



HAL
open science

Vulnérabilité des interfaces habitat-forêt à l'aléa incendie de forêt.: Évaluation couplant dires d'experts et simulation physique d'exposition

Lilian Pugnet

► **To cite this version:**

Lilian Pugnet. Vulnérabilité des interfaces habitat-forêt à l'aléa incendie de forêt. : Évaluation couplant dires d'experts et simulation physique d'exposition. Géographie. Université Nice Sophia Antipolis, 2015. Français. NNT : 2015NICE2010 . tel-01169868

HAL Id: tel-01169868

<https://theses.hal.science/tel-01169868>

Submitted on 30 Jun 2015

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.

UNIVERSITÉ DE NICE-SOPHIA ANTIPOLIS
UFR « Espaces & Cultures »
École Doctorale « Lettres, Sciences Humaines et Sociales »

THÈSE

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE NICE SOPHIA-ANTIPOLIS
Discipline : Géographie et Aménagement

**VULNÉRABILITÉ DES INTERFACES HABITAT-FORÊT À L'ALÉA
INCENDIE DE FORÊT**
Évaluation couplant dires d'experts et simulation physique d'exposition

Présentée et soutenue publiquement le 13 Avril 2015 par

Lilian PUGNET

Composition du jury

Luis GALIANA-MARTIN , Professeur, Universidad Autónoma de Madrid	Rapporteur
Sophie SAUVAGNARGUES , Professeur, École des Mines d'Alès	Rapporteur
Valérie SANSEVERINO-GODFRIN , Enseignant Chercheur, École des Mines de Paris, CRC – Centre de Recherche sur les Risques et les Crises, Nice Sophia Antipolis	Examineur
Éric RIGOLOT , Directeur de l'Unité de Recherche Écologie des Forêts Méditerranéennes, INRA, Avignon	Examineur
Raphaële BLANCHI , Ingénieure de recherche, CSIRO, Bushfire Cooperative Research Center, Melbourne, Australie	Examineur
Éric MAILLÉ , Ingénieur de recherche, Irstea, Aix-en-Provence	Encadrant
Christine VOIRON-CANICIO , Professeur, Université de Nice Sophia Antipolis	Directrice

Direction de thèse

Christine VOIRON, Professeur, Université de Nice-Sophia Antipolis, **Directrice**
Éric MAILLÉ, Ingénieur de recherche, Unité EMAX, Irstea, Aix-en-Provence, **Encadrant**
Marielle JAPPIOT, Chef de l'Unité EMAX, Irstea, Aix-en-Provence, **Co-Encadrante**
Raphaële BLANCHI, Ingénieure de recherche, CSIRO, Bushfire CRC, Melbourne, **Co-Encadrante** lors du séjour en Australie

Thèse préparée au sein des laboratoires

Irstea, Unité de Recherche Écosystèmes méditerranéens et risques, Aix-en-Provence
CSIRO, Bushfire Cooperative Research Center, Melbourne, Australie
Laboratoire ESPACE – UMR 7300, Université de Nice-Sophia Antipolis

Résumé

La vulnérabilité est la composante du risque d'incendie de forêt la moins connue. Elle est généralement évaluée à dire d'experts. Plus objectivement elle peut être évaluée *a posteriori* en mesurant les dommages causés par un sinistre, si le détail des caractères de ce sinistre est connu. Nous proposons un modèle d'évaluation de la vulnérabilité formulé par une analyse multicritères des dire d'experts. Ce modèle est validé en utilisant un modèle physique d'exposition. Ses entrées sont fournies par un modèle de propagation. La calibration se fonde sur une analyse des dommages engendrés par un sinistre réel. Les résultats valident l'approche de modélisation de la vulnérabilité par des variables spatiales.

Mots-clés : vulnérabilité, incendie de forêt, modèle multicritère, exposition, dommages, dire d'experts.

Abstract

Vulnerability is not a well-known component of forest fire risk. It is usually assessed through experts' opinions. It can be assessed more objectively after a disaster par measuring damages, if the attributes of the disaster are known. We propose a model for vulnerability assessment formulated with a multi-criteria analysis of experts' opinions. This one is validated by using a physical model for exposure assessment. Its inputs are provided by a fire propagation model. The system is calibrated based on the analysis of damages induced by a real wildfire. Results demonstrate the consistency of a vulnerability model based on spatial variables.

Keywords : vulnerability, wildfire, multicriteria modeling, exposure, damages, experts' opinions.

Remerciements

J'ai plaisir à m'acquitter d'une agréable obligation en remerciant celles et ceux qui ont fait à un titre ou à un autre, dans le présent ou le passé, que ce travail soit mené à son terme.

Je tiens tout d'abord à remercier les membres du jury qui ont accepté de porter un regard critique sur ce travail.

Je remercie ma directrice de thèse Christine VOIRON pour sa gentillesse, sa confiance, et pour la grande autonomie qu'elle m'a donné tout au long de ce travail. Un grand merci à Éric MAILLÉ, mon encadrant au sein de l'Irstea, pour son aide précieuse dans la réussite de ces recherches, son écoute et ses conseils avisés. Au-delà du cadre professionnel, c'est l'homme que je veux remercier. Ton soutien à mon chevet, au cours de l'épreuve difficile qui a ponctué cette thèse, m'a profondément touché. À cette occasion, c'est toute l'équipe EMAX de l'Irstea d'Aix-en-Provence que je remercie du fond du cœur.

Merci à Yvon DUCHÉ, Jean-Pierre CHÉRY, Sophie SAUVAGNARGUES, Jean-Paul CHEYLAN, Marielle JAPPIOT, membres du comité de suivi de ma thèse pour leurs remarques avisées durant tout ce parcours.

Je voudrais adresser un grand merci à Raphaële BLANCHI et Justin LEONARD pour m'avoir accueilli à Melbourne et encadré mon travail au sein du CSIRO. Cette expérience est pour moi inoubliable. Merci à toi Derek pour ta patience et tout le travail que tu as fourni pour m'aider dans l'exercice de simulation du feu.

Je tiens à remercier, vivement, les habitants des interfaces habitat-forêt pour leur accueil et leur gentillesse lors de mes enquêtes de terrain. Notamment, je saluerai particulièrement Thierry MORLOT pour l'intérêt qu'il a porté à mon travail et pour sa convivialité. Un grand merci à toute l'équipe qui m'a supporté sur le terrain : Roland ESTÈVE, Fabien GUERRA, Jean-Michel LOPEZ, Aminata N'DIAYE, Florent DALVERNY, Denis MORGE.

Je souhaite remercier tous les experts ayant participé à la construction du modèle multicritère de vulnérabilité. Un grand merci à Edouard GILLET pour les renseignements et l'implication dont il a fait preuve pour la reconstruction de l'incendie de Cavaillon.

Merci au « cercle de l'avenir », Tibaut, Chloé, Annabelle, Jonathan, Julien, Nicolas pour votre amitié sans faille et tous les moments de bonheur partagés.

Je voudrais aussi rendre, plus qu'un remerciement, un hommage appuyé à ma famille, pour leur amour et leur soutien inconditionnels... À Mathieu et Paul, amis au long cours, appuis de toujours et complices irremplaçables... À ma petite fée, qui fait de ma vie un rayon de soleil... Tu donnes une âme à mon cœur, des ailes à ma pensée, un essor à mon imaginaire. À tes côtés, les rimes se dessinent. À sculpter ta beauté, chacune se destine...

L. P.

Table des matières

Remerciements	4
Introduction générale	8
Chapitre 1. Géographie des risques, quelle place pour la vulnérabilité ?	14
1.1. Terminologie autour du concept de risque	14
1.1.1. Le risque	14
1.1.2. L'aléa	16
1.1.3. La vulnérabilité	17
1.1.4. La catastrophe	18
1.2. Évolution et complexification du risque.....	19
1.3. D'un paradigme l'autre.....	21
1.3.1. Le paradigme techniciste aléa-centré.....	21
1.3.2. L'amorce d'un basculement	22
1.3.3. Un paradigme nouveau, la vulnérabilité	23
1.4. Évaluation de la vulnérabilité dans les sciences humaines et sociales	25
1.5. La vulnérabilité dans le risque incendie de forêt.....	33
1.5.1. Définition générale d'un incendie de forêt.....	34
1.5.2. Risque, Aléa, Vulnérabilité : définition pour l'incendie de forêt.....	34
1.5.3. Les différentes approches de la vulnérabilité appliquées à la problématique incendie de forêt.	36
1.6. Conclusion du chapitre.....	38
Chapitre 2. Le contexte méditerranéen français, creuset du risque incendie de forêt.....	40
2.1. Le territoire méditerranéen et l'incendie, théâtre de la cohabitation Homme-Forêt.....	40
2.1.1. L'espace naturel méditerranéen complaisant à l'incendie de forêt	40
2.1.2. Histoire des interactions Homme-Forêt.....	49
2.2. La base de données Prométhée, un outil au service de la mémoire des feux.....	53
2.2.1. Les surfaces brûlées – échelles spatiale et temporelle.....	54
2.2.2. La fréquence des incendies – échelles spatiale et temporelle	55
2.2.3. Les causes des départs de feux.....	57
2.3. La gestion du risque incendie de forêt dans l'aménagement du territoire méditerranéen ..	58
2.3.1. Le PPRIF : quelle réponse à la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt ?.....	59
2.3.2. Les interfaces habitat-forêt.....	70
2.4. Conclusion du chapitre.....	76
Chapitre 3. Évaluation et aide multicritère à la décision dans une logique multi-acteurs... 78	78
3.1. Réflexion sur la notion d'évaluation.....	78
3.2. L'expertise dans un processus d'évaluation pour l'aide à la décision	82
3.2.1. Définition et rôle de l'expert.....	82
3.2.2. La connaissance propre à l'expert.....	84
3.3. Processus décisionnel et aide à la décision	85
3.3.1. Le processus de décision : un ensemble d'activités cognitives	86
3.3.2. L'aide à la décision : évaluer pour supporter les problèmes décisionnels.....	87
3.4. L'aide multicritère à la décision	89
3.4.1. Définition des concepts liés à l'aide multicritère à la décision.....	90
3.4.2. Les approches d'aide à la décision.....	93
3.5. Procédure et méthodes d'aide multicritère à la décision.....	94
3.5.1. Procédure d'aide à la décision	94
3.5.2. Les méthodes multicritères d'aide à la décision	98
3.5.3. La méthode Analytic Hierarchy Process.....	101
3.6. L'agrégation des jugements individuels et l'obtention d'un jugement de groupe	111
Chapitre 4. Proposition d'une méthode de caractérisation de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt	116
4.1. Identification des critères pour l'évaluation de la vulnérabilité	118
4.1.1. Les retours d'expérience en France	119
4.1.2. Les retours d'expérience en Australie.....	127
4.1.3. Les retours d'expérience aux États-Unis.....	132
4.1.4. Bilan	133
4.2. Construction du modèle conceptuel hiérarchique.....	136

4.2.1.	Le critère « Topographie ».....	138
4.2.2.	Le critère « Structure de la végétation ».....	140
4.2.3.	Le critère « Structure de l'Habitat ».....	140
4.2.4.	Sur la construction du critère « Aménagement »	142
4.2.5.	Le critère « Propriétés des Habitations ».....	143
4.2.6.	Le critère « Facteurs Humains ».....	144
4.3.	Élicitation des connaissances propres aux experts	145
4.3.1.	Présentation des profils d'experts	146
4.3.2.	Collecte des jugements individuels et calcul des pondérations associées	148
4.3.3.	L'évaluation des modalités.....	155
4.4.	Agrégation des jugements d'experts	157
4.4.1.	Agrégation des expertises individuelles sur les comparaisons par paires de critères	158
4.4.2.	Agrégation des expertises individuelles sur les scores des modalités.....	168
4.5.	Conclusion du chapitre.....	175
Chapitre 5. Spatialisation de la vulnérabilité et modélisation des dommages observés sur les habitations suite à l'incendie du 21 juillet 2012 à Cavaillon		177
5.1.	Présentation de la démarche	178
5.1.1.	Une approche a posteriori.....	178
5.1.2.	Les données	179
5.1.3.	Caractérisation des dommages sur les habitations	181
5.2.	Présentation de l'incendie de Cavaillon et des dommages occasionnés.....	182
5.2.1.	Description de la zone d'étude	182
5.2.2.	Scénario de l'incendie.....	182
5.2.3.	Description et analyse des dommages observés	184
5.3.	Spatialisation de la vulnérabilité	188
5.3.1.	Méthodes et outils de spatialisation.....	188
5.3.2.	Analyse des structures spatiales de la vulnérabilité.....	193
5.4.	Modélisation de l'endommagement des habitations en fonction de l'indice global de vulnérabilité.....	198
5.4.1.	Corrélation des dommages aux valeurs de vulnérabilité.....	199
5.4.2.	Modélisation de l'occurrence des dommages par régression logistique binaire	214
5.4.3.	Modélisation de la sévérité des dommages par régression polytomique ordinale	224
5.5.	Conclusions du chapitre.....	228
Chapitre 6. Modélisation de la vulnérabilité d'exposition par la simulation d'un incendie de forêt en interface et analyse tridimensionnelle.....		231
6.1.	L'incendie de forêt appréhendé sous l'angle de la physique	232
6.1.1.	Transfert de chaleur et propagation des incendies.....	232
6.1.2.	Mesure des caractéristiques physiques d'un incendie.....	235
6.1.3.	Intensité du feu et sévérité des dommages.....	237
6.2.	La modélisation du phénomène feu de forêt	240
6.2.1.	Typologie des modèles de feu.....	240
6.2.2.	Les simulateurs de feu.....	241
6.3.	Reconstruction de l'incendie de Cavaillon à l'aide du simulateur PHOENIX.....	243
6.3.1.	Les intrants du modèle PHOENIX.....	244
6.3.2.	Évaluation de la reconstruction de l'incendie.....	247
6.4.	Étude de la cohérence entre la vulnérabilité à dires d'experts, la simulation de l'incendie et l'endommagement observé.....	251
6.4.1.	Analyse de la relation Intensité-Vulnérabilité sur l'ensemble du territoire en interface.....	252
6.4.2.	Relation intensité simulée dommages observés : analyse du triptyque Intensité-Vulnérabilité-Sévérité.....	257
6.5.	Modélisation tridimensionnelle des contraintes thermiques reçues par les habitations..	263
6.5.1.	Méthodologie.....	264
6.5.2.	Exposition des habitations au rayonnement thermique.....	269
6.6.	Conclusion du chapitre.....	278
Conclusion générale.....		280
Bibliographie.....		287
Liste des annexes		310

Table des illustrations.....	365
Liste des tableaux	370

Introduction générale

La présente thèse porte sur l'étude de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt au regard du phénomène incendie de forêt. Cette recherche s'inscrit dans une volonté d'améliorer l'intégration de la vulnérabilité dans l'aménagement du territoire en région méditerranéenne.

Elle vise à la conception d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité devant permettre aux gestionnaires d'appréhender, de manière objective, l'impact potentiel des incendies de forêt sur les enjeux surdéterminants que sont les habitations résidentielles en interface habitat-forêt.

Contexte

En région méditerranéenne française et dans les espaces forestiers en particulier, les incendies de forêt représentent l'un des principaux phénomènes naturels générateurs de danger. Le feu menace des territoires vastes et variés. Il a des conséquences paysagères, écologiques et socio-économiques importantes à la fois par les dommages supportés et par les coûts de prévention et de lutte nécessaires. Au cours de l'été 2003, l'un des plus catastrophiques des vingt dernières années, près de 20 000 hectares ont été consumés dans le seul département du Var. Pour la région Provence-Alpes-Côte d'Azur le bilan fut particulièrement lourd : 10 morts et des dizaines d'habitations touchées. Plus de 60 000 ha de forêt furent brûlés sur l'ensemble des 15 départements du Sud de la France. De tels évènements ont suscité une prise de conscience de la société à l'égard du risque incendie de forêt, particulièrement dans les espaces périurbains, largement présents en région PACA, et également en région Languedoc-Roussillon et Corse, où habitations résidentielles et végétation forestière se sont étroitement interpénétrées à la suite de décennies de diffusion de l'habitat pavillonnaire et de mise en œuvre de politiques de protection de la forêt.

De nombreux facteurs prédisposent la région à l'incendie de forêt : sécheresses climatiques, canicules, accumulation de végétation combustible due à la fermeture des milieux suite à la déprise agricole et à la moindre exploitation de la forêt, activités humaines. La multiplication des zones de contact entre habitat résidentiel et milieux naturels, appelées interfaces habitat-forêt, préoccupe les différents organismes chargés de la gestion du risque incendie de forêt sur le territoire. Ce type d'occupation de l'espace motive l'analyse du phénomène incendie de forêt, que ce soit dans des perspectives forestières (Office National des Forêt, Institut National de la Recherche Agronomique, Institut national de Recherche en Science et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture), d'aménagement du territoire (Direction Départementale des Territoires et de la Mer), de lutte et de protection des personnes et des biens (Services Départementaux d'Incendie et de Secours).

L'incendie de forêt est considéré traditionnellement comme un aléa « naturel ». Le terme « naturel » est sciemment mis entre guillemets, car l'incendie de forêt recouvre des caractéristiques tout-à-fait particulières : en effet, la majorité des aléas naturels ont des causes d'apparition et de développement principalement, voire exclusivement déterminées par des facteurs eux-mêmes strictement naturels (notamment la tectonique des plaques et le climat). L'aléa incendie de forêt est au contraire largement conditionné par des facteurs

anthropiques. Selon la base de données *Prométhée*, qui depuis 1973 fait office de mémoire du feu, 95 % des incendies de forêt sont liés à des activités humaines (mises à feu par accident, imprudence voire malveillance). La végétation méditerranéenne, bien que brûlant facilement, ne s'enflamme pas toute seule. Contrairement à d'autres forêts dans le monde (en particulier la taïga), la foudre ne provoque qu'une faible proportion des éclosions d'incendies. Les éruptions volcaniques, autre cause naturelle possible des incendies de forêt, sont rares autour de la Méditerranée. L'homme est en réalité responsable de la plus grande partie des feux, dans des proportions qui varient entre 92 % et 98 % selon les pays concernés (Velez, 2000 ; Colin *et al.*, 2001 ; Porrero Rodriguez, 2001).

Par ailleurs, les feux de forêt sont loin d'être un phénomène récent. L'histoire de la forêt méditerranéenne est traversée par une diversité d'usages ou de non usage des écosystèmes, et le retour périodique des incendies (Amouric, 1985). Le morcellement de la forêt d'autrefois, les cultures, l'éclaircissement du sous-bois, n'ont jamais empêché les incendies. De plus, les causes des incendies n'ont pas fondamentalement changé, autrefois comme aujourd'hui elles dépendent des activités humaines qui se déploient à l'intérieur des massifs forestiers. La répétition des feux est avant tout un fait culturel, inscrit dans un système de relations ambivalent entre la forêt et les sociétés puisque le feu était perçu soit comme un mode de gestion efficace par les communautés paysannes (Grove et Rackham, 2001 ; Landsberg, 1997), soit comme un danger par les élites politiques. Depuis plus d'un siècle, le territoire méditerranéen évolue. Le développement socioéconomique des dix dernières années a généré un déclin des activités agricoles et pastorales ainsi que l'abandon des espaces ruraux. Non seulement la déprise agricole conduit à la fermeture du paysage avec la progression de la forêt, notamment en Provence, mais elle s'effectue aussi au profit de zones urbanisées, tout particulièrement sur la bande littorale (Lee et Slak, 2007). La forêt offre un cadre de vie agréable, où l'homme y trouve la tranquillité grâce à une vie proche de la nature. L'interface habitat-forêt naît ainsi de ce processus qui combine la transformation des surfaces agricoles en zones de friches ou en zones forestières, et de façon concomitante, le développement de l'urbanisation sur ces nouveaux espaces et sur les espaces forestiers désormais peu exploités, faute de rentabilité (Lampin, 2009).

Ce constat nous invite immédiatement à explorer la composante du risque qu'est la vulnérabilité. Puisqu'en effet l'aléa n'a pas fondamentalement changé de nature, comment expliquer autrement l'évolution du risque ?

Par ailleurs, si l'on pense les interfaces habitat-forêt comme des espaces d'extrême vulnérabilité, encore faut-il en dégager la spécificité. Notre travail propose d'utiliser le géoconcept d'interface habitat-forêt, tel qu'il a été défini dans la thèse de C. Lampin (2009) comme clé de lecture du territoire méditerranéen français exposé au phénomène d'incendie de forêt, avec comme point de mire et enjeu, l'habitation résidentielle.

L'habitation résidentielle comme enjeu d'étude

À caractère « exceptionnel » ou « banal », l'incendie de forêt en interface est vécu comme une « violation de l'intimité » face à laquelle les particuliers ont souvent un sentiment d'impuissance. Le terme « habitat » appartient à la famille étymologique du mot « habit », emprunté au latin *habitus* « manière d'être », « maintien, attitude ». Il implique l'idée d'une certaine permanence, d'un lieu nécessitant le temps pour y avoir des habitudes. Son emploi dans l'objet géographique « interface habitat-forêt » peut porter à confusion, en effet, deux acceptions lui sont attribuées dans la langue française :

- (1) « *Milieu géographique propre à la vie d'une espèce animale ou végétale* » ;
- (2) « *Mode d'organisation et de peuplement par l'homme du milieu où il vit* ».

Notre travail s'intéresse à la seconde, que les géographes définissent aujourd'hui comme « *l'organisation spatiale (idéelle et matérielle) des espaces de vie des individus et des groupes* » (Lévy et Lussault, 2003). L'habitat renvoie aussi bien à la terre entière, la ville, le quartier mais aussi à la maison, l'espace domestique de la résidence.

Le mot « maison » est issu du latin *mansionem*, accusatif de *mansio* « séjour », amenant « lieu de séjour, habitation ». La maison est un objet complexe répondant aux besoins matériels, physiologiques, spirituels et affectifs de ses occupants (Siret et Rodriguez, 2006). Elle constitue un abri et a pour fonction de protéger contre les intempéries, les perturbations extérieures. C'est un espace approprié où les fonctions vitales peuvent s'effectuer sans contrainte (Guiraud, 1980).

Au sein du concept d'interface habitat-forêt, l'habitat sera abordé par sa structure spatiale, définie par C. Lampin (2009). Notre regard se concentrera principalement sur l'habitat résidentiel individuel. Idéalisé par la majorité des français, il est un marqueur d'identité, une prolongation de soi, considéré comme un investissement des plus importants dans la vie d'une personne en termes de confort, de sécurité physique et psychologique (Rodriguez, 2005).

