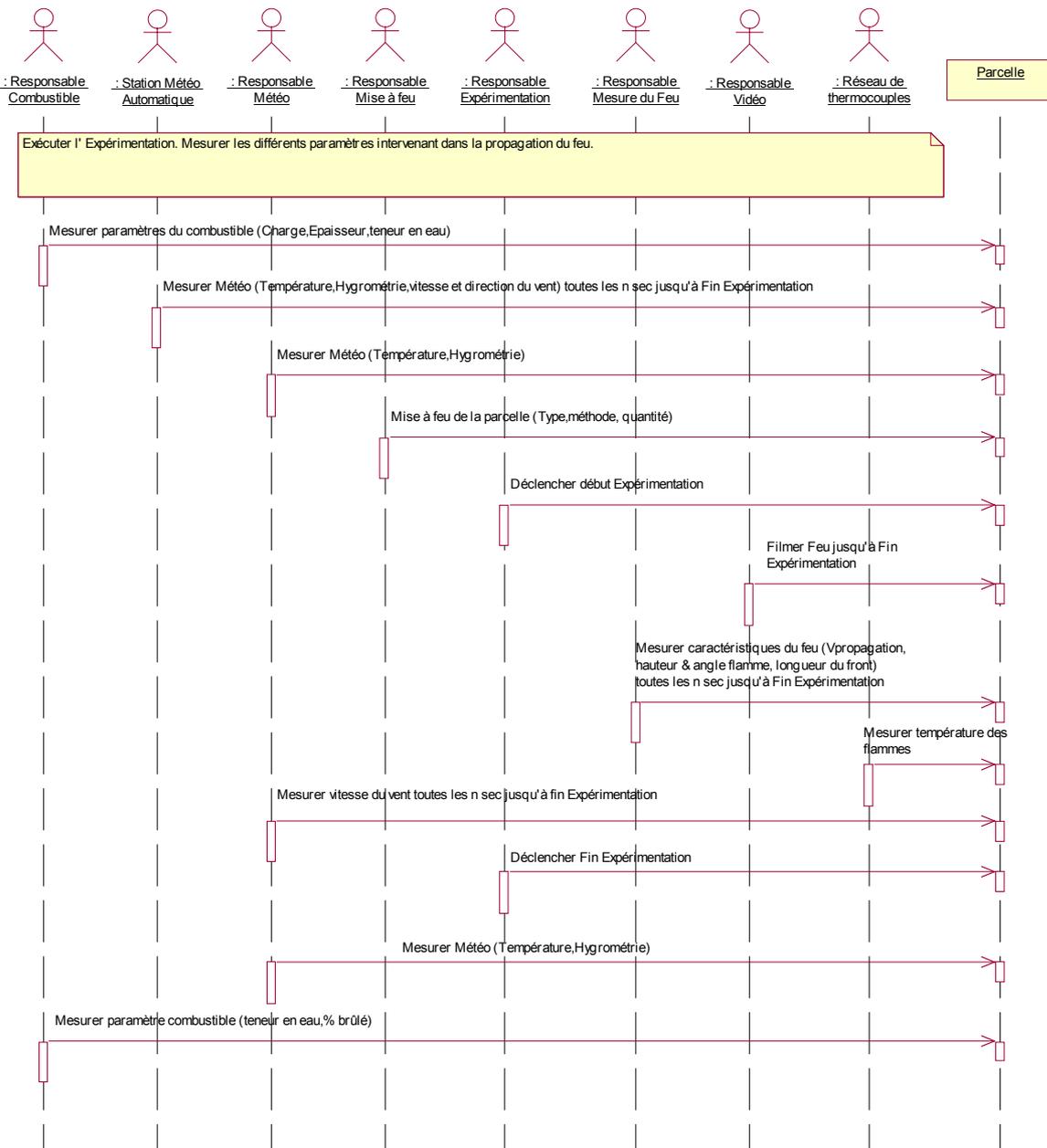


Figure 4.9 : Cas d'utilisation de la mesure des paramètres météorologiques

#### 4.1.3.3. Diagramme de séquence concernant l'exécution de l'expérimentation

La chronologie de l'exécution de l'expérimentation en milieu naturel peut être représentée à l'aide d'un diagramme de séquence (Fig. 4.10). Cette phase se décompose en plusieurs étapes :

- Les mesures des paramètres du combustible avant la mise à feu (charge, épaisseur, teneur en eau...),
- Les mesures des paramètres météorologiques à faible variabilité temporelle avant la mise à feu (température et humidité de l'air...),
- La mise à feu de la parcelle, en ligne ou ponctuelle,
- Filmer la propagation du front de flamme,
- Mesurer par observation, les caractéristiques du feu (angle des flammes, longueur du front...),
- Mesurer la température des flammes,
- Mesurer les paramètres météorologiques à forte variabilité temporelle (vitesse et direction du vent),
- Mesurer à nouveau les paramètres météorologiques et du combustible après l'extinction de la parcelle.



**Figure 4.10 : Diagramme de séquence de l'exécution de l'expérimentation**

Après avoir formalisé la démarche expérimentale, nous allons nous intéresser à la modélisation des connaissances issues d'expérimentations en milieu naturel afin de concevoir le système de gestion de connaissances MODELLIS.

## 4.2. Modélisation d'un système de gestion des connaissances pour la modélisation du comportement des feux de forêt

Nous avons vu que toute modélisation et toute validation de modèle reposent sur des données expérimentales. Il nous a donc paru intéressant de développer un outil d'aide à l'expérimentation. Ce système d'information permettrait de gérer la masse de données hétérogènes recueillies lors d'expérimentations en milieu naturel.

L'objet de ce système d'information est de mettre à disposition des expérimentateurs et modélisateurs, les données recueillies sur différentes zones ateliers afin de :

- Comparer les données issues d'écosystèmes différents,
- Participer au développement des modèles à l'aide de ces données,
- Caler ou valider des modèles avec des données d'écosystèmes différents,
- Simuler le phénomène à partir de scénarios réels.

La gestion des données est l'une des tâches les plus importantes d'un système d'information. Elle se décompose en quatre phases (Fig. 4.11) :

- La saisie des données expérimentales,
- La mise à jour de ces données,
- La consultation de ces données,
- L'impression de ces données.

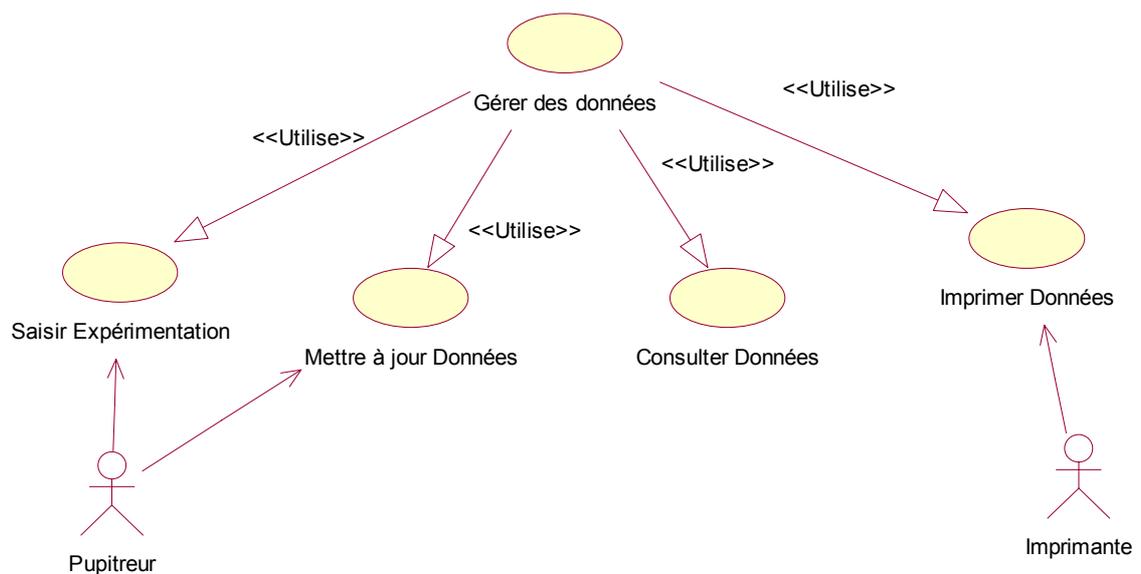


Figure 4.11 : Cas d'utilisation de la gestion des données du système d'information

Afin de ne pas alourdir ce chapitre avec des schémas redondants, nous ne présenterons que le diagramme correspondant à la saisie des paramètres. Les étapes de mise à jour et de consultation des données font appel à des processus semblables à ceux utilisés lors de la saisie des données.

#### 4.2.1. La saisie des données concernant l'expérimentation

Une expérimentation correspond à un feu contrôlé réalisé sur une parcelle expérimentale. Elle est définie par son mode d'allumage, ses enregistrements vidéo, ses mesures météo (capteurs manuels, stations automatiques). L'allumage de la parcelle est caractérisée par le type et la méthode d'allumage (ponctuel ou en ligne), la quantité d'hydrocarbure utilisée pour la mise à feu.

Les données expérimentales sont très hétérogènes (Fig. 4.12). Elles concernent les paramètres liés au dispositif de mesure, aux caractéristiques géographiques, ainsi qu'aux paramètres (expérimentaux) mesurés lors de l'expérimentation.

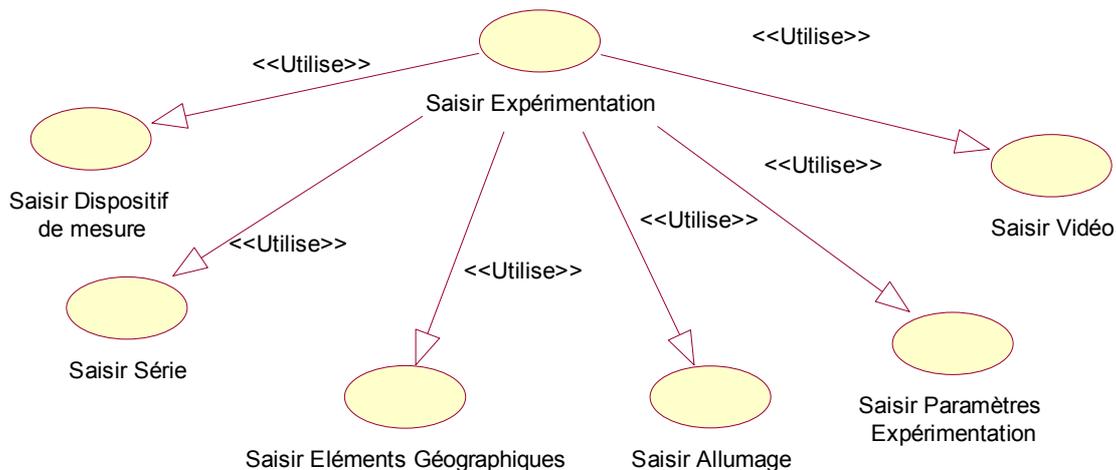


Figure 4.12 : Cas d'utilisation de la saisie des données concernant l'expérimentation

Après avoir saisi le numéro de l'expérimentation ainsi que sa description, le pupitre saisit obligatoirement et chronologiquement toutes les informations relatives à la parcelle expérimentale, à la série d'expérimentations, au dispositif de mesure, à l'allumage. Ces informations peuvent être sélectionnées si elles existent déjà dans la base de données.

Seuls seront détaillés les processus de saisie des paramètres concernant le dispositif de mesure, les caractéristiques géographiques et les paramètres environnementaux.

#### **4.2.2. La saisie des informations concernant le dispositif de mesure**

Un dispositif de mesure est caractérisé par les moyens matériels mis en œuvre lors des brûlages. Le dispositif de mesure mis en place sur la parcelle expérimentale est constitué de capteurs manuels ou automatiques (réseau de capteurs) permettant de mesurer des paramètres environnementaux (température, vitesse du vent...) ainsi que les paramètres caractéristiques du feu (température et angle de la flamme...) durant l'expérimentation. Cette phase sera représentée par un cas d'utilisation afin de définir ses généralités et des exemples de diagrammes de séquences afin de détailler la chronologie de certaines étapes.

##### ***4.2.2.1. Cas d'utilisation de la saisie des informations concernant le dispositif de mesure***

Nous pouvons décomposer la saisie des informations du dispositif de mesure en trois types (Fig. 4.13) :

- La saisie des informations concernant les capteurs manuels ou individuels : sera considéré comme capteur manuel tout appareil de mesure dont l'enregistrement sera déclenché ou effectué manuellement (thermomètre, hygromètre ou anémomètre portatif...),
- La saisie des informations concernant les stations automatiques de mesure ou réseau automatique : sera considéré comme station automatique de mesure, un réseau de capteurs dont l'enregistrement sera programmé (station météo automatique, réseau de thermocouples...),
- La saisie des informations concernant la caméra : celle-ci permet d'enregistrer la progression du feu ou de mesurer des paramètres comme la température des flammes grâce à un capteur infrarouge ; elle est définie par son type (infrarouge...), sa marque, son numéro de série...

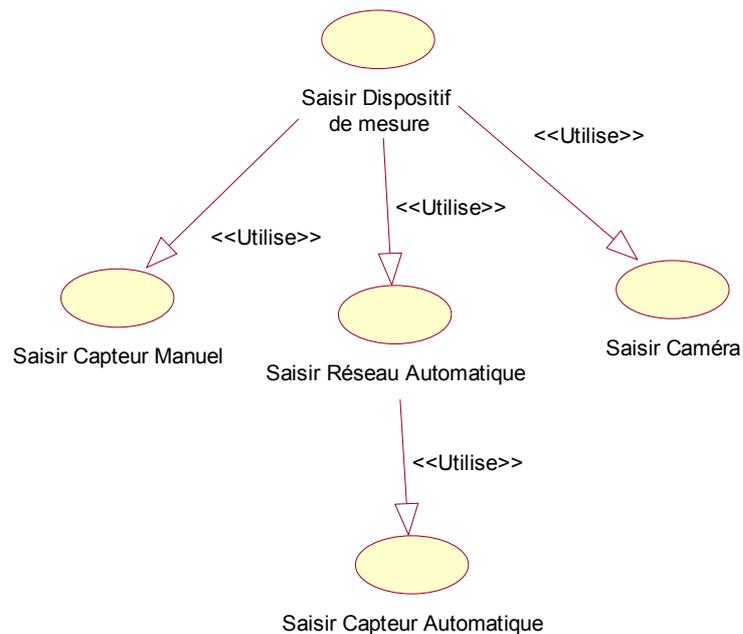


Figure 4.13 : Cas d'utilisation de la saisie des données concernant le dispositif de mesure

#### 4.2.2.2. Diagramme de séquence de la saisie des informations concernant le dispositif de mesure

Le pupitreur saisit dans un premier temps le numéro du dispositif ainsi que son nom et sa description (Fig. 4.14). Il saisit ensuite les informations relatives à la caméra, aux capteurs manuels et aux réseaux de capteurs automatiques. Un dispositif ne comporte pas obligatoirement tous ces composants. Le pupitreur déclenchera donc la saisie ou la sélection des composants.

La saisie d'un dispositif se décompose en plusieurs étapes :

- La saisie du numéro, du nom et de la description du dispositif ; par exemple : Dispositif n°12, Dispo\_site\_Ste\_Eulalie, dispositif standard du site expérimental de Ste Eulalie dans les Landes,
- La vérification des données pour éviter toute erreur et toute redondance dans la base,
- L'enregistrement des données dans la base.

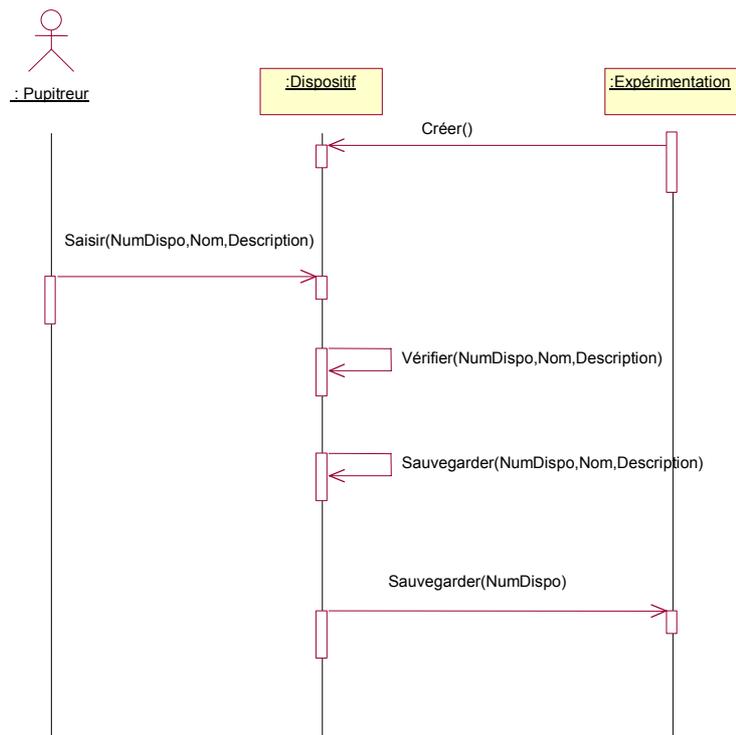


Figure 4.14 : Diagramme de séquence de la saisie des données concernant le dispositif de mesure

#### 4.2.2.3. Diagramme de séquence de la saisie des informations concernant le capteur manuel

Un capteur manuel est caractérisé par un appareil en mode enregistrement manuel et un paramétrage spécifique. Le pupitreur saisit les caractéristiques techniques relatives au capteur manuel (Fig. 4.15). Pour chaque capteur manuel seront saisies les informations suivantes :

- Le numéro de série du capteur (numéro d'identification du capteur),
- Le type,
- La marque,
- La référence de la photo du capteur,
- Une description sommaire,
- Une erreur de mesure attribuée à un défaut de l'appareil.

Les données saisies sont vérifiées par le système afin de ne pas enregistrer des informations erronées ou dupliquer inutilement les enregistrements dans la base.

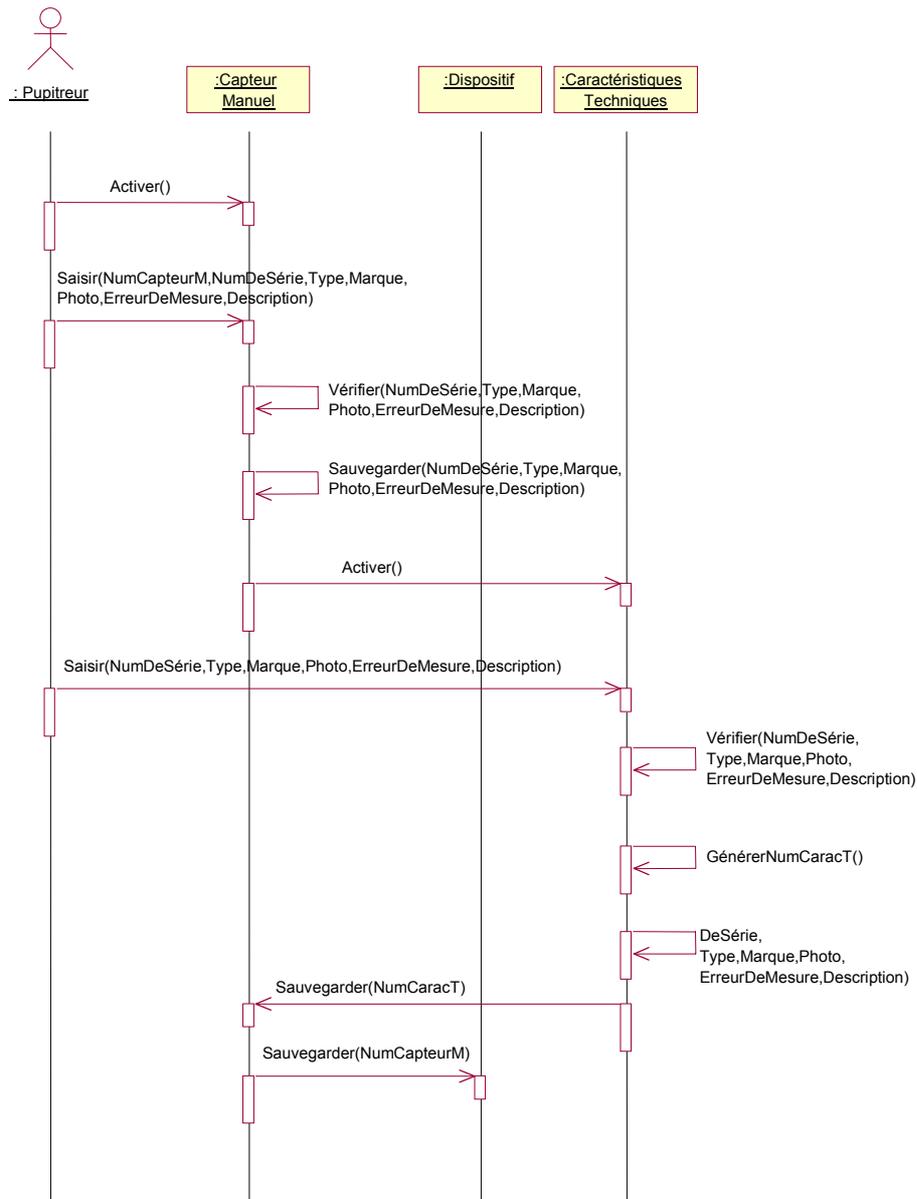


Figure 4.15 : Diagramme de séquence de la saisie des données concernant le capteur manuel

Sont ensuite saisies les informations relatives au paramétrage du capteur (Fig. 4.16) :

- Le numéro d’identification du paramétrage,
- L’unité de mesure,
- La hauteur par rapport au sol.

Le pupitreur peut également sélectionner un paramétrage existant dans la base de données et l’attribuer à un nouveau capteur.

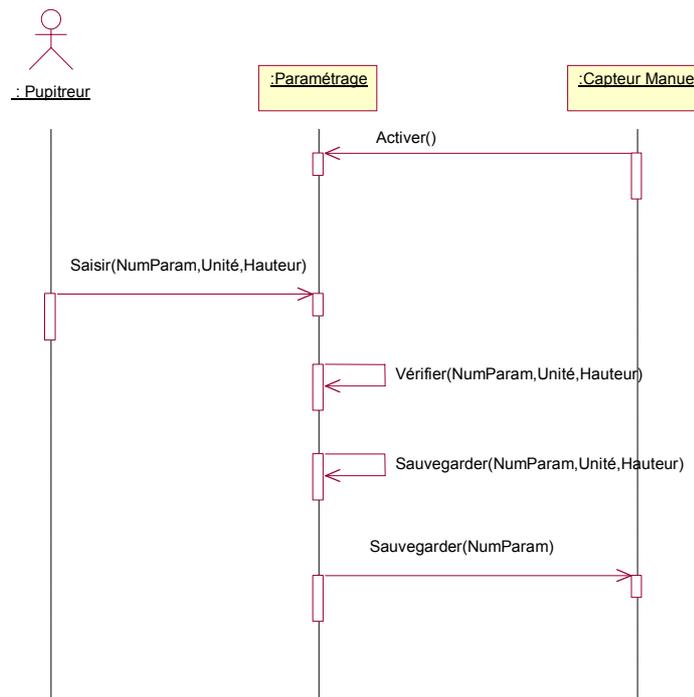


Figure 4.16 : Diagramme de séquence de la saisie des données concernant le capteur manuel

#### 4.2.2.4. Diagramme de séquence de la saisie des informations concernant le réseau automatique

Un capteur automatique est caractérisé par un appareil en mode enregistrement automatique et un paramétrage spécifique. Un réseau de capteurs est caractérisé par une série de capteurs automatiques et un pas de temps de mesure.

Après avoir saisi le numéro du réseau de capteurs automatiques ainsi que sa description et son nom, le pupitreur saisit obligatoirement les informations relatives aux capteurs automatiques (Fig. 4.17). Ces informations peuvent être sélectionnées si elles existent déjà dans la base de données.

Les scénarios de saisie, de sélection et de suppression d'un capteur automatique sont semblables à ceux relatifs aux capteurs manuels. Ces scénarios sont cependant déclenchés automatiquement après avoir saisi un réseau automatique.

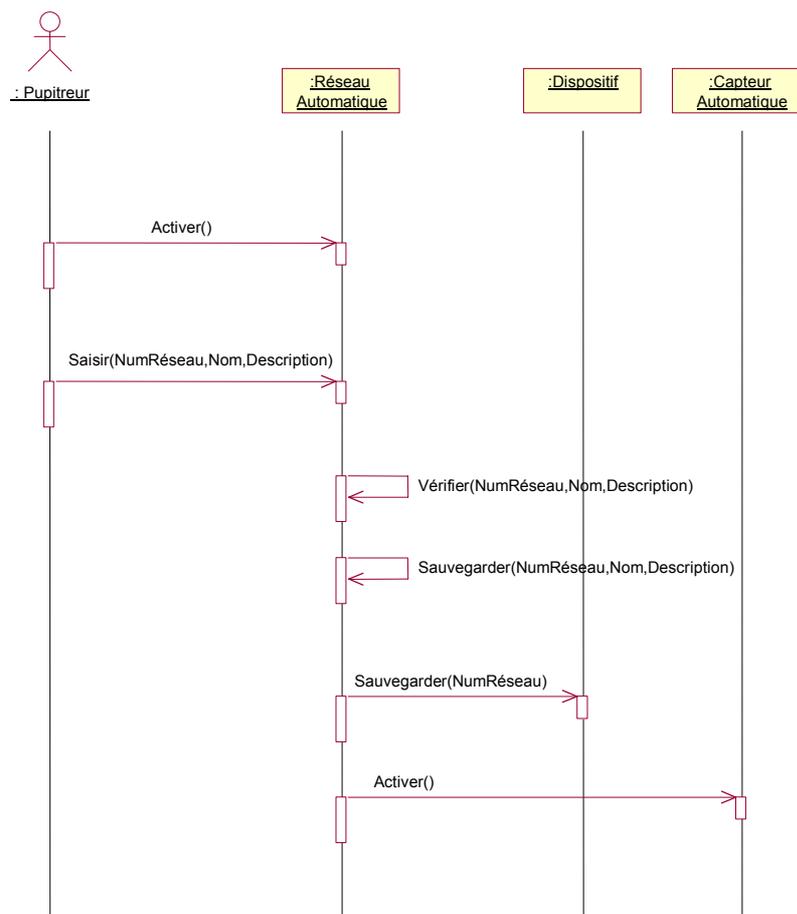


Figure 4.17 : Diagramme de séquence de la saisie des données concernant le réseau automatique

### 4.2.3. La saisie des informations concernant les éléments géographiques

Les éléments géographiques du système d'information sont de natures diverses (Fig. 4.18) :

- **Les informations relatives à la parcelle** : une parcelle expérimentale est une portion de site sur laquelle a lieu l'expérimentation. Elle est définie par ses caractéristiques géographiques, ses dimensions (forme, longueur et largeur ou rayon de la parcelle, ses documents papiers ou numériques),
- **Les informations relatives au site expérimental** : un site expérimental est composé de une ou plusieurs parcelles expérimentales. Il est caractérisé par un département, une commune, un lieu-dit, des caractéristiques géographiques, des documents papiers et numériques,

- **Les informations relatives à la zone atelier :** une zone atelier est caractérisée par un ensemble de sites expérimentaux,
- **Les caractéristiques géographiques :** les trois entités spatiales précédemment citées sont géographiquement caractérisées par l'altitude, la pente, l'exposition, la nature du sol et les coordonnées du centroïde de l'entité spatiale,
- **Les documents papiers :** il existe des documents papier permettant de localiser chaque site et chaque parcelle (cartes IGN...). Ces documents peuvent également fournir des informations supplémentaires au modélisateur (occupation du sol, végétation...). Le document papier est défini par son type (carte, photo...), ses dimensions, la zone représentée et son échelle,
- **Les documents numériques :** ils ont les mêmes fonctions que les documents papiers. Le document numérique est défini par son type (MNT, photo aérienne...), son format (DEM, TIFF...), ses dimensions, sa résolution et son espace disque occupé.