Objet d'une grande aspiration pour les particuliers, construite par les aïeuls ou les occupants eux-mêmes, réfléchie, planifiée, la maison est le projet de toute une vie. Au-delà de la valeur mobilière, la maison constitue un patrimoine immobilier, un investissement financier qui assure le bien-être économique de sa descendance (Siret et Rodriguez, 2006). Le logement est le premier investissement des ménages, source d'attachement et de projection, sa valeur globale (matérielle et immatérielle) est, sinon inestimable, délicate à quantifier. L'habitat résidentiel est alors considéré comme un enjeu majeur par les particuliers, mais également dans le cadre d'une politique sociale.

Des économistes ont travaillé sur la question des valeurs immatérielles, introduisant alors la méthode des prix hédonistes (Waugh, 1929 ; Court, 1939). L'approche hédoniste, étayée par S. Rosen (1974), s'insère dans le cadre de l'évaluation des biens non-marchands. Elle permet d'établir la valeur, ou le plaisir dérivé, des attributs d'un bien. Un bien est alors considéré comme un assortiment d'attributs. Sa valeur est fonction de chacun de ses attributs. La valeur d'un attribut (aménités environnementales, caractère sentimental) est appelée le prix implicite (ou hédoniste) de l'attribut, car il ne peut être observé directement sur un marché. Il est cependant possible de l'estimer en analysant le prix d'un bien qui contient différentes quantités de chaque attribut sur un marché. Un autre concept, apparu dans la littérature économique il y a plus d'un siècle (Davenport, 1902), le consentement à payer (CAP) et ses méthodes sont destinés à déterminer un prix pour des sujets aussi divers que la valeur d'une vie humaine (Jennings et Jennings, 2000), le financement public des arts (Thompson *et al.*, 2002) ou la réunification de la Corée (Yoo, 2004). Cette recherche de « valuation » susceptible d'entrer dans le concept même de vulnérabilité tente de pallier l'absence de dimension de cette dernière. Elle constitue alors un coefficient utilisé par les gestionnaires pour hiérarchiser leurs actions. Cependant, nous pensons que la valeur d'un bien n'entre pas dans le calcul de la vulnérabilité. Elle ne sera donc pas développée dans cette thèse.

Dans ce travail de recherche, nous ne chercherons pas à quantifier la vulnérabilité sur la base du potentiel de perte économique. La quantification de la vulnérabilité se fera par la propension à l'endommagement. Notre approche se veut spatiale et axée sur les mécanismes de production des dommages. Face à l'étalement urbain, construit parfois sans préoccupation vis-à-vis du milieu physique, l'habitat résidentiel est le reflet d'une logique individualiste et économiste qui mène à construire dans des zones où les conséquences d'un incendie de forêt peuvent lui être fatales. Considéré comme un objet structurel, matériel, fonctionnel, l'habitat

individuel est rendu vulnérable. La réduction de la vulnérabilité de l'habitat individuel représente un enjeu de grande importance, commun aux acteurs publics et aux particuliers.

Objectifs et organisation de la thèse

La composante aléa du risque feux de forêt est de mieux en mieux connue. Plusieurs modèles spatiaux existent et sont couramment utilisés pour la production de cartes d'aléa valides à différentes échelles spatiales et temporelles (Haight *et al.*, 2004). En revanche, la vulnérabilité aux feux de forêt est généralement estimée empiriquement, et le plus souvent résumée à la présence ou l'absence d'enjeux surdéterminants, en particulier de biens bâtis et de personnes résidentes ou en transit récurrent. La discrimination des espaces à enjeux en fonction de leur niveau de vulnérabilité est pourtant un élément important pour l'aide à la décision d'aménagement aux échelles locales et micro-locales.

La relative rareté des événements feux induisant des dommages aux biens et les difficultés d'expérimentation en vraie grandeur limitent l'opérationnalité de l'approche expérimentale directe pour l'étude de la vulnérabilité. L'évaluation *ex-ante* de la vulnérabilité est donc le plus souvent fondée sur les dires d'experts, eux-mêmes issus de retours d'expériences monographiques, et non d'études expérimentales systématiques. L'expertise est l'un des deux piliers de la mise en œuvre du principe de précaution¹, au côté du développement et du renouvellement des procédures permettant d'associer le public à la prise de connaissance, à la réflexion et à la délibération sur les risques pouvant affecter la population, les biens et l'environnement. Pour procéder à l'évaluation des risques l'autorité publique doit se doter d'un cadre de recherche approprié, en s'appuyant notamment sur des comités scientifiques et sur des travaux scientifiques pertinents. L'autorité publique est responsable de l'organisation de l'évaluation du risque. Cette dernière doit être conduite de façon pluridisciplinaire, contradictoire, indépendante et transparente, et doit faire ressortir les avis minoritaires éventuels (Godard *et al.*, 2002). Dans ce travail, nous proposons un cadre rigoureux pour formaliser la connaissance des experts du risque incendie de forêt, provenant de disciplines différentes (forestiers, pompiers, gestionnaires, scientifiques). Face à la réalité complexe de la vulnérabilité, nous comptons sur la pluralité des regards disciplinaires, afin d'assurer une certaine objectivité. Une méthode multicritère, empruntée aux techniques d'aide à la décision, sert de socle à l'analyse des jugements des experts sur la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt. L'objectif est de capitaliser les meilleures connaissances individuelles actuelles, puis, par leur agrégation, d'extraire une expertise collective prenant en compte la multiplicité des points de vue.

La subjectivité des dires d'experts peut cependant limiter les possibilités d'extrapolation spatiale de l'évaluation, dans une perspective de cartographie pour l'aménagement des territoires. L'approche à dires d'experts doit alors être confrontée à la réalité du phénomène, par la mesure de l'endommagement des habitations, causé par les incendies de forêt en interface. Au cours de cette thèse, nous avons donc mené des enquêtes post-incendies de manière à emmagasiner le plus d'information possible sur l'endommagement des enjeux. Ainsi, la pertinence de l'approche à dires d'expert est évaluée par son application à un cas d'étude. À cette première confrontation, nous en associons une seconde fondée sur la modélisation de la physique du phénomène par simulation en laboratoire virtuel.

¹ Selon la définition légale apportée par la Loi Barnier (1995) et incorporée au Code de l'environnement, il s'agit du principe selon lequel « l'absence de certitude, compte tenu des connaissances scientifiques et techniques du moment, ne doit pas retarder l'adoption de mesures effectives et proportionnées visant à prévenir un risque de dommages graves et irréversibles à l'environnement à un coût économiquement acceptable ».

Ainsi, l'objectif de cette thèse est donc de proposer une démarche d'objectivation de l'évaluation de la vulnérabilité croisant deux approches : une approche multicritères de dires d'experts couplée à un modèle de simulation physique de l'exposition, le tout, confronté à l'endommagement réel observé lors d'un incendie de forêt en interface (Fig. 1).

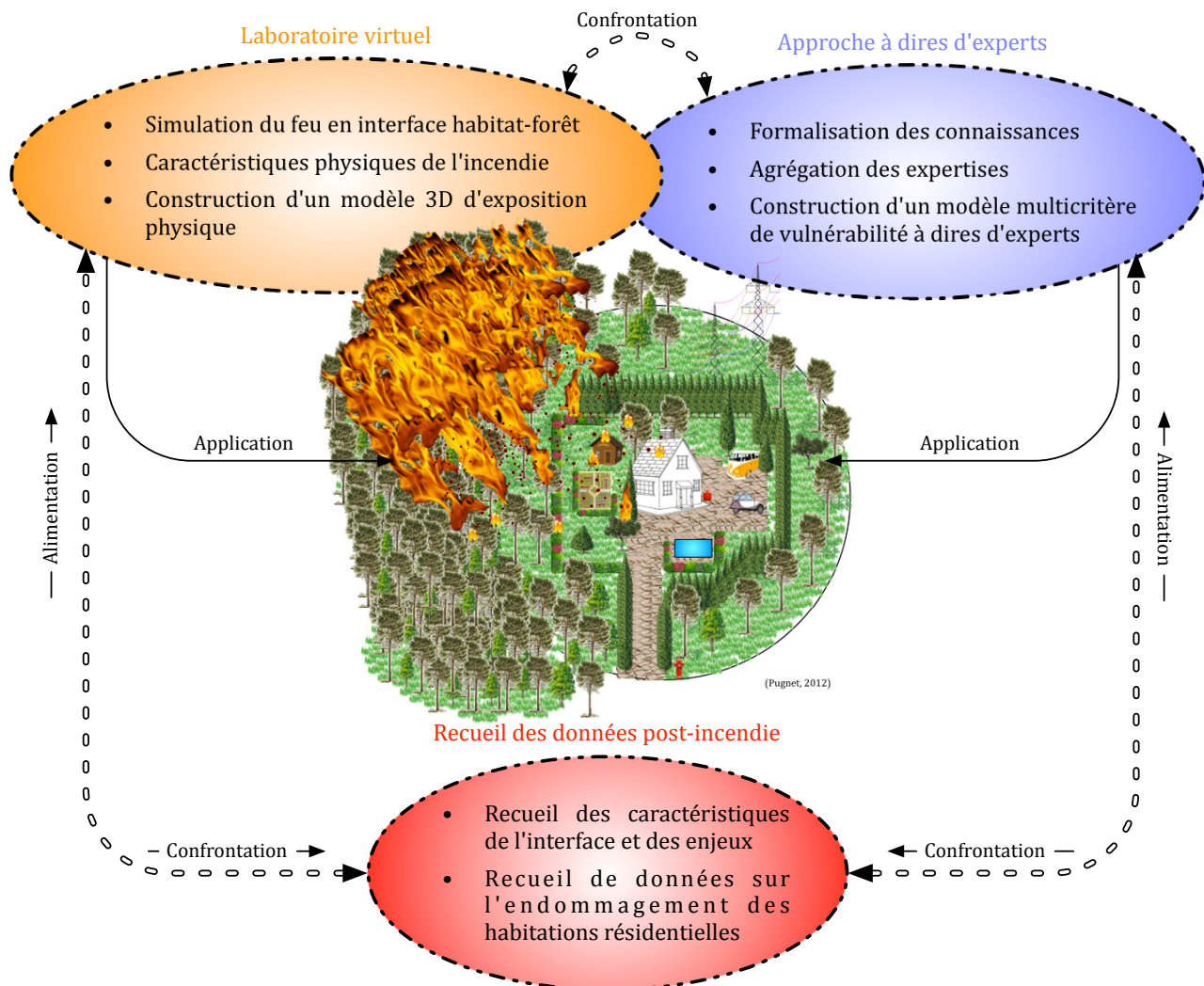


Fig. 1 : Démarche d'objectivation de l'évaluation de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt, à l'échelle de l'habitation résidentielle

La démarche poursuivie pour atteindre les objectifs de la thèse sera la suivante :

- Spécifier un modèle de vulnérabilité spatialisable, grâce à la formalisation de la connaissance des experts du risque incendie et de l'analyse multicritère. L'objectif est alors de produire des cartes de vulnérabilité, utiles aux gestionnaires, rendant possible la modélisation de l'endommagement des habitations résidentielles ;
- Vérifier la pertinence de l'approche à dires d'expert par la confrontation à un modèle d'exposition physique des habitations à l'incendie. L'objectif est d'aboutir à la caractérisation des mécanismes d'endommagement et d'en vérifier l'adéquation avec les dommages observés.
- En déduire qu'il est alors possible de mettre au point une méthode d'évaluation de la vulnérabilité innovante, faisant le lien entre l'intensité du feu et la sévérité des dommages.

La thèse s'organise en six chapitres :

- (1) Le **chapitre 1** porte sur l'interrogation des fondements du concept de vulnérabilité, son émergence sur la scène scientifique. Quelles sont les composantes de la vulnérabilité qui influencent les forces ou les faiblesses d'un territoire face à une perturbation naturelle ? Le chapitre se termine par la définition du concept de vulnérabilité adapté à la problématique des incendies de forêt ;
- (2) Le **chapitre 2** présente le contexte méditerranéen français au regard du risque incendie de forêt et une analyse des outils de gestion disponibles ;
- (3) Le **chapitre 3** expose les fondements de l'aide à l'évaluation en définissant la notion d'évaluation. Puis il définit le rôle de l'expertise dans le cadre du processus d'évaluation pour l'aide à la décision. Enfin, il détaille les différentes méthodes multicritères d'aide à la décision, et présente la méthode retenue pour la formalisation de la connaissance des experts et l'aide à l'évaluation de la vulnérabilité ;
- (4) Le **chapitre 4** identifie les critères pertinents de caractérisation de la vulnérabilité et présente la construction du modèle. Il développe la méthode d'agrégation des expertises individuelles
- (5) Le **chapitre 5** présente l'application de l'approche à dire d'expert à un cas d'étude. Il traite de la spatialisation de la vulnérabilité pour la production de cartes de vulnérabilité. Il établit des relations entre la vulnérabilité estimée à dire d'experts et l'endommagement observé des habitations (occurrence et sévérité des dommages) ;
- (6) Le **chapitre 6** confronte l'approche à dire d'experts et la simulation en laboratoire virtuel. La cohérence des deux approches est analysée au regard de l'endommagement observé, et une relation entre l'intensité simulée de l'incendie et la vulnérabilité estimée à dire d'experts est établie. Puis, il propose une méthode de modélisation de l'exposition des habitations à l'incendie de forêt. Ce dernier chapitre démontre la pertinence des deux approches combinées pour l'évaluation de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt. Il esquisse alors les apports potentiels des modèles et les perspectives qu'ils offrent sur le plan opérationnel.

Chapitre 1. Géographie des risques, quelle place pour la vulnérabilité ?

« Beaucoup a été conquis dans le domaine du risque, pour en faire un objet scientifique, pour l'arracher à l'empire des dieux. Le risque ne tombe pas du ciel : c'est un construit, technique, organisationnel, sociétal, qui se mesure et se gère. Bien plus encore : le risque, c'est le gisement même des opportunités. Sans risque, point de marges de liberté nouvelles. La vie, c'est le risque. Refuser le risque, c'est prendre des risques considérables. »

Patrick LAGADEC

<http://www.patricklagadec.net/fr/>

Ce premier chapitre propose un état des recherches autour du concept de risque et des notions associées dans le domaine disciplinaire de la géographie et des sciences humaines. Nous y interrogeons les fondements du concept de vulnérabilité, son émergence sur la scène scientifique, et les facteurs qui influencent les forces ou les faiblesses d'un territoire face à une perturbation naturelle.

La diversité des recherches dont il est fait mention dans les premières parties témoigne de notre volonté de considérer la problématique de la vulnérabilité des territoires de manière générale avant de focaliser notre attention sur la vulnérabilité liée à l'aléa incendie de forêt. En fin de chapitre nous introduirons le phénomène ainsi que les études sur les risques qui lui sont associées. Enfin, nous conclurons sur la définition de la vulnérabilité que nous adoptons pour mener notre étude.

1.1. Terminologie autour du concept de risque

La notion de risque représente une source intarissable d'interrogations pour de nombreuses disciplines : la sociologie, la psychologie, la religion, l'économie, les mathématiques... Chacune aborde la question selon des prismes de lecture différents. La géographie s'est également penchée sur l'étude des risques, adoptant une démarche axée soit sur les phénomènes physiques naturels (démarche naturaliste), soit sur l'interaction entre les sociétés humaines et l'environnement (démarche sociale).

1.1.1. Le risque

Le terme risque est un mot clé de notre monde contemporain. Aussi médiatisée qu'elle puisse être dans la société civile, la notion de risque reste complexe et polymorphe. Il suffit, pour s'en persuader, de se plonger dans les définitions trouvées dans les dictionnaires.

Sa définition la plus concise apparaît dans le dictionnaire Littré : *« péril dans lequel entre l'idée de hasard »*. Cette définition littéraire introduit l'idée d'un événement dommageable, d'un danger, couplé à la notion de hasard, d'où un caractère aléatoire dont découle la composante *aléa* du risque. En résumé, ce terme recouvre une dualité fondamentale réunissant deux notions indépendantes, celle de perte et celle de probabilité.

Le Petit Robert (2014) en propose trois :

- (1) *« Danger éventuel plus ou moins prévisible »* qui renvoie au terme de « danger, hasard, péril, inconvénient » ;
- (2) *« Éventualité d'un événement ne dépendant pas exclusivement de la volonté des parties et pouvant causer la perte d'un objet ou tout autre dommage »* (risques naturels,

risques technologiques, risques climatiques...). Par extension, « *Événement contre la survenance duquel on s'assure* » (Assurance multirisque habitation).

(3) « *Fait de s'exposer à un danger dans l'espoir d'obtenir un avantage* » (gain, chance).

Dans son étude critique sur la géographie des risques, P. Pigeon (2005) soulève une double ambiguïté liée à ces définitions. Selon le géographe, la première naît de l'opposition partielle entre une « *lecture exogène* » et une « *lecture endogène* » des risques : « *en effet, ces derniers sont ramenés à des dangers extérieurs (1) mais auxquels il est possible de s'exposer (3), d'où un événement qui ne dépend pas exclusivement de la volonté des parties (2)* ». De cette analyse découle l'idée des interactions entre la nature et les sociétés humaines.

La deuxième ambiguïté soulevée résulte du caractère incertain et potentiel de la notion de risque (1) et sur « *l'avéré avec la perte et le dommage* » (2). Cette dualité introduit « *le pari humain sur la réalisation ou non de l'événement partiellement contrôlable et sur l'utilisation possible de ses incidences* » (3). Cette analyse pose la question du dualisme nature-culture et de leurs interrelations, domaine privilégié de la pensée géographique (Ferrier, 2010).

Dans son étude sur la terminologie du risque, I. Kelman dresse le tableau des différentes définitions sorties de la littérature scientifique (Kelman, 2003) :

- Espérance mathématique de pertes en vie humaine, dommages aux biens et atteintes à l'activité économique au cours d'une période de référence et dans une région donnée, pour un aléa particulier. Le risque est le produit de l'aléa par la vulnérabilité (Stenchion, 1997) ;
- Risque (probabilité de perte) = impact d'un aléa * éléments exposés (enjeux) * vulnérabilité de ces enjeux (Blong, 1996 ; Granger *et al.*, 1999). L'augmentation ou l'atténuation de l'un de ces trois éléments provoque l'augmentation ou l'atténuation du risque (Crichton, 1999) ;
- Risque = Aléa * Vulnérabilité * Valeur de la zone exposée/Préparation (De La Cruz-Reyna, 1996) ;
- Le risque est la combinaison de la probabilité d'un événement particulier, avec l'impact que cet événement causerait si il se produisait. Les conséquences d'un événement peuvent être positives ou indésirables dans certains cas, on peut donc mesurer l'importance d'un risque par la formule : Risque = probabilité * conséquence (Helm, 1996 ; Smith, 1996 ; Sayers *et al.*, 2002).

Ces définitions mettent en lumière les conséquences négatives du risque (dommages, pertes...). Elles traduisent une probabilité d'occurrence (possibilité, espérance mathématique, potentielle) et formulent le risque par une fonction mathématique, où intervient un **aléa** (idée de hasard, probabilité d'occurrence d'un processus) potentiellement dramatique dans certaines conditions de **vulnérabilité**.

Dans le *Dictionnaire de la géographie* (Lévy et Lussault, 2003), les termes *aléa* et *vulnérabilité* ne sont pas mentionnés. Cependant, les auteurs abordent l'idée d'interaction entre la nature et les sociétés humaines, qui façonne le risque : « *les frontières entre les différentes catégories de risques tendent à se brouiller à cause de l'interconnexion des systèmes techniques, économiques, sociaux, naturels, politiques. [...] La distinction entre les risques naturels et anthropiques, par exemple, devient difficile à établir du fait de la transformation des milieux biophysiques par l'homme.* »

Toutes ces définitions s'accordent sur la bipolarisation du risque, entre aléa et vulnérabilité, ou Nature et Société (Thouret et D'Ercole, 1996). Selon V. November, « *la pensée sur le risque reste une pensée essentiellement externalisante. C'est-à-dire qu'elle le traite comme*

un objet externe aux espaces qu'il touche. Or le processus de traduction donne à penser que le risque est littéralement ancré dans les espaces » (November, 2006).

Considéré comme « objet géographique », le risque amène une double réflexion :

- la première, sur les relations complexes présentes au niveau d'un territoire, où tout semble interrelié ;
- la seconde, sur la construction sociale et technique des risques, dans un contexte de « *société du risque* » (Beck, 2001).

V. November propose alors de les réunir par l'intermédiaire d'une discipline, la géographie des risques (November, 2006). Le risque est ancré dans un contexte territorial spécifique, à travers le milieu physique (géologie, géomorphologie, climat, etc.) et social (population, usages, économie, etc.). Toute entreprise humaine comporte un risque, et par extension, il n'y a pas de risque sans hommes. Le risque apparaît donc là où il y a possibilité de voir se manifester un phénomène dommageable et où existent des éléments susceptibles d'être endommagés, du fait de leur vulnérabilité. L'espace est de fait une composante majeure du risque : « *l'espace sur lequel s'exercent les menaces n'est pas neutre, il constitue la composante intrinsèque du risque* » (Veyret, 2003).

La définition de l'aléa et de la vulnérabilité permet de préciser encore cette définition générale du risque, même si ces notions ne sont pas toujours définies de façon claire.

1.1.2. L'aléa

Étymologiquement, le terme *aléa* est issu du latin *alea*, qui signifie « *jeu de dés, hasard* » et fait donc référence au caractère aléatoire, dont dépend un événement incertain et imprévisible. Le Petit Robert en donne la définition suivante :

« *Événement imprévisible, tour imprévisible que peuvent prendre les événements* ».

L'aléa renvoie donc à la possibilité d'apparition d'un phénomène ou d'un événement résultant de facteurs ou de processus qui échappent au moins en partie à l'homme. Il apparaît ici comme un phénomène indépendant, extérieur, isolé, n'ayant aucune incidence positive ou négative. Cependant, ce terme est connoté, l'événement, processus ou phénomène probable, est perçu comme une menace par la société, à partir du moment où il devient dommageable.

Notre étude s'intéresse à l'aléa incendie de forêt, considéré comme naturel. Un aléa naturel provient de l'espace physique naturel (séisme, tsunami, tornades, feux de forêt, inondations...). Cependant, qualifier un aléa de « naturel » peut amener certaines confusions (D'Ercole et Pigeon, 1999) : l'homme a sa part de responsabilité dans l'ampleur du phénomène d'origine naturelle en l'exacerbant ou en le déclenchant. En effet, même si une majorité des aléas naturels (sécheresses, éruptions volcaniques...) ont des causes d'apparition et de développement principalement, voire exclusivement déterminées par des facteurs strictement naturels (caractéristiques du milieu physique et du climat notamment), celui qui intéresse nos recherches, l'incendie de forêt, est au contraire largement conditionné par des facteurs anthropiques : 95 % des incendies de forêt sont liés à des activités humaines, et leur développement se voit influencé par l'aménagement du territoire.

Dans un sens restreint, emprunté au langage des probabilités, l'aléa est défini comme la « *probabilité d'occurrence du phénomène* » (Dauphiné, 2003). Y. Veyret et N. Meschinet de Richemond (2003) définissent l'aléa comme un « *événement possible qui peut être un processus naturel, technologique, social, économique et sa probabilité de réalisation* ». Évaluer l'aléa, demande de caractériser trois critères : une probabilité d'occurrence ou fréquence, une extension spatiale et une intensité (Beck, 2006). « *Une magnitude (composante énergétique),*

une probabilité d'occurrence (composante temporelle) et une aire d'impact (composante spatiale) » peuvent en effet lui être attribuées (Thouret et Léone, 2003). Cependant, « sa dimension spatiale n'est pas systématiquement mise en avant » (Peltier, 2005), or, l'espace affecté par l'aléa est déterminant dans la gestion du risque. Certains auteurs précisent ces caractéristiques en les inscrivant à la fois, dans une dimension spatiale et temporelle. L'aléa affecte une aire, un territoire pendant une durée indéterminée (Dauphiné, 2003).

L'aléa se révèle difficilement mesurable (Dauphiné, 2001). Les problèmes concernent le choix des variables à prendre en compte pour évaluer l'intensité du phénomène, la durée, l'espace concerné, la probabilité de son occurrence. *Probabilité* et *aléatoire* priment, soulignant l'incertitude et l'imprévisibilité des phénomènes. Même si l'instrumentation de mesures et les modélisations se perfectionnent et permettent la prévision d'un évènement, il reste néanmoins impossible de tout prévoir.

L'exposition à un aléa peut être définie comme le fait « *d'être soumis aux effets redoutés et potentiels d'une source de danger* » (Beck, 2006). Sa représentation cartographique passe par la délimitation spatiale d'un aléa d'une intensité donnée.

1.1.3. La vulnérabilité

La terminologie existante en termes de vulnérabilité est très vaste. Étymologiquement, le terme *vulnérabilité* est issu du latin *vulnerabilis*, lui-même tiré de *vulnerare*, qui signifie « blesser », et de *vulnus*, qui désigne la « blessure ». Le terme désigne tout à la fois le dommage et la propension à subir ce dommage. Deux acceptions que l'on retrouve dans les définitions issues du dictionnaire (le Petit Robert, 2014) :

- « *Qui peut être blessé, frappé par un mal physique* » ;
- « *Qui peut être facilement atteint, se défend mal* ».

Ainsi, est vulnérable ce qui peut être atteint du fait de son exposition, qui est sensible aux attaques, qui possède des capacités de défense finies. La vulnérabilité, au sens strict, s'entend comme une disponibilité à la blessure, elle a longtemps été considérée sous l'angle de l'endommagement et du coût, donc mesurable (Léone *et al.*, 1995 ; Veyret, 2006). Si, cette définition dénote la passivité de la société (Veyret, 2004 ; Reghezza, 2006), celle de R. d'Ercole (1994) la considère comme « *la propension d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique* ». J.C. Thouret (1996) la complète en appréciant la vulnérabilité comme « *un système de facteurs structuraux (socio-économiques, culturels, fonctionnels et institutionnels), conjoncturels (dysfonctionnements) et géographiques (caractéristiques de l'impact), qui influencent la capacité de réponse sociale au désastre et en font ainsi varier les effets* ».

Ainsi, ces définitions prennent en compte les valeurs sociales et culturelles, et amènent alors la notion d'enjeux, représentée par les personnes, les biens publics et privés, les activités économiques, l'environnement, exposés aux aléas (Veyret et Meschinot de Richemond, 2003 ; Ledoux, 2006). Selon leur nature, les enjeux peuvent être classés en différents types :

- « *patrimoniaux, humains, économiques, fonctionnels, identitaires ou territoriaux et politiques* » (Thouret et Léone, 2003).
- « *les biens des particuliers, les enjeux économiques, les enjeux agricoles, les infrastructures et les enjeux humains* » (Ledoux, 2006).

La vulnérabilité des enjeux exposés représente leur susceptibilité à subir des dommages. Elle suppose une exposition à la menace (Cannon, 1994). Elle dépend alors des capacités d'anticipation, de réaction, de résistance et de reconstruction d'une société face aux impacts

d'un aléa. Selon certains auteurs, ces capacités sont modulées par un ensemble complexe et évolutif de caractéristiques d'un individu ou d'un groupe d'individus qui habitent un espace naturel, social et économique (Cannon, 1994 ; Wisner *et al.*, 2004 ; Benson et Twigg, 2007). Les capacités incluent les ressources (environnementales, sociales, économiques, politiques, culturelles et institutionnelles) dont disposent les communautés pour faire face aux menaces et à leurs impacts (Davis *et al.*, 2004 ; Dekens, 2007).

La vulnérabilité se différencie également selon la nature des éléments exposés, elle peut être humaine, socio-économique et environnementale (Veyret et Meschiné de Richemond, 2003) mais aussi structurelle et conjoncturelle (Vinet, 2002). Tout comme l'aléa elle possède une dimension spatiale et temporelle (Peltier, 2005) : « *la vulnérabilité évolue à toutes les échelles de temps : dans le temps court, parce que la répartition de la population dans un territoire se modifie constamment au fil de la journée, de la semaine, de l'année. (...). La vulnérabilité évolue également dans un temps plus long, au fil de l'urbanisation ou du dépeuplement d'un lieu* ».

Ces différentes visions et définitions confortent l'idée selon laquelle, bien que difficilement modélisable, la vulnérabilité a sa géographie.

1.1.4. La catastrophe

Du grec *katastrophê*, la catastrophe signifie « *bouleversement* » induisant un « *malheur effroyable et brusque* » (Petit Robert). Emprunté au latin *catastrophā*, « *coup de théâtre* », il prend également le sens de « *dénouement* », sans jugement négatif ou positif.

En géographie, plus particulièrement pour la théorie des catastrophes², une catastrophe « *n'est pas un résultat, mais un lieu des paramètres et des variables d'entrées du système qui permet de passer brusquement d'une morphologie ou d'un état à une ou un autre, à partir d'une variation continue de ces paramètres et variables d'entrée* » (Lévy et Lussault, 2003). On retrouve tout de même le caractère brusque du changement d'état, et l'absence de connotation positive ou négative. À ce sujet, certains auteurs reconnaissent une connotation positive aux catastrophes (November, 2002), lorsque celles-ci créent une occasion d'amélioration pouvant apporter aux acteurs du risque des bénéfices.

Le risque se caractérise par une emprise spatiale et temporelle spécifique, « *il participe à la fois du probable et de l'antérieurement réalisé* » (Pigeon, 2005). En ce sens, il est à différencier de la catastrophe. La littérature insiste sur cette distinction (Marco *et al.*, 1998 ; Dauphiné, 2001 ; Veyret, 2003 ; Gaillard *et al.*, 2009). Cependant « *un risque irréalisable ne peut être un risque, et tout événement dommageable suppose un risque antérieur* » (Pigeon, 2005). F. Albouy (2002) corrobore P. Pigeon (2005) : « *une fois réalisée, la catastrophe devient un risque* ».

D'après Dauphiné (2001), le risque est par définition potentiel, la catastrophe, elle, réelle, le révèle, le concrétise. L'auteur parle « *d'espace aérolaire* » du risque, identifiable et cartographiable, en revanche, il perçoit la catastrophe comme « *ponctuelle* », elle appartient à un « *espace factuel* », correspondant à la matérialisation du risque. Cependant, même si la catastrophe est ponctuelle, ses effets s'exercent sur des vastes surfaces, pendant une durée prolongée (Ramade, 1987).

Risque et catastrophe se rejoignent sur la notion de perception : le premier « *n'est pas un concept simple, sa perception n'est pas la même d'un individu à l'autre et sa définition varie*

² Formulée par René Thom (1923-2002), la théorie des catastrophes traite de la stabilité du comportement de systèmes différentiels particuliers, les systèmes gradients (Lévy et Lussault, 2003)

selon les situations » (Albouy, 2002) ; la seconde, par le dommage socialement constaté, entraîne les réactions de la population « *à travers le filtre des représentations* » (Peltier, 2005).

1.2. Évolution et complexification du risque

La plupart des auteurs (Kervern et Rubise, 1991 ; Dauphiné, 2001 ; Veyret, 2004) proposent une vision de l'histoire dans laquelle le risque évolue au fil des siècles et des progrès technologiques et scientifiques.

Dans l'antiquité, les Hommes sont effrayés, anéantis, impuissants face aux calamités (guerres, famines, épidémies, etc.). Leur quotidien est une sorte de confrontation permanente à des aléas plus ou moins dommageables (conflits, invasions, aléas météorologiques). Ces dangers ou hasards de la vie quotidienne sont vécus comme des punitions divines, et renvoient à la notion de fatalité. À cette époque, l'Homme est empreint de superstition, la religion panse les plaies et tente de prévenir les fléaux en développant les prières et les sacrifices lors de cérémonies rituelles. La foi ne laissant pas de place au hasard, le risque échappait à toute logique. Pourtant, certains auteurs de l'antiquité présente déjà les différentes facettes du risque. C'est le cas de Platon, qui dans *La République*³, propose un dialogue entre Socrate et Glaucon au sujet des risques liés à la guerre :

« - *Tout animal lutte plus courageusement en présence de sa progéniture.*

- *Oui, mais il y a grand **risque**, Socrate, qu'éprouvant l'un de ces revers qui sont fréquents à la guerre, les guerriers ne périssent, avec leurs enfants, et que le reste de la cité ne puisse se relever d'une telle **perte**.*

- *Tu dis vrai, repris-je; mais penses-tu que notre premier devoir soit de ne jamais les **exposer au danger** ?*

- *Nullement.*

- *Eh bien! s'ils doivent tenter leur **chance**, n'est-ce pas dans les cas où le succès les rendra meilleurs ?*

- *Si, évidemment.*

- *Or, crois-tu qu'il importe peu que des enfants destinés à devenir des guerriers voient ou ne voient pas le spectacle de la guerre, et que la chose ne vaille pas le **risque** ? »*

À travers la bouche de Socrate, Platon met en lumière l'ambiguïté constituant le terme « risque », dans ses plus profondes racines étymologiques, ici issu du grec *kindunos* (péril, danger). Ce terme a, plus tard, donné naissance aux cindyniques (Kervern et Rubise, 1991), sciences du danger, qui étudient les risques naturels, technologiques, domestiques... et leurs préventions. Ce dialogue évoque à la fois l'idée des conséquences dommageables (**pertes**) qui découlent du risque, et de l'espérance (**chance, valoir le risque**) que l'homme fonde dans la prise de risque par **l'exposition au danger**. L'idée d'une place à l'action humaine face au risque semble déjà présente chez Platon.

Les progrès de la science changent cette vision fataliste du risque. L'arrivée de la théorie probabiliste marque ce glissement. En 1654, les correspondances entre Pierre de Fermat et Blaise Pascal sont à l'origine de la théorie des probabilités. Ces progrès ont permis aux hommes de quantifier la possibilité qu'un événement se produise (ce que l'on appelle la probabilité d'occurrence). L'origine de la perception probabiliste du risque est ainsi,

³ Platon (IV^e siècle av J.-C.), *La République*, éd. Pléiade, 1950, partie V, 467b-467c

historiquement, liée aux jeux de hasard. Par la suite, Daniel Bernoulli, en 1738, dans *Specimen theoriae novae de mensura sortis*⁴ (« *Théorie sur la mesure du risque* ») apporte la première définition scientifique : « *le risque est l'espérance mathématique d'une fonction de probabilité d'événements* » (Bernoulli, 1738). En d'autres termes, il s'agit de la valeur moyenne des conséquences d'événements affectés de leur probabilité. L'homme commence à entrevoir les possibilités d'agir sur leur milieu, les savants étudient les phénomènes naturels et peuvent en donner une explication rationnelle, selon une démarche scientifique moderne.

La catastrophe ne tient plus aux explications théologiques, mais à la physique et ses lois universelles. En 1755, un autre tournant est marqué, celui de la « socialisation du danger ». La responsabilité des hommes est aussi en cause, dans la mesure où ils occupent des régions exposées à des dangers connus. Le tremblement de terre ayant ravagé la capitale portugaise fût l'objet d'une querelle opposant Rousseau à Voltaire. Le premier écrivit en réaction aux poèmes du second sur la « *loi naturelle et le désastre de Lisbonne* » :

« ... je montrais aux hommes comment ils faisaient leur malheur eux-mêmes, et par conséquent comment ils pouvaient l'éviter...

... La plupart de nos maux physiques sont encore notre ouvrage. Sans quitter votre sujet de Lisbonne, convenez, par exemple, que la nature n'avait point rassemblé là vingt mille maisons de six à sept étages, et que si les habitants de cette grande ville eussent été dispersés plus également, et plus légèrement logés, le dégât eût été beaucoup moindre, et peut-être nul. [...] Vous auriez voulu, et qui ne l'eut pas voulu ! que le tremblement se fût fait au fond d'un désert. Mais que signifierait un pareil privilège ? [...] Serait-ce à dire que la nature doit être soumise à nos lois ? » (Rousseau, 1756, *Lettre sur la providence*).

Rousseau récuse l'idée d'une « punition divine », il responsabilise l'homme dont le rôle est de prévenir les conséquences des catastrophes. Le philosophe marque également le passage plus ou moins net d'une menace exogène appréhendée par l'aléa, à une menace endogène caractérisée par la vulnérabilité des sociétés.

Tout au long des XIX^e et XX^e siècle, l'évolution entre une conception focalisée sur l'aléa et le développement, en parallèle, d'une approche sur la vulnérabilité nourrit les débats dans la communauté scientifique. M. Reghezza (2006) identifie trois temps dans cette évolution :

- 1^{er} temps : le risque est réduit au processus physique, le risque est l'aléa que l'on cherche à contenir par des solutions techniques.
- 2^{ème} temps : le risque est compris dans sa dimension sociale. Dans les années 1950, les géographes de l'école de Chicago se focalisent sur les enjeux placés dans une situation d'exposition par rapport à un danger. Ils s'interrogent sur la capacité de réponse d'une société face à la menace.
- 3^{ème} temps : remise en question du caractère naturel du risque et des catastrophes, glissement vers la dimension sociétale du risque. Le risque réside dans la vulnérabilité des enjeux et dans la qualité de la réponse de gestion.

Dans cette dernière phase, seul le phénomène est considéré naturel, sans exposition, sans perte potentielle, sans enjeux humains et matériels,... le risque n'existe pas. Certains auteurs parlent alors d'anthropisation des aléas (Bourdières, 2008), où les causes et le développement des phénomènes peuvent être en lien avec l'activité humaine (Tricart, 1978 ; Pigeon, 1998).

⁴ *Specimen Theoriae Novae de Mensura Sortis, Commentarii Academiae Scientiarum Imperialis Petropolitanae, Tomus V [Papers of the Imperial Academy of Sciences in Petersburg, Vol. V], 1738, pp. 175-192.*

1.3. D'un paradigme l'autre

1.3.1. Le paradigme techniciste aléa-centré

Longtemps naturaliste, la géographie française a d'abord été préoccupée par l'analyse de l'aléa (Veyret et Reghezza, 2005). Les phénomènes naturels ou anthropiques menaçants, extrêmes en magnitude et rares dans le temps, sont le plus souvent considérés sous l'angle de leur dimension extraordinaire. Cette approche a dominé la recherche sur les risques depuis le début du XX^{ème} siècle et jusque dans les années 70 (Hewitt, 1983). Les géographes se focalisent sur l'analyse des processus physiques et considèrent, indépendamment, les catastrophes du contexte quotidien dans lequel évolue la société. Centrées sur l'aléa, les recherches se compartimentent : aux sciences physiques et naturelles incombe l'étude du phénomène naturel, aux sciences appliquées et à l'ingénierie l'élaboration et la mise en œuvre des solutions techniques, aux hommes politiques et à l'administration, la prise de décision sur l'opportunité de réaliser ou non les travaux préconisés.

Les modes de gestion se technocratisent, l'approche techniciste succède à la fatalité, la catastrophe est désormais « *l'effet de causes, le résultats de processus* » (Larrere, 1993). L'étudier, c'est privilégier la connaissance physique de la menace. Le paradigme aléa-centré repose alors sur l'illusion d'une éradication possible du danger, déconnecté de son contexte.

L'Europe et les États-Unis voient l'émergence de la culture de l'ingénieur et des analyses coût-bénéfice. Le souci est à l'optimisation, comme le soulève M. Reghezza, en décrivant la politique de gestion des inondations du Mississippi (Reghezza, 2006). L'aménagement des bassins versants doit répondre aux besoins d'exploitation de la ressource hydrique, aux besoins d'extension de l'agriculture ainsi qu'à ceux de l'urbanisation. Les ingénieurs doivent proposer le meilleur aménagement possible, économiquement acceptable par les décideurs. Face aux inondations, les moyens structurels déployés sont ainsi colossaux, issus du domaine de l'ingénierie, pour tenter de contrôler l'aléa : en 1936, le gouvernement fédéral approuve le *Federal Flood Control Act*, qui prévoyait la réalisation de grands ouvrages hydrauliques, barrages, déviations de cours d'eau et digues (Burton *et al.*, 1978).

Ce paradigme repose sur trois piliers (Reghezza, 2006) :

- La gestion des catastrophes doit être rationnelle et s'appuyer sur l'expertise scientifique ;
- La catastrophe est d'origine naturelle, elle est la conséquence d'un processus physique, exogène à la société, qu'il s'impose de maîtriser voir d'éradiquer ;
- Le contrôle du processus physique requiert des solutions techniques, dont l'application doit être économiquement justifiée.

Ainsi, la catastrophe est réduite à l'aléa, qualifié sous le terme *hazard* en anglais, vision critiquée par J.K. Hewitt, qui l'affuble du terme « *hazard paradigm* » et reproche son caractère réducteur (Hewitt, 1998). Une répartition tripartite des tâches domine : recherche sur les aléas, planification des actions pour la gestion des aléas, élaboration de mesures d'urgence pour la gestion de crise.

Peu à peu, le terme *risk* se substitue à *hazard*. À ces deux termes pourtant synonymes, sont associées des pratiques distinctes. Le terme *risk* est perçu comme une façon scientifique et quantitative d'aborder la question de la probabilité de dommage, par le biais des statistiques, en revanche, *hazard* renvoie à une approche visant l'amélioration des connaissances sur les phénomènes. Ce basculement est bénéfique et permet des avancées considérables dans le domaine de la gestion des risques en affinant les connaissances sur

l'aléa (période de retour, intensité), ce qui permet la mise au point de systèmes de veille et d'alerte (Giro, 2002 ; cité par Reghezza, 2006), à la base des politiques de prévention et de protection. De plus, la prise de conscience collective du risque amène à penser le problème au-delà de la seule question des phénomènes naturels menaçants.

1.3.2. L'amorce d'un basculement

Au début du XIX^{ème} siècle, la géographie américaine se détache progressivement de ses origines naturalistes (Reghezza, 2006). H.H. Barrows introduit sa vision d'une géographie prônant une « *écologie humaine* » : « *ce n'est pas le fait humain qui constitue la géographie, ni non plus le fait environnemental, c'est la relation qui peut exister entre les deux [...] La géographie est la science des relations* » (Barrows, 1923). Selon l'auteur, la géographie vise « *l'ajustement de l'homme à l'environnement et non à l'influence de cet environnement* ».

Les risques vont alors être abordés sous le vocable de « *Natural Hazard* », liant processus physique et activités humaines (Bourdières, 2008). Ce sont les prémices du risque en tant qu'objet social. La substitution de la notion d'aléa par celle du risque démontre l'insuffisance de la première à répondre au problème. Se développent alors des approches sur l'interaction entre les phénomènes et les enjeux : les études d'impact, premières analyses de la vulnérabilité d'endommagement. On cherche alors à déterminer le degré d'endommagement, ou degré de perte pour asseoir la gestion des risques sur le principe coût-bénéfice et la logique assurancielles (Starr, 1969). Ces approches présentent des limites du fait de la difficulté de l'évaluation monétaire pour les biens immatériels : « *les coûts directs immédiats et latents (préjudices corporels, habitats et activités socio-économiques), les coûts indirects, à terme (moyen de production, emploi, reconstruction), sont mesurables. Les atteintes au patrimoine humain, écologique, culturel et esthétique et la réadaptation sont également importantes, mais restent difficiles à évaluer avec précision* » (Thouret et D'Ercole, 1996).

Aux États-Unis, dans les années 1950 et vingt ans après la mise en place des grandes politiques d'aménagement, des géographes de l'École de Chicago, influencés par H.H. Barrows, amorcent des enquêtes sur les plaines inondables américaines (White *et al.*, 1958). Ils cherchent à comprendre l'implantation humaine sur les sites dangereux, mais aussi évaluer le fonctionnement des aménagements hydrauliques réalisés par le gouvernement. Les résultats de l'enquête sont alarmants : les dommages économiques provoqués par les inondations n'ont cessé d'augmenter, pendant que des sommes considérables étaient investies dans les ouvrages de protection (White *et al.*, 1958). S'entament alors des réflexions alternatives autour des programmes d'information et de sensibilisation des populations. Ces travaux aboutissent à la publication d'un ouvrage, *Natural Hazards : Local, National, Global* (White, 1974). Cet ouvrage pose les bases des interactions entre l'homme et l'environnement, par l'étude des réponses des sociétés exposées à des menaces, afin de contribuer à la mise en place de politiques de prévention pertinentes :

- la démarche systémique, centrée sur les interrelations homme/environnement ;
- l'étude de la perception des risques par les sociétés, sous forme d'entretiens et de questionnaires.