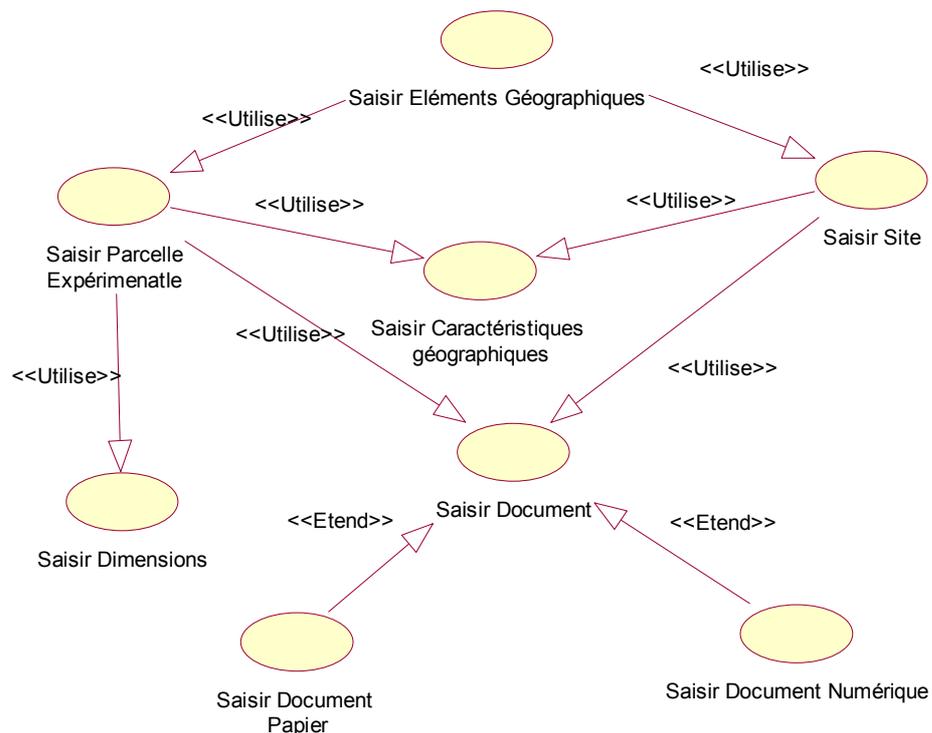


Figure 4.18 : Cas d'utilisation de la saisie des données concernant les éléments géographiques

Pour exemple, nous donnons les scénarios de la saisie des informations relatives à la parcelle expérimentale et aux documents papiers

#### 4.2.3.1. Diagramme de séquence de la saisie des informations concernant la parcelle expérimentale

Après avoir saisi le numéro de la parcelle, ainsi que sa description, le pupitreur saisit obligatoirement les informations relatives aux documents papier ou numériques, aux caractéristiques géographiques et aux dimensions de la parcelle. Ces informations peuvent être sélectionnées (sauf les caractéristiques géographiques), dans le cas où elles existeraient déjà dans la base. La saisie ou la sélection des données est déclenchée automatiquement après l'exécution du scénario représenté par le diagramme de séquence décrit en exemple (Fig. 4.19).

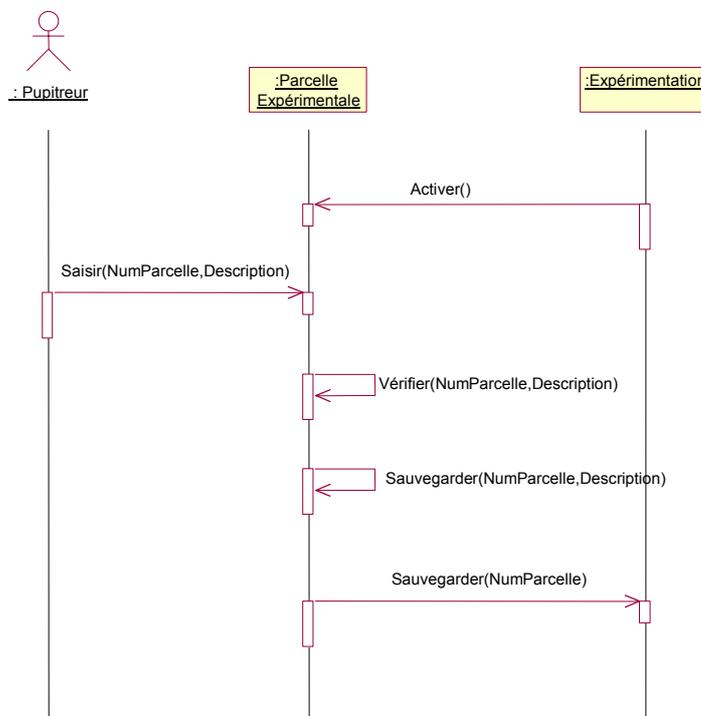


Figure 4.19 : Diagramme de séquence de la saisie des données concernant la parcelle expérimentale

#### 4.2.3.2. Diagramme de séquence de la saisie des informations concernant les documents papiers

Ce scénario est semblable à celui de saisie des informations relatives à un document numérique (Fig. 4.20).

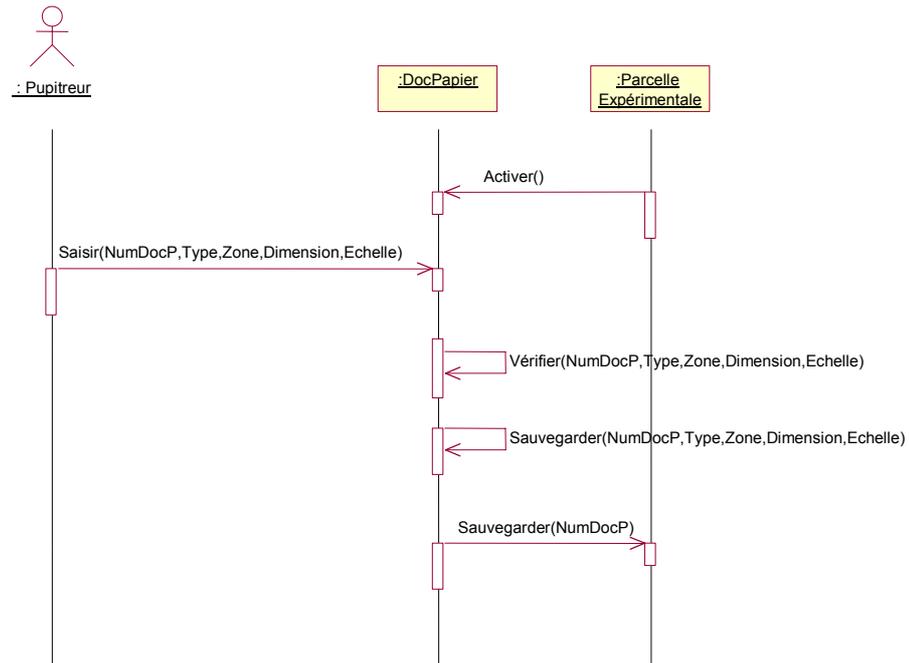


Figure 4.20 : Diagramme de séquence de la saisie des données concernant les documents papiers

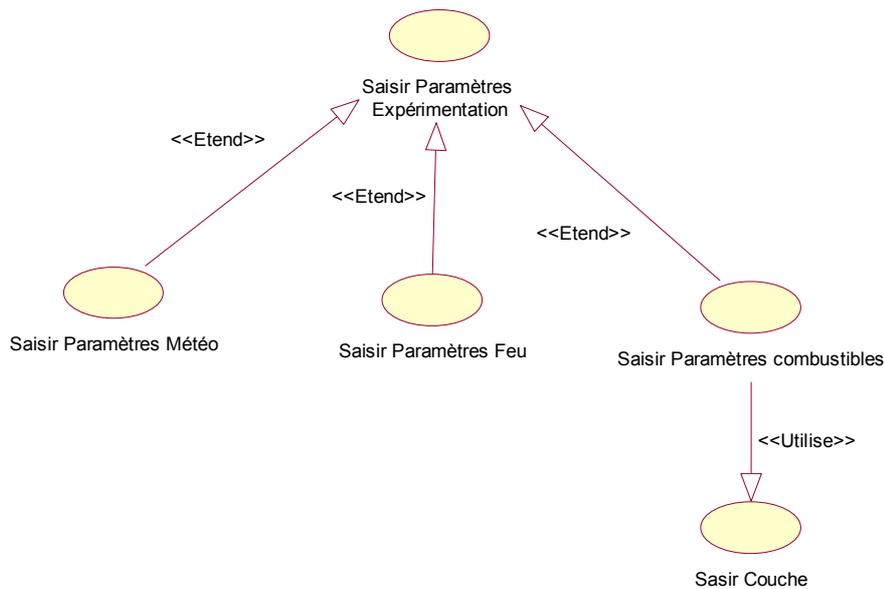
#### 4.2.4. La saisie des informations concernant les paramètres de l'expérimentation

Ces informations sont de trois types (Fig. 4.21) :

- Les mesures des paramètres météorologiques provenant des capteurs manuels ou des réseaux automatiques (température et humidité relative de l'air...) ; une donnée météo mesurée manuellement est caractérisée par le capteur utilisé, l'heure de la mesure, la position du capteur par rapport à la parcelle expérimentale ; les données de la station météo automatique sont définies par un numéro de réseau de capteurs, une heure d'installation et de désinstallation de la station, les caractéristiques géographiques de l'emplacement de la station, le fichier d'enregistrement des données,
- Les mesures des paramètres du feu provenant des observateurs, des capteurs manuels ou des réseaux automatiques (température et angle de la flamme...) ; un brûlage est défini par l'heure de mise à feu de la parcelle expérimentale, la vitesse de propagation moyenne du front de flammes, l'angle moyen de la flamme, la hauteur et la longueur moyennes de la flamme, le rapport de combustible consumé, la longueur du front de flammes, le taux de surface brûlée, le nom du fichier de combustible imbrûlé (mesures de poids), le nom du fichier d'enregistrement de la température de la flamme (fichier thermocouple), le nom du fichier de géométrie de la flamme (mesure de

l'angle, de la hauteur, de la longueur de la flamme en fonction du temps), le nom du fichier de mesure de temps de parcours du front de flammes en fonction de la distance,

- Les mesures des paramètres du combustible : des mesures de combustible sont réalisées avant et après le brûlage ; les mesures effectuées sont : la mesure de la charge de combustible, l'épaisseur moyenne du combustible, la teneur en eau du combustible (avant et après brûlage), le rapport Masse/Volume, le rapport de compacité.



**Figure 4.21 : Cas d'utilisation de la saisie des mesures concernant les paramètres de l'expérimentation**

Nous donnons pour exemple, les cas d'utilisation et les diagrammes de séquences de :

- La saisie des mesures d'une couche de combustible,
- La saisie des paramètres météorologiques.

#### **4.2.4.1. La saisie des mesures concernant une couche du combustible**

Les mesures de combustible sont diverses (Fig. 4.22). Le combustible est caractérisé par un type (maquis, landes...) et une ou plusieurs couches de végétation. Chaque couche est définie par son ordre par rapport aux autres couches, son appartenance à un type de combustible et son pourcentage de surface brûlée. Chaque espèce est définie par son nom et son pourcentage de recouvrement dans la couche de

combustible. Des mesures d'épaisseurs sont réalisées pour chaque couche de combustible.

Un complexe est une section de combustible. Il est défini par son type, son ou ses numéros de couches et ses mesures de combustible. Chaque complexe et chaque couche sont définis par des particules (aiguille de pin...). Une particule est caractérisée par son type, sa longueur, son épaisseur, sa surface, son volume, son poids, son rapport Surface/Volume, son rapport Masse/Volume, sa valeur calorifique maximum.

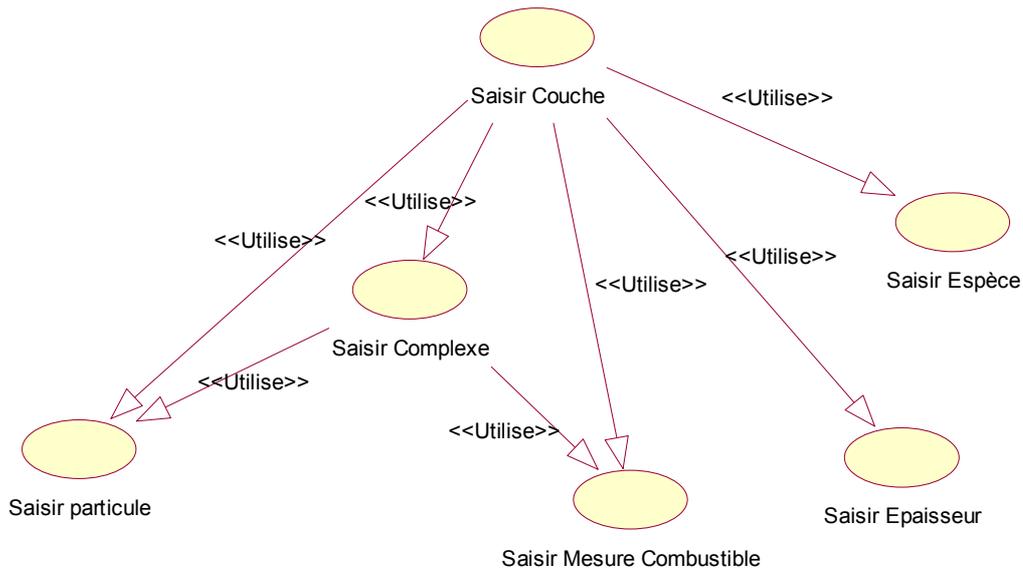


Figure 4.22 : Cas d'utilisation de la saisie des mesures concernant la couche de combustible

Ces paramètres doivent être saisis avec la plus grande rigueur. Le scénario suivant donne un exemple de la saisie d'un paramètre de combustible : l'épaisseur de la couche (Fig. 4.23).

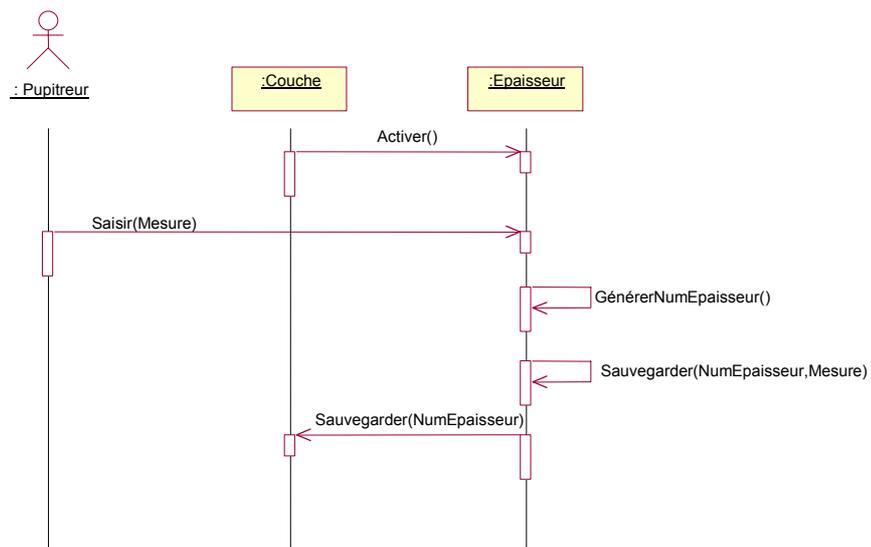


Figure 4.23 : Diagramme de séquence de la saisie de l'épaisseur du combustible

#### 4.2.4.2. La saisie des mesures concernant les paramètres météorologiques

Les mesures des paramètres météorologiques à saisir sont issues de deux sortes de capteurs (Fig.4.24) :

- Des capteurs manuels,
- Des stations automatiques.

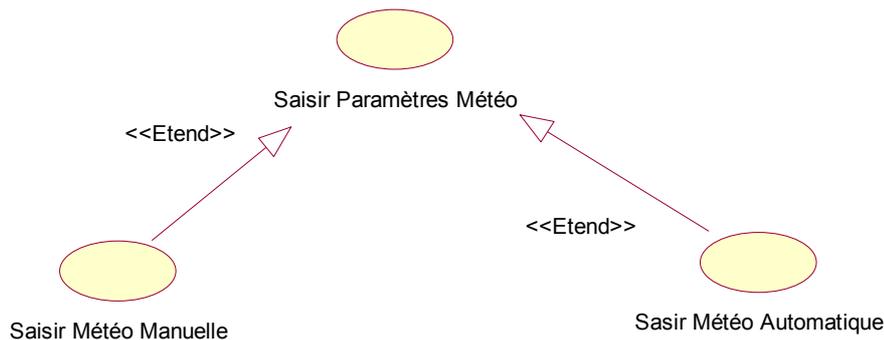


Figure 4.24 : Cas d'utilisation de la saisie des paramètres météorologiques

Les paramètres météorologiques à mesurer sont les suivants :

- La température de l'air,
- L'humidité relative de l'air,
- Le point de rosée,
- La vitesse du vent,
- La direction du vent,
- La pression barométrique.

Les mesures à effectuer sont de deux sortes :

- **Les mesures ponctuelles**, enregistrées à l'aide d'un capteur manuel pour lesquelles l'opérateur choisit le moment de la mesure ; ces mesures concernent les paramètres à faible variabilité temporelle ; par exemple la température qui varie peu durant une expérimentation de quelques minutes,
- **Les mesures continues**, enregistrées généralement par une station météorologique automatique ; ces mesures concernent principalement les paramètres à forte variabilité temporelle, comme la vitesse instantanée du vent.

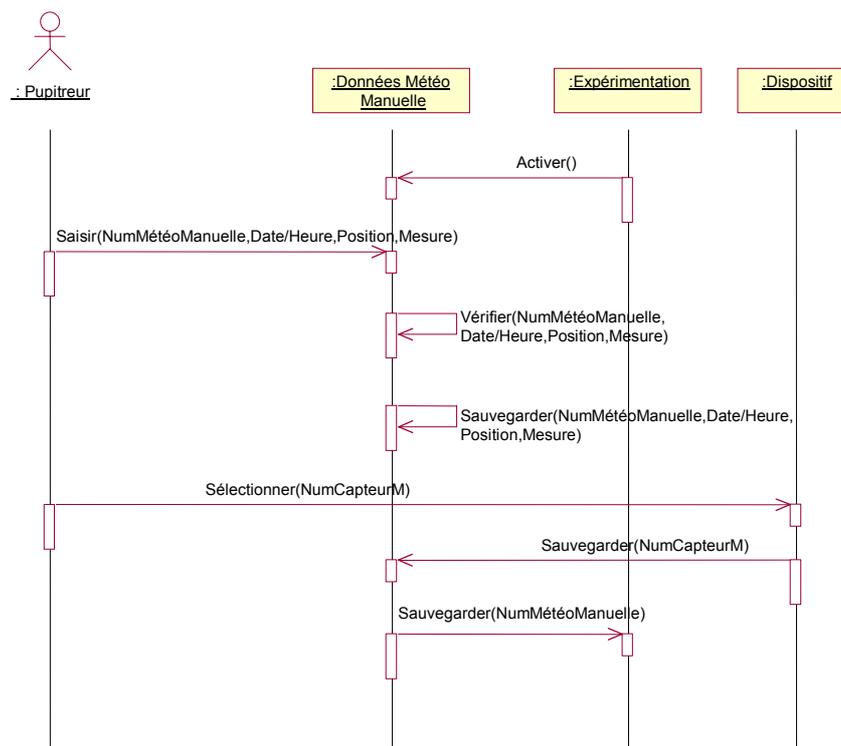
Chaque donnée météorologique est associée à un capteur et son paramétrage. Les données météorologiques ponctuelles sont caractérisées par :

- La date et heure de la mesure,
- La position par rapport à la parcelle,
- La mesure météorologique.

Les données météorologiques continues sont caractérisées par :

- Le numéro du capteur manuel ou de la station automatique,
- La date et heure du début de l'enregistrement,
- La date et heure de fin de l'enregistrement,
- La distance par rapport à la parcelle,
- Le nom du fichier contenant les enregistrements.

Nous proposons dans le scénario suivant un exemple de saisie d'une mesure météorologique enregistrée à l'aide d'un capteur manuel (Fig. 4.25).



**Figure 4.25 : Diagramme de séquence de la saisie d'une mesure météorologique enregistrée à l'aide d'un capteur manuel**

#### 4.2.5. Structure générale du système d'information

Un diagramme de classes a été élaboré afin de représenter de manière générale la structure statique du système (Cf. Chapitre 2). La modélisation objet ayant été choisie comme méthodologie, les composants du système sont représentés par des classes d'objets et des relations entre ces classes.

Le système d'information pour la gestion des données issues de l'expérimentation en milieu naturel comporte 29 classes (Fig. 4.26). Ce diagramme est déduit de l'étude des besoins préalablement établis dans la définition des cas d'utilisation et des diagrammes de séquences. Le système d'information sera donc composé des classes d'objets de ces diagrammes si le développement se fait à l'aide d'un langage de programmation objet. Pour la conception d'un système de gestion de base de données relationnelle les classes du diagramme sont représentées par des tables.

Les attributs de chaque classe sont détaillés afin de décrire avec précision la classe d'objets. Nous pouvons distinguer sept modules :

- Les classes d'objets relatives au dispositif de mesure (capteur manuel, station automatique...),
- Les classes d'objets relatives aux entités géographiques et à leurs caractéristiques (zone atelier, site expérimental...),
- Les classes d'objets relatives à la documentation,
- Les classes d'objets relatives aux mesures des paramètres météorologiques (mesures ponctuelles et mesures continues),
- Les classes d'objets relatives aux caractéristiques de l'expérimentation (types d'allumage, série d'expérimentations),
- Les classes d'objets relatives aux combustibles (espèce, couche...),
- Les classes d'objets relatives au brûlage (caractéristiques du feu, film de la propagation...).

Tous ces modules s'organisent autour de la classe « Expérimentation » qui constitue l'élément central de ce système (Fig. 4.26).

##### 4.2.5.1. Le module de classes relatives au dispositif de mesure

Il se compose de six classes (Fig. 4.27) :

- La classe « Capteur Automatique »,
- La classe « Réseau automatique » (constitué de capteurs automatiques),

- La classe « Paramétrage », correspondant au paramétrage du capteur manuel ou automatique,
- La classe « Caractéristiques techniques », correspondant aux caractéristiques des capteurs manuels ou automatiques,
- La classe « Caméra »,
- La classe « Dispositif », correspondant aux composants matériels précédemment cités.

#### ***4.2.5.2. Le module de classes relatives aux entités géographiques***

Il se compose de six classes (Fig. 4.28) :

- La classe « Parcelle expérimentale »,
- La classe « Dimensions », correspondant aux dimensions de la parcelle,
- La classe « Site expérimental », composé de parcelles expérimentales,
- La classe « Zone Atelier », composée de parcelles expérimentales,
- Le classe « Réseau de Zones Ateliers », composé de zones ateliers,
- La classe « caractéristiques techniques », correspondant aux caractéristiques des entités spatiales précédemment citées.

#### ***4.2.5.3. Le module de classes relatives à la documentation***

Il se compose de trois classes (Fig. 4.28) :

- La classe « Document » : la classe générique du document,
- La sous-classe « Document numérique »,
- La sous-classe « Document papier ».

#### ***4.2.5.4. Le module de classes relatives aux mesures des paramètres météorologiques***

Il se compose de deux classes (Fig. 4.28) :

- La classe « Données météorologiques ponctuelles », correspondant aux mesures enregistrées à l'aide d'un capteur manuel,
- La classe « Données météorologiques série », correspondant aux mesures enregistrées à l'aide d'un capteur manuel ou une station météorologique automatique.

#### ***4.2.5.5. Le module de classes relatives aux caractéristiques de l'expérimentation***

Il se compose de deux classes (Fig. 4.29) :

- La classe « Expérimentation »,
- La classe « Série », correspondant à la série d'expérimentations.

#### ***4.2.5.6. Le module de classes relatives au combustible***

Il se compose de sept classes (Fig. 4.29) :

- La classe « Particule », correspondant à la plus petite particule de végétation étudiée (par exemple une aiguille de pin),
- La classe « Espèce » correspondant à l'espèce végétale,
- La classe « Couche », composée d'espèces végétales et de particules végétales,
- La classe « Epaisseur », correspondant à l'épaisseur de la couche de combustible,
- La classe « Complexe » : le complexe composé de couches de combustibles et de particules végétales ; représente une portion de combustible hétérogène (différentes couches de combustibles et différentes particules),
- La classe « Mesures de combustible », correspondant aux mesures effectuées sur la couche et le complexe de combustible,
- La classe « Combustible », constitué de couches de végétation.

#### ***4.2.5.7. Le module de classes relatives au brûlage***

Il se compose de trois classes (Fig. 4.29) :

- La classe « Allumage », correspondant aux caractéristiques d'allumage de la parcelle,
- La classe « Caractéristiques du feu », correspondant aux mesures à effectuer sur le feu,
- La classe « Vidéo », correspondant aux enregistrements vidéo de la propagation du front de flammes.