La conscience des faiblesses, que présentent les solutions purement techniques, s'installe. Les sociétés modernes ont tout à gagner dans l'association des mesures d'aménagement et des actions sur la société. L'idée de réponse marque un pas décisif vers la notion de vulnérabilité (Reghezza, 2006). De nombreux travaux soutiennent la thèse selon laquelle les hommes interagissent constamment avec le monde naturel (White, 1960 ; Burton et Kates, 1964 ; White, 1968 ; Hewitt et Burton, 1971 ; White, 1973 ; Burton *et al.*, 1978). Les études sont centrées sur la modélisation des comportements humains face aux risques. En 1975, la

collaboration du géographe G.F. White et du sociologue E. Haas débouche sur l'idée que la recherche sur les risques doit désormais prendre en considération des facteurs économiques, sociaux et politiques (White et Haas, 1975). Ils positionnent ainsi le curseur d'analyse sur la « réponse sociale » au risque (*coping capacity*), et l'interaction nature-culture. En 1978, la « théorie générale d'adaptation au risque » est formalisée : *General hazard coping theory* (Burton *et al.*, 1978). Les géographes de Chicago attirent l'attention sur la capacité des sociétés à faire face à l'aléa, déterminante pour réduire leurs impacts et contenir les catastrophes. La focalisation sur le processus physique ne permet pas de comprendre la survenance de la catastrophe, il manque la dimension sociale au problème. Dans ces conditions, « *la catastrophe est vue comme contingente, dans la mesure où elle dépend avant tout de la réponse de la société exposée. Les aléas naturels ne conduisent pas nécessairement à des catastrophes* » (Reghezza, 2006).

En France, le géographe P. Pigeon (2005) a porté sa réflexion critique sur le conditionnement des approches en géographie des risques. Il montre le caractère déterministe et dichotomique de l'approche opposant « *la nature agissante et les sociétés humaines victimes passives* ». L'approche aléa-centrée conditionne, selon lui une vision déterministe du risque : « *En géographie, les aléas représentent classiquement un processus actif, causes premières des dommages qui leur sont imputés. Selon cette approche, il semble logique qu'ils occupent la première place du couple. Partiellement ou totalement inattendus, ils s'imposent finalement aux sociétés humaines, implicitement passives, comme des événements qui leur sont à la fois extérieurs et destructeurs* » (Pigeon, 2005). Le couple, selon P. Pigeon, est donc composé d'un aléa actif destructeur, et d'enjeux « *supports sensibles, passifs, conséquences des contraintes dites naturelles, selon les termes de la bibliographie* ». La cause du risque trouverait donc sa source dans la nature, les relations aléa-enjeux sont alors monocausales et linéaires, supposées déterministes.

1.3.3. Un paradigme nouveau, la vulnérabilité

La notion de vulnérabilité apparaît explicitement dans l'article, *Taking the Naturalness out of Natural Disasters* (Wisner *et al.*, 1976). C'est un véritable concept qui est introduit et ne cessera de s'enrichir. Les auteurs énoncent que « *les catastrophes marquent l'interface entre un phénomène physique extrême et une population humaine vulnérable* ». Ils posent leur postulat : la probabilité d'occurrence du phénomène physique extrême est constante, ainsi la seule explication logique à l'augmentation des dommages causés à la société est à rechercher dans la vulnérabilité croissante de celle-ci (Wisner *et al.*, 1976).

Jusqu'à présent considérées comme exogènes à la société, les catastrophes se révèlent à la lumière des facteurs endogènes à celle-ci et posent la question des conséquences différentes engendrées par des aléas de nature et de force équivalentes. La passivité des populations est remise en question, et la centralité de l'aléa est relayée, parfois même évacuée, au profit de la vulnérabilité des peuplements humains. Cet article marque un tournant décisif, propulsant la vulnérabilité comme objet de connaissance, mais aussi d'action, qu'il faut chercher à réduire.

« *Le risque n'est plus seulement l'aléa ; il intègre également la notion de vulnérabilité, représentée par les sociétés* » (Faugères et Noyelle, 1992). S'engage alors une approche croisant et confrontant les *types, facteurs, éléments, indicateurs* de vulnérabilité.

De nombreux auteurs révèlent les racines socio-économiques des catastrophes : les conditions de vie des populations et les difficultés de réponses induites par la société engendrent une catastrophe lors de l'occurrence d'un aléa naturel (Cannon, 1994 ; Kelman, 2006). Les catastrophes sont des processus de long terme qui résultent des décisions humaines, des attitudes, des valeurs, des activités et de la culture qui affectent la vulnérabilité

et la capacité de réponse (Kelman, 2006). Elles ne doivent donc pas être analysées comme le résultat systématique de l'impact d'un aléa, ni considérées comme des événements à part, mais au contraire reliées à la pauvreté et au développement (Cuny, 1983).

De façon plus générale, une corrélation entre la pauvreté et les victimes des catastrophes est établie (Hewitt, 1983 ; Quarantelli, 1998 ; Fara, 2001). Sont introduits des critères socio-économiques, considérés comme la cause première des catastrophes. L'aléa peut certes causer une catastrophe, mais seulement s'il affecte une population vulnérable : c'est essentiellement cette dernière « *qui décide du fait qu'un aléa reste un aléa, ou que, par un contact avec une population vulnérable, cet aléa se transforme en catastrophe* » (Prowse, 2003). La vulnérabilité est liée à des facteurs structurels, avec en chef de file et facteur explicatif, la pauvreté. En ce sens, « *la vulnérabilité serait un symptôme de la pauvreté* » (Reghezza, 2006).

Selon M. Reghezza, l'approche constructiviste vient compléter et renforcer cette idée. Elle amène l'idée d'une vulnérabilité socialement construite, et précise les processus socio-économiques et politiques, qui en sont à l'origine : structures familiales ou sociales, économie du groupe (collective, libérale...), absence d'accès au crédit et/ou à la propriété, discrimination raciale ou sexuelle, taux d'alphabétisation, opportunité d'ascension sociale par l'éducation, etc. De nombreux auteurs ont adopté cet angle d'analyse (Cutter, 1995 ; Wisner, 1998 ; Fordham, 2000 ; Denton, 2002 ; Cannon, 2002 ; Gaillard, 2006), considérant la vulnérabilité comme un problème de et non pour la société, endogène et non exogène.

En France, l'introduction de la vulnérabilité est plus tardive. C'est en 1987, sous l'impulsion des sociologues J. Theys et J.-L. Fabiani, qu'apparaît l'ouvrage *La société vulnérable* (Fabiani et Theys, 1987). Ces sociologues mettent en lumière « *un basculement de la problématique du risque* » en soulevant l'accroissement du danger au sein des sociétés contemporaines. Les dangers ne sont ni plus nombreux, ni plus intenses, cependant la vulnérabilité des sociétés qu'ils frappent a augmenté (Fabiani et Theys, 1987). Le sentiment d'insécurité va croissant alors même qu'un appareil sécuritaire sans précédent est mis en place.

J. Theys et de J.-L. Fabiani ouvrent la voie à une nouvelle approche des catastrophes et des risques naturels au travers du thème de la vulnérabilité. En 1991, la thèse de R. D'Ercole assoit le concept de vulnérabilité au sein de la géographie française (D'Ercole, 1991).

Date	Événement
1923	Discours à l'Association de géographes américains : H.H. Barrows fonde l'écologie humaine. Mise en exergue du concept d'ajustement de l'homme à son environnement
1923-1942	G. F. White fait de la question des inondations un objet géographique. L'accent est mis sur la capacité d'adaptation au risque naturel
1942-1970	L'école de Chicago se structure autour du thème des risques naturels. Mise en évidence de la dimension sociale du risque et de l'importance de la capacité à faire face (coping capacity)
1970-1975	La collaboration de G. F. White et des sociologues débouche sur l'idée de vulnérabilité
1976	Article fondateur de B. Wisner dans <i>Nature</i> qui fait de la vulnérabilité un concept scientifique
1970-1980	Écoles behaviouriste et structuraliste retrouvent le concept de vulnérabilité sociale
Années 1980	Critique de plus en plus virulente du paradigme technocentriste
1987	Publication de la <i>Société Vulnérable</i> de J. Theys et J.-L. Fabiani
Années 1990	<i>International Decade for the Natural Disaster Reduction</i>
1990-1994	Le concept de vulnérabilité se diffuse dans la géographie française
1994	Conférence de Yokohama, publication de l'ouvrage de I. Blaikie. La réduction de la vulnérabilité devient une priorité de la lutte contre les catastrophes naturelles

Tab. 1 : Bilan sur la genèse du concept de vulnérabilité en sciences sociales (Reghezza, 2006)

1.4. Évaluation de la vulnérabilité dans les sciences humaines et sociales

La recherche actuelle en géographie des risques a de plus en plus tendance à privilégier l'entrée par la vulnérabilité par rapport à l'aléa. En effet, « *les vulnérabilités s'expriment activement à l'occasion d'un événement font l'essentiel du risque au détriment de la composante aléa* » (Gilbert, 2006). La vulnérabilité est prise comme clé de lecture du risque, comprenant sa composante passive (conséquences) et sa composante active (anticipation, réponse sociale).

Comme précisé dans les travaux de M. Reghezza (Tab. 1), la première moitié des années 1990 fixe le point de départ des travaux de recherche sur le concept de vulnérabilité en France (D'Ercole, 1991 ; D'Ercole *et al.*, 1994 ; Lavigne et Thouret, 1994 ; Ledoux, 1994 ; Chardon, 1994 ; November, 1994 ; Thouret et D'Ercole, 1994 ; Thouret et D'Ercole, 1996). Les travaux précédemment cités, émanant de différentes disciplines des Sciences Humaines et Sociales, vont façonner une nouvelle géographie des risques, et sont développés dans un numéro spécial de la Revue Géographie Alpine (1994).

R. D'Ercole propose une définition de la vulnérabilité : « *propension d'une société donnée à subir des dommages en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique. Cette propension varie selon le poids de certains facteurs qu'il est nécessaire d'identifier et d'analyser car ils induisent un certain type de réponse de la société* » (D'Ercole *et al.*, 1994). Les auteurs parlent des « *éléments vulnérables* » à partir desquels « *il s'agit de mesurer les conséquences, en cas de survenue d'un phénomène générateur de dommages. La vulnérabilité est ici conçue comme le pourcentage (ou une valeur allant de 0 à 1) de ce qui peut être perdu en cas de sinistre* ». Ils introduisent également une approche par les « *facteurs de vulnérabilité* », plus qualitative, qui vient compléter la première.

Découlant de l'étude des milieux urbains exposés aux risques naturels, deux grandes familles de facteurs de vulnérabilité sont proposées (D'Ercole *et al.*, 1994 ; Thouret et D'Ercole, 1996).

La première s'intéresse aux « *facteurs structurels de la vulnérabilité* », qui se déclinent à leur tour en différents sous-facteurs :

- « *Les facteurs démographiques* » : ils ont attiré à l'évolution de la démographie et de ses conséquences (accroissement urbain) ;
- « *Les facteurs socio-économiques* » : ils conditionnent les modes d'occupation du sol (exode rural, spéculation foncière, clientélisme) ;
- « *Les facteurs psychosociologiques* » : ils s'intéressent aux différentes perceptions du risque des populations ;
- « *Les facteurs culturels et historiques* » : propres aux populations exposées, ils relèvent des traditions, religions, et aux rapports que les hommes entretiennent avec la nature ;
- « *Les facteurs techniques* » : ils s'apparentent aux caractéristiques physiques des bâtiments généralement inadaptées au milieu ;
- « *Les facteurs fonctionnels* » : ils renvoient à la gestion de crise, par extension, à la qualité opérationnelle des organisations et à leurs moyens techniques et humains ;
- « *Les facteurs institutionnels et politico-administratifs* » : ces derniers visent à appréhender le système de gestion des risques « *en considérant les échelles et domaines de compétence des organismes concernés et la qualité de relais au niveau national, régional et local, afin de mettre en évidence les dysfonctionnements* ».

La seconde famille identifiée est celle des « *facteurs géographiques, conjoncturels ou contingents de la vulnérabilité* », croisée avec la première, elle se décline également en sous-facteurs :

- « Les facteurs géographiques » : ils prennent en considération les contraintes de localisation, le lieu et le moment précis, le style et la récurrence de l'impact. Ils se réfèrent « *aux paramètres spatio-temporels de l'impact d'un phénomène naturel créateur de dommages et aux caractéristiques de la catastrophe* ».
- « Les facteurs conjoncturels et contingents » : ils renvoient aux dysfonctionnements temporaires et imprévisibles. Ils influencent les premiers ainsi que les facteurs structurels. Selon les auteurs, « *la coïncidence entre les caractéristiques spatio-temporelles de l'impact et l'émergence des dysfonctionnements contingents, internes ou externes, provoque l'impact catastrophique d'un phénomène naturel* ».

L'approche par les facteurs de vulnérabilité, en synthétisant des démarches empiriques menées dans différents contextes, révèle la complexité du concept de vulnérabilité, par la multiplicité des facteurs à prendre en compte. Les facteurs sont déclinés à partir d'analyses *a posteriori* des catastrophes, ils concernent la gestion de crise et sa préparation. En ce sens, elle semble adaptée à notre problématique. En effet, les facteurs physiques, géographiques, conjoncturels et psychosociologiques permettent d'appréhender la construction de la vulnérabilité, ou plus spécifiquement la construction des conditions d'endommagement débouchant sur la crise. Cette perspective nous intéresse particulièrement, étant donnée notre volonté d'aider les populations et les collectivités locales à diagnostiquer la vulnérabilité du territoire qu'elles occupent.

Cette vision de la vulnérabilité se veut systémique (Fig. 2), combinant une analyse qualitative des facteurs de vulnérabilité (propension à l'endommagement), avec une analyse quantitative des éléments vulnérables (mesure de l'endommagement, indice de perte).

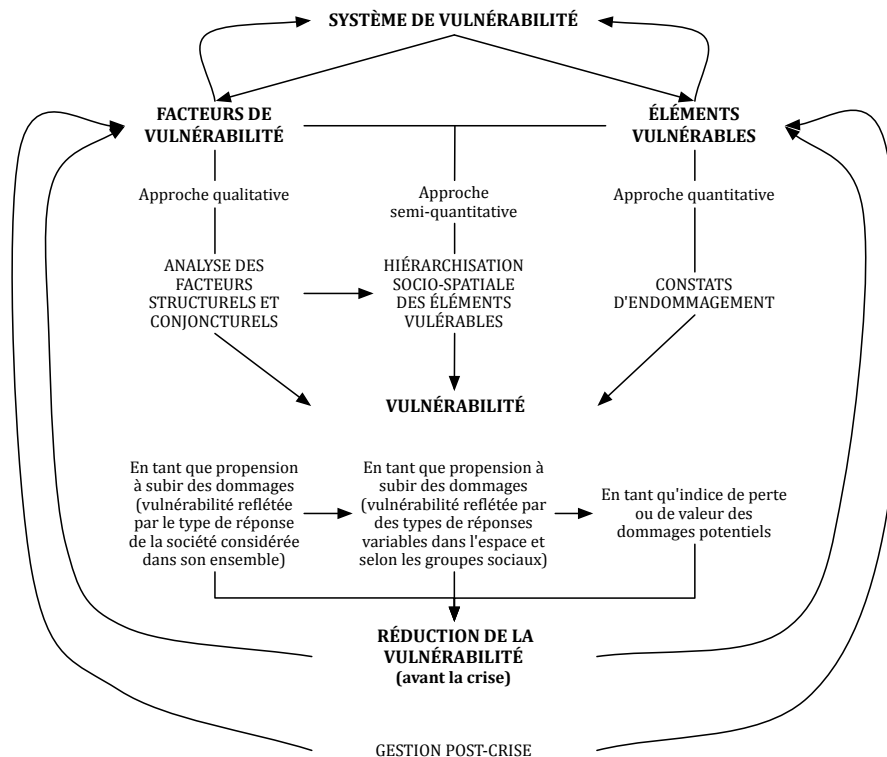


Fig. 2 : Synthèse des différentes approches de la vulnérabilité, d'après D'Ercole *et al.*, 1994

L'étude débouche sur une hiérarchisation sociale et/ou spatiale des éléments exposés, les enjeux. Cette méthode a pour objectif l'évaluation qualitative et quantitative de tous les effets engendrés par l'aléa, selon son intensité et sa fréquence, les facteurs structurels, géographiques et conjoncturels de vulnérabilité, elle vise alors l'élaboration de cartes de vulnérabilité (Lavigne et Thouret, 1994 ; Chardon, 1994). La hiérarchisation spatiale de la vulnérabilité et la cartographie des zones vulnérables sont issues du croisement d'une quinzaine de facteurs naturels, techniques et sociaux de vulnérabilité choisis comme indicateurs pertinents.

C'est une vision territoriale de la vulnérabilité, qui « renvoie à l'idée qu'il existe, au sein de tout territoire, des éléments localisables susceptibles d'engendrer et de diffuser leur vulnérabilité à l'ensemble d'un territoire, provoquant des effets qui peuvent perturber, compromettre, voire interrompre son fonctionnement et son développement » (D'Ercole et Metzger, 2009). L'analyse de la vulnérabilité territoriale a pour but principal l'identification, la caractérisation et hiérarchisation des espaces à partir desquels se crée et se diffuse la vulnérabilité au sein du territoire. Partant du diagnostic territorial, les gestionnaires ont alors la possibilité d'engager des actions de prévention pertinentes, sur les espaces clairement définis. L'espace analysé est celui des enjeux majeurs présents sur le territoire.

La méthodologie générale de cartographie de la vulnérabilité territoriale s'articule en quatre étapes (D'Ercole et Metzger, 2009) :

- l'identification des enjeux majeurs et des lieux stratégiques ;
- l'analyse détaillée de la vulnérabilité de ces enjeux majeurs ;
- la construction d'une carte de vulnérabilité spatiale, c'est-à-dire une hiérarchie des espaces vulnérables *a priori*, selon leur exposition à un ou plusieurs aléas, ou la qualité de leur accessibilité ;
- enfin, la synthèse de la vulnérabilité territoriale, c'est-à-dire une cartographie des lieux dont dépend la vulnérabilité de l'ensemble du territoire.

La démarche s'appuie sur une connaissance concrète des problèmes et des besoins exprimés par les gestionnaires du territoire en matière de gestion des risques, et poursuit un objectif opérationnel. Elle repose sur des développements méthodologiques appuyés sur un SIG, visant l'optimisation et l'utilisation des connaissances produites par des recherches de type géographique pour la planification préventive du territoire et la gestion des crises (D'Ercole et Metzger 2002, 2004, cités par D'Ercole et Metzger, 2009). L'approche territoriale de la vulnérabilité est pertinente pour une gestion du risque adaptée au contexte local, de plus, l'intérêt qu'elle porte aux mécanismes de transmission de la vulnérabilité nous paraît pertinente pour notre problématique.

D'autres géographes proposent une vision radicale de la vulnérabilité. C'est le cas notamment de J.C. Gaillard (2007), qui propose une approche exclusivement sociale, indépendante de tout aléa. Il identifie les facteurs endogènes aux sociétés selon trois pôles (Fig. 3). La vulnérabilité est ici liée à la marginalisation de certaines populations au sein de la société, qui s'opère à différents niveaux : mise à l'écart géographique (habitats dans des zones potentiellement affectées par des aléas naturels ou technologiques), sociale (appartenant souvent à des groupes minoritaires), économique (pauvreté et chômage) et politique (aucun porte-parole reconnu pour les défendre auprès de ceux qui détiennent le pouvoir) (Gaillard, 2007).

Cette approche privilégie l'analyse de données sociales, économiques et politiques de manière systémique et territorialisée, avant, pendant et après une crise, en focalisant sur le processus de prise de décision et les réponses des sociétés face aux risques. En cela, la

vulnérabilité est « *endogène aux caractéristiques du système social et elle se réalise en interaction avec les propriétés du système et celles des individus qui en sont membres* » (Soulet, 2005). J.C. Gaillard met en exergue les processus de « *vulnérabilisation* », à partir de facteurs internes aux sociétés (Gaillard, 2007). Le géographe français s'inscrit dans la lignée de nombreux auteurs (O'Keefe *et al.*, 1976 ; Waddell, 1977 ; Torry, 1979 ; Hewitt, 1983 ; Blaikie *et al.*, 1994 ; Wisner *et al.*, 2004), qui mettent en évidence les racines socio-économiques des catastrophes en induisant une réflexion sur la fragilité des contextes dans lesquels la perturbation se déploie.

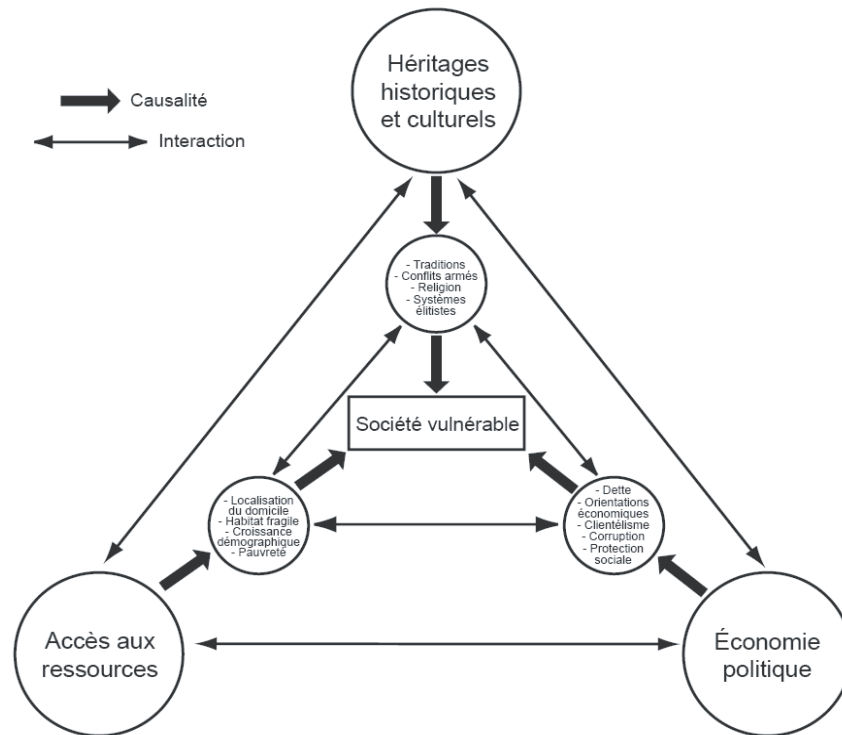


Fig. 3 : Interactions et rapports de causalité entre facteurs de vulnérabilité (Gaillard, 2007)

F. Leone et F. Vinet (2006) évoquent, dans leur synthèse sur le concept de vulnérabilité (Fig. 4), deux approches complémentaires en matière d'évaluation de la vulnérabilité : l'une rétrospective et l'autre prospective. L'approche rétrospective s'inscrit dans le cadre des retours d'expérience. Celle dite prospective s'intéresse à l'évaluation des risques encourus. Ces deux approches sont complémentaires et visent à porter à connaissance sur l'endommagement déclaré et potentiel. Selon eux, la vulnérabilité peut s'évaluer à la fois quantitativement et qualitativement : « *soit à travers la sensibilité à l'endommagement, soit à travers la caractérisation de l'endommagement, soit à travers la capacité de réponse à l'endommagement* » (Léone et Vinet, 2006).