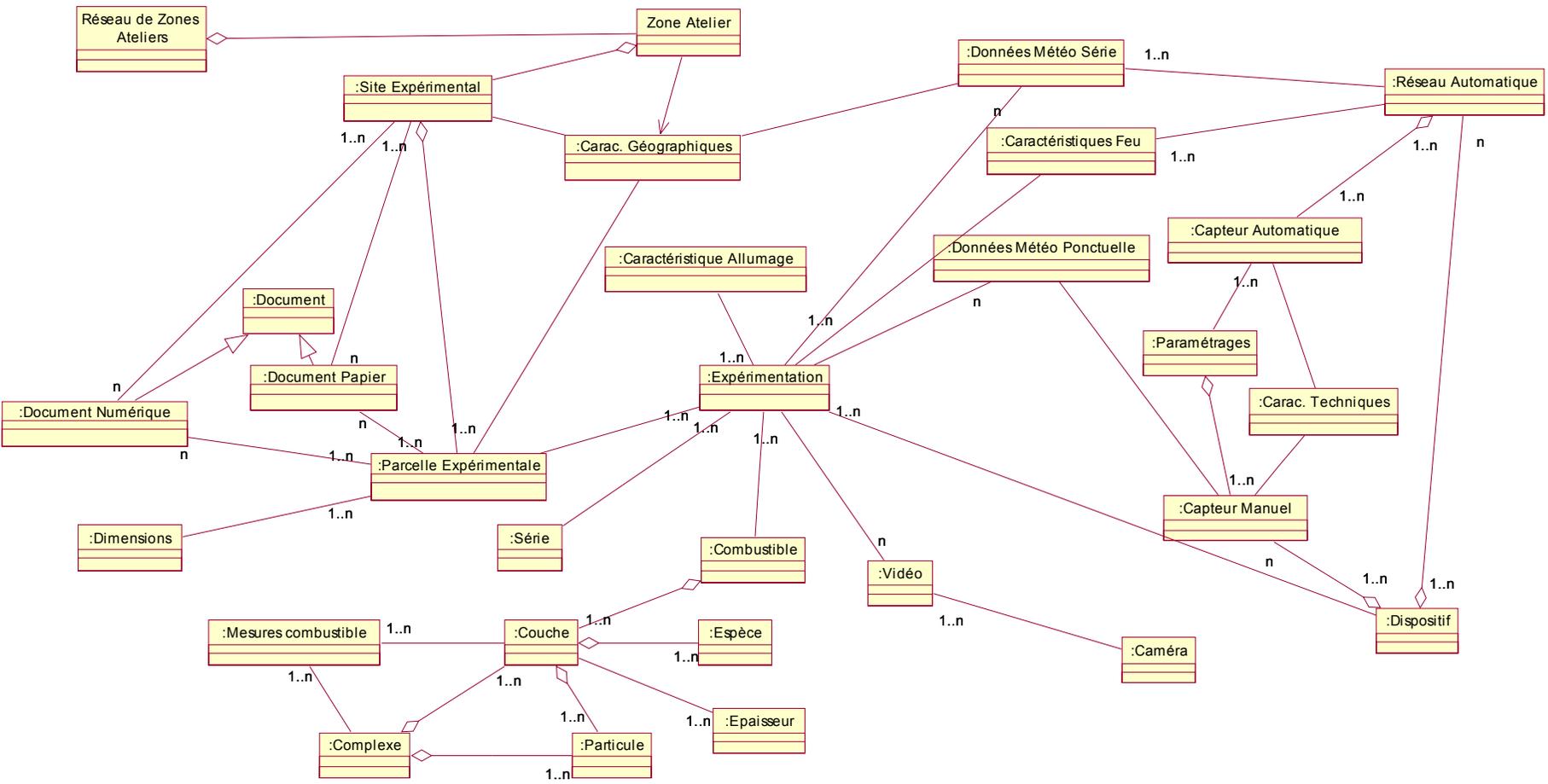


Figure 4.26 : Diagramme de l'ensemble des classes du système d'information

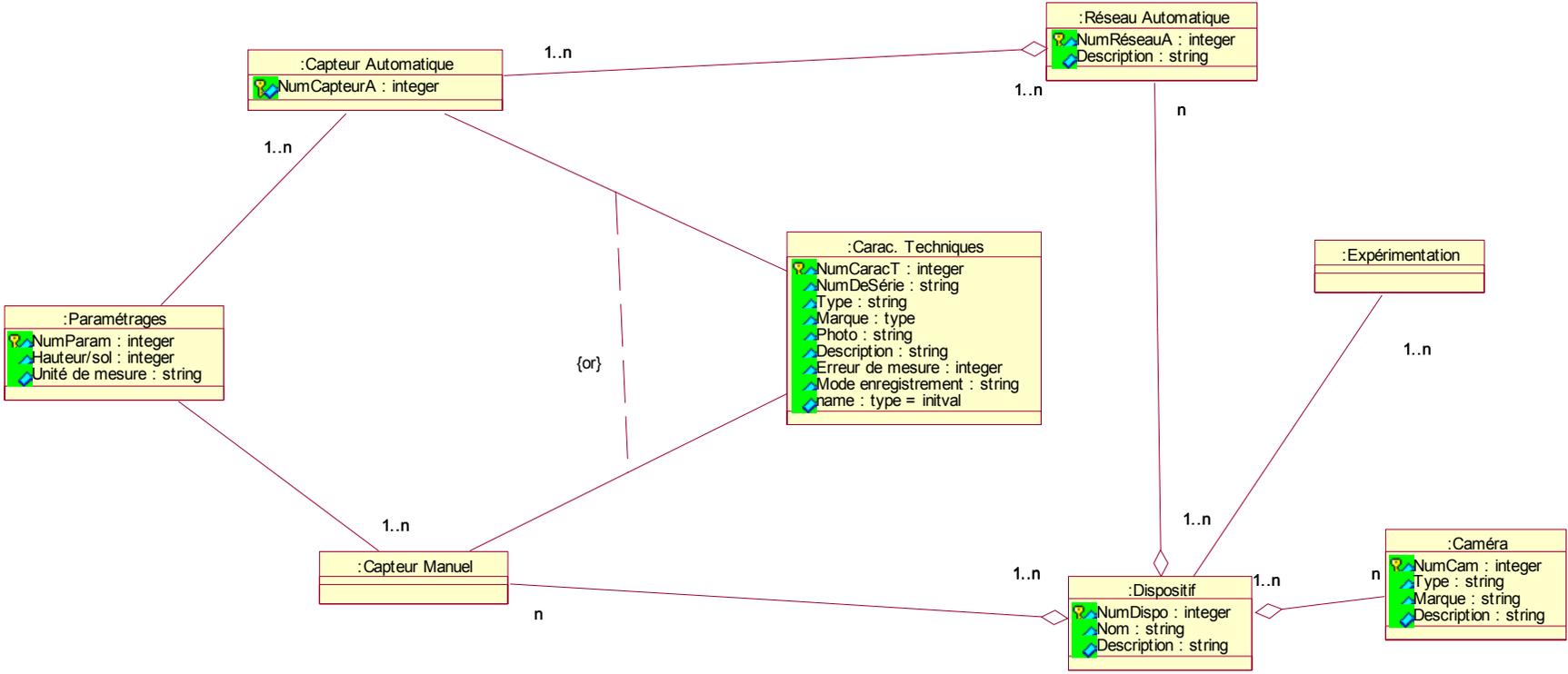


Figure.4.27 : Diagramme de classes relatives au dispositif

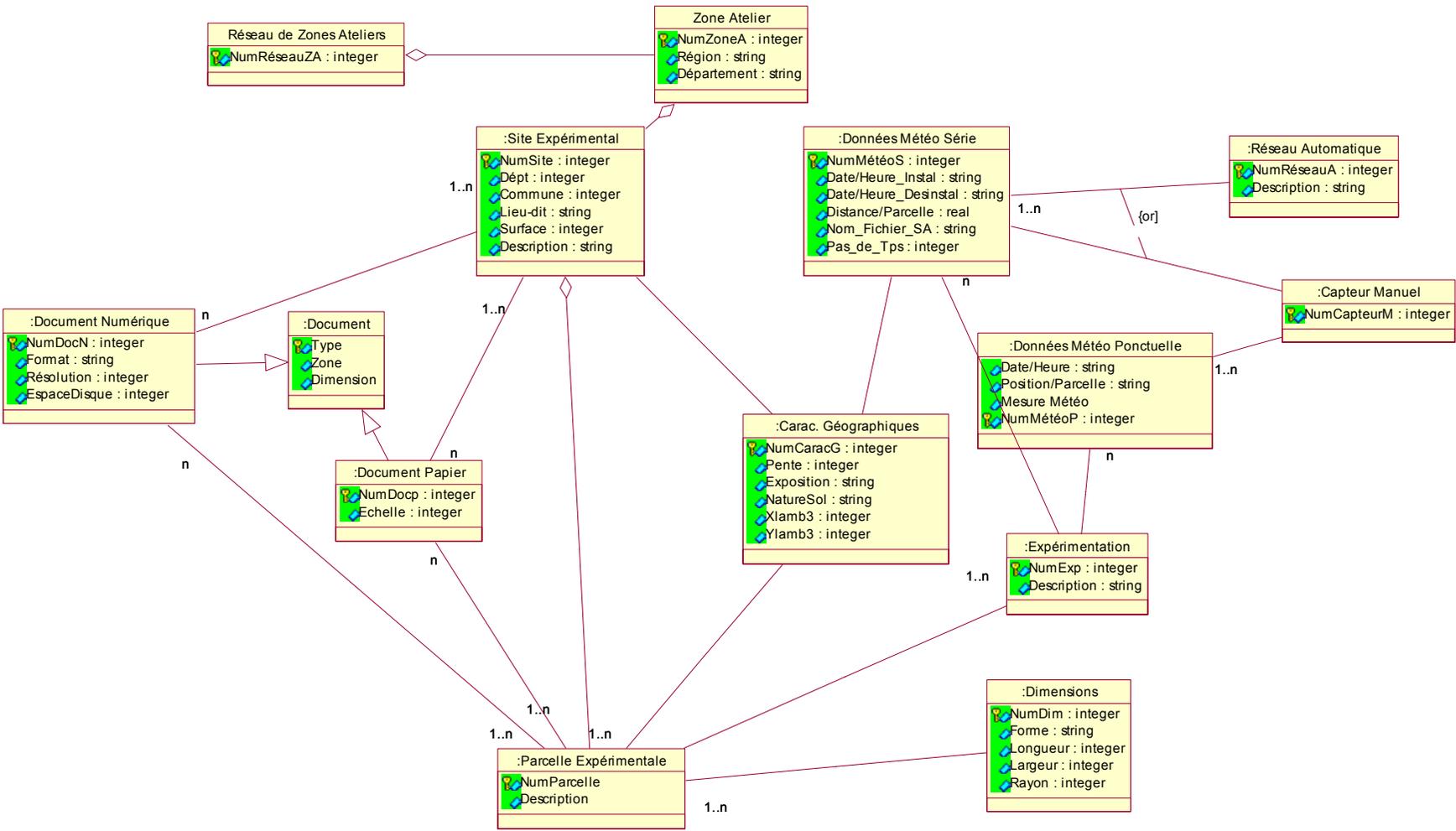


Figure 4.28 : Diagramme de classes relatives aux entités géographiques, à la documentation et aux paramètres météorologiques

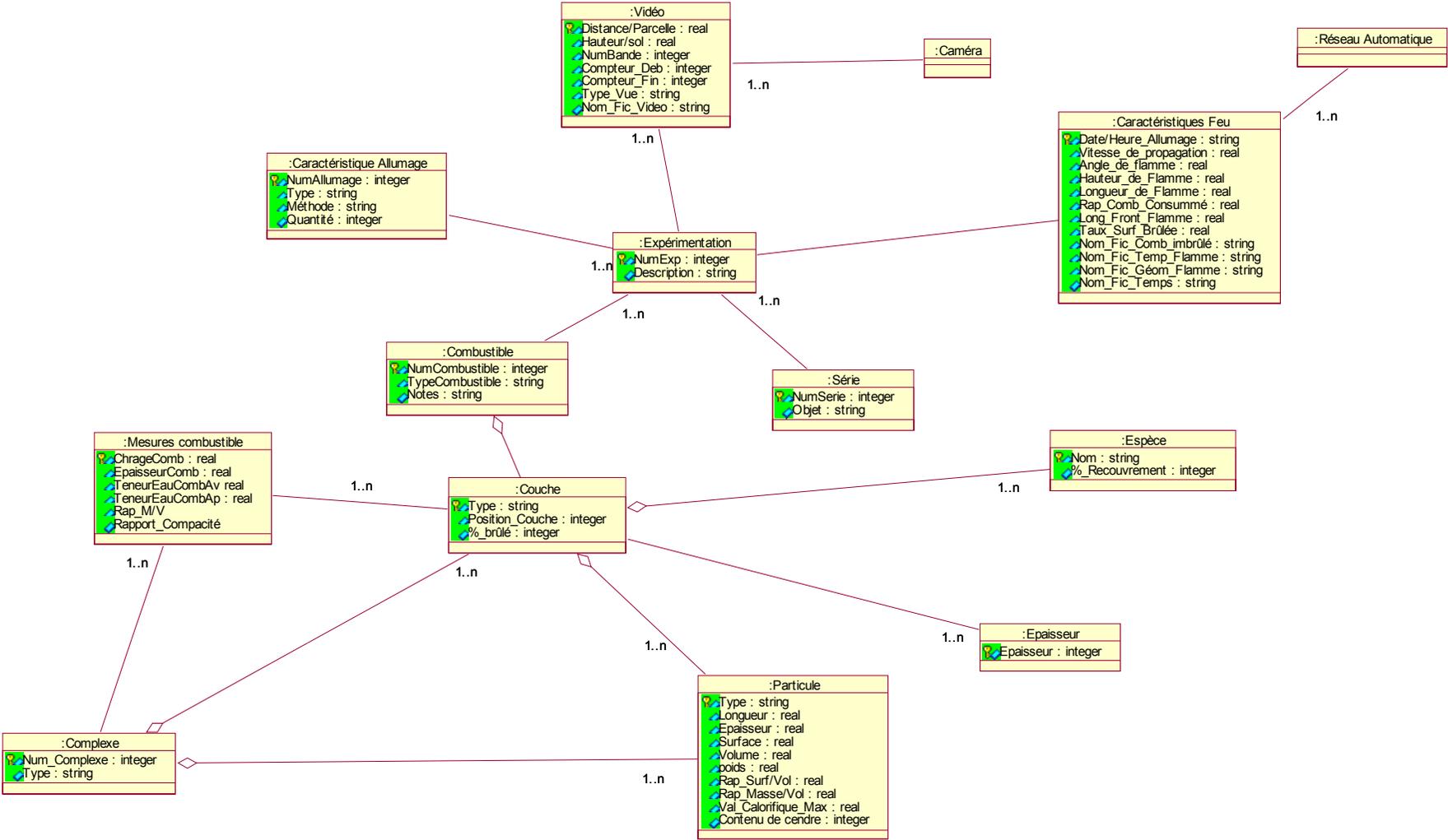


Figure 4-29 : Diagramme de classes relatives aux caractéristiques de l'expérimentation, au combustible et au brûlage

### **4.3. Conclusion du Chapitre 4**

Le langage UML est particulièrement bien adapté à la formalisation de connaissances et des activités dans le domaine de l'environnement. La modélisation de la démarche expérimentale et du système d'information pour la capitalisation et la gestion des données issues d'expérimentations en milieu naturel a contribué à la formalisation des connaissances du domaine. Nous avons défini dans ce chapitre, les besoins des utilisateurs (modélisation de la démarche expérimentale) ainsi que les fonctionnalités du système (modélisation du système d'information).

L'étape suivant la phase de conception est le développement d'un prototype de système d'information pour l'aide à la gestion de données expérimentales. Nous aborderons la description de ce système dans le chapitre 5. Les fonctionnalités sont présentées et des exemples d'utilisation sont donnés afin de démontrer la validité d'un tel outil dans la démarche de modélisation du comportement des feux de forêt.



## **Troisième Partie**

### **Système de gestion des connaissances et zone atelier pour la modélisation des incendies de forêt**



## Chapitre 5

### Vers un système de gestion des connaissances pour la modélisation des feux de forêt

*Savoir où l'on veut aller, c'est très  
bien ; mais il faut encore montrer qu'on  
y va.*

*Emile Zola*

Nous présentons dans ce chapitre un prototypage d'un système de gestion des connaissances d'une zone atelier. L'objet de cette démarche est de présenter l'un des composants d'un Environnement de Résolution de Problèmes pour l'aide à la modélisation du comportement des incendies de forêt.

Nous détaillons et discutons les différentes fonctionnalités du prototype. Des exemples de modélisation semi-empirique, fondée sur des données d'une campagne d'expérimentations menée dans les Landes, sont présentés afin de démontrer l'utilité d'un couplage entre un système d'information pour la gestion des connaissances et un système à base de modèles.

#### **5.1. Vers un prototype d'Environnement de Résolution de Problème d'aide à la modélisation des incendies de forêt**

Nous avons vu dans le deuxième chapitre, que l'ERP<sup>1</sup> pouvait constituer un outil idéal pour le modélisateur. Nous définissons ici ce que pourrait être un ERP pour l'aide à la modélisation du comportement des incendies de forêt.

L'ERP devra :

- Faciliter la capitalisation d'informations d'origines diverses (acquises par différents laboratoires sur de nombreux sites),

---

<sup>1</sup> Environnement de Résolution de Problème

- Favoriser à terme la mise en œuvre de modèles de simulation permettant une meilleure compréhension des mécanismes et situations présentes, passées et à venir,
- Etre considéré comme un point de convergence des différentes données, connaissances et modèles acquis et/ou élaborés dans le cadre de cette étude.

### **5.1.1. L'ERP d'aide à la modélisation des incendies de forêt**

Nous avons vu dans le Chapitre 2 qu'un ERP, dédié à l'aide à la modélisation est généralement constitué de trois sous-systèmes spécialisés. Nous reprenons et détaillons chacun de ces trois sous-systèmes.

#### ***5.1.1.1. Le sous-système de gestion de la base de données et de connaissances***

La quantité de données nécessaires à un modèle de simulation et acquises lors d'expérimentations, est souvent considérable et cela peut avoir des répercussions négatives sur l'efficacité de l'ERP. Les données et les informations de base, qui fournissent l'ensemble des connaissances indispensables à l'utilisateur, doivent donc être gérées par l'ERP sous la forme d'un sous-système de gestion des données.

Le recours à ce système est dès lors nécessaire. L'ensemble des données est représenté sous forme de tables reliées par des relations de cohérence.

Dans le cadre de cette étude, une base de données (couvrant la zone atelier) a été conçue puis développée. Ceci nous a conduit à réfléchir à la structure et l'organisation d'une telle base selon les informations disponibles et acquises sur le terrain :

- La localisation des zones ateliers et des sites expérimentaux,
- La topographie,
- La végétation,
- Les données climatiques et météorologiques régionales et locales,
- Les données issues de photographies aériennes ou acquises pour les besoins de diverses études,
- La description du dispositif de mesure,
- Les données issues de l'expérimentation conduite sur le terrain.

Ceci nous a également conduit à nous interroger sur d'éventuelles adaptations de ces informations pour en permettre l'intégration et l'exploitation au sein de l'ERP (homogénéité des unités de mesures, modification du format de données...).

Enfin, cela nous a permis de définir les traitements à mettre en œuvre sur ces données afin d'atteindre les objectifs fixés dans le cadre de la problématique à traiter.

#### **5.1.1.2. Le sous-système de gestion des bases de modèles**

Grâce aux travaux conduits par les différentes équipes, un système de modèles pourra être élaboré puis intégré dans le sous-système de gestion de la base de modèles. Ce deuxième sous-système regroupera, de façon cohérente, un ensemble de modèles de natures différentes.

Les objectifs assignés à une base de modèles sont de cinq types (Rousseau, 1988 ; Guarniéri et al., 1998) :

- Capitaliser les connaissances sur les modèles d'un domaine d'étude (objectifs de modélisation, hypothèses, variables prédites...),
- Faciliter la comparaison théorie/expérience,
- Guider le choix d'un modèle parmi un ensemble de modèles candidats,
- Faciliter l'intégration de nouveaux modèles (développés ultérieurement),
- Offrir à des utilisateurs non avertis des moyens de simulation développés par d'autres.

L'ERP proposé pourra compter à terme, plusieurs bases de modèles. Chacun des modèles est caractérisé et décrit, dans un premier temps, par une série de propriétés (i.e des connaissances sur le modèle), il est par la suite « instancié » dans l'ERP (possibilité de réaliser des simulations).

Les différents modèles pourront être intégrés au sein de l'ERP quel que soit le langage informatique utilisé.

#### **5.1.1.3. Le sous-système de gestion du dialogue**

L'IHM<sup>2</sup> de l'ERP regroupe les commandes initiées par l'utilisateur en vue d'actions qu'il souhaite effectuer. Ces actions portent sur :

- Les données (visualiser une ou plusieurs photos du site, consulter les données météorologiques, le résultat d'une ou plusieurs expérimentations...),
- Les modèles (fixer les paramètres d'entrée d'un modèle, déclencher une simulation, modifier le contenu de la base de connaissances...),

---

<sup>2</sup> Interface Homme-Machine

- La mise en forme et la présentation des résultats des commandes précédentes (visualiser les résultats d'une simulation sous la forme d'un tableau, d'un ensemble de courbes, d'une carte...).

Ce système permettra à terme, à un ensemble d'opérateurs (les différents laboratoires de recherches), de consigner les informations acquises lors d'expérimentations. Ce logiciel assurera donc les fonctions principales suivantes :

- Archivage de l'information sur des supports durables : le fichier informatique plutôt que le papier,
- Reconstitution chronologique d'une expérimentation,
- Synthèse d'une expérimentation,
- Utilisation des données issues d'une expérimentation pour le développement ou la validation de modèles.

Nous avons choisi de traiter dans cette thèse, uniquement la modélisation des connaissances mises en œuvre dans une zone atelier et plus particulièrement celles acquises lors d'expérimentations en milieu naturel. Nous présentons donc un prototype de système de gestion des connaissances d'une zone atelier dédiée à la modélisation du comportement des incendies de forêt : le système MODELLIS (MODELLED-Information System) (Napoli et al., 1999).

### 5.1.2. Le prototypage de l'ERP

Le prototypage permet d'une part de valider des choix fonctionnels en développant au fur et à mesure une spécification exécutable et d'autre part de choisir de façon plus assurée parmi les divers scénarios envisagés (Zelfani, 1993).

La création d'un prototype permet d'effectuer une démonstration des spécificités du système d'information, à chaque étape du cycle de vie itératif du logiciel. Les fonctionnalités du système d'information peuvent donc être ajustées en fonction de l'évaluation du prototype.

Les prototypes peuvent être classés en fonction de leurs finalités et objectifs. Floyd (1984) distingue trois familles de prototypes :

- **Le prototype exploratoire** : il a pour objet de clarifier les besoins et les caractéristiques désirés du système final (Fig. 5.1) ; il permet de développer et

de valider les spécifications du système ; c'est donc l'outil privilégié des analystes en informatique et des cognitivistes,

- **Le prototype expérimental** : il a pour objet de tester la faisabilité et le comportement des parties critiques du système d'information afin d'évaluer leurs performances ; c'est un outil principalement destiné au développeur en informatique (Zelfani, 1993),
- **Le prototype évolutif** : il a pour objet la réalisation d'un logiciel par l'adaptation graduelle de celui-ci aux évolutions de la spécification ; ce prototype directement utilisable, évolue de version en version.

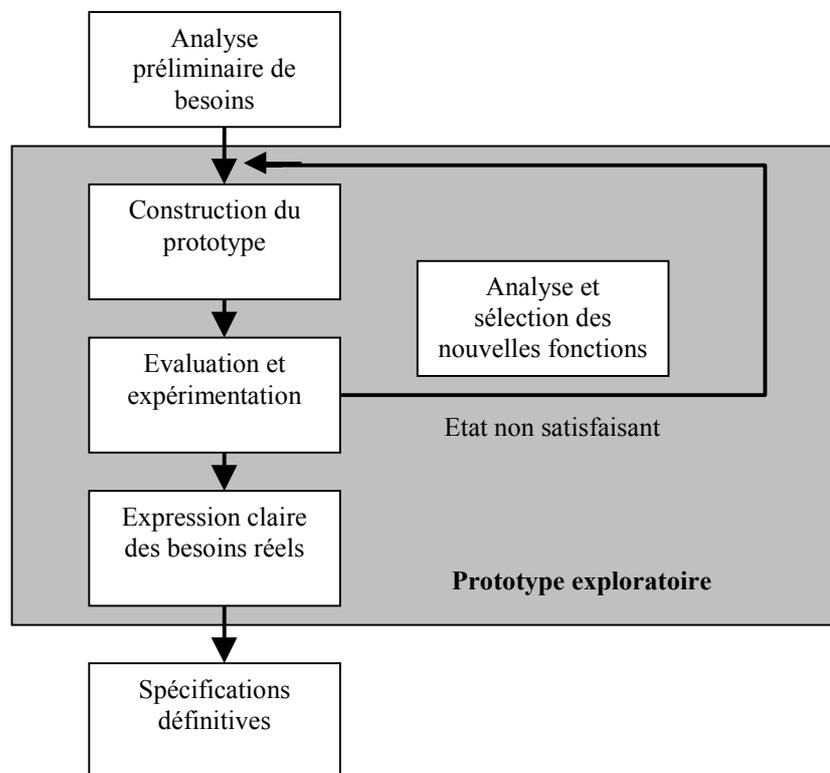


Figure 5.1 : Le prototypage exploratoire d'après Aubry (1985)

Le prototypage envisagé dans le cadre de ces travaux, s'inscrit dans une démarche exploratoire proche de l'objectif des spécifications opérationnelles, par principe non évolutive car notre but n'est pas de développer le logiciel final, mais de fournir une spécification validée.

## **5.2. MODELLIS : un système de gestion des données et connaissances d'une zone atelier**

Un premier prototype de système d'information pour la gestion des connaissances d'une zone atelier dédiée à la modélisation du comportement des feux de forêt, a été développé. Bien que le modèle conceptuel ait été validé, le prototype n'est pas encore directement utilisable par les utilisateurs finaux : la base de données n'a été testée que sur quelques expérimentations conduites dans les Alpes-Maritimes (UNSA<sup>3</sup>) et dans les Landes (INRA<sup>4</sup> d'Avignon et UNSA). Ce prototype exploratoire a été conçu avec l'aide du Pôle Cindyniques de l'Ecole des Mines de Paris à Sophia-Antipolis.

### **5.2.1. Présentation du prototype exploratoire MODELLIS**

Afin d'assister les chercheurs dans leurs activités liées à l'expérimentation, nous proposons de concevoir un prototype de système d'information pour la gestion de connaissances acquises lors d'expérimentations, dans des zones ateliers. Les connaissances pouvant être codées en données, ce premier prototype a été développé avec le Système de Gestion de Base de Données Relationnelles, Microsoft Access. Nous l'avons nommé MODELLIS. Le développement se fonde sur la modélisation conceptuelle développée dans le Chapitre 4.

L'ensemble des données est accessible par des fenêtres et de multiples menus. L'IHM, constituée de formulaires de saisie et de consultation, a été spécialement étudiée afin de rendre son utilisation la plus intuitive possible.

### **5.2.2. Les fonctionnalités de MODELLIS**

MODELLIS comprend trois modules traitant les données relatives à (Fig. 5.2) :

- Une zone atelier (caractéristiques de la zone, du site et de la parcelle expérimentale),
- Un dispositif expérimental (les capteurs utilisés pour les mesures),
- Une expérimentation (les données acquises lors d'expérimentations).

---

<sup>3</sup> Université de Nice-Sophia Antipolis

<sup>4</sup> Institut National de la Recherche Agronomique



Figure 5.2 : Ecran de présentation de MODELLIS

Les données de ces modules peuvent être gérées indépendamment les unes des autres. Ainsi, un dispositif de mesure spécifique à un type de site expérimental, peut être documenté avant la définition du dit site ; il en est de même en ce qui concerne l'expérimentation et la zone atelier.

Il est cependant recommandé à l'utilisateur de respecter une certaine hiérarchisation de la gestion des données afin ne pas oublier certaines informations. Nous conseillons donc de saisir les données du dispositif et de la zone atelier avant celles de l'expérimentation. Nous nous proposons de décrire les principales fonctionnalités de cette application.

#### 5.2.2.1. Le module « Zones Ateliers »

Ce menu concerne la gestion des informations concernant les quatre types d'entités spatiales :

- Le réseau de zones ateliers,
- La zone atelier,
- Le site expérimental,
- La parcelle expérimentale.

La notion d'appartenance entre entités spatiales doit être respectée (Cf. Chapitre 1). Cependant, les données de ces entités peuvent être saisies indépendamment les unes des autres.

#### *5.2.2.1.1. Le module « Réseau de zones ateliers »*

Ce module permet de définir un réseau de zones ateliers par un identifiant unique et des informations le caractérisant. L'expérimentateur pourra ainsi grouper les zones ateliers en fonction d'une problématique propre à ce réseau. Il est possible à partir de l'écran de ce module d'accéder directement au formulaire de saisie des informations d'une zone atelier.

#### *5.2.2.1.2. Le module « Zone atelier »*

Ce module a pour objet de décrire une zone atelier par les informations qui la caractérisent (identifiant, région, département...). L'expérimentateur peut ainsi créer une zone afin de grouper les sites expérimentaux pouvant lui être associés, en fonction de leurs caractéristiques géographiques et de la problématique d'étude mise en œuvre sur ceux-ci. Ce module permet d'accéder directement au module « Site expérimental ». L'utilisateur peut ainsi, implémenter directement des sites expérimentaux à partir d'une zone atelier.

#### *5.2.2.1.3. Le module « Site expérimental »*

Ce module permet de définir un site expérimental par les informations permettant de le caractériser telles que l'identifiant, la commune, le département, le code postal, le lieu-dit et sa superficie. Des sous-modules permettent de saisir les caractéristiques des documents papiers et numériques, apportant ainsi des informations complémentaires (Fig. 5.3). Ces documents peuvent également servir à documenter une parcelle expérimentale. A un site expérimental correspondent plusieurs documents.

Un sous-module permet de saisir les caractéristiques géographiques du site expérimental. Ces informations sont :

- Les coordonnées X et Y du centre de la parcelle,
- Le type de coordonnées (Lambert 2 étendu, Lambert 3),
- La pente,
- L'altitude,
- L'exposition,
- La nature du sol.

A partir du module « Site Expérimental », l'utilisateur peut directement, implémenter les informations relatives aux parcelles du site.

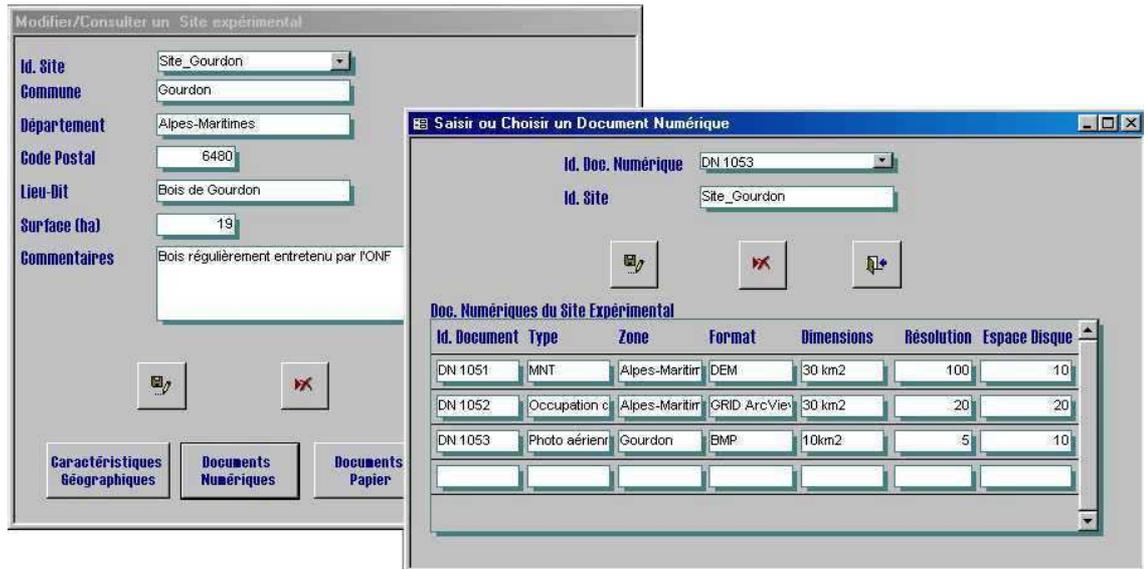


Figure 5.3 : Ecrans de saisie d'un site expérimental et de ses documents numériques

#### 5.2.2.1.4. Le module « Parcelle expérimentale »

Ce module permet de décrire une parcelle expérimentale. L'écran de saisie est semblable à celui du site expérimental. La parcelle est caractérisée par un identifiant unique, ses dimensions, sa forme, et l'identifiant du site auquel elle appartient. Des sous-modules sont disponibles afin de saisir les informations relatives à ses caractéristiques géographiques, aux documents papier et numériques disponibles. Il est donné à l'utilisateur la possibilité de gérer directement ces documents à partir de l'écran de saisie de la parcelle expérimentale (Fig. 5.4).

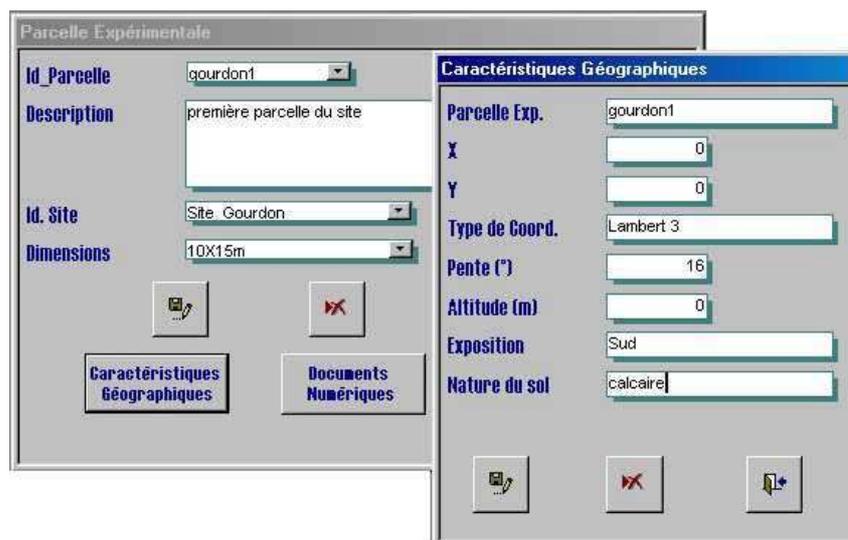


Figure 5.4 : Ecrans de saisie d'une parcelle expérimentale et de ses caractéristiques géographiques

Ce module « Parcelle expérimentale » permet également d'accéder aux écrans de saisie des informations relatives au combustible de la parcelle : le type, la couche, l'espèce, le complexe et la particule. Les couches, les complexes et les particules de combustible sont renseignés par différents paramètres. Par exemple, les informations de la particule végétale sont (Fig. 5.5) :

- L'identifiant de la particule,
- La teneur en eau,
- Le type de particule (aiguille de pin maritime, d'Alep),
- L'épaisseur du combustible,
- La longueur, le poids, la surface, le volume,
- Le rapport masse/volume,
- Le rapport surface/volume,
- La valeur calorifique maximum.

Figure 5.5 : Ecrans de saisie des informations relatives au combustible

### 5.2.2.2. Le module « Dispositif Expérimental »

Ce menu concerne la gestion des éléments du dispositif de mesure à mettre en place sur un site ou une parcelle expérimentale (Fig. 5.6). Il permet de gérer les différents appareils de mesure participant à l'expérimentation :

- Les capteurs manuels,
- Les capteurs automatiques,
- Les réseaux de capteurs automatiques,
- Les caméras.

Il est également possible, à partir de ce menu, de saisir des informations concernant les caractéristiques techniques de chaque appareil de mesure (le numéro de série, la marque, la description, l'erreur de mesure à associer à l'appareil) ainsi que son paramétrage (unité de mesure, hauteur sur sol).

Ces informations constituent les métadonnées des mesures enregistrées. Il est en effet primordial que le modélisateur connaisse de telles données, et plus particulièrement, l'unité de mesure, l'erreur de mesure propres à chaque instrument, afin de rendre ces mesures comparables les unes par rapport aux autres.

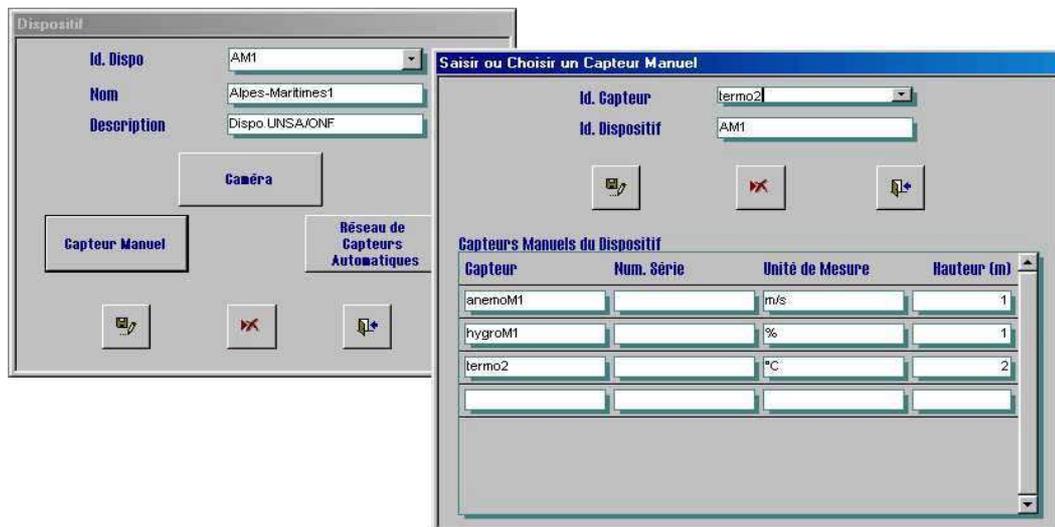


Figure 5.6 : Ecrans de saisie d'un dispositif de mesure et de ses capteurs manuels

### 5.2.2.3. Le module « *Expérimentation* »

Ce module permet l'accès à toutes les informations pouvant être enregistrées durant une expérimentation. Nous pouvons distinguer différentes sortes d'informations concernant :

- L'expérimentation proprement dite,
- Les mesures de paramètres du feu,
- La vidéo,
- Les mesures de paramètres météorologiques (mesures ponctuelles et série),
- Les mesures de combustible.

### 5.2.2.3.1. Les informations propres à l'expérimentation

Ces informations permettent de caractériser l'expérimentation (Fig. 5.7). Nous pouvons citer pour exemple, l'identifiant unique, une description, un numéro de série (l'expérimentateur a la possibilité de classer les expérimentations en fonction d'un critère), l'identifiant de la parcelle, le type d'allumage, la durée de l'expérimentation, le type de combustible, la vitesse de propagation, le type de dispositif de mesure, le rapport de combustible brûlé et le taux de surface brûlée.

Figure 5.7 : Ecran de saisie d'une expérimentation

### 5.2.2.3.2. Les mesures des paramètres du feu

Les informations relatives au feu sont caractérisées par un identifiant unique. Ces informations sont (Fig. 5.8) :

- La date et l'heure de la mesure,
- L'angle, la hauteur et la longueur de la flamme,
- La longueur du front de front de flammes,
- La localisation du fichier d'enregistrement des temps de propagation (temps de passage du front de flammes sur certains repères),
- L'identifiant de l'expérimentation à laquelle appartient la mesure.

A chaque expérimentation peuvent correspondre plusieurs mesures de feu.

**Saisir ou choisir une Mesure de paramètres du Feu**

Id. Mesure feu: Gourdon\_feu1

Date/heure Mesure: 09/02/98 10:10:00

Angle de flamme: 0

Hauteur de flamme: 20

Longueur de flamme: 0

Longueur du front: 150

Fichier Propagation: c:\Exp\AM\Gourdon\E980209

Id. Expérimentation: Gourdon1

**Mesure des Param. du feu**

Id. Mesure feu	Date/Heure Mesure
Gourdon_feu1	09/02/98 10:10:00

Figure 5.8 : Ecran de saisie des mesures de paramètres du feu

#### 5.2.2.3.3. Les informations relatives à l'enregistrement vidéo

Pendant toute la durée de l'expérimentation, un cameraman filme la progression du feu. Cet enregistrement vidéo permettra au modélisateur de définir la forme du front de flammes. Les informations à saisir concernant cet enregistrement sont :

- L'identifiant unique de l'enregistrement vidéo,
- L'identifiant de l'expérimentation filmée,
- L'identifiant de la caméra utilisée,
- La distance et la hauteur de la caméra par rapport à la parcelle,
- Le numéro de bande, ainsi que le compteur de début et de fin de l'enregistrement,
- Le type de vue (frontale, oblique...).

Une expérimentation peut être filmée sous différents angles et avec différentes caméras (visible, infrarouge). Plusieurs vidéos d'une expérimentation peuvent donc être enregistrées dans la base.

#### 5.2.2.3.4. Les mesures des paramètres météorologiques

Les enregistrements concernant les paramètres météorologiques sont de deux types (Fig. 5.9) :

- Les données ponctuelles, mesurées à l'aide d'un capteur manuel (le responsable des mesures météorologiques relève la température avant et après l'expérimentation),
- Les données séries mesurées en continu, par une station météorologique automatique ou manuellement, par le responsable des mesures météorologiques (par exemple, il est plus facile de suivre un front de flammes à l'aide un anémomètre manuel et d'enregistrer les mesures dans un dictaphone au fur et à mesure de la progression).

**Saisir ou choisir une Donnée Météo ponctuelle**

Id. Météo Ponctuelle: H1  
Id. Expérimentation: Gourdon1

Données Météo ponctuelles de l'Expérimentation

Id. Météo ponctuelle	Date/Heure	Id. Capt. Manuel
H1	09/02/98 10:00:00	hygroM1
T1	09/02/98 10:00:00	termo2
T2	09/08/98 11:20:00	termo2

**Saisir ou Choisir une Série de Données Météo**

Id. Météo Série: msm11  
Id. Expérimentation: Gourdon1

Données Météo Série de l'Expérimentation

Id. Don. Météo Série	Date/Heure Deb.	Durée (mn)	Id. Capt. Manuel
msm11	09/02/98 10:00:00	01:03:00	anemoM1

Figure 5.9 : Ecrans de saisie des mesures de paramètres météorologiques

Il est possible d'accéder et d'ajouter directement des mesures ponctuelles et en série à partir du menu expérimentation.

Les informations à saisir concernant les données ponctuelles sont :

- L'identifiant unique de la mesure,
- La date et l'heure de la mesure,
- La position par rapport à la parcelle,
- La mesure,
- Le capteur utilisé pour la mesure et son paramétrage.

Les informations à saisir concernant les séries de données sont :

- L'identifiant unique de la série,
- La date et l'heure de début d'enregistrement,
- La durée de l'enregistrement,
- La position par rapport à la parcelle,
- Le pas de temps utilisé pour les mesures,
- La localisation du fichier d'enregistrements,
- Le ou les capteurs utilisés ainsi que leur paramétrage.

#### 5.2.2.3.5. Les mesures de combustible

L'expérimentateur enregistre dans la base les informations suivantes (Fig. 5.10) :

- L'identifiant unique de la mesure,
- La charge et l'épaisseur du combustible,
- La teneur en eau avant et après l'expérimentation,
- Le rapport masse/volume et le rapport de compacité,
- L'identifiant de la couche à laquelle appartient le combustible.

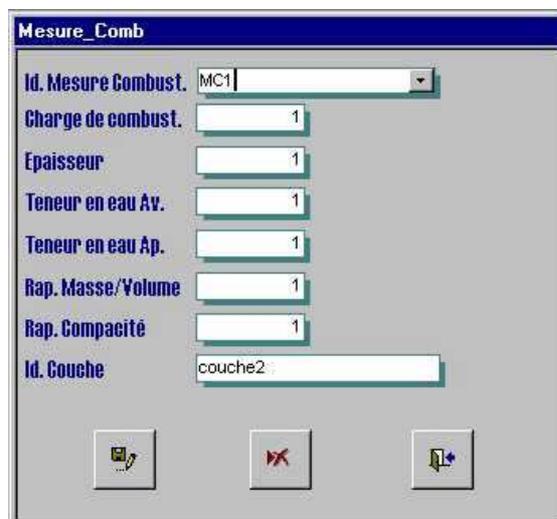


Figure 5.10 : Ecran de saisie des mesures de combustible

A ce jour MODELLIS propose une capitalisation des données et leur consultation par de multiples menus et requêtes. A terme, ces données doivent servir à simuler la propagation d'un front de flammes. L'équipe GVE<sup>5</sup> de l'UNSA a utilisé les données enregistrées dans la base, afin de modéliser la propagation d'un feu de forêt.

<sup>5</sup> Gestion et Valorisation de l'Environnement

### 5.2.3. Exemples de modélisation à partir des données de MODELLIS

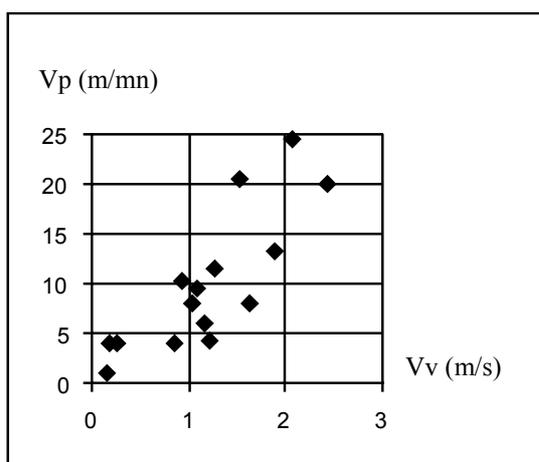
L'équipe GVE de l'UNSA a réalisé dans le cadre du projet EFAISTOS, une étude sur le développement d'un modèle statistique de la vitesse de propagation d'un feu de forêt à partir des informations issues des expérimentations en milieu naturel. L'objet de cette modélisation était d'étudier la relation entre la vitesse de propagation d'un feu et les données de vent. Cette modélisation de type 1D (la seule dimension prise en compte est le temps) a été réalisée avec des outils fondés sur le logiciel Microsoft Excel.

#### 5.2.3.1. Modélisation à partir des données des Alpes-Maritimes

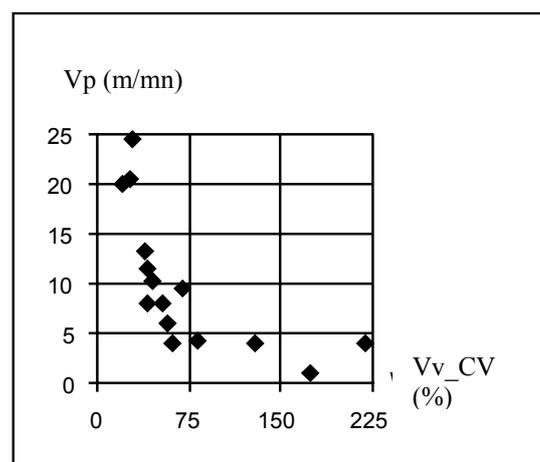
Une analyse de données a été réalisée sur 15 feux étudiés durant la campagne de brûlages dirigés de l'hiver 1998 (Napoli et Carréga, 1998). Le protocole de mesure et ces expérimentations ont été présentés dans le deuxième chapitre. Les coefficients de corrélation simple ont été calculés pour chacun des paramètres météorologiques :

**Tableau 5.1 : matrice des coefficients de corrélation simple.**

	<b>r</b>	<b>r<sup>2</sup></b>
Vitesse de vent moyenne à 2 m sur sol	0,82	<b>67 %</b>
Vitesse de vent instantanée maximale à 2 m sur sol	0,48	23 %
Coefficient de variation de la vitesse de vent instantanée	-0,67	45 %
Inverse du coefficient de variation	0,90	<b>81 %</b>
Ecart type de la vitesse de vent instantanée	0,04	0,2 %
Température de l'air	0,43	18,5 %
Humidité relative de l'air	-0,04	0,2 %
Point de rosée	0,13	1,7 %



**Figure 5.11 : Relation entre la vitesse de propagation (Vp) et la vitesse moyenne du vent (Vv) ;  $r = 0,82$**



**Figure 5.12 : Relation non linéaire entre la vitesse de propagation (Vp) et le coefficient de variation de la vitesse du vent (Vv\_CV) ;  $r = -0,67$**

Nous pouvons constater que les paramètres les plus explicatifs de la vitesse de propagation sont la vitesse de vent moyenne à deux mètres sur sol ( $r = 0,82$ ) (Fig. 5.11) ainsi que le coefficient de variation (relation non linéaire, Fig. 5.12) et plus particulièrement l'inverse de ce coefficient ( $r = 0,90$ ).

### ***5.2.3.2. Modélisation à partir des données des Landes***

Une analyse de données a été réalisée sur 11 feux étudiés sur des parcelles expérimentales dans les Landes en Avril 1998 (Napoli et Carréga, 1998). Le protocole de mesure et ces expérimentations ont été présentés dans le deuxième chapitre.

Une modélisation à l'aide de la régression multiple a été effectuée. Nous avons retenu deux types de données météorologiques pour cette modélisation :

- Les données mesurées manuellement par l'observateur,
- Les données mesurées par une station météorologique automatique.

Concernant les mesures de feu, nous avons décidé d'étudier le feu déjà en progression et non pas dans sa phase d'éclosion. Nous avons considéré que le feu était lancé après avoir parcouru trois mètres depuis la ligne d'allumage.

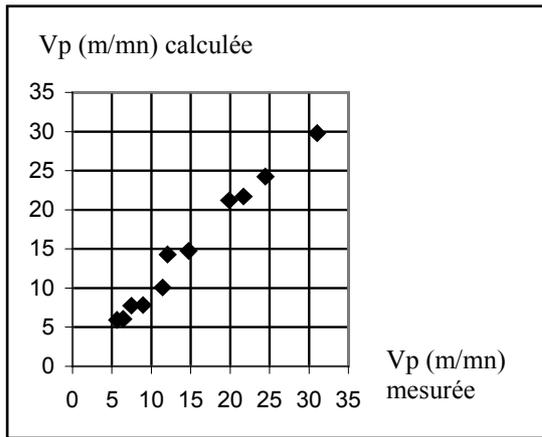
Un premier modèle calculé à l'aide des six paramètres suivants a été retenu :

- Le coefficient de variation de la vitesse de vent à 1 m sur sol ( $Vv1m$ ),
- Le coefficient de variation de la vitesse de vent à 2 m sur sol ( $Vv2m$ ),
- La vitesse de vent maximale à 2 m sur sol ( $Vvx2m$ ),
- La température mesurée par la station météorologique ( $T\_sm$ ),
- L'humidité relative mesurée par la station météorologique ( $HR\_sm$ ),
- La vitesse de vent maximale ( $Vvx\_sm$ ).

La régression multiple nous a permis de déterminer l'équation suivante :

$$ROS\_c = -267.1174 + 37.86644 * Vv1m - 45.74765 * Vv2m + 10.83969 * Vvx2m + 7.25863 * T\_sm + 2.237673 * HR\_sm + 5.661933 * Vvx\_sm$$

Un coefficient de corrélation de 0.991 a partiellement validé la fiabilité de ce modèle (Fig. 5.13).



**Figure 5.13 : relation entre la vitesse de propagation calculée par le modèle et celle mesurée lors des expérimentations**

Ces premières tentatives de modélisation statistique nous permettent de confirmer la nécessité de coupler MODELLIS à une base de modèles de propagation.

### **5.3. Perspectives de couplage avec d'autres systèmes d'information traitant de la problématique Incendie de Forêt**

Nous avons démontré en début de chapitre l'intérêt d'un environnement de résolution de problème pour l'aide à la modélisation du comportement des incendies de forêt. Le prototypage du système d'information pour la gestion des connaissances d'une zone atelier, ne représente qu'une étape dans l'élaboration de l'ERP. Il est donc nécessaire de poursuivre la conception et le développement afin d'aboutir à un produit de l'ingénierie de l'environnement, c'est-à-dire un progiciel opérationnel. Nous allons donc proposer quelques perspectives d'évolution.

#### **5.3.1. Perspective de couplage de MODELLIS avec des bases de modèles de propagation**

Un prototype d'ERP, dédié au domaine de l'expérimentation en laboratoire et de la modélisation des incendies de forêt, a été conçu et développé par le Pôle Cindyniques de l'Ecole des Mines de Paris (Guarniéri et al., 1998, 2000, 2001). Ce prototype dénommé FIRELAB a été réalisé conjointement avec les chercheurs de l'INRA d'Avignon et de l'IUSTI de Marseille.

L'ERP proposé pourra à terme intégrer plusieurs bases de modèles. Chacun des modèles est caractérisé et décrit, dans un premier temps, par une série de propriétés (i.e des connaissances sur le modèle), il est par la suite « instancié » dans l'ERP (possibilité de réaliser des simulations).

Les différents modèles pourront être intégrés au sein de l'ERP, quel que soit le langage informatique avec lequel ils sont rédigés. A ce jour, trois modèles ont été intégrés dans l'ERP :

- « Q2D » (Larini *et al.*, 1996) est un modèle, écrit en fortran, qui considère le feu comme un phénomène multi-phasique (phases solides et phases gazeuses) et qui peut être considéré en une, deux ou trois dimensions,
- A partir de cette description « complète » du phénomène, un modèle réduit nommé PIF97, codé en langage C, propose une version dite stationnaire du modèle Q2D ; le feu est considéré comme se propageant à une vitesse constante dans une direction,
- BEHAVE est un système intégrant le modèle semi-empirique de Rothermel (1972), codé en langage C ; c'est le modèle de référence dans le domaine des incendies de forêt.

Chacun des modèles est décrit au sein d'une base de connaissances regroupant les propriétés suivantes :

- **Le nom du modèle,**
- **Le type de modélisation** dont relève le modèle (empirique, semi-empirique, physique non-complet, physique complet),
- **L'auteur,**
- **Un commentaire** qui décrit les principales caractéristiques du modèle,
- **Une liste de références bibliographiques,**
- **Les objectifs prédictifs** : une description des principaux processus considérés par le modèle tels que :
  - Vitesse de propagation,
  - Hauteur de flamme,
  - Angle de la flamme,
  - Taux de combustible brûlé,
  - Intensité du front de feu,
  - Flux radiatif,
  - Flux convectif,
  - Flux conductif,
  - Température du gaz,
  - Température des particules solides,
- **Effet du vent** : absence de vent, vent constant, vent non constant,
- **Effet de la pente** : absence de pente, pente uniforme, pente non uniforme,

- **Caractéristiques du combustible** : espèce, profondeur, rapport surface/volume,
- **Dimension d'espace** : 0D, 1D, Q2D sur z, Q2D sur y, 2D sur x,y, 2D x,z, Q3D sur z, Q3D sur y et 3D,
- **Dimension de temps** : dépendant du temps, indépendant du temps,
- **Langage de programmation** : Fortran, C, Pascal, C++ et non-implémenté,
- **Figure**: une ou plusieurs figures peuvent être présentées.

L'objectif de cette base de connaissances est de proposer un ensemble d'informations sur les modèles regroupés au sein de la base de modèles, afin d'en assurer une mise en œuvre optimale. Ces connaissances guident l'utilisateur dans le choix d'un modèle plutôt qu'un autre au grès de ses objectifs de modélisation.

L'utilisateur choisit le modèle et saisit les paramètres d'entrée issus de son expérimentation. Les simulations sont représentées sous forme de tableau ou de graphique (Fig. 5.14). Les résultats peuvent alors être archivés afin de permettre à l'utilisateur de les comparer avec d'autres simulations.

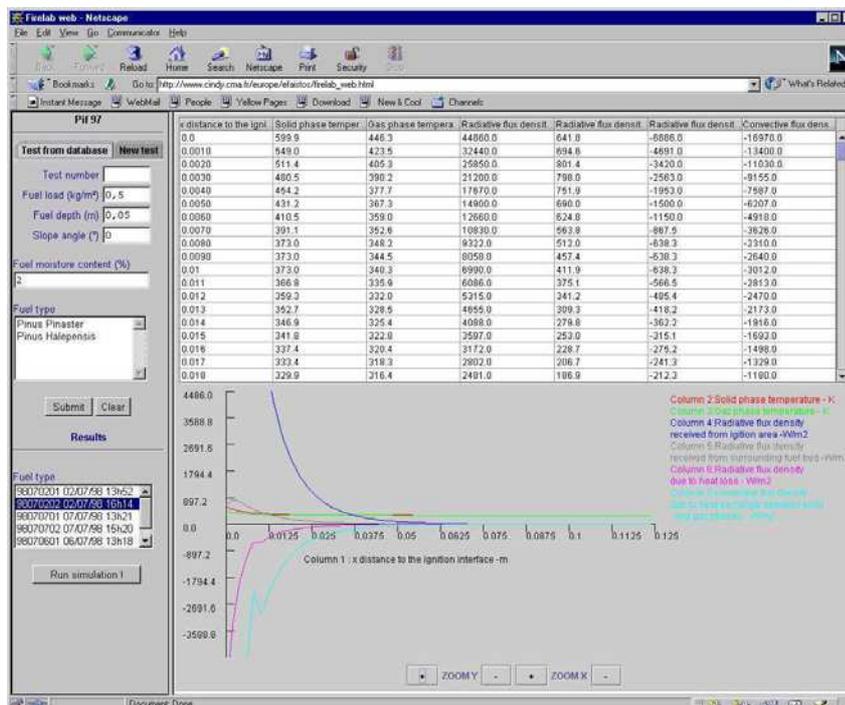


Figure 5.14 : Exemple de simulation avec FIRELAB (source : EMP/Pôle Cindyniques)

Ce couplage permettrait à FIRELAB de simuler la propagation d'un feu à l'aide de données expérimentales en milieu naturel et ainsi valider les modèles avec des données de vrais feux. De plus, il permettrait à MODELLIS d'acquérir une base de modèles de propagation.

### 5.3.2. Perspective de couplage de MODELIS avec des ERP à référence spatiale

Nous présentons deux ERP à référence spatiale qui apporteraient à MODELIS une composante géographique.

#### 5.3.2.1. Perspective de couplage avec MERIS

Le pôle Cindyniques de l'Ecole des Mines de Paris a réalisé un prototype d'Environnement de Résolution de Problème pour la prévention des incendies de forêt. Cet ERP, dénommé MERIS, se compose de trois sous-systèmes spécialisés (Guarniéri, 1995 ; Guarniéri et Wybo, 1997) :

- Un système de gestion de la base de données géographiques,
- Une interface graphique permettant la création et la gestion de bases de modèles,
- Une Interface Homme-Machine dédiée à la problématique incendie de forêt.

Cet ERP permet de réaliser des simulations de propagations d'un feu de forêt (Fig. 5.15). La vitesse et la direction du front de flammes sont calculées en fonction du type de végétation et des paramètres météorologiques interpolés. Les tests ont été mis en œuvre dans les Alpes-Maritimes.