Les deux premiers types d'évaluation renvoient au degré d'endommagement potentiel des enjeux. Le troisième regroupe les définitions employées en sciences sociales. La vulnérabilité désigne alors la capacité des individus à faire face à une crise ou un changement (Allen, 2003). Ces définitions font appel à d'autres notions telles que la « *capacité à faire face* » (*coping capacity*) ou la capacité d'adaptation et surtout à la résilience.

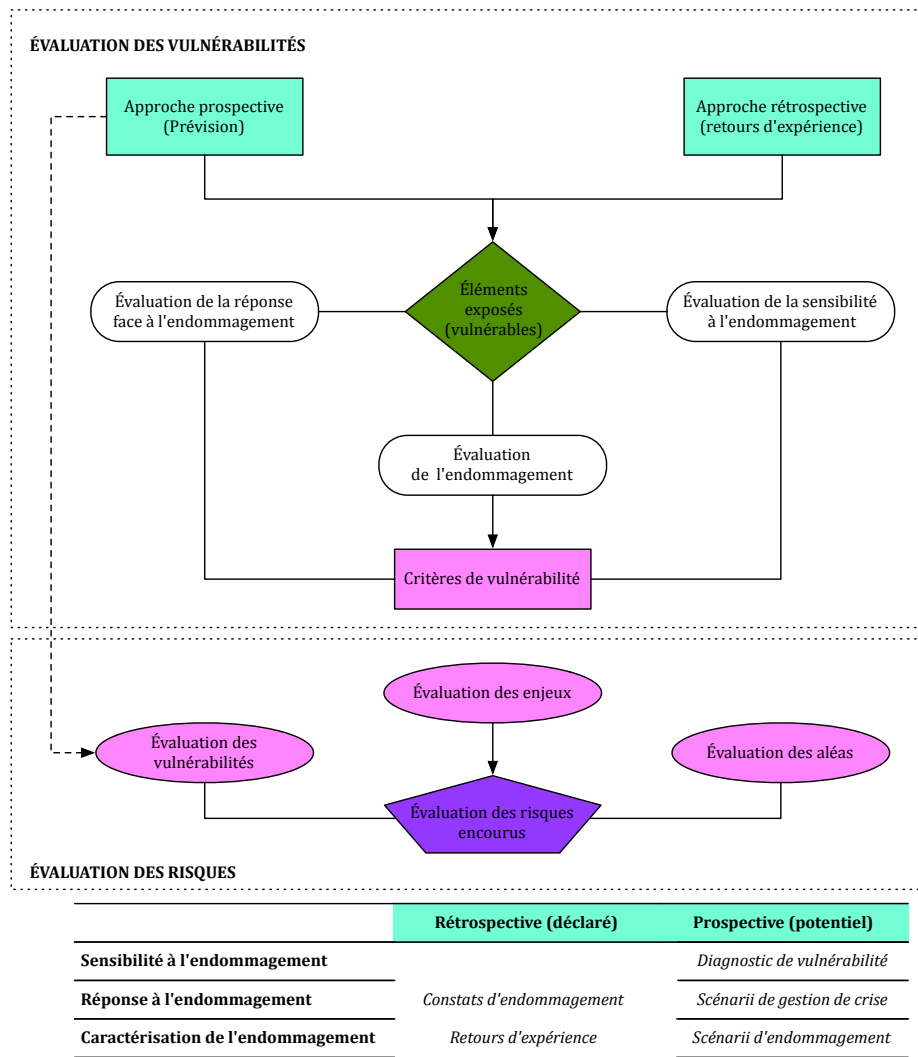


Fig. 4 : Synthèse des différentes approches d'évaluation des vulnérabilités, d'après (Léone et Vinet, 2006)

Pour réduire le foisonnement des définitions existantes, M. Reghezza propose de les regrouper en deux ensembles (Reghezza, 2006) :

« La vulnérabilité biophysique », le premier ensemble, défini autour de la notion d'endommagement, renvoie à la vulnérabilité « physique », la vulnérabilité comme « degré d'exposition » et la vulnérabilité comme « capacité de résistance physique ».

- « Physique » : désigne les conséquences de l'impact d'un aléa sur des infrastructures, populations, constructions... La vulnérabilité dépend exclusivement de l'impact physique et de la valeur des enjeux. Le concept de vulnérabilité physique sert une approche quantitative et techniciste du risque, étendant aux enjeux les méthodes et les principes utilisés dans le traitement de l'aléa (comportement des constructions à la perturbation). Le retour d'expérience est donc placé au cœur de cette démarche. L'élaboration de scénarii possibles en est un autre volet essentiel. Cette approche a cependant deux inconvénients majeurs qui ont été abondamment dénoncés. En premier lieu, la société est considérée comme passive, victime de la défaillance des systèmes bâtis ou techniques. Ensuite, on postule que la valeur économique d'un bien est purement quantifiable.
- « Degré d'exposition » : la vulnérabilité est comprise comme degré de pertes ou de dommages, le terme *sensibilité* est souvent utilisé. L'endommagement d'un enjeu dépend de l'aléa auquel il est exposé. Or, tous les enjeux ne sont pas exposés de la

même façon à l'aléa. La notion de distance est alors introduite, on parle alors de vulnérabilité comme fonction de la proximité à la source des dommages. M. Reghezza note un « glissement sémantique », la vulnérabilité passe de *sensibilité*, *susceptibilité*, puis se confond à l'exposition. La distribution spatiale des enjeux est alors déterminante. La connaissance progressant, on remarque des « effets de site » (la nature du milieu amplifie le phénomène naturel), l'exposition devient alors différentielle à l'aléa, augmentant la vulnérabilité. Il est donc nécessaire de corrélérer la répartition spatiale des enjeux et la nature du milieu pour comprendre la répartition des dégâts. Un problème persiste, les enjeux sont toujours supposés passifs face à un aléa qu'ils subissent.

- « *Capacité de résistance physique* » : la sensibilité des enjeux ne dépend pas uniquement de l'intensité du phénomène naturel : ils ont une fragilité propre qui les rend plus sensibles aux pertes et aux dommages. La notion de fragilité internalise la vulnérabilité des enjeux. La fragilité de ces enjeux peut être liée à la qualité des matériaux, à la conception, à la construction. Elle est vue comme l'incapacité de résistance de l'enjeu.

Les différentes approches évoquées vont progressivement être réunies sous un label commun, la « *vulnérabilité biophysique* » (Brooks, 2003, cité dans Reghezza, 2006). La vulnérabilité biophysique suggère à la fois une composante physique (la nature de l'aléa, processus physique et ses manifestations) et une composante biologique (pour un système naturel) ou sociale (pour un système anthropique) qui renvoie aux propriétés intrinsèques du système affecté.

« *La vulnérabilité sociale* », le **second ensemble**, s'est développée de façon parallèle au premier. Se concentrant sur le système, non sur les enjeux, elle définit la « *capacité à faire face* » à la perturbation. Cette capacité à faire face détermine l'aptitude du système à produire les ajustements nécessaires à l'absorption du choc, à ses facultés d'adaptations. Elle introduit une nouvelle notion la « *résilience* » du système. Celles-ci peuvent être liées à des propriétés physiques du système, mais le plus souvent, elles découlent de facteurs socio-économiques, politiques, culturels (Reghezza, 2006). Cette forme de vulnérabilité est inhérente au système, elle existe indépendamment de l'aléa, au sens où un système est vulnérable, que l'aléa se produise ou non. En revanche, elle est latente : seule l'occurrence de l'aléa la révèle et lui permet de se manifester. L'impact de l'aléa ne dépend donc pas seulement de l'exposition à la source de danger. Il est conditionné par les propriétés sociales du système anthropique ou par les propriétés écologiques du système naturel. Selon J. Ford (2002), « *les lieux vulnérables du point de vue biophysique ne sont pas toujours ceux des populations vulnérables* », ainsi dans certaines régions exposées à un aléa intense, les pertes économiques pourront être élevées, mais du fait des systèmes d'assurances ou d'aides à la reconstruction, les populations peuvent se relever rapidement. De même, pour les écosystèmes soumis au phénomène incendiaire, certaines espèces ne se relèveront pas, d'autres, comme les pyrophytes, ont besoin de l'incendie pour se reproduire.

La vulnérabilité se définit en référence à la capacité d'absorption du choc, de réponse, à l'origine de la résilience. La résilience est entendue soit, comme la capacité de retour à l'état initial, soit, comme la capacité de retour à un « état d'équilibre », différent de l'état initial. Ces trois aspects sont inclus dans l'idée de capacité à faire face (*cope with*). Depuis la fin des années 1990, la résilience est devenue un concept incontournable des recherches sur la vulnérabilité (Reghezza, 2006).

En géographie des risques les études menées sur la vulnérabilité se concentrent sur l'endommagement et se scinde en deux tendances (Dauphiné, 2003) : l'appréhension de la vulnérabilité en tant que mesure de l'endommagement ou en tant que propension à subir ou résister à l'endommagement (D'Ercole, 1994 ; Reghezza, 2006 ; Léone et Vinet, 2006). Dans le

premier cas, il s'agit d'évaluer dans une approche analytique l'exposition des enjeux aux aléas, d'estimer le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène, en vue d'expliquer et de rechercher les causes de vulnérabilité (Dauphiné, 2004) en utilisant les outils de cartographie, le SIG, et les statistiques. Dans le deuxième cas, il s'agit d'une approche synthétique ou systémique (D'Ercole, 1994 ; Pigeon, 2005), qui propose une analyse des interactions entre différents facteurs sur un territoire.

L'étude de A.C. Chardon (1994) propose une démarche analytique pour évaluer et cartographier la vulnérabilité de la population aux différents risques naturels, sur la ville de Manizales (Colombie). L'évaluation de la vulnérabilité est double : quantitative à l'échelle des quartiers (dommages) et qualitative à l'échelle de la ville (facteurs). C'est de la vulnérabilité biophysique dont il s'agit, puisque la vulnérabilité est définie comme « *la propension variable à l'endommagement que présentent des éléments (populations, activités économiques, patrimoine culturel, bâti,...) exposés à l'occurrence d'aléas géodynamiques (séismes, glissements de terrain, inondations)* », mais à A.C. Chardon d'ajouter qu'« *être vulnérable aux risques naturels, c'est être exposé physiquement à l'aléa, mais aussi présenter certaines fragilités face au sinistre* » (Chardon, 1994). L'auteur distingue deux groupes de critères : un premier groupe de sept critères définit la vulnérabilité physique, un second groupe de huit critères définit la vulnérabilité socio-économique. Chaque critère est hiérarchisé et pondéré, la vulnérabilité globale est obtenue par sommation des deux vulnérabilités élémentaires. La démarche analytique intègre donc les deux dimensions de la vulnérabilité (physique et sociale), amenant ainsi les approches systémiques, qui appréhendent des systèmes vulnérables complexes, en intégrant les aspects physiques, économiques, sociaux, et leurs interactions dans une même grille d'analyse.

L'endommagement est défini comme un indicateur, ou un marqueur de vulnérabilité (Thouret et Léone, 2003 ; Léone, 2007). Les études francophones sur la vulnérabilité ont largement privilégié l'approche territoriale systémique aboutissant à des cartographies utiles à la définition de stratégies de prévention ou à des réflexions conceptuelles sur les rapports entre risques et territoires (D'Ercole, 1991 ; Chardon, 1996 ; Lutoff, 2000 ; Hardy, 2003 ; November, 2002 et 2006 ; Reghezza, 2006 ; Beucher, 2008). Les considérations sociales dans la vulnérabilité s'apparentent le plus souvent à la prise en compte de la perception des menaces et à l'analyse de la culture du risque (Glatron, 2003 ; Meschin de Richemond, 2003 ; Beck, 2006).

Cette tendance générale n'empêche pas les auteurs d'avoir des préoccupations très variées, tant au niveau de la nature des aléas pris en compte (éruptions volcaniques, inondations, sismicité, risques industriels, transport et mobilité ou multi-aléas) que des facettes de la vulnérabilité (environnementale, territoriale, organisationnelle, sociale...). L'analyse des politiques publiques des risques est de plus en plus fréquente (Peltier, 2005 ; Beck, 2006 ; Vinet, 2007 ; Beucher, 2008 ; Bourdières, 2008). Elle se penche sur leurs grandes évolutions (passage des mesures structurelles à non structurelles, rôle des catastrophes comme déclencheur d'évolution), leur ancrage territorial, leurs difficultés organisationnelles (comprendre les bonnes logiques d'action entre pratiques locales et politique nationale), leur lien avec la politique globale et la construction d'outils d'aide à la décision : « *La vulnérabilité organisationnelle pose la question des acteurs, mais aussi et de manière indissociable celle du sens de l'action, des échelles d'intervention et des dispositifs qui structurent la gestion des risques* » (Bourdières, 2008). À ce titre, V. Bourdières élève la vulnérabilité en paradigme, il propose de la caractériser par une fonction, « *résultat d'une combinaison de plusieurs variables ou paramètres associés* » (Bourdières, 2008) :

« Vulnérabilité : F (Aléa, éléments exposés, niveau d'exposition, facteurs actifs de vulnérabilité) »

L'aléa caractérise la menace, intègre la nature du phénomène, et constitue « *un paramètre incontournable du problème et nécessite d'être pris en compte. Néanmoins en rien il ne peut suffire à résumer le problème de l'exposition qui de fait l'intègre. En effet, il n'y a évidemment vulnérabilité que s'il y a exposition d'enjeux à une menace* » (Bourdières, 2008). Les enjeux exposés représentent la part passive de la vulnérabilité. En dernier lieu, mais élément déterminant selon l'auteur, « *les facteurs actifs de vulnérabilité* » concernent la fragilité physique (structurelle, constructive) des objets exposés, la perte de sens dans l'action de gestion, toutes les limites de la réponse globale apportée au risque. V. Bourdières les aborde sous l'angle organisationnel de l'action publique.

Les outils utilisés sont eux aussi très variés, allant de l'enquête de terrain, par questionnaires, aux modélisations (Provitolo, 2003), en passant par les Systèmes d'Information Géographique (SIG) (Beck, 2006; Demoraes, 2004), les SMA (Systèmes Multi Agents) qui proposent de modéliser les relations entre acteurs sur un territoire (Becu, 2006), ou le VAT (Vulnerability Assessment Tool) qui propose une mise en relation des facteurs de vulnérabilité dans le but de faciliter son évaluation en milieu urbain (Barroca et Hubert, 2008). La vulnérabilité est un problème multicritère, les méthodes d'analyse multicritère ont donc été utilisées à plusieurs reprises pour l'évaluation de la vulnérabilité d'un territoire, au regard de différents aléas (transport de matières dangereuses, inondation, ruissellement pluvial, multi-aléas...). Elles sont utilisées pour comparer la vulnérabilité de différents sites en fonction de critères socio-économiques, hydrauliques et de l'organisation des secours (Graillot *et al.*, 2000 ; Barczak et Grivault, 2007), pour évaluer la vulnérabilité d'un territoire afin d'apporter une aide à la décision aux acteurs chargés de l'organisation des secours (Griot *et al.*, 2002) ou une aide à la décision pour la gestion multi-risques d'un territoire métropolitain (Renard et Chapon, 2010).

Les approches peuvent être prospectives, rétrospectives, qualitatives, quantitatives, diachroniques, systémiques. La plupart proposent une réflexion territorialisée et systémique, en fonction des objectifs et préoccupations. La question de l'unité spatiale se pose pour identifier l'échelle d'analyse la plus pertinente. Le risque est désormais considéré la plupart du temps comme une construction sociale et politique (November, 2002), et comme un facteur dans les choix politiques et urbanistiques.

Toutes ces approches visent à une meilleure conceptualisation de la nature multicritère de la vulnérabilité, où différents facteurs entrent en interaction, souvent complexe (l'exposition, la sensibilité, le manque de capacités d'intervention de la société), ainsi que différentes dimensions thématiques de vulnérabilité (physique, sociale, écologique, économique, culturelle et institutionnelle).

Nous avons interrogé les fondements du concept de vulnérabilité, son émergence sur la scène scientifique, et les facteurs qui influencent les forces ou les faiblesses d'un territoire face à une perturbation naturelle. L'approche traditionnelle se focalise sur les phénomènes, leur processus physique, et les conséquences qui en résultent, l'endommagement. Elle privilégie une vision passive des enjeux face aux perturbations, qui elles sont actives. Le concept de vulnérabilité s'est tour à tour complexifié, révélant une ambiguïté, liée au caractère polysémique du terme. Les processus naturels entretiennent des liens systémiques avec le territoire, à l'origine du risque : « *la frontière nature-société marque la limite entre l'environnement naturel du système et le système risque, ce dernier étant identifiable par les*

interactions dynamiques entre processus physiques d'endommagement et facteurs de peuplement inégalement favorables à l'endommagement » (Pigeon, 2002).

La vulnérabilité est une mesure difficile à appréhender du fait de son caractère polymorphe et dynamique. Les conséquences de la rencontre entre un phénomène destructeur et un enjeu vulnérable permettent son interprétation. En effet, vulnérabilité et endommagement sont étroitement liés : les dommages physiques révèlent *a posteriori* la propension des enjeux à laisser prises aux attaques. La vulnérabilité se construit autour de critères, qui favorisent inégalement l'endommagement, qu'ils soient matériels (aspect, matériaux, entretien), socio-économiques, organisationnels et institutionnels, culturels (maîtrise de l'occupation du sol, préparation des personnes, choix d'adaptation face au risque). Une question se pose, celle de la hiérarchisation des contributions de chaque critère à la construction de la vulnérabilité territoriale. Des critères tels que la configuration spatiale, la sensibilité des enjeux, leur exposition du fait de la susceptibilité du milieu naturel à exacerber le phénomène et la capacité de réponse sociétale sont à analyser de manière à comprendre le processus de vulnérabilisation. Nous soutenons que la vulnérabilité réside dans la nature de l'espace et de la société qui s'y est implantée : « *la catastrophe naît de la rencontre, ponctuelle et/ou graduelle, entre une perturbation et une situation de vulnérabilité historiquement et géographiquement contextualisée* » (Magnan, 2009). Différentes formes de vulnérabilité sont alors identifiables, intrinsèques et résultantes. La vulnérabilité est révélée par la catastrophe, cependant, sa naissance est antérieure à cette dernière.

Partant de ce postulat, nous proposerons une méthode d'évaluation de la vulnérabilité d'un territoire au regard spécifique des incendies de forêt. Nous introduirons dans la section suivante ce phénomène ainsi que les études sur les risques qui lui sont associés. Le territoire d'étude sera présenté au chapitre 2.

1.5. La vulnérabilité dans le risque incendie de forêt

« Les travaux sur la vulnérabilité restent de très loin les parents pauvres des recherches sur les risques et la sécurité. Cette pauvreté des recherches sur la vulnérabilité a une explication très simple : aucune institution, aucun pays, aucune entreprise n'aime faire spontanément état de ses zones de fragilité ou de faiblesse »

(Fabiani et Theys, 1987)

Ce constat des deux sociologues, de la *Société Vulnérable*, est probant en ce qui concerne le risque incendie de forêt. Les études sur le phénomène physique sont prédominantes. La vulnérabilité, quant à elle, est quelque peu délaissée (Chuvieco, 2003). Certaines synthèses sur le risque incendie ne mentionnent pas le terme (Finney, 2005 ; Hardy, 2005). L'étude de la vulnérabilité n'a été introduite dans l'évaluation du risque que récemment (Calkin *et al.*, 2010 ; Chuvieco *et al.*, 2010; Thompson et Calkin, 2011).

Les incendies de forêt sont des phénomènes majeurs de transformation de l'environnement pour une grande variété d'écosystèmes (FAO, 2007). La région méditerranéenne française est le site de violents incendies de forêt, le risque est permanent, il menace des territoires vastes et variés, caractérisés par un environnement et des dynamiques complexes. Les feux de forêt ont des conséquences dramatiques d'un point de vue écologique et socio-économique, à la fois par les dommages supportés et par les coûts de prévention et de lutte nécessaires.

1.5.1. Définition générale d'un incendie de forêt

On parle d'incendie de forêt lorsqu'un feu atteint des forêts, landes, garrigues ou maquis d'une superficie minimale d'un hectare d'un seul tenant, détruisant au moins une partie des étages arbustifs et/ou arborés.

L'incendie résulte d'une réaction chimique, la combustion, qui « *se développe sans contrôle, dans le temps et dans l'espace* » (Trabaud, 1989). Cette réaction vive et fortement exothermique nécessite la présence des trois éléments du triangle du feu (Fig. 5) :

- Un combustible : toute substance susceptible de brûler (végétation, essence, gaz...). Les solides et les liquides ne brûlent pas en tant que tels, ce sont les gaz et les vapeurs qu'ils émettent qui brûlent. L'inflammabilité et la combustibilité d'un combustible dépendent de sa teneur en eau, de sa température mais aussi de son type (broussailles, ligneux...) et de sa structure (dense, éparse...).
- Un comburant : corps qui a pour fonction d'entretenir la combustion (oxygène, halogènes, soufre, phosphore...). Dans le cas des feux de forêt, il s'agit de l'oxygène de l'air qui alimente la combustion. L'évolution du feu (intensité et direction) dépend très largement des caractéristiques locales du vent, elles-mêmes modifiées par le relief, voire par le feu lui-même (qui crée son propre vent) ;
- Une énergie d'activation : source de chaleur externe (étincelle, foudre...).

Le processus de combustion se décompose en trois étapes : évaporation de l'eau contenue dans le combustible, émission de gaz inflammables par pyrolyse puis vient la mise à feu. La forêt dans son intégralité, est un combustible potentiel. Toute infrastructure humaine implantée en forêt ou à ses abords constitue également un combustible potentiel.