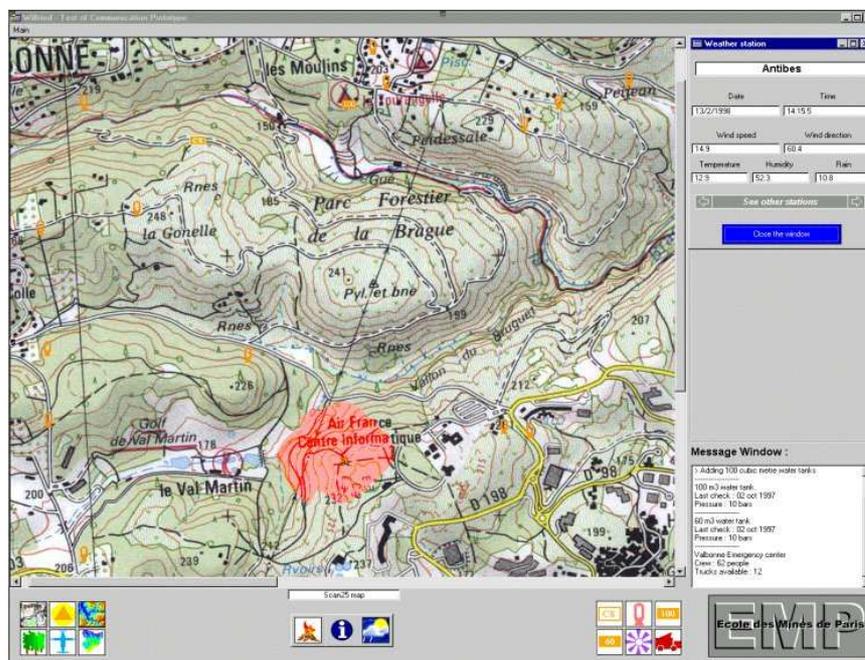


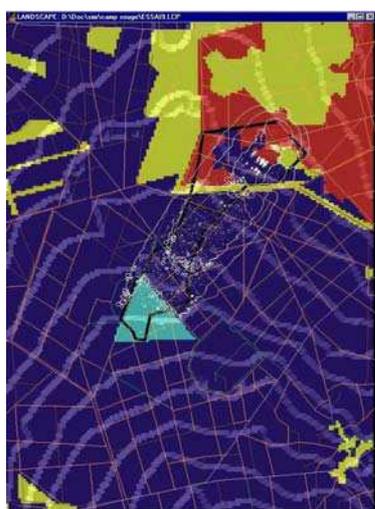
Figure 5.15 : Exemple de simulation de propagation d'un feu dans le département des Alpes-Maritimes, réalisée avec MERIS (source : EMP/Pôle Cindyniques)

Un couplage de MODELLIS avec MERIS permettrait aux modélisateurs d'associer la composante géographique à la gestion des connaissances de la zone atelier. Le scientifique pourrait alors simuler en 2D et sur fond cartographique les expérimentations réalisées en milieu naturel. De plus, le département des Alpes-Maritimes, terrain de test de MERIS constitue un espace géographique sur lequel l'UNSA a réalisé des expérimentations en milieu naturel. Un rapprochement technologique entre ces deux systèmes serait donc profitable aux deux équipes de chercheurs.

### 5.3.2.2. Perspective de couplage avec FARSITE

L'Association Régionale de Défense de la Forêt contre les Incendies (ARDFCI) a réalisé en 2001, une étude intitulée « Etude et développement d'un modèle de propagation du feu pour le massif forestier des Landes ». Cette étude a été commandée par le Service Départemental d'Incendie et de Secours des Landes (SDIS 40), co-organisateur des campagnes d'expérimentations en milieu naturel dans le département des Landes.

L'objectif de l'étude était de rendre compte d'une première utilisation d'un outil de simulation de propagation du feu de forêt, tel que FARSITE (Finney 1995, 1998 ; Andrews, 1998), dans le contexte Landais. Une série de simulations a été effectuée à partir de données de feux de forêt passés (Fig. 5.16). Les premiers résultats ont permis de définir les capacités du logiciel et son adaptation au contexte Landais.



**Figure 5.16 : Exemple de simulation d'un feu réel survenu le 14 avril 1995, sur le camp militaire de Souge (Gironde); surface brûlée > 500 ha ; simulation réalisée avec FARSITE**

(source : ARDFCI)

Il serait donc intéressant de coupler MODELLIS à FARSITE opérant dans le département des Landes. Les données des expérimentations effectuées dans ce département (Cf. Chapitre 3) pourraient servir pour éprouver ce logiciel.

## **5.4. Conclusion du Chapitre 5**

MODELIS permet, par une série de menus et de requêtes, la capitalisation et la consultation de données issues d'expérimentations en milieu naturel. Cet outil informatique doit servir, à terme, aux modélisateurs afin de développer et d'éprouver des modèles, à partir de données issues du terrain.

MODELLIS s'intègre dans le concept de Zone Atelier en tant qu'outil technologique pour les scientifiques. Nous présentons dans le chapitre suivant, ce que pourrait être une zone atelier pour la modélisation des incendies de forêt et plus particulièrement de la relation entre les paramètres météorologiques et les paramètres de comportement du feu et dans laquelle MODELLIS aurait sa place.



## Chapitre 6

### Vers un réseau de zones ateliers pour l'étude du comportement des feux de forêt en France

*Qui m'aime me suive !*

*Philippe VI*

L'objet de ce chapitre est de proposer, dans une démarche purement didactique, ce que pourrait être un réseau de zones ateliers dans le Sud de la France, pour l'étude du comportement des feux de forêt. Nous nous intéressons plus particulièrement à l'étude de l'influence des paramètres climatologiques sur la vitesse de propagation d'un front de flammes. Cette analyse se fonde principalement sur les travaux réalisés par l'Université de Nice-Sophia Antipolis dans le cadre de programmes de recherche européens. Ce chapitre permet de faire le point sur l'acquisition des connaissances utiles à la modélisation de la propagation des incendies de forêt. Nous avons vu dans le premier chapitre, qu'une zone atelier est définie par :

- Une ou plusieurs problématiques de recherche,
- Des équipes scientifiques,
- Un ou plusieurs sites expérimentaux.

La problématique de recherche a été étudiée dans le premier et troisième chapitre : nous avons retenu la modélisation du comportement des feux de forêt. Nous nous intéressons à décrire dans ce chapitre, les différentes zones ateliers dans le Sud de la France qui contribueraient à la création d'un réseau d'étude du comportement du feu. Ces zones ont été choisies en fonction de leurs caractéristiques géographiques, de leur adéquation avec la problématique et des travaux scientifiques dont elles sont ou étaient les aires d'étude. Nous définissons également les équipes scientifiques qui participeraient à la conception d'un réseau de zones ateliers pour la modélisation du comportement des incendies de forêt.

## 6.1. Les facteurs favorables à la création de zones ateliers

Le Sud de la France a été choisi en raison du nombre élevé de feux de forêt et de l'importance des surfaces brûlées chaque année dans cette région. Nous proposons trois zones ateliers pouvant constituer un réseau d'étude :

1. Le département des Alpes-Maritimes,
2. Le département du Var,
3. Le département des Landes.

Ces trois départements sont représentatifs du bassin de risque défini par :

- Les deux millions d'hectares de forêts et les deux millions d'hectares d'espaces naturels des 15 départements de l'Entente Interdépartementale<sup>1</sup> en vue de la protection des forêts contre l'incendie,
- Le million d'hectare de forêts du département des Landes.

A ces trois zones ateliers sera rattaché le laboratoire de l'INRA<sup>2</sup> d'Avignon qui, comme nous l'avons vu au premier chapitre, constitue à lui seul une véritable zone atelier pour l'étude du comportement des incendies de forêt.

Bien évidemment, les zones ateliers ne peuvent être dissociées des équipes de recherche. Nous pouvons distinguer quatre types d'équipes qui mettent en œuvre les zones ateliers précédemment citées :

- Les équipes d'analyse et de modélisation des paramètres influant sur le comportement du feu de forêt (paramètres météorologiques, topographiques, de combustibles...),
- Les équipes chargées de mener des expérimentations en laboratoire ou en milieu naturel,
- Les équipes d'analyse et de modélisation du comportement des incendies de forêt (vitesse et direction de propagation, intensité...),
- Les équipes chargées de la conception d'outils informatiques spécialisés : les équipes de cognitiens et de développeurs.

L'Equipe « Gestion et Valorisation de l'Environnement » (GVE) de l'Université de Nice-Sophia Antipolis (UNSA) étant spécialisée dans l'étude des phénomènes environnementaux en interaction avec les paramètres climatologiques, nous n'étudions dans ce chapitre que les zones ateliers pour l'étude du phénomène feu de forêt et des

---

<sup>1</sup> Alpes de Haute Provence, Hautes Alpes, Alpes Maritimes, Ardèche, Aude, Bouches du Rhône, Corse du Sud, Haute Corse, Drôme, Gard, Hérault, Lozère, Pyrénées Orientales, Var, Vaucluse.

<sup>2</sup> Institut National de la Recherche Agronomique

paramètres climatologiques influant sur son comportement. Les différentes équipes de recherche travaillant sur ce thème sont également présentées. Le réseau de zones ateliers, ensemble des sites expérimentaux, est représenté dans la Figure 6.1. Il est composé par :

- Les zones ateliers pour les expérimentations en milieu naturel : les zones ateliers des Alpes-Maritimes et des Landes,
- Les zones ateliers pour l'étude des paramètres climatologiques : les zones ateliers des Alpes-Maritimes et du Var,
- Les laboratoires d'essais de l'INRA d'Avignon,
- Les équipes chargées des expérimentations : l'INRA d'Avignon, l'UNSA,
- Les équipes chargées de l'étude des paramètres climatologiques : l'UNSA,
- Les équipes de modélisation : l'Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels de Marseille (IUSTI), l'INRA d'Avignon, l'UNSA,
- Les équipes de conception d'outils informatiques : l'Ecole des Mines de Paris à Sophia-Antipolis, l'UNSA.

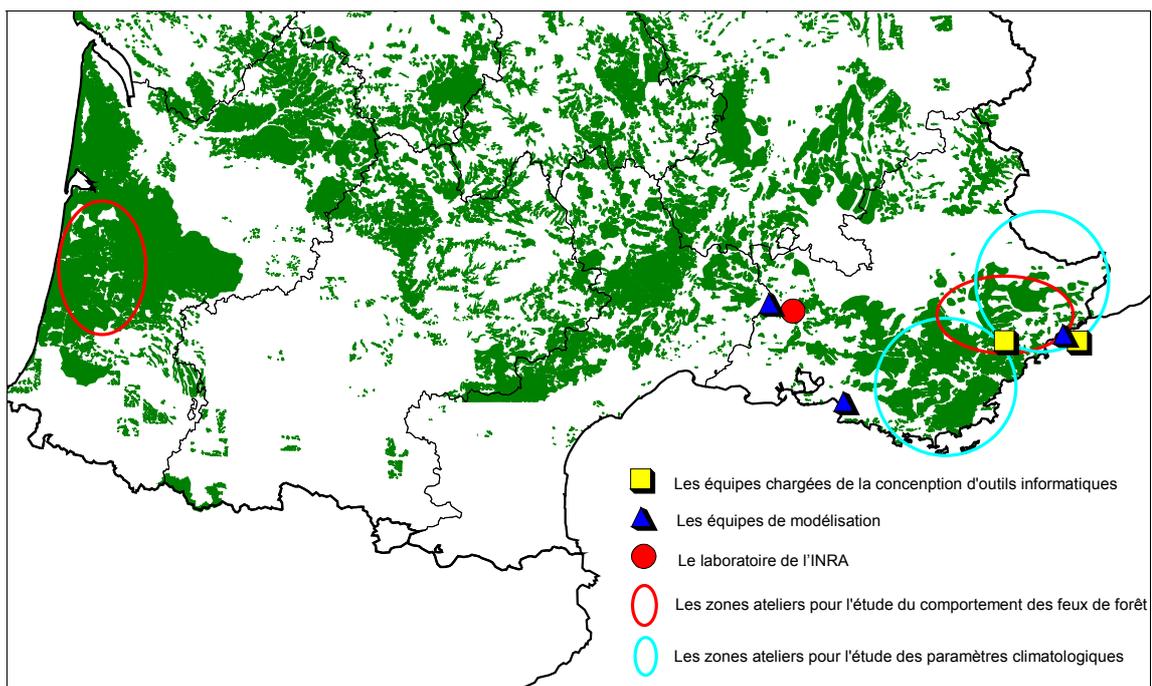


Figure 6.1 : Le réseau de zones ateliers pour l'étude du comportement des feux de forêt

Nous allons définir les caractéristiques d'une zone atelier pour l'étude des paramètres climatologiques. Les méthodes développées dans ces zones permettent de définir des modèles de climatologie pouvant être couplés aux modèles de propagation définis sur les zones ateliers pour l'étude du comportement des feux de forêt. Les réseaux de zones ateliers participent donc à la conception de systèmes de modèles définis par Guarniéri (1995).

## **6.2. Les Zones Ateliers pour l'étude des paramètres climatologiques**

L'intérêt de spatialiser l'information météorologique à l'aide de méthodes d'interpolation est évident. Une carte de vitesse de propagation d'incendies de forêt dans un secteur bien précis ne peut être établie sans informations météorologiques. En effet, les paramètres météorologiques contribuent à prédire le comportement d'un éventuel incendie et à définir les périodes et les secteurs à haut risque. Par exemple, si le vent est fort, nous pouvons en déduire que le risque de départ de feu est très élevé et que le front de flammes peut se propager rapidement. Les données météorologiques n'étant disponibles que sur certains points d'un secteur, il est nécessaire de les interpoler afin de spatialiser l'information climatologique.

### **6.2.1. Les principales méthodes d'interpolation de paramètres climatologiques à mettre en œuvre sur une zone atelier**

Afin d'élaborer une base de données climatologiques fiable, il convient de déterminer la méthode d'interpolation la plus adaptée au domaine d'étude. Une pré-étude a consisté à définir les caractéristiques et le domaine d'action des méthodes d'interpolation existantes. La plupart de ces méthodes sont testées sur les zones ateliers climatologiques précédemment citées (Napoli, 1995 ; Napoli et Carréga, 1996). Les résultats sont commentés et discutés.

#### ***6.2.1.1. Les méthodes d'estimation non probabilistes***

Ceux sont des méthodes d'ajustement. Elles permettent une représentation lisse de la variabilité de la variable régionalisée. La surface ajustée ne passe pas par les données et ne rend compte que de la tendance moyenne. Ces méthodes s'adaptent mal aux phénomènes ayant une composante erratique. Elles supposent l'indépendance des observations ainsi qu'une distribution homogène de celles-ci.

##### ***6.2.1.1.1. Les méthodes de pondération***

L'estimation est réalisée par une moyenne pondérée des observations ; les poids relatifs à chaque observation sont choisis en fonction de la distance  $d$  entre le point d'observation  $x_i$  et le point d'estimation  $x_0$ . La pondération, sensible aux amas d'observations, reste arbitraire et suppose une connaissance empirique de la structure spatiale de la variable régionalisée.

Nous citons pour exemple la méthode IDW (Inverse Distance Weighting) qui est purement spatiale. Elle consiste à interpoler la valeur en un point, en tenant compte des distances entre ce point et les points du domaine dont les valeurs sont connues. Cette méthode repose sur la théorie de la gravité établie par Newton (Isaaks et Srivastava, 1989).

Soient :

- $v_j$  : la valeur à interpoler au point  $j$ ,
- $n$  : le nombre de valeurs connues et prises en compte pour l'interpolation,
- $d$  : la distance entre le point  $j$  à interpoler et le point  $i$  à prendre en compte dans l'interpolation et dont la valeur est connue,
- $p$  : la puissance à laquelle on élève  $d$  (pondérateur de la distance) : généralement  $p = 2$ .

La formule d'interpolation s'écrit :

$$v_j = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p} v_i}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{d_i^p}}$$

L'objet de cette méthode est de faire en sorte, que les points les plus éloignés jouent un rôle moins important que les points les plus proches du point à interpoler. Pour cela, on pondère les valeurs connues par l'inverse de la distance au carré. Plus  $p$  est grand et plus les plus proches voisins du point à interpoler sont influents. Dans la majorité des cas on estime que  $p = 2$  correspond à un bon pondérateur.

#### 6.2.1.1.2. Les méthodes de discrétisation de la surface

Elles sont fondées sur l'ajustement par découpage de la surface à cartographier. Elles sont au nombre de quatre :

- **Les polygones de Thiessen** : on divise la surface en polygones ; chacun d'eux, défini en référence à un point d'observation, est constitué par l'ensemble des points, dont le point d'observation le plus proche est celui de référence ; à l'intérieur du polygone la valeur est égale au point d'observation ; on a une surface non continue ; la partition de l'espace est dite de Voronoi,

- **Les triangles de Delaunay** : ils sont construits à partir des polygones de Thiessen en joignant les points dont les polygones associés ont un côté commun ; on procède ensuite à une interpolation linéaire au sein de chaque triangle à partir des valeurs observées de la variable régionalisée au trois sommets du triangle ; on obtient ainsi une surface continue en ajustant à chaque triangle une surface plane passant par ses sommets,
- **Les courbes Splines** : ces méthodes sont un compromis entre les méthodes d'ajustement polynomial et les méthodes de triangulation exposées ci-dessus ; elles consistent à estimer une surface continue et différentiable en passant par les points d'observation ; le principe est d'ajuster des fonctions polynomiales en chaque polygone issu d'une discrétisation de l'espace ; si certains points d'observation ne sont pas situés aux sommets des polygones, la surface ajustée aura une allure plus lisse ; en fonction du choix des polygones et du degré des fonctions polynomiales utilisées on peut moduler l'aspect et le degré d'ajustement aux données de la surface cartographiée,
- **Les classifications** : elles divisent l'espace en zones supposées homogènes ; la différence essentielle avec les méthodes précédentes est qu'elles ne s'appuient pas uniquement sur des observations ponctuelles du phénomène étudié mais analysent la structure ainsi que la genèse du phénomène pour en déduire sa cartographie.

Ces méthodes présentent un certain nombre d'inconvénients caractéristiques : les procédures d'ajustement et/ou de pondération sont arbitraires et ne sont pas adaptées aux données ou à la nature du phénomène. Elles ne proposent pas une estimation de l'erreur d'interpolation.

### **6.2.1.2. Les méthodes probabilistes**

Ces méthodes s'appuient sur la notion de variable régionalisée utilisée principalement dans les géostatistiques. Pour optimiser l'estimation, il est nécessaire de chercher à connaître la structure spatiale du phénomène étudié avec l'analyse du variogramme.

#### **6.2.1.2.1. Quelques notions sur les géostatistiques**

Les traitements statistiques ordinaires font abstraction de l'information géographique des données à traiter ; les structures spatiales sont donc détruites. Il est évident qu'il ne suffit pas de connaître la fréquence d'occurrence d'une valeur dans un

domaine d'étude, il est au moins aussi important de savoir, de quelle manière les valeurs se succèdent dans l'espace et notamment, quelles sont la taille et la position des structures spatiales.

Afin d'étudier les structures spatiales d'un phénomène, Matheron a développé la variographie au milieu des années 60, à l'Ecole des Mines de Paris : cette méthode repose sur la théorie des variables régionalisées (Matheron, 1970). On peut ainsi à l'aide des variogrammes étudier la manière dont évolue un phénomène en faisant varier la distance et la direction (utilisées comme paramètres).

#### *6.2.1.2.2. La théorie des Variables Régionalisées*

Une variable régionalisée prend ses valeurs dans une région de l'espace : le champ géométrique. Au sein de celui-ci, la variable régionalisée est une fonction du point spatial. A chaque valeur de la variable sont attribuées des coordonnées géographiques permettant de la situer dans l'espace. Ces valeurs varient d'un point à un autre avec une certaine continuité. Suivant l'échelle d'observation, on peut distinguer deux comportements : un comportement structuré continu dû à une continuité en moyenne et un comportement apparemment erratique, aléatoire à échelle locale. C'est la présence de la composante erratique qui induit la mise en œuvre d'une approche probabiliste du phénomène.

##### *Les caractéristiques du variogramme :*

La variable régionalisée est définie en chaque point de l'espace. Le variogramme au pas  $h$  est la valeur moyenne de la variance entre les implantations de la variable, distantes de  $h$  ( $h$  étant un vecteur donné et constant). Il faut aussi considérer le fait qu'une régionalisation puisse être anisotrope. Il peut exister, par exemple, une direction privilégiée, le long de laquelle les valeurs se modifient lentement, tandis qu'elles varient beaucoup plus vite dans la direction perpendiculaire. Il est donc indispensable de calculer le variogramme dans différentes directions si l'on souhaite décrire avec précision les formes des structures spatiales (Voiron-Canicio, 1986).

On remarque la présence d'une distance appelée « portée » à partir de laquelle le variogramme se stabilise autour d'un palier. Cette distance correspond à la zone d'influence d'un point sur les autres. On peut remarquer dans certains cas une discontinuité à l'origine : effet de pépite. Cela représente une zone de croissance très rapide qui correspond à une micro-régionalisation indistincte à l'échelle d'étude et à l'existence d'une variabilité locale forte.

Le variogramme est un bon outil d'étude de la structure spatiale d'une variable régionalisée et contient trois types d'informations :

- La nature de la continuité de la variable régionalisée révélée par le comportement du variogramme à l'origine,
- Le comportement isotrope ou anisotrope de la variable régionalisée qui peut être observé si on estime le variogramme séparément pour les différentes directions de l'espace,
- La zone d'influence réciproque entre deux points de la variable régionalisée, définie par la portée.

*Caractéristiques des méthodes probabilistes :*

Pour optimiser l'estimation on cherche à connaître la structure spatiale du phénomène étudié avec l'analyse du variogramme. Les méthodes fondées sur des calculs complexes, comme le corrélogramme sont de nos jours à la portée de n'importe quel chercheur, grâce au progrès réalisés en micro-informatique. Ces méthodes sont à la pointe des techniques d'interpolation (Ex : méthode optimale de Gandin, krigeage, fonctions Splines). Seule une méthode probabiliste purement spatiale comme le krigeage (on ne connaît qu'une seule valeur par point de mesure) a pu être testée.

Le krigeage se fonde sur la théorie des variables régionalisées. Il s'appuie sur les caractéristiques structurales de l'échantillon qui est résumé dans le variogramme. Il permet d'obtenir en tout point d'une surface une valeur estimée de la variable régionalisée ainsi qu'une estimation de la variance d'erreur. Il est donc possible de cartographier les estimations de la variable et la variance d'erreur en ce point. Le faible nombre de stations de mesure et le relief contrasté des Alpes-Maritimes viennent donc accentuer les inconvénients de cette méthode d'interpolation purement spatiale. Il est alors à craindre que celle-ci ne soit pas plus adaptée au phénomène qu'au milieu étudié.

***6.2.1.3. Une méthode d'interpolation et de reconstitution de champ en relation avec l'environnement, utilisée dans cette étude***

Lorsque les méthodes d'interpolation purement spatiales ne se justifient pas ou sont inadéquates, on peut chercher à représenter l'extension spatiale d'une variable climatique selon une autre logique qui consiste à identifier et quantifier les relations entre la valeur prise par un point et la valeur de certains paramètres exprimant le site de ce point. Cette quantification se fait par l'intermédiaire de régressions linéaires multiples.

Des modèles d'interpolation de températures minimales et maximales pour chaque décade ou mois de l'année ont été présentés par le Pr. Carréga de l'Université de Nice Sophia-Antipolis (Carréga 1982, 1992, 1994). Cette méthode d'interpolation est fondée sur une régression multiple établie à partir de statistiques portant sur des données relevées dans les stations météorologiques des Alpes-Maritimes entre 1956 et 1985.

Cette méthode prend en compte les paramètres géographiques suivants :

- **L'altitude**, en mètres,
- **La position/aval**, en mètres, définie comme la dénivellation maximale constatée dans un rayon de 100 m autour de la station,
- **La pente/amont**, en degrés, qui est la valeur moyenne de la pente du versant, sur 600 m environ en amont de la station,
- **L'exposition**, variant de 0° au nord à 180° au sud ; l'Est et l'Ouest prenant donc la même valeur (90°) ; un sommet et une butte, n'ayant pas d'orientation par définition, sont considérés comme exposés à 90°; il en est de même pour une station située au fond et au centre d'une vallée,
- **La continentalité**, en km, définie par la distance à vol d'oiseau de la station par rapport à la mer.

Cette méthode, donnant de très bons résultats, a été utilisée entre autres dans un logiciel de l'Ecole des Mines de Paris, «EXPERTGRAPH» qui réalisait une cartographie du risque d'incendies dans les Alpes-Maritimes (Wybo, 1991 ; Carréga et Wybo, 1992). Ce logiciel était utilisé par le CODIS de Villeneuve-Loubet (06) et l'ONF<sup>3</sup>. La méthode a été adaptée à des entités spatiales discrètes : les pixels.

La température en un point est donnée par :

$$T(x, y) = T_0 + \sum A_i \cdot V_i(x, y)$$

Avec :

- $A_i$  : coefficients pondérateurs des paramètres,
- $V_i$  : valeurs de chaque paramètre au point  $(x, y)$ ,
- $T_0$  : une température de base.

---

<sup>3</sup> Office National des Forêts

$T_0$  est ajustée à partir des données du capteur donnant l'erreur la plus faible par rapport au modèle : pour chaque capteur  $j$  situé en  $(x, y)$ , on effectue l'évaluation de son  $T_{0j}$  :

$$T_{0j} = T(x_i, y_i) - S A_i \cdot V_i(x_j, y_j)$$

On calcule ensuite l'erreur cumulée sur tous les autres capteurs  $K$  en prenant cette valeur de  $T_0$  :

$$D_j = S (k \neq j) |T(x_k, y_k) - (T_0 + S A_i \cdot V_i(x_k, y_k))|$$

On choisit enfin, comme  $T_0$ , celui qui donne le  $D_j$  minimum : cette valeur est alors utilisée pour l'estimation de la température en chaque point. Les résidus sont ensuite interpolés à l'aide du krigeage (Laborde, 1984 ; Benichou et Le Breton, 1986).

#### **6.2.1.4. Interpolation de données fondée sur la modélisation physique : l'interpolation des données de vent**

Une méthode d'interpolation de données de vent a été proposée par les Australiens (Ross et al., 1988). Le modèle NUATMOS réalise des interpolations de vitesses et de directions de vent dans un espace tridimensionnel. L'interpolation repose sur deux sortes de données :

- Les données topographiques : un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de résolution  $m$  ( $m$  peut être fixé par l'utilisateur, sachant que le modèle fournit un résultat optimum pour  $m = 500$  m),
- Les données météorologiques : les capteurs sont localisés sur le MNT. Afin d'affiner l'interpolation, il est possible de fournir au modèle des données de vent relevées à des altitudes différentes pour un même capteur (10 m : capteur au sol ; 100 m : ballon sonde ...).

Plusieurs mesures à différentes altitudes peuvent être données pour un même point. Le modèle fonctionne en deux temps :

1. Le vent initial est calculé pour tous les points du maillage et les tous les niveaux d'altitude, par interpolation spatiale (approche statistique),
2. Le relief et ses effets sont introduits pour calculer les vitesses et directions de vents finales ; la méthode fait appel à de nombreuses lois sur la dynamique des fluides.

Ainsi, il est possible de simuler les turbulences dues au relief et de les prendre en compte dans l'interpolation. Ce modèle, assez fiable, a été utilisé dans un relief aussi contrasté que les Alpes-Maritimes (Guarniéri et al., 1995 ; Carréga et Glinsky-Olivier, 1997), il est d'autant plus fiable que le nombre de capteurs est élevé.

## **6.2.2. Un exemple de zone atelier : les Alpes-Maritimes**

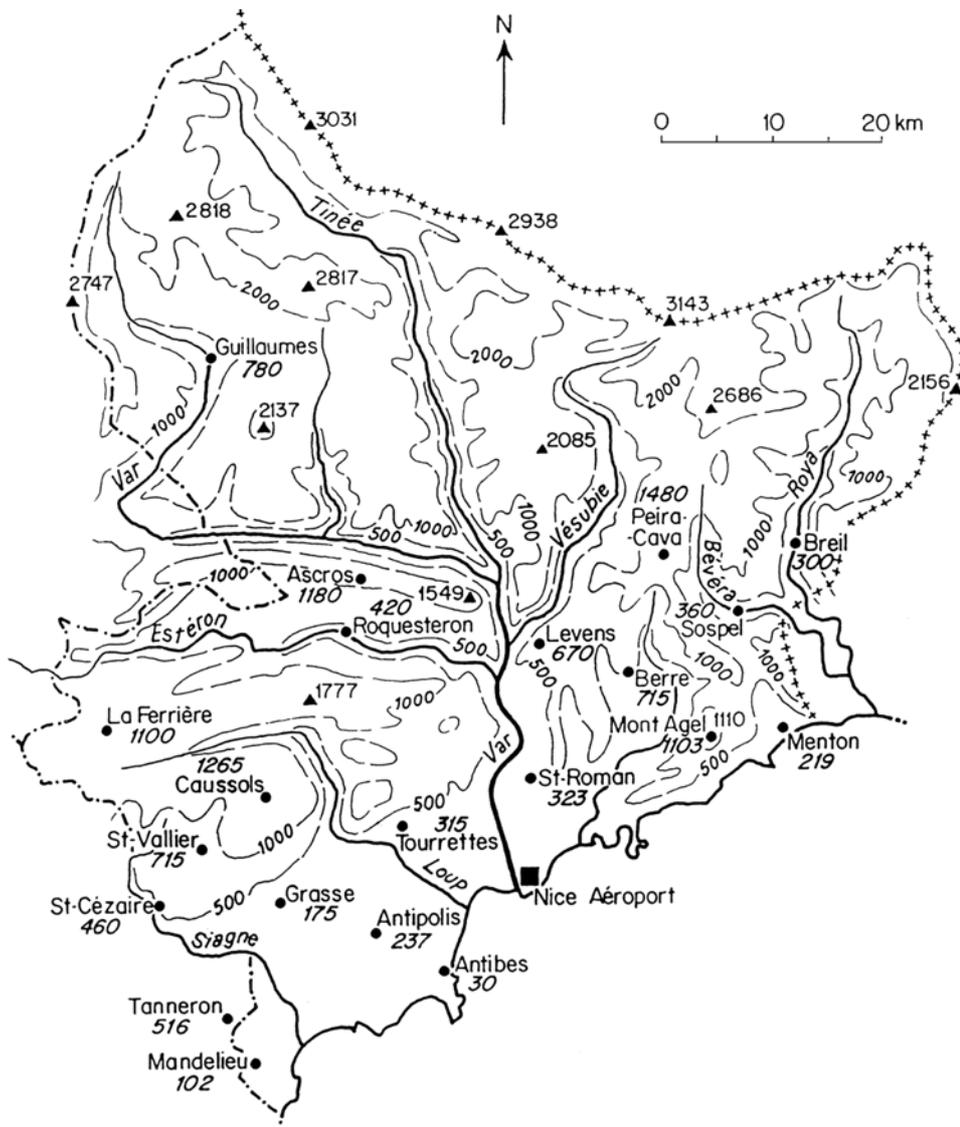
Dans le cadre du projet européen « RISK SENSOR » (projet n° EV5V-CT94-0525) l'Université de Nice-Sophia Antipolis s'est proposée de mener une étude, consistant à évaluer et développer des méthodes d'interpolation adaptées au relief contrasté du département des Alpes-Maritimes ou du massif des Maures (département du Var). Dans ce projet l'UNSA a également apporté sa contribution à l'étude de la relation entre les paramètres de combustible et la vitesse de propagation, ainsi qu'à l'étude entre les paramètres climatologiques et le stress hydrique de la végétation.

### ***6.2.2.1. Le cadre d'étude et les données disponibles***

En 1988, le département des Alpes-Maritimes s'est doté d'un réseau de stations météorologiques automatiques enregistrant toutes les trois heures des données sur le vent, la température et l'humidité relative. Ces 21 stations se répartissent dans la bande intermédiaire entre le littoral et l'arrière-pays (secteur le plus sensible au risque d'éclosion de feux de forêt) (Fig. 6.2). Une fois le réseau de stations météorologiques mis en place, il est alors possible de spatialiser l'information climatologique.

Un indice de risque d'incendies n'est intéressant que s'il fournit une estimation en temps réel. Pour qu'une cartographie du risque soit fiable, il est nécessaire que le temps écoulé entre l'obtention des données climatologiques et l'édition de la carte de risque soit le plus bref possible. Au-delà d'un certain temps, la carte est obsolète et donc inutilisable par les services de lutte contre l'incendie, d'où la nécessité d'un choix judicieux de la méthode d'interpolation.

Dans un premier temps, les interpolations ont été testées sur les moyennes de la température et de l'humidité relative de l'air de juillet 1994 à 15h ; les données ont été fournies par Météo-France.



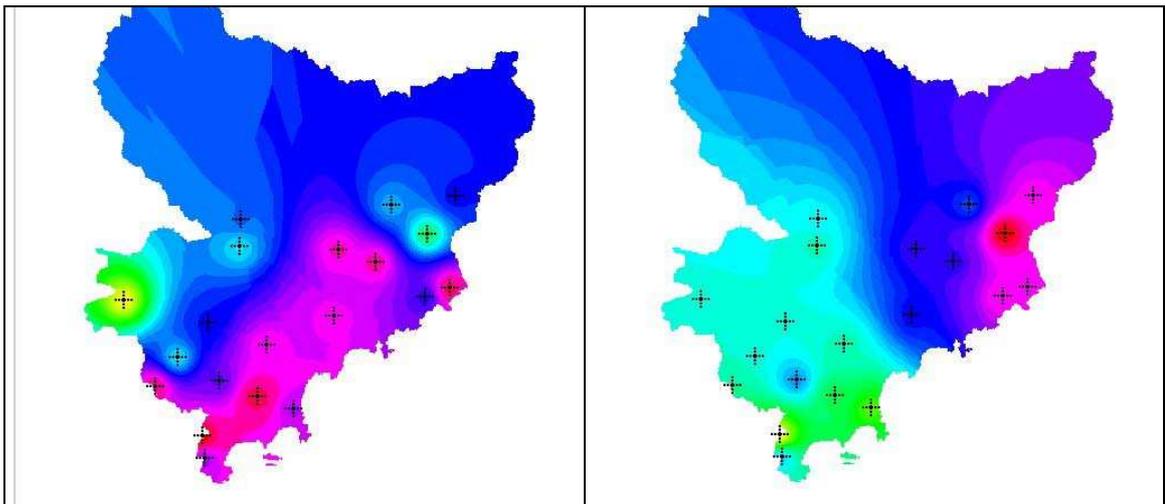
**Figure 6.2 : Localisation des stations météorologiques automatiques dans la zone atelier des Alpes-Maritimes**

En ce qui concerne l'interpolation du vent, les travaux effectués dans le contrat « Modélisation des incendies de forêt » (projet n° EV5V-CT91-0015), ont montré qu'en terrain complexe doté d'un bon réseau de capteurs météorologiques et surtout en régime de brise (très fréquent en Méditerranée), le modèle australien NUATMOS de représentation spatiale du vent est le plus performant (Ross, 1988 ; Guarnieri et al, 1995 ; Carréga et Glinsky-Olivier, 1997).

### 6.2.2.2. Interpolation des paramètres climatologiques pour les modèles de propagation des feux

Différents tests ont été réalisés afin de vérifier si les méthodes spatiales comme la méthode IDW ou le krigeage convenaient à un relief accidenté comme le relief des Alpes-Maritimes.

Les nombreuses interactions entre le phénomène climatologique et le relief laissent envisager que la relation statistique est forte. Or, si nous comparons les structures spatiales caractéristiques de la carte de la température (Fig. 6.3) et de l'humidité relative de l'air (Fig. 6.4) établies par la méthode IDW et les formes contrastées du relief des Alpes-Maritimes (Fig. 6.2), nous constatons qu'il n'y a pas d'adéquation apparente entre elles. En effet, toutes les unités spatiales du relief (vallées, crêtes...) ne sont pas prises en compte lors de l'interpolation et n'interviennent donc pas sur les structures spatiales de la carte de la température ou de l'humidité relative de l'air. Tout expert en climatologie ou en météorologie se poserait alors des questions sur la validité de ces cartes.



**Figure 6.3 : Carte d'interpolation de la température de l'air ; méthode IDW ; zone atelier des Alpes-Maritimes**

**Figure 6.4 : Carte de l'humidité relative de l'air ; méthode IDW ; zone atelier des Alpes-Maritimes**

Nous obtenons les mêmes conclusions lorsque nous réalisons une carte de l'humidité relative de l'air à l'aide du krigeage. En effet, le krigeage a été testé dans de nombreux domaines et sa fiabilité n'est pas à mettre en cause. Par contre, son utilisation pour tous les phénomènes dans un environnement quelconque est à proscrire, sans réflexion ou connaissance préalable. La précision de cette méthode purement spatiale est fonction du nombre de mesures mises à disposition pour calculer le variogramme. Plus le relief est contrasté et plus le nombre de points de mesures doit être important. L'emplacement des stations de mesures devient alors fondamental. Leur positionnement

judicieux dans un relief favorisera lors de l'interpolation, la prise en compte des structures spatiales intervenant dans le phénomène. Il est également important de souligner que les insuffisances de cette méthode d'interpolation ne sont pas dues à son inefficacité mais, à son application dans un contexte particulier.

La méthode d'interpolation ne doit donc pas être fondée sur une distribution exclusivement spatiale. Si tous les paramètres intervenant dans le phénomène ne peuvent être définis, il est tout de même essentiel de prendre en compte les plus importants et en particulier, tous ceux qui caractérisent le relief (pente, exposition, altitude...).

### **6.2.3. La zone atelier du Var**

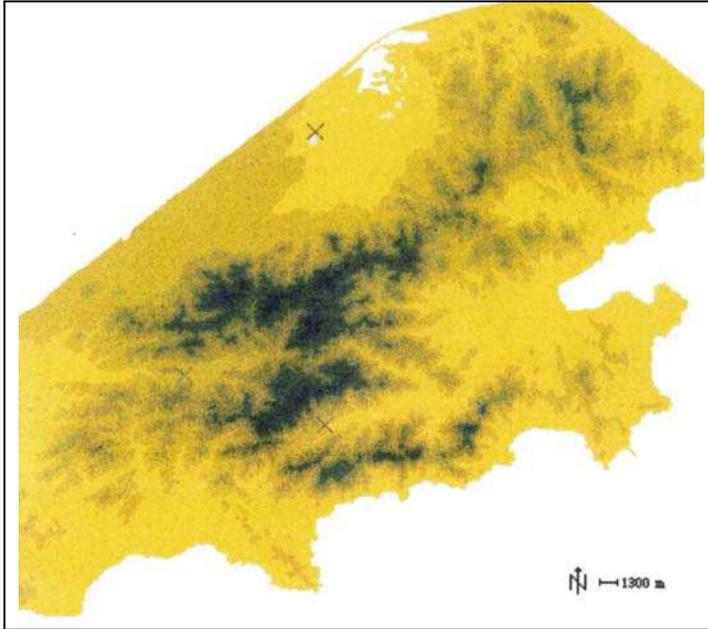
Nous avons vu précédemment que les méthodes d'interpolation purement spatiales sont mal adaptées à un relief accidenté. Les paramètres topographiques jouent un rôle trop important en milieu contrasté pour être négligés dans l'interpolation de données climatologiques. Le krigeage étant une méthode purement spatiale, les facteurs géographiques ne sont pas suffisamment pris en compte. Or une méthode d'interpolation ne peut s'affranchir des lois physiques et des facteurs spatiaux régissant le phénomène. L'efficacité de cette méthode découle de l'expertise mise en œuvre pour définir les paramètres d'interpolation.

#### ***6.2.3.1. Le cadre d'étude et les données disponibles***

Toutes les données concernant le massif des Maures ont été fournies par le Cemagref<sup>4</sup> de Montpellier dans le cadre d'une convention de collaboration associant l'Ecole des Mines de Paris, le Cemagref et l'Université de Nice-Sophia Antipolis. Les informations topographiques proviennent des traitements réalisés à l'aide du S.I.G. Grass 4.1© sur le Modèle Numérique de Terrain (MNT) de résolution 100 m (Fig. 6.5). Les données météorologiques ont été relevées en 1995 sur 6 sites de la région à 13 heures.

---

<sup>4</sup> Institut français de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement.



**Figure 6.5 : MNT du Massif des Maures ; zone atelier du Var**

### **6.2.3.2. Interpolation de la température de l'air**

Deux études ont été réalisées afin de déterminer l'importance des paramètres topographiques dans l'interpolation de la température :

- L'une fondée sur les paramètres topographiques déterminés par une analyse de la carte au 50000<sup>ème</sup> de la zone d'étude (paramètres observés),
- L'autre fondée sur les paramètres topographiques déterminés par les traitements réalisés sur station de travail à l'aide du S.I.G. Grass 4.1© sur le M.N.T.

#### **6.2.3.2.1. Interpolation fondée sur les paramètres topographiques relevés sur une carte**

Parmi les différents paramètres topographiques sélectionnés, tous n'ont pas été retenus par les régressions « pas à pas » (stepwise). Les paramètres initiaux étaient :

- L'**altitude (A)** en m : altitude réelle de la station météorologique,
- L'**encaissement (E)** en m : dénivellation maximale dans un rayon de 100m autour de la station,
- La **pente amont (P)** en % : valeur de la pente en amont de la station,
- L'**exposition (Ex)** en ° : orientation N=1°, E ou W=90°, S =180°.
- La **distance à la mer (M)** en km : distance minimale entre la station et le littoral.

Les régressions multiples pas à pas et validées au seuil de 95 % (test F) du coefficient de FISHER-SNEDECOR ont été calculées sur chaque journée. Un tableau récapitulatif présente les différents résultats obtenus sur les 5 journées (Tab. 6.1) avec :

- **r** : coefficient de corrélation,
- **r<sup>2</sup>** : part de la variance expliquée par les paramètres explicatifs,
- **Modèle d'interpolation** : équation de régression.

**Tableau 6.1 : les modèles d'interpolation de la température fondés sur les paramètres topographiques relevés sur une carte.**

date	r	r <sup>2</sup>	Modèle d'interpolation
6/07/95	0,975	0,95	$T = 25,99 - 0,00529 A + 0,0753 M$
13/07/95	0,975	0,95	$T = 28,59 - 0,00937 A + 0,091 E + 0,12543 M$
25/07/95	0,995	0,99	$T = 28,69 - 0,00605 A + 0,0291 E_x + 0,10012 M$
03/08/95	0,998	0,99	$T = 32,208 - 0,00129 A + 0,0983 E - 0,1144 P + 0,10655 M$
29/08/95	0,981	0,96	$T = 28,39 - 0,0113 A$

Ces paramètres topographiques ont d'abord été déterminés sur le M.N.T. de résolution 100 m puis à partir des données topographiques calculées à l'aide du SIG.

#### 6.2.3.2.2. Interpolation fondée sur les paramètres topographiques calculés sur le MNT

Différents paramètres topographiques ont été calculés à l'aide du SIG Grass 4.1© sur le M.N.T. de résolution 100 m (Fig. 6.5) :

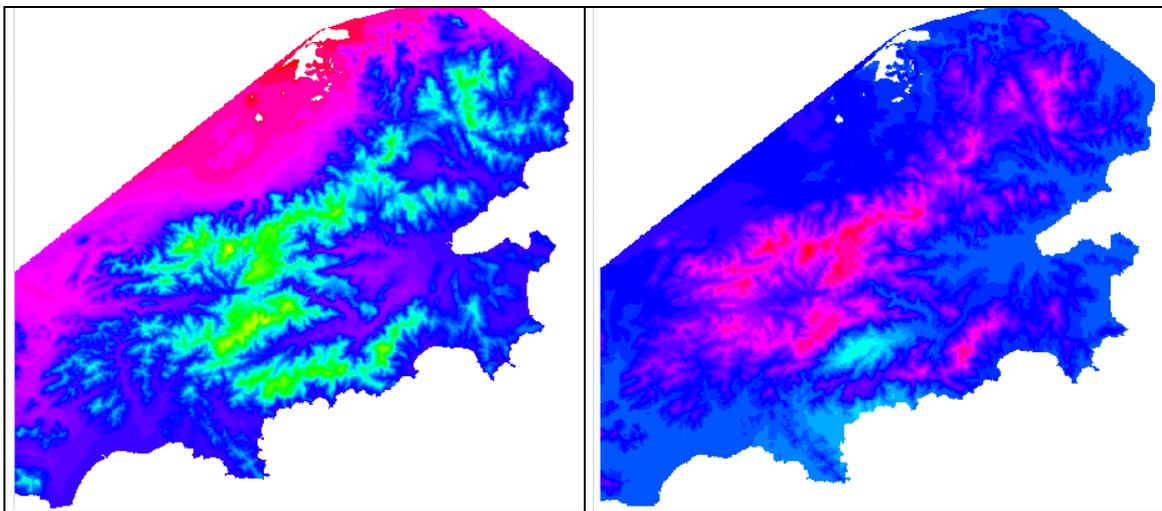
- L'**altitude (A)** en m : altitude du pixel de la station météorologique,
- La **pente (P)** en % : pente moyenne du pixel de la station,
- L'**exposition (Ex)** en ° : exposition moyenne du pixel de la station,
- L'**encaissement (E)** en m : dénivellation maximale dans un rayon de 100 m autour de la station (les 8 pixels autour du pixel contenant la station),
- La **distance à la mer (M)** en m : distance minimale entre le pixel de la station et le littoral.

Les régressions multiples pas à pas ont été calculées sur chaque journée. Un tableau récapitulatif présente les différents résultats obtenus sur les 5 journées (Tab. 6.2). Etant donné que les paramètres topographiques ont été calculés sur l'ensemble du M.N.T., cette équation de régression peut être utilisée pour interpoler la température sur le massif des Maures. Afin de minimiser l'erreur, les résidus ont été interpolés à l'aide

de la méthode IDW. On ajoutera alors au modèle la valeur du résidu en chaque point de la région d'étude. Une cartographie des résultats est présentée (Fig. 6.6).

**Tableau 6.2 : les modèles d'interpolation de la température fondés sur les paramètres topographiques calculés sur le MNT.**

date	r	r <sup>2</sup>	Modèle d'interpolation
06/07/95	0,896	0,80	$T = 27,39896 - 0,006699591 A$
13/07/95			Aucun paramètre topographique retenu par la régression
25/07/95	0,946	0,89	$T = 33,85374 - 0,007979833 A$
03/08/95			Aucun paramètre topographique retenu par la régression
29/08/95	0,978	0,95	$T = 28,47827 - 0,01181713 A$



**Figure 6.6 : Carte des températures ; 06/07/1995 ; zone atelier du Var**

**Figure 6.7 : Carte de l'humidité relative ; 06/07/1995 ; zone atelier du Var**

#### 6.2.3.2.3. Comparaison des deux études

Nous pouvons remarquer que les coefficients de corrélation, calculés à l'aide des paramètres topographiques du SIG sont moins bons que ceux obtenus avec les paramètres topographiques observés. Ceci s'explique par le fait que le SIG fonctionne sur une résolution de 100 m. Les valeurs du M.N.T. sont donc des valeurs moyennes sur une surface de 1 ha. De plus, les algorithmes de calcul des pentes et des expositions donnent la valeur moyenne par rapport aux 8 pixels voisins, contrairement aux paramètres observés qui sont plus exacts. Nous pouvons également constater que le rôle des paramètres topographiques varie d'une journée à l'autre. Bien que l'altitude semble être le paramètre primordial (ce paramètre est retenu lors de chaque régression multiple pas à pas), son importance varie suivant la situation météorologique de la journée.

### 6.2.3.3. Interpolation de l'humidité relative de l'air

L'interpolation de l'humidité relative de l'air, contrairement à celle de la température, présente des résultats semblables avec les deux méthodes précédentes (paramètres relevés manuellement et paramètres calculés). Pour éviter une redondance dans la présentation de l'étude, nous nous intéressons seulement à la méthode utilisant les paramètres topographiques du SIG. Les régressions multiples pas à pas ont été calculées sur chaque journée ; un tableau récapitulatif présente les différents résultats obtenus sur les 5 journées (Tab. 6.3). Une cartographie des résultats est également présentée (Fig. 6.7). Les résidus ont été interpolés à l'aide de la méthode IDW.

**Tableau 6.3 : les modèles d'interpolation de l'humidité relative fondés sur les paramètres topographiques calculés sur le MNT.**

date	r	r <sup>2</sup>	Modèle d'interpolation
06/07/95	0,845	0,71	HR = 39,46331 - 0,04845489 A
13/07/95	0,907	0,82	HR = 38,8521 + 0,06214159 A
25/7/95	0,999	0,99	HR = 26,36603 + 0,02529656 A + 0,8193814 P + 0,05692937 Ex
03/08/95			Aucun paramètre topographique retenu par la régression
29/08/95	0,981	0,96	HR = 11,82731 + 0,05565409 A

### 6.2.4. Commentaires sur les résultats obtenus

La qualité des résultats obtenus différant d'une méthode à l'autre, certaines méthodes d'interpolation n'ont pas été testées. Les méthodes choisies et présentées dans cette étude peuvent être considérées comme fiables pour l'interpolation de données de température et d'humidité relative de l'air. Elles peuvent donc être utilisées dans le cadre de la réalisation d'une carte du risque d'incendies de forêt dans les Alpes-Maritimes. L'éclosion et la propagation des feux de forêt étant fortement liées aux conditions météorologiques, l'interpolation des données météorologiques reste fondamentale pour bien appréhender le phénomène.

Nous avons démontré que les paramètres topographiques jouent un rôle essentiel dans l'interpolation de données météorologiques et ce, différemment selon le type de situation météorologique. Les facteurs explicatifs des phénomènes climatologiques ne sont donc pas invariables dans l'espace et dans le temps.

### **6.3. Les Zones Ateliers pour l'étude du comportement des feux de forêt**

Nous avons vu dans le premier chapitre que l'expérimentation constitue un outil de modélisation pour le chercheur. L'équipe « Gestion et Valorisation de l'Environnement » de l'UNSA a réalisé des expérimentations en collaboration avec l'INRA et l'ONF dans deux zones ateliers :

- Le département des Alpes-Maritimes,
- Le département des Landes.

Les expérimentations en milieu naturel effectuées sur ces zones ateliers sont détaillées dans la suite de ce chapitre. Nous associerons à ces zones, le laboratoire de l'INRA pour l'étude du comportement d'un feu.

#### **6.3.1. Les principaux types d'expérimentations et de modélisation à mettre en œuvre sur une zone atelier**

Une typologie des expérimentations a été proposée dans le premier chapitre. Trois types d'expérimentations concernent les zones ateliers pour l'étude du comportement des feux de forêt de ce chapitre : le suivi de brûlages dirigés, l'expérimentation en milieu naturel, l'expérimentation en laboratoire. Les trois formes de modélisation du domaine (empirique, physique et semi-empirique) peuvent être mises en œuvre sur ces zones.

Ces types d'expérimentations et ces méthodes de modélisation sont détaillés dans le premier chapitre.

#### **6.3.2. La zone atelier des Alpes-Maritimes**

Des expérimentations en milieu naturel ont été menées par l'équipe GVE dans la zone atelier des Alpes-Maritimes (Fig. 6.8) à la fin de l'hiver et au début du printemps. Celles-ci étaient pratiquées à l'intérieur des secteurs de brûlages dirigés délimités par l'ONF. L'objet de ces expérimentations était de mesurer les paramètres environnementaux en interrelations avec le feu et plus particulièrement, la relation entre le vent et la vitesse de déplacement du front de flammes. Ces expérimentations sont détaillées dans le Chapitre 3.

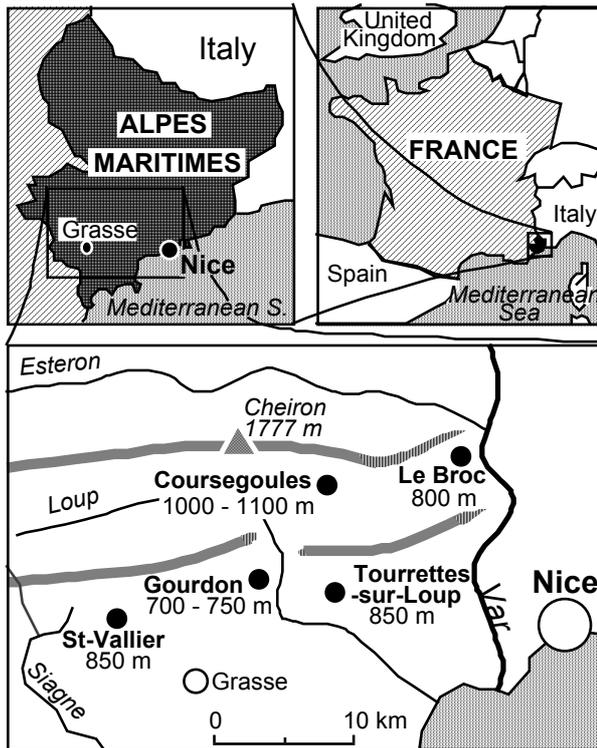


Figure 6.8 : Localisation des sites expérimentaux de la zone atelier des Alpes-Maritimes

### 6.3.3. La zone atelier des Landes

En 1994, l'INRA d'Avignon et le Service Départemental d'Incendie et de Secours des Landes (SDIS 40) débutèrent un programme sur l'étude des facteurs d'éclosion et de propagation des feux de forêt dans la zone atelier des Landes. Après une période de préparation (1994), des campagnes d'expérimentations sur l'éclosion et la propagation d'un feu furent organisées de 1995 à 1999 sur la commune de S<sup>te</sup>-Eulalie-en-Born. Les premières campagnes d'expérimentations concernant l'éclosion d'un feu eurent lieu en 1995 et 1996. En 1997, une série de mesures a été effectuée afin d'étudier la variation de la teneur en eau de la molinie morte.

En 1998 et 1999, l'équipe GVE de l'UNSA était chargée de mesurer les paramètres climatologiques afin d'étudier leurs interrelations avec la vitesse de propagation du front de flammes. Les expérimentations de 1998 ont été détaillées dans le Chapitre 3.

En septembre 1999, une campagne d'expérimentations a eu lieu sur un autre site expérimental de la zone atelier des Landes. Le site se composait de parcelles de 2 hectares chacune de forme rectangulaire de 200 par 100 m (Fig. 6.9 et 6.10). Comme lors de la campagne d'expérimentations précédente, la végétation était principalement composée de pins maritimes de 10 ans d'âge et de 7 mètres de hauteur en moyenne et d'espèces caractéristiques des Landes : molinie, ajoncs, bruyères, fougères aigles.

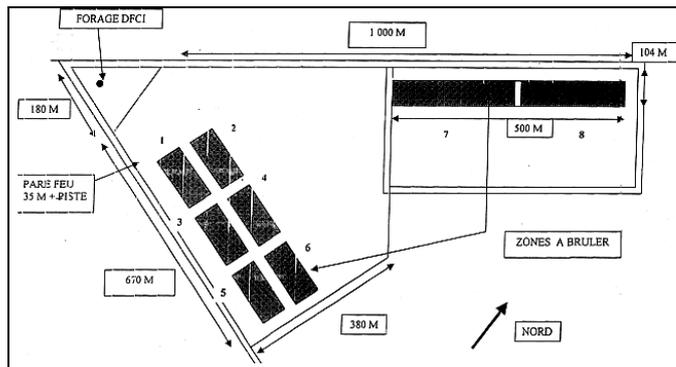


Figure 6.9 : Le site expérimental de 1999 ; zone atelier des Landes ; source : site web Mediaforest



Figure 6.10 : Vue aérienne des parcelles expérimentales du site de 1999 ; zone atelier des Landes ; source : site web Mediaforest

Les conditions météorologiques étant très favorables pour la propagation d'un feu de forêt, des hauteurs de flammes de près de 10 m ont été observées (Fig. 6.11 et 6.12).



Figure 6.11 : Avancée du front de flammes ; parcelle expérimentale de 1 ha ; zone atelier des Landes ; source : site web Mediaforest



Figure 6.12 : Vue latérale du front de flammes ; parcelle expérimentale de 1 ha ; zone atelier des Landes ; source : site web Mediaforest

#### 6.3.4. Le laboratoire de l'INRA d'Avignon : une zone atelier pour l'étude du comportement d'un feu

Des centaines d'expérimentations en laboratoire ont été conduites par l'équipe « Prévention des Incendies de Forêt » (PIF) de l'INRA d'Avignon afin d'étudier avec précision, les paramètres de comportement d'un feu principalement sur un lit d'aiguilles de pins maritimes ou de pins d'Alep. Le banc d'essai, baptisé DESIRE par l'équipe de recherche, se compose d'un plateau inclinable de 2x3 m (Fig. 6.14). La vitesse et l'intensité du feu peuvent ainsi être étudiées en fonction de la pente.



#### **6.4. Les équipes de modélisation du comportement des feux de forêt**

Nous pouvons distinguer deux sortes d'équipes chargées de la modélisation, pouvant être associées aux zones ateliers précédemment citées :

- Les équipes de développement de modèles semi-empiriques,
- Les équipes de développement de modèles physiques.

L'équipe « Gestion et Valorisation de l'Environnement » de l'UNSA constitue un exemple d'équipe de développement de modèles semi-empiriques. En effet, au cours du projet « EFAISTOS », elle a développé deux modèles de vitesse de propagation d'un feu de forêt, fondés sur les expérimentations menées en milieu naturel dans les zones ateliers des Alpes-Maritimes et des Landes. Ces modèles de propagation ont été présentés dans le Chapitre 5.