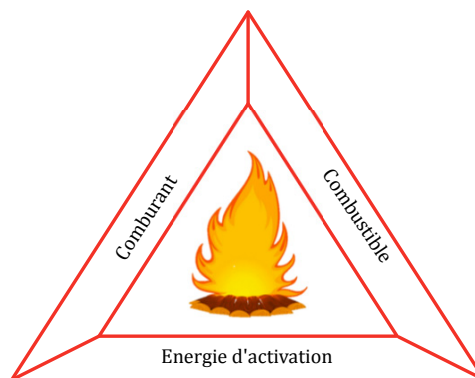


Fig. 5 : Le triangle du feu

1.5.2. Risque, Aléa, Vulnérabilité : définition pour l'incendie de forêt

La littérature traitant du risque incendie de forêt propose une terminologie disparate, source de confusions, sur le risque et les notions qui lui sont associées, malgré les efforts déployés pour harmoniser les définitions (Backmann et Allgöwer, 2000 ; Hardy, 2005 ; Finney, 2005 ; Camia *et al.*, 2006 ; Chuvieco, 2010 ; Miller, 2013). Les termes « danger » (*danger*), « aléa » (*hazard*) et « risque » (*risk*) sont souvent confondus (Camia *et al.*, 2006). Ces confusions engendrent des malentendus et rendent difficile les prises de décision pour la gestion du phénomène, et la coopération entre scientifiques, gestionnaires et personnel de lutte (Backmann et Allgöwer, 2000). A. Backmann et B. Allgöwer (2000), dans leur synthèse sur la terminologie employée en matière d'incendie de forêt, voient plusieurs raisons au problème : le terme *risque* est une construction sociale, employé dans la vie quotidienne, un large éventail de notions lui est attribué ; ainsi, la terminologie dépend toujours d'une

interaction entre le cadre sémantique et le cadre culturel, soit les différentes perceptions liées à la culture et aux valeurs de chacun ; le risque incendie de forêt, à l'image du kaléidoscope de Schopenhauer⁵, revêt à « chaque tour une configuration nouvelle, et cependant ce sont, à dire vrai, les mêmes éléments qui passent toujours sous nos yeux ». Ainsi, chaque « communauté » (gestionnaires de l'incendie, personnel de lutte, forestiers, écologistes, scientifiques...) représente une « configuration » de pensée qui lui est propre, induisant autant de définitions du risque incendie de forêt qu'il existe de « communautés ».

Nous l'avons précisé précédemment, la définition, qui prévaut pour les risques naturels, identifie le risque dans l'interaction entre une probabilité d'aléa dommageable et un système vulnérable. Rares sont les définitions citées par A. Camia *et al.* (2006) qui introduisent le terme vulnérabilité. On en compte trois sur les onze proposées pour le terme « *fire risk* » :

- Le risque incendie de forêt est la combinaison de deux composantes : l'**aléa**, sa probabilité d'occurrence et son intensité, et la **vulnérabilité**, les conséquences de l'événement (Blanchi *et al.*, 2002).
- Selon P. Carrega (1997, 2003), un autre élément doit être considéré en plus de l'**aléa** et de la **vulnérabilité** : à savoir la **susceptibilité** du site soumis à l'aléa. La susceptibilité regroupe les caractères qui commandent la propagation du feu (Carrega, 2008).
- Enfin, le risque incendie de forêt comprend trois aspects : l'**aléa**, le **danger** et la **vulnérabilité** (Zeng *et al.*, 2003).

Selon A. Backmann et B. Allgöwer (2000), le risque se définit par la probabilité qu'un incendie de forêt survienne à un endroit précis et dans des circonstances spécifiques, et par les conséquences de celui-ci, définies selon les effets de son contact avec l'environnement (naturel ou anthropique). Le risque recouvre ainsi : d'une part la probabilité qu'un événement se produise, l'aléa, et d'autre part les conséquences particulières découlant de cet événement, la vulnérabilité.

On constate alors que la vulnérabilité est considérée comme passive, vulnérabilité physique, elle est assimilée aux conséquences de l'action de l'aléa sur le milieu, sans que ce dernier n'ait une faculté de réponse ou une quelconque incidence sur le phénomène. Pour chiffrer les conséquences, le milieu se voit attribuer une valeur économique (Chuvieco *et al.*, 2010).

L'aléa incendie de forêt est considéré comme un processus physique naturel, et définit comme « *la probabilité qu'un phénomène naturel d'intensité donnée se produise en un lieu donné* » (Backmann et Allgöwer, 2000 ; Blanchi *et al.*, 2002). Il se caractérise par une probabilité d'éclosion et une intensité. Les auteurs utilisent le terme *aléa* pour décrire le comportement de l'incendie, dépendant de facteurs naturels, tels les conditions météorologiques, la topographie, ainsi que le type et la structure de la végétation (Zeng *et al.*, 2003).

Il nous semble opportun d'introduire un bémol dans cette définition, en reprenant l'exemple donné par P. Carrega (2008) sur le phénomène de *crue éclair*. Selon l'auteur, une crue représente généralement l'aléa, or cela « *revient à agglomérer des phénomènes parfois totalement séparés et indépendants les uns des autres, donc à ne pas pouvoir démêler les agents qui ont combiné leurs effets pour aboutir à la montée des eaux* ». Lors d'une crue éclair, « *l'aléa n'est pas la crue, mais bien l'orage qui va générer une forte intensité de pluie (et sans lequel il n'y aurait aucune crue)* », ainsi P. Carrega introduit une troisième composante, dans le couple aléa-vulnérabilité, la « *susceptibilité* » : « *elle est, pour un épisode pluvieux donné, le potentiel du*

⁵ Schopenhauer utilise l'image du kaléidoscope pour montrer la forme de métempsychose qui caractérise l'histoire (Arthur Schopenhauer, 1819, *Le monde comme volonté et comme représentation*, Brockhaus, Leipzig).

milieu biophysique, plus ou moins influencé par l'homme, à produire ou non une crue, par l'intervention de la pente, de la perméabilité de la roche et du sol, de la couverture végétale, par le tracé plus ou moins hiérarchisé du réseau hydrographique, bref, par tout ce qui va agir sur le trajet de l'eau une fois celle-ci parvenue à la surface ».

Il reconnaît l'action de l'homme dans l'artificialisation des milieux, mais néglige sa participation à la « *susceptibilité* », et l'intègre justement à la vulnérabilité, qui regroupe tout ce qui « *procède des activités humaines, et de leur fragilité face au type d'événement : densité, enjeux (vies humaines, richesses), prévention (par exemple les digues, etc.), moyens de lutte pendant la crue, résilience, etc.* ». Il conclut alors en établissant un parallèle avec les incendies de forêt : « *Pour un incendie de forêt, l'aléa est la flamme de départ, quelle que soit son origine, alliée à des conditions météorologiques autorisant son développement [...]. La susceptibilité regroupe les caractères qui vont commander la propagation du feu (pour des conditions météorologiques données) [...]. Les paramètres importants sont en particulier la biomasse, caractérisée par sa densité, sa stratification verticale (l'herbe communique le feu aux arbustes qui, à leur tour, le transmettent aux arbres), ses essences plus ou moins inflammables ; et l'orientation ainsi que la valeur de la pente face au feu* » (Carrega, 2008).

P. Carrega conçoit la vulnérabilité comme toutes les actions de l'homme (sensibilisation et instructions des populations, lutte, présence humaine et valeur des biens). Cette vision, selon nous, occulte la vulnérabilité inhérente à tout socio-écosystème, qui s'exprime dans les interactions entre l'écologie, l'économie et la société. Pour nous, et en accord avec M. Reghezza (2006), la notion de susceptibilité est comprise dans la vulnérabilité biophysique. Ainsi, la susceptibilité est indissociable de la vulnérabilité « globale », qui se compose de la vulnérabilité biophysique et de la capacité de réponse (adaptation, résilience) d'un système, qu'il soit naturel ou anthropique. Nous considérons la vulnérabilité, à l'interface du système naturel, et du système anthropique.

Ainsi, nous adhérons à la vision de P. Carrega, lorsqu'il définit l'aléa incendie de forêt, comme combinaison d'une « *mise à feu* » et d'une « *météorologie favorable au feu* », et intégrons la « *susceptibilité* », qu'il définit, à la vulnérabilité. Notre étude s'intéressera aux facteurs de vulnérabilité, dans la lignée des travaux de R. D'Ercole, qui conçoit la vulnérabilité comme « *un système qui considère un grand nombre de variables (naturelles et humaines) dont la dynamique spatiale et temporelle peut générer des situations qui peuvent s'avérer plus ou moins dangereuses pour une société exposée à un phénomène* » (D'Ercole, 1996). Nous souhaitons travailler à la fois sur les dommages causés par l'incendie, et sur la propension du système à subir ces dommages. Le système étudié correspond aux interfaces habitat-forêt, que nous introduirons et définirons au chapitre 2.

1.5.3. Les différentes approches de la vulnérabilité appliquées à la problématique incendie de forêt

Nombreuses sont les interprétations de la vulnérabilité dans le champ des risques naturels. Le concept a été appliqué aux incendies de forêt sous différents aspects : par la sensibilité physique des habitations, leur exposition, mais aussi la capacité de réponse et la préparation des personnes. Il est de nos jours admis que l'incendie de forêt représente une menace pour la société, en raison d'une urbanisation qui va croissant, toujours plus proche des massifs forestiers. L'incendie est une force endémique à de nombreux écosystèmes, il devient problématique lorsqu'il menace les sociétés humaines. Pourtant, les nombreuses études sur les incendies de forêt ont souvent négligé l'aspect social, se focalisant sur les conséquences écologiques et physiques des sinistres (Paton *et al.*, 2008).

Des études récentes ont mis l'accent sur la compréhension des dimensions humaines au niveau de la gestion des incendies de forêt, ce qui justifie la mise en place de politiques visant

principalement la prévention et la protection des personnes et des biens, pas seulement de l'environnement (Gill, 1994 ; Whittaker et Mercer, 2004 ; Cottrell, 2005 ; Brenkert-Smith *et al.*, 2006 ; Sturtevant et McCaffrey, 2007 ; Collins, 2009 ; Eriksen et Gill, 2010 ; Pavaglio *et al.*, 2011 ; McCaffrey *et al.*, 2011, 2013 ; Bihari et Ryan, 2012, Prior et Eriksen, 2013). Un travail important de responsabilisation est mené auprès des populations, afin de leur permettre de réduire leur propre risque. La préparation aux phénomènes dangereux est perçue comme un facteur favorisant la capacité de réponse et d'adaptation des individus à l'aléa (Lindell et Perry, 2000 ; Jonientz-Trisler *et al.*, 2005 ; Thomalla *et al.*, 2006 ; Paton *et al.*, 2008 ; Whittaker *et al.*, 2012 ; Prior et Eriksen, 2013).

L'étude menée par T. Prior et C. Eriksen (2013) cherche à comprendre l'influence des processus sociaux sur un écosystème complexe. S'appuyant sur une étude de cas menée en Australie, ils utilisent une approche semi-quantitative pour modéliser les interactions entre 54 facteurs sociaux, répartis en trois catégories (la planification de la préparation, l'entretien de la propriété, et les moyens de lutte), influençant la préparation à l'incendie de forêt, et structurant la vulnérabilité par la résilience. Le travail est mené sur deux fronts : recueil de données qualitatives par interview semi-structurés (36 propriétaires résidant à moins de 100 m d'une forêt) ; recueil de données quantitatives à partir de questionnaires (1 175 retours). Au cours des entretiens, un facteur clé de la préparation des personnes a émergé : « l'esprit communautaire » (*sense of community*) (Prior et Eriksen, 2013). Ce facteur décrit les connexions entre les personnes et les lieux, et soulève l'influence des réseaux d'entraide sur la capacité de réponse de chacun. Les résultats de cette étude montrent que les processus sociaux, et en particulier la cohésion communautaire, contribuent de manière substantielle à la préparation individuelle et la capacité d'adaptation des communautés et des membres de la communauté qui sont menacés par les incendies (Prior et Eriksen, 2013).

D'autres études cherchent à évaluer spatialement la vulnérabilité sur un territoire (Galiana-Martin et Karlsson, 2011). Considérant la vulnérabilité comme une caractéristique physique expliquant la propension d'un territoire à souffrir les dommages, les auteurs s'intéressent à deux aspects : l'un interne, l'impact des incendies sur la valeur des enjeux concernés et leur capacité à s'en remettre, l'autre externe, lié aux caractéristiques de l'incendie et à la capacité de la société à gérer le risque. La méthode employée se veut synthétique et permet de décomposer la vulnérabilité en ses principales composantes. Ainsi, afin de capturer l'aspect multicritère de la vulnérabilité, les auteurs utilisent une procédure d'analyse hiérarchique (*Analytic Hierarchy Process* – AHP), méthode élaborée par T.L. Saaty (1980) pour répondre, initialement, aux problèmes de décision. Chaque critère de vulnérabilité est ensuite cartographié à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG). Les quatre critères principaux sont :

- La difficulté d'extinction ;
- Les besoins nécessaires à la défense de la forêt ;
- Les besoins nécessaires à la protection des personnes et de leurs biens ;
- La valeur des entités composant le territoire.

Chaque critère se décompose en plusieurs sous-critères. Cette méthode fait appel à des consultations avec des experts, responsables de la prévention et de la lutte contre les incendies de forêt sur la zone étudiée, dans le but de pondérer les différents critères structurant la vulnérabilité. L'intérêt de cette étude est de traiter des données qualitatives et quantitatives, tout en formalisant une approche spatiale pour l'évaluation de la vulnérabilité, destinée à la gestion du risque sur le territoire.

Une certaine communauté scientifique s'est par ailleurs attachée à étudier la probabilité de survie des constructions (Davis, 1990 ; Foote, 1994 ; Leonard et McArthur , 1999 ; Cohen, 2000, 2002 ; Ellis *et al.*, 2004 ; Caballero *et al.*, 2004 ; Leonard et Blanchi, 2005 ; Blanchi *et al.*, 2006 ; Xanthopoulos *et al.*, 2011 ; Manzello et Foote, 2014). Lors d'un incendie, celle-ci dépend fortement de caractéristiques des matériaux de construction (inflammabilité, combustibilité) (Cohen, 2000, 2002), de l'existence d'ouverture dans les constructions (Blanchi *et al.*, 2006), mais aussi de l'aménagement aux abords directs des bâtiments. La survie des bâtiments est fortement liée à l'inflammabilité des matériaux de toiture (Davis, 1990 ; Foote, 1994 ; Cohen, 2002 ; Xanthopoulos *et al.*, 2011). L'inflammabilité des bâtiments, davantage que celle de la végétation environnante, est la principale cause des pertes structurelles au cours des incendies ravageant les interfaces habitat-forêt (Cohen, 2000, 2002). Certains auteurs ont démontrés, que les pertes sont rarement dues à l'action directe du front de flamme : les maisons sont majoritairement menacées par les projections de brandons, et le rayonnement thermique provenant de feux disséminés aux abords des maisons (Ramsey *et al.*, 1995 ; Caballero *et al.*, 2004 ; Blanchi *et al.*, 2006 ; Cohen, 2008). La sécurité du logement dépend donc des mesures de préparation pour sa protection (espace défendable, matériel de lutte, entretien de la végétation autour des maisons, matériaux inflammables aux abords des maisons...). Une large gamme d'actions est disponible pour les résidents et les propriétaires, toutes visant à atténuer l'impact des feux sur leurs propriétés (Webster, 1986 ; Schäuble, 2004). Il s'agit notamment de mesures à prendre sur la conception et l'emplacement des maisons, de manière à limiter l'exposition aux flammes et au rayonnement thermique. Mais aussi, des mesures saisonnières telles que l'entretien de la végétation (débroussaillage, élagage, mise à distance...), l'entretien de l'habitat (retrait ou protection des éléments inflammables, curage des gouttières et toitures...). Toutes ces mesures ont pour objectif la réduction de la vulnérabilité. Les propriétaires et les propriétés bien préparés auront plus de chance de ne pas souffrir du passage d'un incendie (Penman *et al.*, 2013).

1.6. Conclusion du chapitre

Les différentes approches visant l'évaluation de la vulnérabilité révèlent le caractère multicritère de cette dernière, qu'elle soit « sociale » ou « biophysique ». Le nombre important de facteurs, de paramètres, qui servent à son évaluation, ne peut se réduire à une simple mesure (Alwang *et al.*, 2001). Le plus souvent les études sur la vulnérabilité au regard de l'incendie de forêt ne proposent pas sa spatialisation. L'incendie de forêt est un phénomène spatial, nous entendons, alors, mener une étude spatiale de la vulnérabilité du territoire des interfaces habitat-forêt. La notion de vulnérabilité territoriale découle de l'idée qu'il existe une « *solidarité de fait entre enjeux et territoire* » (D'Ercole et Metzger, 2009) : l'enjeu majeur qui intéresse notre étude, l'habitation résidentielle, est identifié par rapport au territoire des interfaces habitat-forêt, qui en dépend. En accord avec R. D'Ercole et P. Metzger (2009), nous pensons que, de ce lien, découle une diffusion de la vulnérabilité de l'habitat résidentiel identifié et localisé, à l'ensemble *interface*, et réciproquement, une diffusion de la vulnérabilité de l'ensemble *interface* aux habitations (effets de site) À nos yeux, les interfaces correspondent à une clé de lecture du territoire, et en leur sein, l'enjeu « bâti résidentiel » une clé de lecture de la vulnérabilité du territoire des interfaces.

Aussi, la carte de vulnérabilité des interfaces, que nous envisageons, n'est pas une carte d'aléa incendie de forêt, même si ce dernier n'est pas ignoré, à laquelle on superposerait les enjeux. Par l'approche spatiale, nous cherchons à mettre en évidence la vulnérabilité des interfaces construite par la distribution spatiale de la vulnérabilité des habitations, sous l'hypothèse que celle-ci suive une évolution continue dans l'espace.

Pour cela, nous traiterons la vulnérabilité de manière transversale, c'est-à-dire en s'intéressant aux nombreux critères qui appartiennent aux différentes acceptions de celle-ci : sensibilité, exposition, capacité de réponse (Fig. 6).

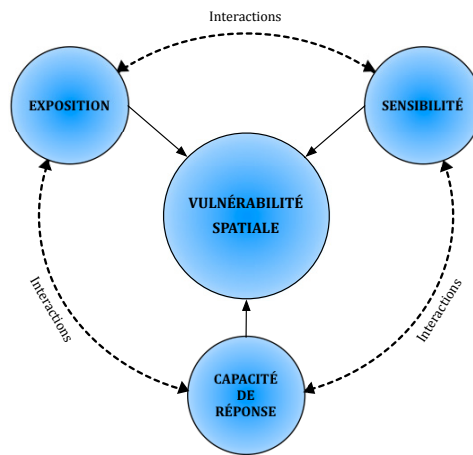


Fig. 6 : Concept de vulnérabilité spatiale appliqué aux incendies de forêt

L'utilisation d'un système d'information géographique (SIG) est tout à fait adaptée à cet égard, car ces outils sont idéaux pour gérer les informations spatiales, fournir le traitement et la visualisation des résultats cartographiques.

La sensibilité renvoie à la capacité d'endommagement, avec à la fois l'idée d'un dommage subi, dimension passive de la capacité, mais également active, avec par exemple la possibilité pour un propriétaire de mettre en œuvre des mesures permettant de réduire cette capacité d'endommagement. La sensibilité entre alors en interaction avec la capacité de réponse, qui correspond à la préparation des personnes et à leurs choix d'actions pour s'adapter au phénomène dangereux. L'adaptation est entendue comme la capacité à plus long terme, relevant d'une volonté d'agir pour redonner de la souplesse au système et lui permettre ainsi de s'adapter (Peltonen, 2005). Ces deux notions interagissent avec celle d'exposition, qui recouvre la susceptibilité du système à diffuser et modifier le phénomène perturbateur, du fait de ses caractéristiques naturelles (structure de la végétation, topographie) et anthropiques (distance des cibles aux vecteurs de diffusion, corridors ornementaux...).

La résultante de ces interactions correspond à la vulnérabilité globale, qu'il s'agira de spatialiser. La modélisation de la vulnérabilité du territoire des interfaces doit alors permettre aux acteurs comme aux particuliers d'appréhender et de comprendre quels sont les facteurs susceptibles de favoriser la propension à l'endommagement. L'objectif est donc double : faire émerger une prise de conscience basée sur la vulnérabilité, et déterminer des lieux où les actions préventives seraient les plus efficaces. L'idée est d'abord d'identifier ce qu'il faut préserver, les habitations en interfaces, puis d'analyser tout ce qui les rend vulnérables, au regard des composantes « exposition », « sensibilité » et « capacité de réponse » de la vulnérabilité. Rejoignant l'approche de L. Galiana-Martin et O. Karlsson (2011), nous souhaitons ainsi décomposer cette vulnérabilité en ses éléments déterminants, et les spatialiser pour faciliter sa lecture et permettre son appropriation par les personnes et les différents gestionnaires du risque. Cette démarche vise la production d'une connaissance opérationnelle, qui viendrait soutenir les gestionnaires dans le choix des mesures préventives à mettre en place.

Chapitre 2. Le contexte méditerranéen français, creuset du risque incendie de forêt

Dans ce chapitre, nous présentons les spécificités de la région méditerranéenne française au regard du phénomène incendie de forêt. Il est question de dresser un bilan historique des interactions entre la Société et l'Environnement. Après avoir exploré les facteurs naturels (climat, topographie, végétation) prédisposant la région méditerranéenne à l'incendie, nous nous concentrerons sur la relation Homme-Forêt. L'objectif est alors de souligner l'influence de l'homme sur le milieu naturel et son rapport avec les incendies de forêt. Cette étape sera l'occasion d'aborder la naissance des interfaces habitat-forêt, concept qui sera défini dans la dernière partie du présent chapitre.

Dans la deuxième partie du chapitre, nous présenterons l'outil Prométhée, base de données nationale au service de la mémoire sur les incendies de forêt. Nous détaillerons alors l'activité des feux en région méditerranéenne et soulignerons les lacunes de l'outil ne permettant pas son utilisation dans nos recherches.

Enfin, la troisième partie est consacrée à l'étude de la gestion du risque incendie de forêt, en région méditerranéenne française. Nous étudierons la place réservée à la vulnérabilité au sein du principal outil actuel de gestion, le Plan de Prévention du Risque Incendie de Forêt (PPRIF).