Nous pouvons citer parmi les équipes de développement de modèles physiques, l'équipe PIF de l'INRA d'Avignon qui a développé le modèle physique PIF97. Ce modèle permet de simuler la propagation d'un front de flammes sur un lit de combustible (aiguilles de pins maritimes, de pins d'Alep...). Ce modèle ne permet pas encore de simuler la progression d'un front de flammes d'un vrai feu de forêt.

Un autre exemple d'équipe de développement de modèles physiques : l'équipe « Ecoulements diphasiques et réactifs » de l'Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels de Marseille (IUSTI) qui a développé un modèle multiphasique décrivant la propagation d'un feu dans des milieux de combustibles hétérogènes : le modèle Quasi 2D (Larini et al., 1996). Ce modèle a été validé à l'aide des expérimentations effectuées dans le laboratoire de recherche de l'INRA d'Avignon.

#### **6.5. Les équipes de conception d'outils informatiques spécialisés pour l'étude du comportement des feux de forêt**

Un Environnement de Résolution de Problème pour l'aide à la modélisation du comportement des feux de forêt et plus précisément, un système d'information pour la gestion des connaissances d'une zone atelier dédiée à l'étude du comportement des incendies de forêt, a été proposé dans cette thèse : MODELLIS. Il a été présenté de façon détaillée dans le Chapitre 5.

Le pôle Cindyniques de l'Ecole des Mines de Paris constitue un exemple parmi les équipes de conception d'outils informatiques spécialisés dans l'étude du comportement des feux de forêt. Ce groupe de recherche a développé un Environnement

de Résolution de Problème d'aide à la modélisation des feux, fondé sur une base de modèles : FIRELAB (Guarnieri et al, 1998, 2000, 2001).

Le laboratoire de l'INRA d'Avignon a servi de base de développement à cet outil informatique. L'ERP FIRELAB permet de gérer les informations enregistrées durant les expérimentations et de réaliser des simulations de propagation d'un front de flammes sur un lit de combustible.

## **6.6. Les équipes de recherche pouvant être intégrées au réseau de zones ateliers pour l'étude du comportement des feux de forêt en France**

Les équipes déjà présentes dans ce réseau de zones ateliers (l'UNSA, l'INRA d'Avignon, l'EMP de Sophia-Antipolis, l'IUSTI de Marseille) appartiennent au Groupement d'Intérêt Scientifique « Incendies de Forêt ». Ce groupe a pour mission de mener des études dans différents axes de recherche relatifs aux feux de forêt. Nous pouvons distinguer :

- **Le milieu naturel** : l'impact écologique du feu ; les effets immédiats en fonction des caractéristiques du feu et de celles du milieu ; répercussions à long terme,
- **Le phénomène** : évaluation spatio-temporelle du risque : évaluer l'aléa et analyser la vulnérabilité, zonage d'un territoire en niveaux d'aléa, utilisation de la télédétection pour l'analyse de certains facteurs, approche dynamique du développement du phénomène par la prise en compte de scénarios d'incendie, étude et prise en compte des vulnérabilités, prise en compte de paramètres météorologiques, élaboration d'indices météorologiques,
- **L'action de l'Homme** : analyse socio-économique des causes d'incendies ; aménagement et équipement du territoire, pour améliorer la connaissance des techniques à mettre en œuvre, en fonction des facteurs de risque et des types de formation forestière.

Nous pouvons associer à ce réseau de zones ateliers les équipes ci-après. En effet, même si elles n'ont pas participé aux projets scientifiques menés sur ces zones ateliers, ces équipes peuvent être complémentaires des équipes précédemment citées et membres du GIS « Incendies de forêt ». Ces équipes à associer seraient :

- **Le Cemagref d'Aix-en-Provence** : ce centre de recherche est spécialisé dans la production de méthodes et d'outils d'aide à la décision publique, tels que les

guides sur l'équipement des massifs forestiers (réalisation de points d'eau, de pistes DFCI) et dans l'analyse et la cartographie du risque d'incendie,

- **Le Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive du CNRS de Montpellier** : ce groupe de recherche travaille sur l'étude des impacts des incendies sur la végétation, les nutriments et le sol, sur la cicatrisation et reconstitution des écosystèmes après incendie,
- **Le Centre d'Essais et de Recherche de l'Entente (CEREN)** : le centre de recherche de l'Entente interdépartementale, spécialisé dans la lutte contre les incendies est chargé de procéder à tous les essais nécessaires à l'application des moyens de lutte contre les feux de forêt ; il mène également des travaux dans les domaines suivants : réalisation et optimisation de codes de calcul et simulation en milieu thermique, étude d'impact de l'utilisation des additifs sur l'environnement,
- **Météo-France d'Aix-en-Provence** : ses principales activités de recherche sont : l'analyse des paramètres climatologiques dans le risque incendie, l'assistance opérationnelle à la Sécurité Civile, étude du stress hydrique de la végétation à l'aide de la télédétection,
- **La Section Technique Interrégionale Sud-Est de l'ONF d'Aix-en-Provence** : cette équipe est spécialisée dans l'identification des besoins des gestionnaires forestiers et dans la description du combustible.

De par leurs travaux réalisés et leurs problématiques de recherche, ces centres et équipes de recherche ont leur place dans un réseau de zones ateliers pour l'étude du comportement des feux de forêt.

## 6.7. Conclusion du Chapitre 6

Nous avons vu dans ce chapitre que la création d'une zone atelier ou d'un réseau de zones ateliers pour l'étude du comportement des feux de forêt repose principalement sur la fédération des équipes de recherche du domaine. En effet, il existe un certain nombre de zones d'études et de travaux réalisés par diverses équipes de chercheurs qui pourraient être réunies, dans la création de véritables zones ateliers.

Les programmes de recherche européens comme « EFAISTOS » et nationaux tels que le GIS « Incendie de forêt », contribuent déjà à réunir des équipes scientifiques ou des décideurs, tels que les gestionnaires de l'espace forestier, autour d'une même

problématique, afin de faire avancer les recherches dans ce domaine. La création d'une zone atelier pour l'étude des incendies de forêt est donc une réalité qu'il reste à concrétiser.

**Conclusion générale  
et  
Perspectives**



## Conclusion générale et perspectives

*L'Homme n'est point fait pour méditer, mais pour agir.*

*Jean-Jacques Rousseau*

Arrivés au terme de cette thèse, il est désormais temps de dresser le bilan des principaux acquis et de proposer des perspectives.

Le système Incendie de Forêt, de par sa complexité, doit être analysé à l'aide d'une démarche scientifique. La modélisation, et plus spécialement le recours à l'expérimentation permettant d'acquérir les connaissances nécessaires du phénomène, s'impose aux chercheurs. L'expérimentation en milieu naturel constitue donc l'outil idéal pour étudier le comportement d'un feu de forêt dans des conditions approchant la réalité.

La formalisation des connaissances constitue une véritable aide à la modélisation pour le scientifique. Nous avons vu que l'acquisition et la formalisation des connaissances pouvaient assister le scientifique dans sa démarche de modélisation d'un phénomène environnemental. La gestion et l'organisation rigoureuses des connaissances issues d'expérimentations en milieu naturel permettent d'optimiser, dans la démarche modélisatrice, la transition entre l'étape d'expérimentation et celle de modélisation.

Le modèle conceptuel de la démarche expérimentale et de l'organisation des connaissances issues d'expérimentations en milieu naturel permet, au modélisateur d'optimiser la préparation de l'expérimentation ainsi que la capitalisation des connaissances qui en sont issues.

Le recours au langage de modélisation UML a permis, de conceptualiser l'ensemble des connaissances et compétences nécessaires à l'expérimentation en milieu

---

naturel. Son utilisation intuitive par la réalisation de différents diagrammes descriptifs et son approche fondée sur la Modélisation Objet, nous ont permis d'élaborer le modèle conceptuel de la démarche expérimentale et celui de l'organisation des connaissances issues d'expérimentations en milieu naturel. Développé spécialement pour le Génie Logiciel et plus particulièrement pour la conception de Système d'Information, UML nous a permis de contribuer à la conception d'un Système de Gestion des Connaissances (MODELLIS), composant à part entière d'un futur Environnement de Résolution de Problème pour la modélisation des incendies de forêt.

La réalisation d'un premier prototype de système de gestion des connaissances a permis une concrétisation partielle du modèle conceptuel proposé. L'utilisation, dans le cadre d'expérimentations conduites dans les départements des Alpes-Maritimes et des Landes, nous a permis d'éprouver ponctuellement l'utilité d'un tel outil informatique et de valider le modèle conceptuel des connaissances.

En perspective, nous pouvons dire que l'activité de formalisation des connaissances dans la recherche en environnement constituera un véritable métier. Le travail de cognition effectué lors de l'acquisition des connaissances et le travail de modélisation réalisé lors de leur formalisation ne peuvent se faire sans une approche multi-experte. En effet, il est impossible d'être un spécialiste de la formalisation de connaissances, sans avoir auparavant, acquis les connaissances et compétences nécessaires à l'expert. L'objet de l'analyse du cognicien n'est pas seulement de retranscrire les informations énoncées de l'expert, mais aussi d'acquérir les connaissances tacites utiles à la résolution d'un problème.

Dans la démarche de formalisation des connaissances, les entités spatiales n'ont pas été différenciées des autres. Il serait donc intéressant de modéliser les informations géographiques à l'aide d'un langage de modélisation propre à ce type d'entités. Bédard (1999) a développé un outil de modélisation, PERCEPTORY fondé sur le langage UML, permettant de modéliser de façon précise les caractéristiques spatiales. Il serait donc intéressant de reprendre le modèle conceptuel présenté dans cette thèse et de formaliser les zones ateliers, les sites et parcelles expérimentales à l'aide d'un tel langage. Le modèle ainsi complété pourrait plus facilement être développé dans un Système d'Information à Référence Spatiale.

Le système de gestion des connaissances issues d'expérimentations en milieu naturel (MODELLIS) pourrait être couplé à des bases de modèles de propagation tel que FIRELAB (Guarniéri et al., 2000, 2001). Il pourrait ainsi apporter la composante terrain à des modèles utilisant la plupart du temps des données issues de laboratoire.

La démarche de formalisation des connaissances peut être appliquée à différents domaines de l'environnement. Le modèle conceptuel présenté dans cette thèse a servi de guide pour la conception d'un modèle de connaissances dans le domaine du suivi, en temps réel, de volcans en activité. Ce modèle a été élaboré dans le cadre du projet européen « SANARIS » (Olampi et al., 2000).

La formalisation des connaissances doit être partie intégrante de la démarche de modélisation. Un nouveau projet européen «EU FIRELAB» relevant de la modélisation du comportement des incendies de forêt, repose sur ce concept. Ce projet se propose d'établir un laboratoire de recherche « sans murs » afin de réunir certaines équipes de recherche et d'unir leurs travaux. La formalisation des connaissances de ces différentes équipes est donc l'une des principales phases du projet. Ce projet est à ce jour sur le point d'être évalué par la Commission Européenne. La proposition même de la création d'un laboratoire « sans murs » démontre, pour les chercheurs européens, la nécessité de recourir à la formalisation des connaissances et au concept de zone atelier.

La création de zones ateliers pour la modélisation de phénomènes environnementaux, constituerait un véritable élément fédérateur entre les différentes équipes de chercheurs. La possibilité de mettre en commun les connaissances pluridisciplinaires pour un même objectif, constituerait une avancée considérable. La zone atelier constituerait alors un réservoir de connaissances dans lequel les modélisateurs pourraient puiser, afin d'éprouver les modèles existants sur de nouveaux écosystèmes et de les valider à l'aide de données terrains ou d'en créer de nouveaux. Les zones ateliers pourraient donc servir de supports aux projets de recherche à venir.



## **Bibliographie**

---

## Bibliographie

### A

- ALBINI F A, 1985 : « A model for fire spread in wildland fuels by radiation » ; Comb. Sci. Technol. 42 ; pp. 229-258.
- ALBINI F A, 1986 : « Wildland fire spread by radiation - a model including fuel cooling by natural convection » ; Comb. Sci. Technol. 45 ; pp. 101-113.
- ALEXANDER M.E., STOCKS B.J., WOTTON B.M. et LANOVILLE R.A., 1998 : « An example of multi-faceted wildland fire research: the international crown fire modelling experiment », In Proceedings of the 14th International Conference on Forest fire Meteorology ; Coimbra, Portugal ; pp. 83-112.
- ANDREWS P.L., 1986 : « BEHAVE : Fire behavior prediction and fuel modelling system – BURN subsystem, part1 » ; General Technical Report INT-194 ; Ogden, UT : USDA For. Serv. ; Intermountain Research Station ; 130 p.
- ANDREWS P.L. et CHASE C.H., 1989 : « BEHAVE : Fire behavior prediction and fuel modelling system – BURN subsystem, part 2 » ; Gen. Tech. Rep. INT-260 ; Ogden, UT : USDA For. Serv. ; Intermountain Research Station ; 93 p.
- ANDREWS P.L., 1998 : « An integrated wildland fire decision support system - Progress and plans » ; In Actes de la 3<sup>ème</sup> Conférence Internationale sur la Recherche dans le domaine des feux de Forêts ; Vol. II ; Coimbra, Portugal ; pp. 2141-2154.
- AUBRY R., 1985 : « Gestion de projet, le génie logiciel » ; Fascicule de cours ; Département informatique, INSA Lyon.

### B

- BARRAQUE B., 1997 : « Spécificité et difficulté de la modélisation dans le domaine de la gestion de l'environnement » ; In BLASCO F., (Coord.), « Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement » ; Journées du Programme « Environnement, Vie et Sociétés » du CNRS ; Ed. Elsevier ; p. 385-399.
- BEDARD Y., 1999 : « Visual modelling of spatial database towards spatial PVL and UML » ; Géomatica, Vol 53, n° 2 ; pp. 169-186.
- BENICHOU P. et LE BRETON O., 1986 : « Prise en compte de la topographie pour la cartographie de champs pluviométriques statistiques : la méthode Aurelhy » ; Agrométéorologie des régions de moyenne montagne, Toulouse, 16-17 avril ; Ed. INRA, Paris ; pp. 53-68.
- BLASCO F., 1997 : « Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement » ; Journées du Programme « Environnement, Vie et Sociétés du CNRS ; Ed. Elsevier ; 445 p.
- BOOCH G., 1994, « Object-Oriented Analysis and Design with Applications » ; Second edition. ADDISON WESLEY ; 608 p.
- BREHMER B., LOVBORG L. et WINMAN A., 1992a : « Learning the time constants of a dynamic task » ; Working Papers in Cognitive Science and HCI ; WPCS-92-6 ; 12 p.
- BREHMER B., LOVBORG L. et WINMAN A., 1992b : « Cost information in a dynamic decision task » ; Working Papers in Cognitive Science and HCI ; WPCS-92-7 ; 15 p.
- BROWN J.K., 1970 : « Ratios of surface area to volume for common fine fuels » ; Forest Science 16(1) ; pp. 101-105.

- 
- BUSCAGLIA M., 1983 : « Biologie et Vérités » ; Les critères de vérité dans la recherche scientifique ; Actes du Colloque de l'Association des Professeurs de l'Université de Genève ; Ed. Maloine, Paris ; pp. 11-20.
- BUISSON L., 1990 : « Le raisonnement spatial dans les systèmes à base de connaissances – Application à l'analyse de sites avalanches » ; Thèse de Doctorat ; Université Joseph Fourier de Grenoble ; 1176 p.
- BURGAN R.E. et ROTHERMEL R.C., 1984 : « BEHAVE : Fire behavior prediction and fuel modelling system – BURN subsystem » ; Gen. Tech. Rep. INT-167 ; Ogden, UT : USDA For. Serv. ; Intermountain Research Station ; 126 p.
- BURROUGH P.A., 1986 : « Principles of Geographical Information System for land resources assessment » ; Oxford Science Publications ; 194 p.
- BURROUGH P.A., 1992 : Development of intelligent geographical information systems » ; Int. Geographical information systems ; Vol. 6, n° 1 ; pp. 1-11.

## C

- CARREGA P., 1982 : « Les facteurs climatiques limitant dans le Sud des Alpes occidentales » ; Thèse de Doctorat de 3<sup>ème</sup> cycle ; Université de Nice-Sophia Antipolis ; 251 p. ; et n° 13 de la Revue d'Analyse Spatiale et Quantitative et Appliquée (1982) ; 221 p.
- CARREGA P., 1992 : « Topoclimatologie et habitat » ; Thèse de Doctorat d'Etat ; Université de Nice-Sophia Antipolis ; et n° 35 et 36 de la Revue d'Analyse Spatiale et Quantitative et Appliquée (1994), 408 p.
- CARREGA P. et WYBO J.L., 1992 : « Vers une évaluation intégrée du risque d'incendie de forêt » , Acte de colloque « le feu, avant...après » ; Revue d'analyse spatiale quantitative et appliquée.
- CARREGA P., 1994 : « Topoclimatologie et habitat » ; Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée n° 35 & 36 ; 408 p.
- CARREGA P. et GLINSKY-OLIVIER N., 1997 : « Cartographie du vent à l'échelle locale : performance comparée de deux modèles numériques » ; Publications de l'Association Internationale de Climatologie ; Vol. 10 ; pp. 126-134.
- CARREGA P. et NAPOLI A., 1998 : « A quick protocol of in-the-field measurement for the study of forest and bush fire spread » » In Proceedings of the 14th International Conference on Forest fire Meteorology ; Coimbra, Portugal ; pp. 565-582.
- CATCHPOLE E.A. et DE MESTRE N.J., 1986 : « Physicals models for a spreading line fire ». Austr. Forestry ; 49 ; pp. 102-111.
- CHENEY N.P., GOULD J.S. et CATCHPOLE W.R., 1993 : « The influence of fuel, weather and fire shape variables on fire-spread in grassland » ; International Journal of Wildland Fire. Vol. 3, N° 1 ; pp. 31-44.
- CHENEY N.P. et GOULD J.S., 1995 : « Fire growth in Grassland fuels » ; International Journal of Wildland Fire ; Vol. 5, N° 4 ; pp. 237-247.
- CHENEY N.P., GOULD J.S. et CATCHPOLE W.R., 1998 : « Prediction of fire spread in grasslands » ; International Journal of Wildland Fire ; Vol. 8 n° 1 ; pp. 1-13.
- CHEVALLIER J.J., 1993 « Systèmes d'aide à la décision à référence spatiale : méthode de conception et de développement » In : SIG'93, Ottawa Canada.
- CHEVENET F., 1994 : « Un environnement de résolution de problèmes pour l'analyse statistique en écologie » ; Thèse de l'Université Claude Bernard – LYON I ; 189 p.
- COMMISSION EUROPEENNE, 1996 : « Les feux de forêt dans le Sud de l'Union Européenne - 1989-1993 – Etude préparatoire à l'installation du système communautaire d'information sur les feux de forêt » ; Office des publications officielles des Communautés européennes ; Luxembourg ; 61 p.

CRANEFIELD S. et PURVIS M., 2001 : « Integrating environmental information : incorporating metadata in a distributed information system's architecture » ; *Advances in Environmental Research* 5 ; Elsevier Sciences Ltd ; pp. 319-325.

CRESPON C., 1998 : « Relation entre propagation des incendies de forêt et facteurs de géographie physique : applications expérimentales dans les Alpes-Maritimes et les Landes » ; *Mémoire de Géographie Physique* ; Université de Nice-Sophia Antipolis ; 51 p.

## D

DE MARSILY G., 1994 : « quelques réflexions sur l'utilisation des modèles en hydrologie » ; *Revue des sciences de l'eau* ; n° 7 ; pp. 219-234.

DE MARSILY G., 1997 : « De la validation des modèles en sciences de l'environnement » ; In BLASCO F., (Coord.), « Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement » ; *Journées du Programme « Environnement, Vie et Sociétés » du CNRS* ; Ed. Elsevier ; pp. 375-382.

DESCONNETS J.C., MARTIN C. et LIBOUREL T., 2000 : « Autour d'une expérience de conception d'un outil d'évaluation du risque sismique » ; In. *Actes du colloque SIRNAT, (Systèmes d'Information pour les Risques Naturels)*, Grenoble, France ; 13 p.

DIENG R., CORBY O., GIBOIN A., MATTA N. et RIBIERE M., 2000 : « Méthodes et outils de gestion des connaissances » ; *Edition Dunod* ; 302 p.

DUPUY J.L., 1991 : « Modélisation prédictive de la propagation des incendies de forêts » ; *Document PIF9103 ; Rapport bibliographique* ; Université Claude Bernard Lyon 1 / Institut National de la Recherche Agronomique ; 64 p.

DUPUY J.L., 1997 : « Mieux comprendre et prédire la propagation des feux de forêts : expérimentation, test et proposition de modèles » ; *Thèse de Doctorat* ; Université Claude Bernard - Lyon I ; 272 p.

## F

FINNEY M.A., 1995 : « FARSITE-A fire area simulator for managers » In *The Biswell Symposium : Fire Issues and solutions in Urban interface and Wildland Ecosystems. General Technical Report PSW-158* ; Berkley, CA : USDA for. Serv., Pacific SW Forest and Range Experiment Station ; pp. 55-56.

FINNEY M.A., 1998 : « FARSITE-A Fire Area Simulator-model development and evaluation. USDA Forest Service ; Research Paper RMRS-RP-4, Rocky Mountain Research Station, Ft. Collins, CO, 47 p.

FIRESCAN Science Team, 1994 : « Fire in Boreal ecosystems of Eurasia : first results of the Bor Forest Island fire experiment, FIRESCAN » ; *World Resource Review* n° 6 ; pp. 499-523.

FIRESCAN Science Team, 1996 : « Fire in ecosystems of boreal Eurasia : the Bor Forest Island fire experiment, FIRESCAN » ; *Biomass burning and global change* ; Vol. II ; The MIT Press, Cambridge, MA ; pp. 848-873.

FLOYD C., 1984 : « A systematic look at prototyping » In « *Approaches to prototyping* » ; Ed. Budde R.

FORRESTER J.W., 1984 : « Principes des Systèmes » ; Traduit par Sylvestre-Baron P. ; *Presse Universitaire de Lyon* ; 404 p.

FOSBERG, M., 1992 : « International Boreal Forest Research Association, Stand Replacement Fire Working Group » ; *Int. Forest Fire News* No. 7 ; pp. 6-8.

FOUET J.M., 1997 : « Connaissances et savoir-faire en entreprise » ; Ed. Hermès, Paris ; 414 p.

## G

GABAY J., 1989 : « Apprendre à pratiquer MERISE » ; Ed. Masson, Paris.

- 
- GALLOPOULOS E., HOUSTIS E. et RICE J.R., 1992 : « Future research directions in problem solving environments for computational science » ; CSRD Report NO 1259. Report of a Workshop on Research Directions in Integrating Numerical Analysis, Symbolic Computing, Computational Geometry, and Artificial Intelligence for Computational Science, Washington, DC, April 11-12, 1991 ; 52 p.
- GIROUD F., MARGERIT J., PICARD C. et SERO-GUILLAUME O., 1998 : « Data assimilation: the need for a protocole » ; In Proceedings of the 14th International Conference on Forest fire Meteorology ; Coimbra, Portugal ; pp. 583-598.
- GODARD O., 1997 : « L'environnement, du concept au champ de recherche et à la modélisation » ; In BLASCO F., (Coord.), « Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement » ; Journées du Programme « Environnement, Vie et Sociétés » du CNRS ; Ed. Elsevier ; p. 407-415.
- GOLDAMMER J.G., 1994 : « International Decade for Natural Disaster Reduction (IDNDR) » Int. Forest Fire News n°.11 ; pp. 31-37.
- GOLDAMMER J.G. et FURYAEV V.V., 1996 : « Fire in Ecosystems of Boreal Eurasia » ; Kluwer Academic Publ., Dordrecht ; 528 p.
- GOODCHILD M.F., 1987 : « A spatial analytical perspective on Geographical Information Systems » ; Int. J. of Geographical Information Systems ; Vol. 1, n°4 ; pp. 327-334.
- GUARNIERI F., 1994a, : « Aide à la décision à référence spatiale dans le domaine de la prévention des incendies de forêts : le système WILFRIED » ; Revue de Internationale de Géomatique, Editions HERMES.
- GUARNIERI F., 1994b : « Wilfried : Un système coopératif d'aide à la décision à référence spatiale dédié à la prévention des incendies de forêts » ; In Actes des Journées de la Recherche Cassini – Système d'Information Géographique ; pp. 55-64.
- GUARNIERI F., 1995 : « Modèles de systèmes et systèmes de modèles dans les systèmes à base de connaissances – Application à la prévention des incendies de forêts » ; Thèse de Doctorat ; Université Joseph Fourier de Grenoble ; 218 p.
- GUARNIERI F., CARREGA P., GLINSKY-OLIVIER N. et LARROUTUROU B., 1995 : « Expert knowledge and quantitative wind modelling for spatial decision support dedicated to wildland fire prevention » ; In The International Emergency Management and Engineering Conference ; May 9-12 1995 ; Nice ; France ; pp. 171-179.
- GUARNIERI F. et WYBO J.L., 1997 : « Systèmes de modèles dans les systèmes à base de connaissances : Application aux questions de l'environnement » ; In BLASCO F., (Coord.), « Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement » ; Journées du Programme « Environnement, Vie et Sociétés » du CNRS ; Ed. Elsevier ; p. 359-363.
- GUARNIERI F., ANDERSEN C.K., OLAMPI S. et CHAMBINAUD N., 1998 : « FireLab, towards a Problem Solving Environment to support forest fire behaviour modelling » In Proceedings of the 14 th International Conference on Forest fire Meteorology, Coimbra, Portugal.
- GUARNIERI F., NAPOLI A. et OLAMPI S., 2000 : « Un Environnement de Résolution de Problèmes pour l'aide à la simulation des incendies de forêts » ; In Actes du colloque SIRNAT, (Systèmes d'Information pour les Risques NATurels), Grenoble, France ; 12 p.
- GUARNIERI F., NAPOLI A. et OLAMPI S., 2001a : « Toward a Virtual Laboratory to Support Forest Fire Behaviour Modelling and Metrology » ; Chapitre XVIII du livre « Environmental Information Systems in Industry and Public Administration », Idea Group Publishing, Hershey (PA), USA ; pp. 271-281.
- GUARNIERI F., JABER, A. et WYBO JL., 2001b, « Aide à la décision à référence spatiale et systèmes Multi-Agents », Collection « Information géographique et aménagement du territoire » sous la direction de G. BRUGNOT, série en 32 volumes, Editions HERMES.
- GUIJARRO M et VALETTE J.C., 1995 : « Influencia de la pendiente y de la carga de acículas muertas de Pinus halepensis en el comportamiento del fuego : modelos desarrollados en laboratorio ». ; Revista de Investigacion Agraria. Sistemas y Recursos Forestales.

**H**

- HACHETTE, 1997 : « Dictionnaire Universel Francophone » ; Ed. Hachette Edicef.
- HARGROVE W.W., GARDNER R.H., TURNER M.G., ROMME W.H. et DESPAIN D.G., 2000 : « Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes » ; Ecological Modelling 135 ; Elsevier Sciences Ltd ; pp. 243-263.
- HENSHAW D.L., 1997 : « The H.J. Andrews cloamtopological field measurement program » ; In MICEHENER W.K., PORTER J.H. et STAFFORD S.G. (Editor) : « Data and Information Management in the Ecological Sciences : a resource guide » ; published by LTER Network Office, University of New Mexico, Albuquerque, NM ; pp. 117-124.
- HERNANDO C, MORO C. et VALETTE J.C., 1994 : « Flammability parameters and Calorific Values of Erica arborea and Arbutus unedo » ; Second International Conference on Forest Fire Research, Coimbra (Portugal) ; November 21<sup>st</sup> - 24<sup>th</sup> ; pp. 481-490.
- HETIER J.P. et LILIN C., 1989 : « Les espaces boisés méditerranéens et leurs ressources » ; Forêt méditerranéenne ; t. XI ; n°3 ; pp. 226-237.
- HOLMES M.E. et POOLE G., 1997 : « Management of long-term water quality database : flatdat for the flathead lake biological station » ; In MICEHENER W.K., PORTER J.H. et STAFFORD S.G. (Editor) : « Data and Information Management in the Ecological Sciences : a resource guide » ; published by LTER Network Office, University of New Mexico, Albuquerque, NM ; pp. 111-116.

**I**

- ISAAKS E. H. et SRIVASTAVA. R. M., 1989 : « An introduction to applied geostatistics » ; Oxford University Press, New York ; 561 p.
- IUFRO, 1995 : IUFRO (Ed.) XX World Congress, Tampere, Finland, 6-12 August 1995. Abstract Vol., S1.09.00 Forest Fire Research Sessions ; pp. 86-94.