2.1. Le territoire méditerranéen et l'incendie, théâtre de la cohabitation Homme-Forêt

« Au-delà des questions de localisation et de position relative, la pensée géographique est concernée depuis sans doute ses origines par la grande thématique de la nature et de la culture. Les territoires sont en effet le domaine où sont en jeu les dispositifs qui relèvent de la nature (le monde physique et vivant) et de la culture (les réalisations des activités humaines ou société) et de leurs interrelations » (Ferrier, 2010). Le territoire, au sens de portion d'espace appropriée par un groupe social (Di Méo, 1998), se caractérise par la mise en contact de deux espaces : l'espace naturel et l'espace culturel. Cette acception assimile le territoire à un théâtre, où en tout point s'exerce l'interface nature-culture (Ferrier, 2010).

2.1.1. L'espace naturel méditerranéen complaisant à l'incendie de forêt

Les spécificités de l'espace naturel méditerranéen sont bien connues et étudiées depuis le début du XIX^{ème} siècle (Fesquet, 1998). Climatiquement, la région méditerranéenne est caractérisée essentiellement par l'existence d'une sécheresse estivale, de précipitations très irrégulières et des vents violents emblématiques (Mistral et Tramontane). En matière de relief et de sols, elle oppose des montagnes et collines aux pentes souvent fortes, et aux sols fréquemment superficiels. La flore herbacée, arbustive et arborescente est très riche et variée. Elle est adaptée à ces conditions spécifiques.

a. Un climat unique favorable aux incendies

La région méditerranéenne s'identifie aux territoires de nombreux pays. Pour beaucoup d'entre eux, seule une fraction de leur territoire fait partie intégrante de cette région, caractérisée par un climat unique : *« À la transition entre les moyennes latitudes de l'ouest des continents et la zone tropicale aride, le climat méditerranéen se singularise par une période estivale chaude et peu arrosée et un hiver doux et pluvieux. C'est là une particularité que l'on ne rencontre nulle part ailleurs »* (Beltrando, 2004). Le dénominateur commun définissant la région méditerranéenne est avant tout d'ordre climatique. F. Braudel l'affirme, *« l'unité*

essentielle de la Méditerranée, c'est le climat, un climat très particulier, semblable d'un bout à l'autre de la mer, unificateur des paysages et des genres de vie » (Braudel, 1985). Les régions méditerranéennes possèdent l'alternance saisonnière la plus contrastée du monde (Demangeot, 2000) :

- Un hiver commandé par les cyclones tempérés ;
- Un été commandé par les hautes pressions subtropicales.

Le climat méditerranéen français est sous l'influence de la mer Méditerranée, des reliefs et de l'anticyclone des Açores. La mer Méditerranée peut être considérée comme une immense machine thermodynamique qui stocke les rayonnements solaires durant l'été et restitue cette énergie pendant l'hiver. Les reliefs des Alpes et du Languedoc bloquent les masses d'air en provenance du Nord, tandis que l'anticyclone des Açores bloque les flux d'ouest, notamment en été.

Ce climat se caractérise alors par la douceur de ses hivers, avec de rares gelées. La saison froide est liée à la circulation de perturbations pluvieuses principalement d'ouest en est. À l'avant de ces perturbations les vents sont de secteur sud (chauds et humides) à l'arrière de secteur nord, froids et secs (Beltrando, 2004). La saison chaude est quant à elle caractérisée par le décalage vers le nord de la circulation atmosphérique. Les températures annuelles moyennes dépassent 15°C, avec des températures mensuelles moyennes autour de 25 °C en été, rarement moins de 10°C en hiver (Fig. 7).

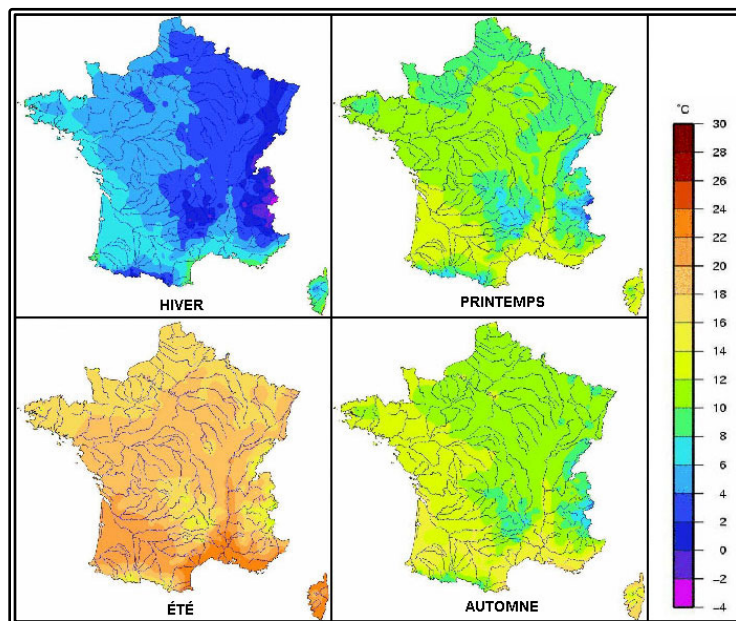


Fig. 7 : Température moyenne saisonnière (°C), normale 1981 - 2010 (source Météo-France®, fond de carte IGN®)

La situation géographique introduit de la diversité (Demangeot, 2000). Ainsi, le climat méditerranéen se dégrade en fonction de la latitude et de la continentalité (Vigneau, 2005). G. Beltrando distingue trois dégradations :

- Océanique à l'ouest du bassin : chaleur estivale moins marquée, amplitude thermique annuelle modérée, saison sèche réduite, précipitations plus abondantes et plus étalées entre l'automne et le printemps (Maroc, Portugal) ;
- Continentale vers l'intérieur des terres : hivers plus froids, étés plus chauds et moins arides, amplitude thermique annuelle marquée (Espagne, Anatolie) ;

- Aride dans le sud du bassin, au contact des déserts tropicaux : hivers plus froids, étés plus chauds, longue saison sèche (Algérie).

Il existe alors une dichotomie nord-sud (Demangeot, 2000 ; Vigneau, 2005) : la rive nord a deux maxima de pluie, en automne et au printemps, tandis que la rive sud n'en a qu'une, en hiver. L'étroite frange septentrionale, dont fait partie le littoral français présente les ambiances les moins chaudes et les plus arrosées, l'hiver y est relativement frais.

Le climat méditerranéen se distingue par la qualité de sa lumière et son incomparable ensoleillement, 2 000 à 3 000 heures par an (Vigneau, 2005). À titre d'exemple, la Provence reçoit 2 800 heures d'ensoleillement, en moyenne annuelle (Fig. 9), expliquant largement l'attractivité de la région (Ferrier, 2005), et la présence d'un été long et torride qui, selon J. Demangeot reprenant Virgile, « *déborde sur des mois qui ne sont pas les siens* » (Géorgiques, 28 av J.-C. ; Demangeot, 2000). La période estivale, avec ses minima de précipitations (Fig. 8) et ses ciels bleus inimitables, est la saison des incendies de forêt.

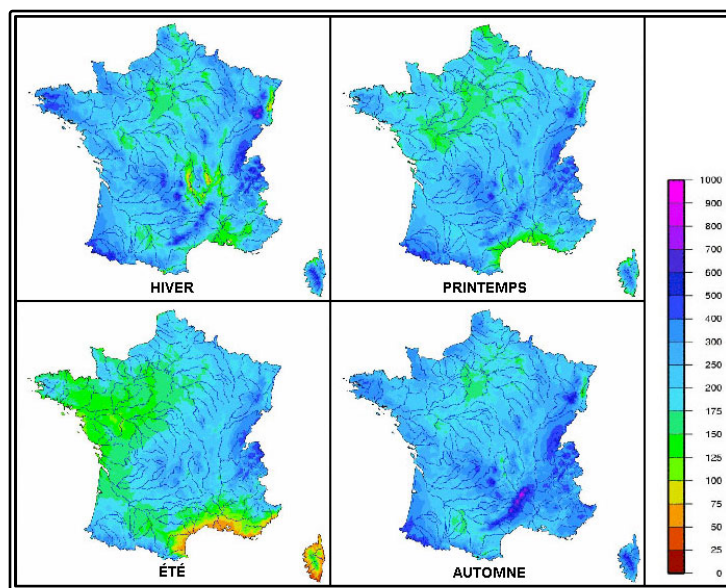


Fig. 8 : Précipitations cumulées par saisons (mm), normale 1981 - 2010 (source Météo-France®, fond de carte IGN®)

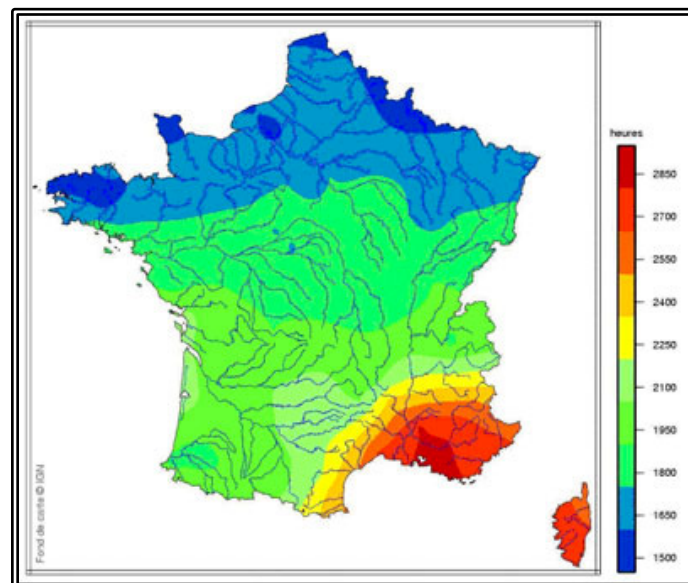


Fig. 9 : Insolation annuelle moyenne (h), normale 1991 - 2010 (source Météo-France®, fond de carte IGN®)

Le risque feu de forêt est indirectement lié à l'eau (Beltrando, 2004) puisque la chaleur et la sécheresse, induisant un déficit d'humidité dans une région et pour une période donnée, commandent, entre autres, le processus du feu. D'après G. Beltrando, « le déficit d'humidité se produit lorsqu'un temps anticyclonique s'installe durablement au-dessus d'une région, les perturbations circulant en périphérie. L'air est subsident, chaud et sec, l'humidité relative faible. La persistance de ce type de temps est donc la première cause de la sécheresse » (Beltrando, 2004).

La notion de sécheresse est ambiguë. Les auteurs s'accordent sur deux définitions (Beltrando, 2004 ; Vigneau, 2005) :

- La « sécheresse structurelle » : composante de la trame climatique, caractérisée par des retours plus ou moins réguliers, d'intensité habituelle dans des lieux qui lui sont familiers. Sa permanence à l'échelle annuelle entraîne l'aridité.
- La « sécheresse accidentelle » : elle se démarque de la première par un caractère apériodique, une intensité qui fait exception dans les lieux habituels ou tout simplement qui touche des lieux inhabituels. Cette sécheresse est, en ce sens, un phénomène climatique préjudiciable.

Plusieurs méthodes ont vu le jour dans le but de déterminer la sécheresse :

- La méthode *Thornthwaite* est fondée sur une approche conceptuelle : l'évapotranspiration potentielle (ETP). Cette donnée est théorique (opposée à l'évapotranspiration réelle ETR) et non-expérimentale mais caractérise les conditions climatiques. L'ETP permet de définir les saisons ou périodes climatiquement sèches, soit quand les précipitations P sont inférieures aux besoins de la végétation ($P < ETP$). Quand le bilan climatique (mensuel ou annuel) est négatif et que les réserves en eau du sol sont épuisées, la sécheresse est définie par le déficit hydrique (Fig. 10) ;

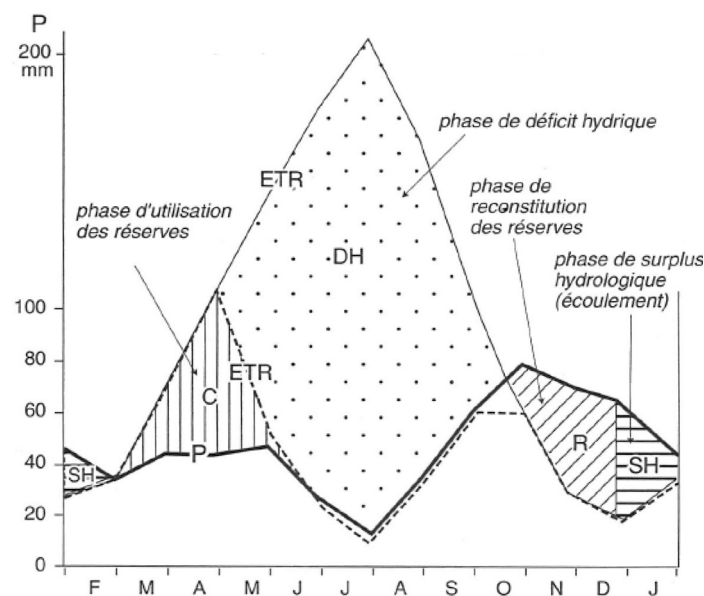


Fig. 10 : Bilan hydrique à Marseille (source : Vigneau, 2005)

- La méthode basée sur les diagrammes ombrothermiques (Fig. 11) permet de cerner la nature et l'intensité de la sécheresse par variation du rapport des précipitations aux températures.

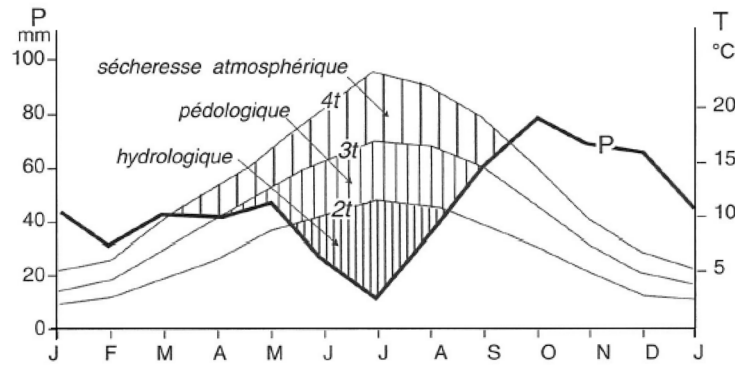


Fig. 11 : Diagramme ombrothermique de Marseille (source : Vigneau, 2005)

Ainsi quand $P < 4T$, le mois connaît la sécheresse atmosphérique (l'atmosphère prélève plus d'eau qu'elle n'en apporte). Quand $P < 3T$, la sécheresse est dite pédologique, épuisement de la réserve utile du sol (RU), voire de toute son eau de rétention capillaire (C). Enfin, les sécheresses hydrographiques (étiages) et phréatiques (vidanges des nappes) s'établissent quand $P < 2T$. Pour l'étude des incendies de forêt, c'est d'abord la sécheresse atmosphérique qui nous intéresse bien que les autres sécheresses, toutes interdépendantes, puissent servir à préciser l'intensité du phénomène (Vigneau, 2005) ;

- La méthode Indice-Forêt-Météo (IFM) de Météo-France (Fig. 12) analyse la sécheresse « feux de forêt » par différents indices donnant une vue globale de celle-ci, pertinente au sens du risque d'incendie de forêt en région méditerranéenne (Cassin, 2011) : l'indice du combustible léger (litière supérieure), l'indice d'humus (matière organique à moyenne profondeur) et l'indice profond. Ces indices augmentent avec la sécheresse.

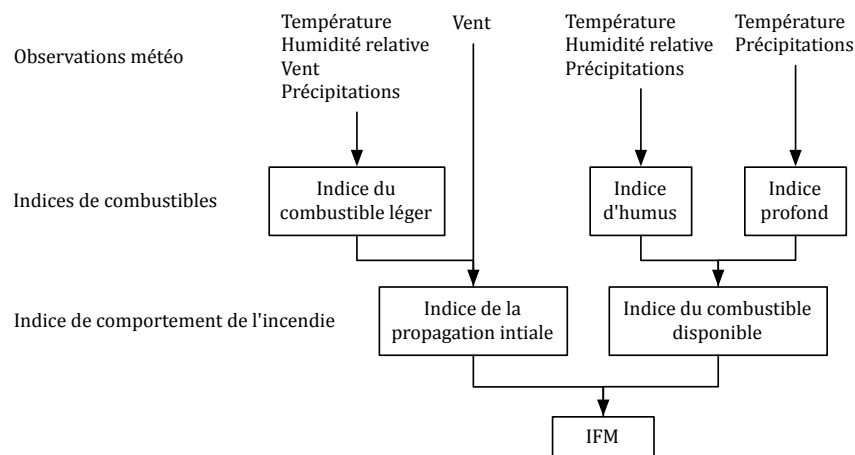


Fig. 12 : Méthode de calcul de l'Indice-Forêt-Météo (IFM) (Source : Météo-France)

Enfin l'orientation des vents joue un rôle important sur le climat. En région méditerranéenne française, le Mistral, vent de nord-ouest à nord amène un froid sec en hiver, et un temps chaud et sec en été. Le vent du sud amène des entrées maritimes, notamment sur le Languedoc-Roussillon. On observe ainsi une très forte variabilité interannuelle du climat qui n'est pas sans conséquences pour la gestion des incendies de forêt (Carnat et *al.*, 2005).

En conclusion, la période estivale rassemble les facteurs privilégiant les incendies de forêt, soit une forte sécheresse associée à de fortes chaleurs auxquelles s'ajoute le vent. Sécheresse et chaleur conduisent à diminuer la teneur en eau de la végétation qui devient alors très inflammable. Le vent qui peut survenir sous la forme de rafales violentes et

atteindre de très grandes vitesses, accélère aussi le dessèchement des végétaux, apporte l'oxygène nécessaire à la combustion et participe à la propagation des incendies (Rothermel, 1971 ; Viegas *et al.*, 1991). Enfin le vent est vecteur de mises à feu secondaires par le transport de particules incandescentes (Colin *et al.*, 2002).

b. Le relief, support de l'incendie

L'une des caractéristiques physiques communes au pourtour méditerranéen est la présence de la montagne. Au bord de la mer ou à quelques kilomètres de la côte se dressent des montagnes récentes, hautes, aux formes mouvementées créant des paysages à la topographie accidentée. Les pentes sont souvent fortes même dans les régions de moyenne montagne méditerranéenne (De Franchis, 2003).

Les sols méditerranéens présentent une grande diversité en raison de la grande variabilité des facteurs naturels (climat, végétation, lithologie...) qui conditionnent leur formation et leur répartition. Deux se distinguent (George, 1933) :

- **Les sols squelettiques** : aux grès et aux roches anciennes, granitiques et gneissique se superpose une arène sableuse. Les schistes se couvrent superficiellement d'une terre grasse. Ces dépôts de surface peuvent être appelés sols squelettiques. Ils contiennent un potentiel de vie à porter une végétation. Mais ce sont des composés maigres, dépourvus de substances fertilisantes, et très peu épais. Ils sont sensibles à l'érosion éolienne ou hydrique, surtout dans la situation de découverte végétale dans laquelle ils se retrouvent après un incendie ou par suite du surpâturage.
- **Les sols rouges** ou *terra rossa* : ces sols sont beaucoup plus profonds, et plus évolués. Leur teinte est due à la concentration des oxydes de fer (sols fersiallitiques). Ces sols sont de bons sols agricoles ou forestiers, à la condition qu'ils soient protégés de l'érosion. Cette dernière les réduit à des sols squelettiques autour de croûtes calcaires stériles.

Globalement, les sols méditerranéens sont souvent fragiles, soumis à des actions anthropiques importantes et rajeunis par l'érosion. Ils sont alors peu profonds, peu différenciés et pauvres en matière organique. Ils ont une capacité de réserve en eau faible, ce qui constitue un lourd handicap, pour des régions où les précipitations sont faibles, au regard des incendies. Néanmoins, il existe aussi, dans ces régions, des sols profonds, bien structurés, souvent plats ou peu pentus et retenant bien l'eau, notamment dans les plaines où domine l'agriculture.

La topographie accidentée joue un rôle important dans la propagation des feux. La nature de la roche en place (lithologie) structure le relief qui influence la circulation des masses d'air, et donc le climat. Quatre variables topographiques agissent sur le développement des incendies, l'altitude, la pente, l'exposition et la forme du relief.

L'altitude exerce une forte influence sur les précipitations, la température et l'humidité relative. De manière générale, les précipitations augmentent avec l'altitude, de fait, l'humidité relative sera plus faible à basse altitude. De plus la quantité de végétation décroît à mesure que l'altitude augmente. En conséquence, l'effet combiné de ces deux variables implique qu'à haute altitude, les températures sont plus basses, l'humidité relative plus élevée et la charge en combustible plus faible, ce qui ralentit d'autant plus la propagation des incendies. À basse altitude, les températures sont plus élevées, l'air plus sec et la charge en combustible plus conséquente, ainsi l'intensité des feux est plus forte.

L'exposition agit également sur les conditions atmosphériques. Généralement, les versants sud présentent les conditions les plus favorables pour une inflammation rapide et

pour la propagation des flammes (types de végétation, influence des vents et de l'ensoleillement).

De façon générale, le relief crée un enroulement du vent ce qui induit des phénomènes aérologiques locaux disparates. Dans les zones les plus escarpées, l'effet pente se combine à l'effet du vent et accélère la propagation du feu depuis les piémonts vers les crêtes. Dans les zones vallonnées, les phénomènes sont plus complexes, le vent dominant pouvant même parfois changer radicalement de direction créant des « couloirs de feu », passages préférentiels de l'incendie. La propagation des incendies est accélérée dans les montées et ralentie dans les descentes. La pente conditionne l'inclinaison des flammes par rapport au sol et influe sur leur vitesse de propagation (Dupuy, 1997). En règle générale, la vitesse de propagation est deux fois plus rapide sur des pentes de 10° et quatre fois plus rapide sur des pentes de 20° (McArthur, 1967). Leur progression est considérablement ralentie sur les pentes descendantes.

c. *La forêt méditerranéenne*

Sur le plan végétal, les milieux méditerranéens se caractérisent avant tout par une grande diversité, résultat d'un ensemble de facteurs que P. Braudel assimile à « *une somme interminable de hasards, d'accidents, de réussites répétées* » (Braudel, 1985). L'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) définit ainsi la forêt : « *Territoire occupant une superficie d'au moins 50 ares avec des essences forestières capables d'atteindre une hauteur supérieure à 5 m à maturité in situ, un couvert arboré de plus de 10 % et une largeur moyenne d'au moins 20 m* ».