**J**

- JOLIVET M., 1992 : « Les passeurs de frontières » ; Editions CNRS, Paris.
- JOLIVET M. et PAVE A., 1993 : « L'environnement : un champ de recherche en formation » ; Nature-Sciences-Sociétés, 1,(1) ; pp . 6-20.

**L**

- LABORDE J.P., 1984 : « Analyse des données et cartographie automatique en hydrologie : éléments d'hydrologie » ; Thèse de doctorat ; Institut National Polytechnique de Lorraine.
- LAURINI R. et THOMPSON D., 1992 : « Fundamentals of Spatial Information Systems » ; Academic Press, London ; 680 p.
- LARINI M., GIROUD F., PORTERIE B. et DUPUY J.L., 1996 : « Fire propagation through a multiphase medium » ; 13<sup>th</sup> Conference on Fire Meteorology : international Perspectives on Landscape Fire ; 27-31 October, 1996 ; Cumberland Conference Center, Lorne, Australia.
- LOPES A.G., SOUSA A.C.M. et VIEGAS D.X., 1994 : « Numerical simulation of the wind field and fire propagation in mountain canyons » ; Proceedings of the International Conference on Forest Fire Research ; Coimbra ; pp. 289-299.
- LOVBORG L. et BREHMER B., 1991 : « NEWFIRE - A flexible system for running simulated fire-fighting experiments », Riso - M-2953 ; Riso National Laboratory, Roskilde , Denmark ; 40 p.
- LOVBORG L. et BREHMER B., 1992 : « New facilities in NEWFIRE » ; Working Papers in Cognitive Science and HCI ; WPCS-92-8 ; 19 p.

---

## M

- MARSDEN-SMEDLEY J.B., 1993 : « Fuel characteristics and fire behaviour in Tasmanian buttongrass moorlands. Parks and Wildlife », Service, Department of Environment and Land Management, Hobart, Tasmania.
- MARSDEN-SMEDLEY J.B. et CATCHPOLE W.R., 1995a : « Fire behaviour modelling in Tasmania buttongrass moorlands. I. Fuel characteristics » ; International Journal of Wildland Fire ; Vol. 5, N° 4 ; pp. 203-214.
- MARSDEN-SMEDLEY J.B. et CATCHPOLE W.R., 1995b : « Fire behaviour modelling in Tasmania buttongrass moorlands. II. Fire behaviour » ; International Journal of Wildland Fire ; Vol. 5, N° 4 ; pp. 215-228.
- MATHERON G., 1970 : « La théorie des variables régionalisée et ses applications » ; Les CGMM, fascicule 5, ENSMP, Fontainebleau ; 212 p.
- MATHIEU N., 1992 : « Géographie et interdisciplinarité : rapport naturel ou rapport interdit ? » In Jolivet M., « Les passeurs de frontières » ; Editions CNRS, Paris ; p. 129-154.
- MAUREL P., MERIAUX P., TOURMENT R., PAQUIER A., PARDO C. et CHRYAT M., 2000 : « Analyse et prototypage d'un SIRS générique pour aider à la gestion intégrée des zones fluviales endiguées » ; Actes du colloque SIRS (Systèmes d'Information pour les Risques NATurels), Grenoble, France ; 13 p.
- MC ARTHUR A.G., 1967 : « Fire behaviour in eucalypt forest » ; Comm. Aust. For. Timb. Bur. Leaflet 107, 100 ; 23 p.
- MICAELLI J.P. et PERRIN J., 1997 : « Les trois âges de la capitalisation des connaissances » in FOUET J.M., (Coord.), « Connaissances et savoir-faire en entreprise » ; Ed. Hermès, Paris ; pp. 23-39.
- MICHENER W., 1997 : « Ecological metadata » ; In MICHENER W.K., PORTER J.H. et STAFFORD S.G. (Editor) : « Data and Information Management in the Ecological Sciences : a resource guide » ; published by LTER Network Office, University of New Mexico, Albuquerque, NM ; pp. 47-51.
- MOLINA M.J. et LLINARES J.V., 1998 : « Relationships between fire behaviour, weather conditions and fire intensity parameters in experimental summer fires in Valencia shrublands » ; In Proceedings of the 14th International Conference on Forest fire Meteorology ; Coimbra, Portugal ; pp. 661-676.
- MULLER P.A., 1997 : « Modélisation objet avec UML » ; Ed. Eyrolles ; 421 p.

## N

- NALDER I.A., WEIN R.W., ALEXANDER M.E. et DE GROOT W.J., 1997 : « Physical properties of dead and downed round-wood fuels in the boreal forests of Alberta and Northwest Territories » ; Can. J. For. Res. 27 ; pp. 1513-1517.
- NAPOLI A., 1995 : « Périodes et secteurs à risques d'incendies de forêts dans les Alpes-Maritimes – Analyse de la composante météorologique » ; Mémoire de DEA « Structures et dynamiques spatiales » ; Université de Nice-Sophia Antipolis.
- NAPOLI A. et CARREGA P., 1995 : « Un essai d'interpolation de l'humidité relative de l'air à l'aide du krigeage » ; Revue d'Analyse Spatiale Quantitative et Appliquée ; N° 37 ; pp. 75-83.
- NAPOLI A. et CARREGA P., 1996 : « Relationship between meteorological parameters and vegetation characteristics, and interpolation of meteorological parameters for fire risk assessment » ; Rapport annuel, Université de Nice Sophia-Antipolis ; Projet européen « Risk Sensor » ; Contrat N° EV5V-CT94-0525.
- NAPOLI A. et CARREGA P., 1998 : « Modelling the fire spread with terrain experiments » ; Rapport Annuel, Université de Nice Sophia-Antipolis ; Projet européen « Efaistos » ; Contrat N° ENV4-CT96-0299.

NAPOLI A., GUARNIERI F. et CARREGA P., 1999 : « Forest Fire Metrology: Methodological and Technological Approach to Support the Experimental Process in Forest Fire Behaviour Modelling »; In Actes du symposium international DELFI «Feux de forêts : besoins et innovations » ; Athènes, Grèce ; pp. 216-223.

### O

OLAMPI S., ILL D. et GUARNIERI F., 2000 : « Remote sensing and satellite communication on World Wide Web platform for support volcanoes monitoring » ; TIEMS 2000, International Emergency Management and Engineering Conference, Orlando, USA.

OLLE T.W., HAGELSTEIN J., Mac DONALD I.G., ROLLAND C., SOL H.G., VAN ASSCHE F.J.M. et VERRIJN-STUART A.A., 1991 : « Information systems methodologies – A framework for understanding » ; Seconde Edition ; publié par Addison-Wesley.

OLLE T.W., 1993 : « Data modelling and conceptual modelling: A comparative analysis of functionality and role » ; Australian Journal of Information Systems ; Issue N° 1.

OLLE T.W., 1996 : « Fundamentals of data and process modelling » ; JTC1 Workshop in Seattle ; 9-12 september 1996 ; 14 p.

OPENSHAW S., 1990 : « Spatial analysis and geographical information systems : a review of progress and possibilities » ; In. Geographical Information Systems for Urban and Regional Planning ; Kluwer Academic Publishers ; pp. 153-163.

### P

PAVE A., 1994 : « Modélisation en biologie et en écologie » ; Ed. Aléas ; 559 p.

PAVE A., 1997 : « Introduction » In BLASCO F., (Coord.), « Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement » ; Journées du Programme « Environnement, Vie et Sociétés » du CNRS ; Ed. Elsevier ; p. XIV-XVI.

PEREZ J.Y. et VALETTE J.C., 1995 : « L'éclosion et la propagation initiale du feu dans une lande à molinie en forêt landaise » ; Document INRA PIF9525 ; 18 p.

PEREZ J.Y. et VALETTE J.C., 1996 : « Le comportement du feu dans une lande à molinie de la forêt landaise » ; Document interne INRA-PIF/SDIS40 ; 19 p.

PEREZ J.Y., GROSSIORD R., PORTIER D., NAPOLI A., CARREGA P. et VALETTE J.C., 2000 : « Le comportement du feu en lande arbustive de la forêt landaise » ; Rapport interne INRA-PIF/SDIS 40 ; 62 p.

PEUQUET J. et MARBLE F., 1990 : « Introductory readings in Geographical Information Systems : Taylor & Francis Ltd ; 371 p.

PORTER J.H., 1997 : « Scientific databases for environmental research » ; In MICEHENER W.K., PORTER J.H. et STAFFORD S.G. (Editor) : « Data and Information Management in the Ecological Sciences : a resource guide » ; published by LTER Network Office, University of New Mexico, Albuquerque, NM ; pp. 41-46.

### R

RECHENMANN F., 1992 : « Modélisation et partage des connaissances. Vers des démarches de recherche collaboratives » ; In Géopoint 92 ; Modèles et modélisation en Géographie ; Groupe Dupont ; pp. 25-33.

ROSS D.G., SMITH I.N., MNINS P.C. et FOX D.G., 1988 : « Diagnostic wind field modeling for complex terrain: Model development and testing » ; Journal of Applied Meteorology, Vol. 27 ; pp. 785-796.

ROTHERMEL R C, 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels. USDA Forest Service, Research Paper INT-115.

- 
- ROUSSEAU B., 1988 : « Vers un environnement de résolution de problèmes en biométrie - Apport des techniques de l'intelligence artificielle et de l'interaction graphique » ; Thèse de l'Université Claude Bernard – Lyon I ; 281 p.
- ROYCE W.W., 1970 : « Managing the development of large software systems » ; Proceedings of IEEE WESCON.
- RUEGG H., 1983 : « Les critères de vérité dans la recherche en physique » ; Les critères de vérité dans la recherche scientifique ; In Actes du Colloque de l'Association des Professeurs de l'Université de Genève ; Ed. Maloine, Paris ; pp.147-156.
- RUMBAUGH J., BLAHA M., EDDY F., PREMERLANI W., et LORENSEN W., 1995 : « OMT. 1. Modélisation et conception orientées objet. » (Edition française revue et augmentée) ; MASSON, Paris, PRENTICE HALL, London ; 516 p.
- RUMBAUGH J., JACOBSON I. et BOOCH G., 1999 : « The Unified Modeling Language Reference Manual » ; Addison-Wesley, Object Technology Series ; 550 p.

## S

- STAFFORD S.G., 1997 : « Issues and concepts of data management : the H.J. Andrews forest science data bank as case study » ; In MICEHENER W.K., PORTER J.H. et STAFFORD S.G. (Editor) : « Data and Information Management in the Ecological Sciences : a resource guide » ; published by LTER Network Office, University of New Mexico, Albuquerque, NM ; pp. 1-5.
- STOCKS B.J., 1980 : « Black spruce crown fuel weights in northern Ontario » ; Can. J. For. Res. 10 ; pp. 498-501.
- SWAIN H.M., 1997 : « Data and information management in the ecological sciences : synopsis from a field station perspective » ; In MICEHENER W.K., PORTER J.H. et STAFFORD S.G. (Editor) : « Data and Information Management in the Ecological Sciences : a resource guide » ; published by LTER Network Office, University of New Mexico, Albuquerque, NM ; pp. 129-134.

## T

- TARDIEU H., ROCHFELD A. et COLETTI R., 1986 : « La méthode MERISE » ; Editions d'organisations.
- TRABAUD L., 1989 : « Les feux de forêt. Mécanismes, comportement et environnement » ; Ed. France Sélection, Aubervilliers ; 278 p.
- TRICHET F., 1998 : « DSTM : un environnement de modélisation et d'opérationnalisation de la démarche de résolution de problèmes d'un Système à Base de Connaissances » ; Thèse de Doctorat ; Université de Nantes ; 170 p.
- TUFFERY C., 1997 : « Les SIG dans les entreprises » ; Ed. Hermès ; 128 p.

## V

- VALETTE J.C., CLEMENT A. et DELABRAZE P., 1979 : « Inflammabilité d'espèces méditerranéennes ». Tests rapides, campagne été 1978 ; INRA d'Avignon, doc. Interne n°3 ; 71p.
- VAN WAGNER C.E., 1985 : « Fire behavior modeling, how to blend Art and Science » In. Eighth Conference on Fire and Forest Meteorology » ; Society of American Foresters.
- VAN WAGNER C.E., 1987 : « Elaboration et structure de la méthode Canadienne de l'indice forêt météo service Canadien des forêts » ; Gouvernement du Canada ; 34 p.
- VEGA J.A., CUINAS P., FONTURBEL T., PEREZ-GOROSTIAGA P. et FERNADEZ C., 1998 : « Predicting fire behaviour in Galician (NW Spain) shrubland fuel complexes » ; In Proceedings of the 14th International Conference on Forest fire Meteorology ; Coimbra, Portugal ; pp. 713-728.
- VENTURA J. et MENDES-LOPES J.M., 1997 : « Forest fire behaviour on laboratory rig » ; Rapport Annuel, Université de l'IST ; Projet européen « Efaistos » ; Contrat N° ENV4-CT96-0299 ; 8 p.

- VILLANOVA M., 2000 : « Modélisation UML d'un système d'information dédié aux risque naturels » ; In Actes du colloque SIRNAT, (Systèmes d'Information pour les Risques NATurels), Grenoble, France ; 12 p.
- VINCK D., 1997 : « La connaissance : ses objets et ses institutions » in FOUET J.M., (Coord.), « Connaissances et savoir-faire en entreprise » ; Ed. Hermès, Paris ; p. 55-91.
- VOGEL C., 1988 : « Génie Cognitif » ; Ed. Masson.
- VOIRON-CANICIO C., 1986 : « Les variogrammes et leur application en analyse régionale. » ; Revue d'Analyse Spatiale ; p. 1-10.

## W

- WALLISER B., 1977 : « Systèmes et modèles. Introduction critique à l'analyse de systèmes » ; Édition du Seuil ; Paris ; 247 p.
- WEBER R., 1991 : « Modelling fire spread through fuel beds » ; Prog. En. Combust. Sci.17 ; p. 67-82.
- VIEGAS D.X., VIEGAS M.T. et VARELA V.G., 1994 : « Fields Tests of fire spread on shrub vegetation in a slope » In Proceedings of the 2<sup>nd</sup> International Conference on Forest Fire Research. ; Coimbra; Portugal, pp. 469-478.
- WYBO J.L., 1991 : « EXPERGRAPH : Analyse basée sur des connaissances et suivi temps réel d'information géographique évolutive » ; Thèse de l'Université de Nice-Sophia Antipolis ;

## Z

- ZACKLAD M., 2000 : « Ingénierie des connaissances appliquées aux systèmes d'information pour la coopération et la gestion des connaissances » ; Habilitation à Diriger des Recherches ; l'Université Paris 6 ; 152 p.
- ZELFANI M., 1993 : « Ingénierie de la connaissance et raisonnement dans un univers multi-agents : XPENT-CASSIS, un système à bases de connaissance en géotechnique » ; Thèse de Doctorat ; Université de St-Etienne ; 170 p.

## Site web

Site web LTER : The US Long-Term Ecological Research network ; « ten-year review of the national science foundation's long-term ecological research program » ;

<http://lternet.edu/documents/reports>

Site web CNRS/PEVS : Programme Environnement, Vie et Sociétés ; « Zones Ateliers de recherche sur l'environnement » - Des dispositifs pour le suivi, l'observation et l'étude à long terme des anthroposystèmes ;

<http://www.cnrs.fr/cw/fr/prog/progsci/evs.html>

Site web du Global Fire Monitoring Center – Programme BIBEX ;

<http://www.uni-freiburg.de/fireglobe/>

---

## **Table des figures**



## Tables des Figures

### Chapitre 1

Figure 1.1 : L'environnement du système incendie de forêt	27
Figure 1.2 : Représentation graphique du système incendie de forêt	28
Figure 1.3 : L'avant événement feu de forêt	29
Figure 1.4 : Pendant la phase d'éclosion du feu de forêt	30
Figure 1.5 : Pendant la phase de propagation du feu de forêt	31
Figure 1.6 : Après l'événement feu de forêt	33
Figure 1.7 : Le site expérimental pour l'étude de la vitesse de propagation du front de flammes	40
Figure 1.8 : Le concept de zone atelier	46

### Chapitre 2

Figure 2.1 : Relations entre données, informations et connaissances	52
Figure 2.2 : Le cycle de vie itératif	60
Figure 2.3 : Diagramme de cas d'utilisation	66
Figure 2.4 : Diagramme de séquence	67
Figure 2.5 : Diagramme de collaboration	67
Figure 2.6 : Diagramme d'états	68
Figure 2.7 : Diagramme de classes	68
Figure 2.8 : Diagramme de composants	69
Figure 2.9 : Diagramme de déploiement	70
Figure 2.10 : Représentation graphique d'un ERP	74

### Chapitre 3

Figure 3.1 : Le site expérimental d'Annaburoo ; 1995	86
Figure 3.2 : Vue aérienne d'une expérimentation, site expérimental d'Annaburoo	86
Figure 3.3 : Site expérimental de McCorkhill	89
Figure 3.4 : Site expérimental de Dee Vee	89
Figure 3.5 : Expérimentation avec un feu de grande intensité	90
Figure 3.6 : Expérimentation du 5 mars 1998	90
Figure 3.7 : Disposition des parcelles en 1998	92
Figure 3.8 : Vue aérienne des parcelles	92
Figure 3.9 : Vue aérienne d'une expérimentation en 1997	94
Figure 3.10 : Vue aérienne d'une expérimentation en 1998	94
Figure 3.11 : Lewa Downs, Kenya, Septembre 1997	95
Figure 3.12 : Expérimentation dans la région de Krasnoyarsk, Russie, 1993	96
Figure 3.13 : Parcelle expérimentale à Bor Forest Island	96
Figure 3.14 : Vue aérienne du site expérimental	97
Figure 3.15 : Expérimentations en 1999	97
Figure 3.16 : Site expérimental de Tourettes-sur-Loup	100
Figure 3.17 : Forte émission de fumée ; site de Tourettes-sur-Loup ; 11/02/1998	100
Figure 3.18 : Propagation rapide ; site de Tourettes-sur-Loup ; 11/02/1998	100
Figure 3.19 : Propagation lente; site de Coursegoules ; 12/02/1998	100

---

## Chapitre 4

Figure 4.1 : Représentation graphique d'un ERP d'aide à la modélisation	106
Figure 4.2 : Cas d'utilisation de la démarche expérimentale	107
Figure 4.3 : Cas d'utilisation de la préparation de l'expérimentation	108
Figure 4.4 : Cas d'utilisation de la mise en place du dispositif de mesure	109
Figure 4.5 : Diagramme de séquence de la préparation de l'expérimentation	110
Figure 4.6 : Diagramme de déploiement du dispositif	111
Figure 4.7 : Cas d'utilisation de l'exécution de l'expérimentation	111
Figure 4.8 : Cas d'utilisation de la mesure des paramètres	112
Figure 4.9 : Cas d'utilisation de la mesure des paramètres météorologiques	113
Figure 4.10 : Diagramme de séquence de l'exécution de l'expérimentation	114
Figure 4.11 : Cas d'utilisation de la gestion des données du système d'information	115
Figure 4.12 : Cas d'utilisation de la saisie des données concernant l'expérimentation	116
Figure 4.13 : Cas d'utilisation de la saisie des données du dispositif de mesure	118
Figure 4.14 : Diagramme de séquence de la saisie des données du dispositif de mesure	119
Figure 4.15 : Diagramme de séquence de la saisie des données du capteur manuel	120
Figure 4.16 : Diagramme de séquence de la saisie des données du le capteur manuel	121
Figure 4.17 : Diagramme de séquence de la saisie des données du réseau automatique	122
Figure 4.18 : Cas d'utilisation de la saisie des données concernant les éléments géo.	123
Figure 4.19 : Diagramme de séquence de la saisie des données de la parcelle expérimentale	124
Figure 4.20 : Diagramme de séquence de la saisie des données des documents papiers	125
Figure 4.21 : Cas d'utilisation de la saisie des mesures concernant les param. de l'exp.	126
Figure 4.22 : Cas d'utilisation de la saisie des mesures concernant la couche de combustible	127
Figure 4.23 : Diagramme de séquence de la saisie de l'épaisseur du combustible	127
Figure 4.24 : Cas d'utilisation de la saisie des paramètres météorologiques	128
Figure 4.25 : Diagramme de séquence de la saisie d'une mesure météo d'un capt. man.	129
Figure 4.26 : Diagramme de l'ensemble des classes du SI	133
Figure 4.27 : Diagramme de classes relatives au dispositif	134
Figure 4.28 : Diagramme de classes relatives au entités géo, à la doc. et aux param météo	135
Figure 4.29 : Diagramme de classes des caract. de l'exp.	136

## Chapitre 5

Figure 5.1 : Le prototypage exploratoire d'après Aubry (1985)	145
Figure 5.2 : Ecran de présentation de MODELLIS	147
Figure 5.3 : Ecrans de saisie d'un site expérimental et de ses documents numériques	149
Figure 5.4 : Ecrans de saisie d'une parcelle expérimentale et de ses caract. géo.	149
Figure 5.5 : Ecrans de saisie des informations relatives au combustible	150
Figure 5.6 : Ecrans de saisie d'un dispositif de mesure et de ses capteurs manuels	151
Figure 5.7 : Ecran de saisie d'une expérimentation	152
Figure 5.8 : Ecran de saisie des mesures de paramètres du feu	153
Figure 5.9 : Ecrans de saisie des mesures de paramètres météorologiques	154
Figure 5.10 : Ecran de saisie des mesures de combustibles	155
Figure 5.11 : Relation entre la vitesse de propag. et la vitesse moy. du vent	156
Figure 5.12 : Relation non linéaire entre la propag et le coef. de var. de la vitesse du vent	156
Figure 5.13 : relation entre la propag. calculée et celle mesurée lors des expérimentations	158
Figure 5.14 : Exemple de simulation avec FIRELAB	160
Figure 5.15 : Exemple de simulation de propag. d'un feu réalisée avec MERIS	161
Figure 5.16 : Exemple de simulation d'un feu réel réalisée avec FARSITE	162

## Chapitre 6

Figure 6.1 : Le réseau de zones ateliers pour l'étude du comportement des feux de forêt.....	167
Figure 6.2 : Localisation des stations météorologiques automatiques.....	176
Figure 6.3 : Carte d'interpolation de la température de l'air ; zone atelier des Alpes-Maritimes.....	177
Figure 6.4 : Carte de l'humidité relative de l'air ; zone atelier des Alpes-Maritimes.....	177
Figure 6.5 : MNT du Massif des Maures.....	179
Figure 6.6 : Carte des températures ; 06/07/1995 zone atelier du Var.....	181
Figure 6.7 : Carte de l'humidité relative ; 06/07/1995 zone atelier du Var.....	181
Figure 6.8 : Localisation des sites expérimentaux de la zone atelier des Alpes-Maritimes.....	184
Figure 6.9 : Le site expérimental de 1999 ; zone atelier des landes.....	185
Figure 6.10 : Vue aérienne des parcelles expérimentales du site de 1999.....	185
Figure 6.11 : Avancée du front de flammes ; parcelle expérimentale de 1 ha.....	185
Figure 6.12 : Vue latérale du front de flammes ; parcelle expérimentale de 1 ha.....	185
Figure 6.13 : Vue latérale de la propagation d'un feu, labo. de l'INRA d'Avignon.....	186
Figure 6.14 : visualisation des temp. des flammes, labo. de l'INRA d'Avignon.....	186
Figure 6.15 : Enregistrement de la progression du feu ; labo. de l'INRA d'Avignon.....	186
Figure 6.16 : Visualisation du feu à l'aide d'une caméra IR, labo. de l'INRA d'Avignon.....	186

*Je remercie les différents auteurs de m'avoir accordé l'autorisation d'utiliser ces clichés ou schémas issus des Sites Web suivants :*

Site Web du Centre National de la Recherche Scientifique / Programme « Environnement, Vie et Sociétés » (CNRS/PEVS) :

<http://www.cnrs.fr/cw/fr/prog/progsci/evs.html>

Site Web du Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation, Projet Vesta (CSIRO/Vesta) :

<http://www.ffp.csiro.au/vesta/>

Site Web du Global Fire Monitoring Center/Programme BIBEX :

<http://www.uni-freiburg.de/fireglobe/>

Site Web du Service Service Canadien des Forêts, EIMFC Centre de Foresterie du Nord, Programme « Expérience Internationale de Modélisation des Feux de Cimes » :

<http://nofc.forestry.ca/fire/frn/nwt/index-f.html>

Site WEB de l'USDA Forest Service, projet FROSTFIRE :

<http://www.fsl.orst.edu/fera/frostfire.html>

Site WEB du Pôle Cindyniques de l'Ecole des Mines de Paris, projet EFAISTOS :

<http://www.cindy.ensmp.fr/europe/efaistos>

Site WEB de MEDIAFOREST, Expérimentations organisées dans les Landes par l'INRA et le SDIS 40 :

<http://www.mediaforest.net/incendie>

**Les photos concernant les expérimentations réalisées dans les Alpes-Maritimes** ont été prises par Cyrille CRESPON, étudiant de l'Université de Nice-Sophia Antipolis qui m'a accompagné sur le terrain afin de préparer son mémoire de maîtrise (Crespon, 1998).





## **Formalisation et gestion des connaissances dans la modélisation du comportement des incendies de forêt**

### **Résumé :**

Nous proposons de traiter dans cette thèse, une partie du vaste domaine de la recherche dans le domaine des incendies de forêt. Nous nous intéressons plus particulièrement à la formalisation des connaissances (structuration des connaissances et de leurs interrelations) pour l'analyse du comportement des feux de forêt et plus précisément pour la modélisation de la vitesse de propagation d'un front de flammes.

Le système incendie de forêt, de par sa complexité, doit être appréhendé par une démarche modélisatrice du phénomène (expérimentation, modélisation et validation). Nous proposons dans cette thèse, par la formalisation du corpus de connaissances issues d'expérimentations en milieu naturel, d'apporter une aide à la modélisation du comportement des incendies de forêt. Un prototype de système de gestion des connaissances est élaboré afin d'assister les scientifiques chargés de conduire des expérimentations en milieu naturel. Ce système de gestion des connaissances étant partie intégrante des outils informatiques à mettre en œuvre dans une zone atelier, nous nous permettrons d'imaginer ce que pourrait être une zone atelier pour la modélisation du comportement des incendies de forêt en France.

La première partie de la thèse a pour objet de présenter le système incendie de forêt, la démarche de modélisation pour l'analyser ainsi que le recours à la démarche de formalisation de connaissance pour assister le modélisateur. La deuxième partie présente l'acquisition des connaissances dans le domaine de l'expérimentation en milieu naturel pour l'étude du comportement d'un incendie de forêt et leur formalisation à l'aide du langage de modélisation UML. La troisième partie présente, un prototype d'un système de gestion des connaissances issues d'expérimentations en milieu naturel : MODELLIS (MODELLed-Information System). Nous voyons comment celui-ci pourrait être intégré à ce que pourrait être une zone atelier pour l'étude du comportement des incendies de forêt dans le Sud de la France.

**Mots clés :** formalisation des connaissances, incendie de forêt, système d'information, système de gestion des connaissances, environnement de résolution de problème

---

## **Knowledge formalization and management in forest fire behaviour modelling**

### **Abstract :**

We propose to cover in this PhD, some part of the vast field of research on forest fires. We are more particularly interested in knowledge formalization (structuring of knowledge and its interrelationships) for the analysis of forest fire behaviour and more precisely for modelling of the rate of spread.

The system "forest fire", because of its complexity, must be apprehended by the modelling process of the phenomenon (experimentation, modelling and validation). We propose in this PhD, by the formalization of the corpus of knowledge resulting from experiments in natural environment, to help the modelling of the forest fire behaviour. A prototype of a knowledge management system is elaborated in order to assist the scientists in charge of natural-field experiments. This knowledge management system is integral part of the data-processing tools to use in a Long-Term Ecological Research (LTER) area. We will also try to imagine what could be a workshop zone for forest fires behaviour modelling in France.

The aim of the first part of the PhD is to present the "forest fire" system the modelling process in order to analyze it, and the need of the knowledge formalization process to assist scientists. The second part presents the acquisition of knowledge in the field of experiments in natural environment, for the study of the forest fire behaviour and their formalization using the UML modelling language. The third part presents a prototype of a knowledge management system resulting from experiments in natural field: MODELLIS (MODELLed-Information System). We see how this could be integrated in an example of LTER area for the study of forest fire behaviour in Southern France.

**Key words :** knowledge formalization, forest fire, information system, knowledge management system, problem solving environment.