« *La forêt méditerranéenne n'est certainement pas fragile, comme on peut le lire encore trop souvent. Elle possède au contraire une surprenante vigueur si l'on songe aux nombreuses contraintes auxquelles elle doit faire face : la sécheresse estivale, les coups de froid ou de chaleur, et bien entendu le feu* » (Clément, 2005). C'est ainsi une végétation spécifique et adaptée, c'est-à-dire xérophile (adaptée à la sécheresse), thermophile (adaptée à la chaleur) et frugale (adaptée aux sols pauvres) qui s'est installée. Souvent sempervirente, elle est caractérisée par l'abondance de ligneux et par des feuilles petites et vernissées pour résister aux dures conditions de l'été. Ainsi les arbres ou les arbustes ont des feuilles coriaces, en général persistantes, présentant des dispositifs de lutte contre la transpiration excessive de l'été (membranes épaisses, stomates protégés du soleil, concentration particulière des sucres cellulaires) : le pin parasol, le chêne vert, le chêne-liège, en sont des exemples. Cette végétation méditerranéenne est par ailleurs marquée de façon prépondérante par le passage du feu avec le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) aux stratégies de régénération adaptée, le ciste conquérant après le passage d'un feu, et le maquis et la garrigue, formes dégradées de la forêt après incendie.

Les types actuels de végétation sont en majeure partie le résultat de l'action humaine et son usage du feu (Le Houérou, 1980). À la forêt primaire ont succédé garrigues et maquis. La garrigue désigne une formation végétale caractéristique des régions méditerranéennes calcaires, proche du maquis qui lui se développe sur des terres acides. Cette formation s'établit dans les massifs calcaires en terrain sec et filtrant. Elle se caractérise par la rareté des grands arbres. Elle résulte en général de la dégradation de peuplements forestiers notamment de la forêt de chêne vert, qui passe progressivement à des peuplements de pins d'Alep, puis à la garrigue. La végétation est essentiellement composée de plantes adaptées à la sécheresse (espèces xérophiles), et au fort ensoleillement (plantes héliophiles). Le thym, la lavande, le genévrier oxycèdre, le genêt scorpion ou le genêt d'Espagne, le buis, le pistachier, le pistachier lentisque, le chêne kermès sont des espèces typiques des garrigues méditerranéennes non boisées.

Nous pouvons distinguer neuf types de peuplement forestier sur substrat rocheux calcaire (Tab. 2)(Lampin, 2004). Cette typologie caractérise les peuplements selon plusieurs facteurs tels que la structure horizontale et la structure verticale du peuplement forestier.

Type	Peuplement	Hauteur dominante	Recouvrement (%)				
			0-0,5 m	0,5-1 m	1-3 m	3-10 m	>10 m
A	Peuplement forestier haut et évolué fermé	15,6 m	30-60 (50)	10-30 (30)	10-30 (20)	10-30 (20)	60-90 (70)
B	Peuplement forestier bas fermé sans strate basse	8,6 m	1-10 (1)	1-10 (1)	10-30 (20)	60-90 (90)	Présence (1)
C	Garrigues hautes ouvertes et réparties en taches	4,6 m	30-60 (60)	10-30 (20)	10-30 (30)	1-10 (1)	Absence
D	Garrigues basses	2,1 m	30-60 (40)	1-10 (10)	1-10 (1)	Présence (1)	Absence
E	Peuplement forestier très fortement éclairci	13,2 m	30-60 (30)	1-10 (10)	1-10 (10)	1-10 (10)	1-10 (1)
F	Peuplement forestier très bas mais fermé	4,9 m	30-60 (50)	30-60 (40)	60-90 (60)	10-30 (10)	Absence
G	Peuplement forestier dense mais peu haut	8,4 m	10-30 (20)	10-30 (30)	10-30 (10)	60-90 (80)	Absence
H	Peuplement forestier haut et assez clairsemé, à strate basse modérée	16,4 m	10-30 (30)	10-30 (20)	30-60 (40)	30-60 (40)	10-30 (20)
I	Peuplement forestier haut et peu dense à strate basse développée	16,4 m	60-90 (70)	30-60 (30)	10-30 (30)	30-60 (40)	10-30 (10)

Tab. 2 : Typologie des peuplements forestiers sur substrat rocheux calcaire, hauteur dominante et intervalle de recouvrement (recouvrement moyen) d'après (Lampin, 2004)

Sur substrat siliceux, le maquis contient des arbousiers, de la bruyère arborescente, des calycotomes, des lentisques, parfois du buis, des daphnés et des ajoncs. La végétation méditerranéenne sur substrat cristallin peut quant à elle être divisée en sept types de peuplement (Fig. 13) (Jappiot, 1997). Nous retrouvons à peu près les mêmes facteurs de distinction (structure horizontale et verticale), cependant les essences composant les types de peuplement diffèrent de celles des régions méditerranéennes calcaires.

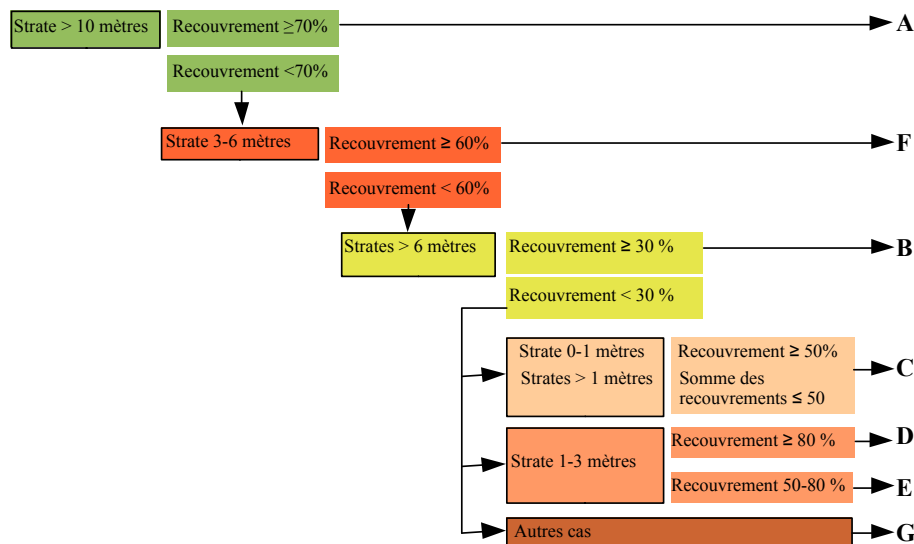


Fig. 13 : Typologie des peuplements forestiers sur substrat cristallin d'après (Jappiot, 1997)

Type A. Châtaigneraie ou chênaie haute et fermée dont le recouvrement de la strate haute (10 m) atteint 70 %. Ce type de peuplement est généralement représenté par des

vergers et taillis de châtaigniers, des futaies et taillis de chênes verts et pubescents ou encore des aulnaies et ripisylves ;

Type B. Futaies claires de feuillus ou de résineux dont le recouvrement de la strate moyenne (6m) est supérieur à 30 %. Les subéraies (plantation de chênes-lièges), les châtaigneraies et chênaies sont les peuplements de ce type de formation ;

Type C. Maquis bas caractérisé par un recouvrement de la strate basse (1 m) dépassant 50 % et un recouvrement de strate supérieur à 1 m n'atteignant pas 50 %. Le peuplement type est celui de cistaies (pyrophytes), de maquis ou de subéraies récemment incendiées ;

Type D. Maquis moyen arboré à forte biomasse. Ici, le recouvrement de la strate 1-3 m dépasse 80 %. Ce peuplement est composé de maquis et subéraies claires à bruyères arborescentes ;

Type E. Maquis moyen à faible biomasse. Le recouvrement de la strate 1-3 m est compris entre 50 et 80 %. Le peuplement associé est un maquis à bruyères arborescentes, calycotomes et arbousiers ;

Type F. Maquis haut avec un recouvrement de la strate 3-6 m supérieur à 60 %. Ce peuplement est un maquis haut à arbousier, bruyère arborescente, chênes-lièges et chênes verts ;

Type G. Peuplement étagé clair, avec un recouvrement des strates supérieures à 1 m inférieur à 50 %. Il se compose de subéraies claires, de maquis bas clairsemés, de chênaies pubescentes ou encore de pinèdes clairsemées.

Maquis et garrigues sont aussi désignés sous le nom de forêts subforestières. Ces formations végétales répondent particulièrement bien à la sécheresse estivale prononcée, couplée à des températures élevées ainsi qu'aux perturbations telles que les incendies, mais le maintien de conditions extrêmes comme une canicule prolongée peut entraîner une surmortalité des individus (Lloret et *al.*, 2004).

Les végétaux méditerranéens sont bien adaptés au retour périodique des incendies. Leur aptitude à la reconquête permet aux plantes de la Méditerranée de repousser dès la première ou la seconde année après le passage d'un feu (Clément, 2005). On parle alors d'espèce pyrophytes, terme dont l'origine est attribuée à Kuhnholz-Lordat (1939), désignant les plantes dont la propagation, la multiplication ou la reproduction est stimulée par le feu ou celles qui résistent au feu par divers mécanismes (Le Houérou, 1980). On distingue les pyrophytes passifs, qui résistent à l'effet du feu grâce à des mécanismes ou des particularités diverses telle que la présence d'une écorce épaisse : chêne-liège, une faible susceptibilité à prendre feu tels les tamarix, les *Atriplex* (taux élevé de matières minérales dans le bois) ou même certains chênes caducifoliés et autres essences à bois très dur (If, Buis) (Le Houérou, 1980).

L'auteur distingue encore les pyrophytes actifs à stimulation végétative dont la croissance est stimulée par le feu. Tels sont :

- Le thuya de berberie (*Tetraclinis articulata*) ou le filaire (*Phillyrea media*) : repousses souterraines de souche ; pas de drageon ;
- Le chêne Kermès (*Quercus coccifera*) a la double faculté de repousser par ses organes aériens et aussi d'émettre des drageons à partir du système racinaire ;
- Le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) dont les cônes éclatent au feu essayant les graines à des distances de plusieurs mètres permettant à une partie d'entre elles d'échapper au feu tout en améliorant le taux de germination par levée de dormance. La teneur en

résine très inflammable des pins favorise les incendies (Clément, 2005). Les sautes de matières enflammées peuvent atteindre plus de 2 km dans le cas des pinèdes de pin d'Alep, entraînant ainsi l'allumage de foyers secondaires dans au moins 40 % des cas (Alexandrian, 2002).

La végétation des sous-bois contribue au phénomène incendiaire. Les oléastres, les pistachiers-térébinthes ou les lentisques contiennent des résines ou des huiles très inflammables. Tous ces végétaux possèdent de surcroît une partie ligneuse très développée qui fournit au feu une grande quantité de matières combustibles.

Les caractéristiques de la végétation méditerranéenne résultent d'une longue évolution qui remonte au moins au Néolithique (Clément, 2005). L'intensification des incendies, liée au développement des cultures et à la nécessité d'ouvrir des espaces de pâturage pour les troupeaux domestiques, a largement contribué à diffuser les chênes sempervirents et les pins méditerranéens, au détriment parfois de forêts caducifoliées (Durand, 1998).

La végétation méditerranéenne actuelle est ainsi largement « *la fille du feu* » (Clément, 2005). Dès la Préhistoire, le feu a constitué un moyen efficace d'aménagement des forêts par les paysans du Néolithique (Arnould, 2002). La cohabitation du feu, des hommes et de la forêt s'est prolongée tout au long de l'histoire.

2.1.2. Histoire des interactions Homme-Forêt

« *Des traces anciennes aux marques d'aujourd'hui, les territoires nous parlent de nous, ils nous parlent de notre histoire profonde, à l'intersection de la nature et de la culture, que nous voulons débusquer par une interrogation inlassable des lieux* » (Ferrier, 1984). Dans le cadre de notre recherche, nous considérons la culture, au même titre que J.P. Ferrier (2010), comme l'ensemble des productions matérielles et immatérielles qui résultent de l'activité des sociétés humaines.

Les progrès récents de la connaissance du développement de l'humanité font apparaître « *nos lointains ancêtres, non plus comme les représentants d'une espèce furtive pesant peu sur le devenir des écosystèmes, mais comme les maîtres de larges territoires, et ceci depuis bien des milliers d'années* » (Leonard, 2004). L'histoire du territoire méditerranéen français est liée à celle de la forêt, espace privilégié des activités humaines, par extension, de la *culture* : « *la forêt est le miroir de la société* » (Corvol, 1987). La forêt méditerranéenne constitue un espace aménagé, utilisé et modifié par l'homme. Elle semble être l'entité centrale de ce territoire, particulièrement dans la problématique des incendies de forêt. L'historien Y. Rinaudo dresse une chronologie de l'histoire de la forêt et des pratiques humaines en son sein (Rinaudo, 1988). Dans son étude intitulée *L'histoire de la forêt méditerranéenne d'hier à aujourd'hui*, il définit trois grandes périodes historiques, que nous allons retracer dans cette section.

L'âge villageois (jusqu'à la fin du XIX^e siècle). La société du XVII^{ème} siècle perçoit l'espace rural et forestier comme une source d'insécurité, du fait du brigandage et des invasions provenant de la mer. Pour des motifs défensifs, les populations étaient alors contraintes à résider au sommet des collines, sur des sites rocheux et escarpés. On les retrouve encore aujourd'hui : « *Le village perché est sans aucun doute la forme d'habitat la plus répandue et la plus caractéristique des paysages ruraux méditerranéens* » (Joannon et al., 1975). Au fil des ans, ce sentiment d'insécurité se dissipe, on assiste alors à l'expansion des villages. Les constructions de fermes en dehors des villages s'intensifièrent avec l'extension des périmètres irrigués au XVIII^{ème} siècle. Les connaissances évoluent, l'homme perçoit le potentiel qu'offre la forêt pour l'amélioration des conditions de vies. S'amorce alors l'exploitation grandissante de la forêt, qui devient l'indispensable complément de l'économie villageoise. La forêt elle-même n'est pas habitée, mais la population rurale augmentant, on

assiste à sa conquête au profit de l'aménagement de nouveaux villages. Les ressources forestières s'en retrouvent avidement recherchées et disputées.

Pour les communautés, le droit d'usage assure l'exploitation de la forêt dans un but de subsistance. La forêt était alors complètement intégrée à l'économie villageoise. Cela ne va pas sans conflits, et les propriétaires privés cherchent à limiter son exploitation afin d'y produire du bois d'œuvre, dans la perspective d'une économie de marché. De son côté, l'État rejoint les préoccupations des propriétaires forestiers, et se positionne en conservateur d'un patrimoine naturel menacé par les abus du droit d'usage, d'une part, et par les incendies qui la ravagent, d'autre part. M. Faure, dans son étude sur l'histoire des incendies (Faure, 1987), cite un document d'archive de la Marine à Toulon, datant de Louis XV. Il relate la « Visite des bois des vigueries de Provence » effectuée par le Comte Chabert de L'Isle de 1720 à 1725. Le Comte Chabert de l'Isle constate l'amenuisement de la ressource forestière :

« [...] à Collobrières et à Bormes, on brûle les pins naissants sous le prétexte de les couper et de les envoyer vendre à Marseille, de sorte qu'il en reste plus un [...] »

[...] autour de Draguignan, la plus grande partie des pins sots est détruite par les incendies qui arrivent annuellement [...]

[...] À Barjols, à Pierrefeu, Bargème, Pourrière, Esparron, Bras, Mazaugues, Quinson et Montmeyran, les seigneurs comme les paysans ébranchent et même écient les arbres pour donner les feuilles à leurs bestiaux ; les chèvres dépouillent les arbres de leur écorce à fleur de terre. C'est un abus que l'usage semble autoriser dans toute la province et auquel on ne saurait trop remédier si l'on veut conserver ce qui reste [...]

[...] À Seranon, à Castellane, à Barrême, à Digne, il n'y a plus de bois pour l'usage des habitants [...] ».

Ainsi, bien que cette forêt, plus cloisonnée, davantage exploitée et moins embroussaillée qu'aujourd'hui, il s'y produit de nombreux incendies dont certains de plusieurs milliers d'hectares (Challot, 2004).

L'abandon de la forêt méditerranéenne (milieu du XIX^e siècle jusqu'au milieu du XX^e siècle). L'utilisation traditionnelle de la forêt se poursuit, l'économie des villages en est tributaire, et se développe jusqu'au milieu du XIX^e siècle : *« Les plus nombreux (petits propriétaires, ouvriers sans terre, artisans) y trouvent les indispensables ressources complémentaires prélevées dans le cadre des usages en vigueur : terres agricoles (essarts, écobuage), engrais (feuille, rameaux), litière et nourriture du bétail (porcs et surtout ovins et caprins), bois d'œuvre (outils réparations diverses, charpente), combustible (chauffage, charbon de bois, fours à chaux, tuileries...) produit de la chasse et de la cueillette [...] Et comme les hommes sont toujours plus nombreux, la ponction des richesses s'alourdit, au point de menacer la forêt elle-même qui recule et s'appauvrit »* (Rinaudo, 1981 ; cité dans Faure, 1987). L'État, décidé à en maîtriser ces usages, promulgue le Code Forestier en 1827. Avec lui, les préfets, les Conseils généraux et l'administration forestière prennent en charge la Défense des forêts contre l'incendie (Challot, 2004), qui ravage chaque année le territoire : *« cet espace forestier nettoyé, gratté, parcouru, il brûle toute les années en cet « autrefois » idyllique, et beaucoup. Ventoux et Lubéron en flammes, collines de Marseille et de Gemenos, incendies gigantesques dans les Maures et l'Estérel en 1838, 1840, 1854. 6 000 ha dans le Var en 1862, 11 000 en 1864, 4 000 ha par an de 1838 à 1848 »* (Faure, 1987). En parlant d'un « autrefois idyllique », M. Faure fait référence à l'idée selon laquelle, l'aléa incendie est un problème récent, idée récusée par l'historien H. Amouric : *« La fausse idée d'un âge d'or, d'un autrefois qui aurait connu un harmonieux équilibre entre l'homme et la forêt est à bannir »* (Amouric, 1982). À M. Faure de rajouter : *« la forêt méditerranéenne n'a jamais autant brûlé que pendant ledit âge d'or. Elle n'a*

jamais autant brûlé, bien qu'elle fût occupée par les hommes, et parce qu'elle était occupée par les hommes. Les activités qui s'y déployaient multipliaient les causes d'incendies » (Faure, 1987).

Des mesures sont prises suite à l'instauration du Code Forestier, l'écobuage est réglementé dans les forêts publiques en 1841, et dans les forêts privées en 1864. Dans les années 1880, l'État lance des campagnes de restauration des terrains de montagne. Cependant, les frais engagés ne sont pas à la hauteur des rentes : la forêt méditerranéenne coûte plus qu'elle ne rapporte, et les propriétaires se désintéressent progressivement de leurs parcelles forestières.

Cette période se caractérise par un fort exode rural qui va en s'accroissant. Les besoins en bois de l'économie domestique régressent, parallèlement aux exigences et aux progrès de l'industrie qui dédaignent les bois durs, nouveaux ou de petites dimensions dont la forêt méditerranéenne est productrice. De ce fait, on constate le passage d'un usage intensif, voire ravageur de la forêt, à un non usage. Cette accalmie octroie un second souffle à la forêt, qui entame un nouvel essor. Elle reconquiert les terres agricoles abandonnées, elle s'embroussaille de plus en plus, offrant davantage de zones d'expression à l'incendie.

Les pouvoirs publics ont conscience du danger, et commencent à intégrer des pistes et des pare-feu dans les massifs forestiers. Cependant les moyens de lutte restent faibles, et les incendies continuent à parcourir le territoire méditerranéen.

Le retour à la forêt (depuis le milieu du XX^e siècle). Sorties de la seconde guerre mondiale, les populations citadines ressentent le besoin de revenir à la Nature. Les perspectives de la forêt méditerranéenne se trouvent alors modifiées du fait d'un intérêt économique relancé : l'espace forestier apporte une plus-value au cadre de vie (Corvol, 2009). La forêt devient alors un argument de vente qui augmente la valeur du foncier.

Le tourisme prend un essor considérable et la forêt méditerranéenne attire de nombreux occupants. Les activités de loisir impliquent la présence toujours plus abondante des personnes dans les espaces forestiers. Cette présence impacte largement la probabilité d'éclosion des feux, par négligence ou accident. De plus, la forêt apporte des agréments, qui offrent un cadre de vie agréable, où l'homme y cherche la tranquillité grâce à une vie proche de la nature (Leonard, 2004). Cependant, ce ne sont plus des ruraux, mais les habitants des villes qui viennent s'installer et y transportent « *leur mode de représentation très urbain de la végétation* » (Racine, 1983). Leurs modèles semblent trop souvent caractérisés par une méconnaissance de la région : « *Généralement ignorant des caractéristiques de la forêt, le nouvel habitant méconnaît les problèmes posés par le risque d'incendie lié à sa présence même dans ce milieu : chaque habitant peut être à l'origine du feu. Chacun possède peut-être un tuyau d'arrosage mais aussi une foule de moyens de mettre le feu* » (Racine, 1983).

Le territoire méditerranéen ne cesse d'évoluer. Entre 1980 et 2008, les sols agricoles (cultivés ou non) ont perdu 547 000 ha (soit -0,54 % par an) (Source Agreste Statistique, 2010), les forêts qui prédominent, ont gagné 417 000 ha (soit + 0,7 % par an). À titre de comparaison, sur la même période, l'évolution moyenne en France métropolitaine s'est traduite par une diminution annuelle des surfaces agricoles de seulement 0,27 % et par une augmentation annuelle de la surface forestière de 0,23 % (Source Agreste Statistique, 2010). Le développement socioéconomique des dix dernières années a généré un déclin des activités agricoles et pastorales ainsi que l'abandon des espaces ruraux. Non seulement la déprise agricole conduit à la fermeture du paysage avec la progression de la forêt, notamment en Provence, mais elle s'effectue aussi au profit de zones urbanisées, tout particulièrement sur la bande littorale (Lee et Slak, 2007). L'arrêt des activités telles que le prélèvement de bois de chauffage et l'entretien de la forêt, conduit à l'accumulation du bois mort et au développement des sous-bois.

En parallèle, la pression anthropique exercée sur ce territoire méditerranéen est telle qu'entre 1999 et 2007, on enregistre une progression démographique de 9,4 % (soit + 1,04 % par an), pour une évolution moyenne en France métropolitaine de 5,6 % (soit + 0,62 % par an) (Source INSEE : valeurs de recensements 1999 et 2007). Cette pression, d'une part des propriétaires fonciers, agriculteurs ou citadins, d'autre part des candidats à la construction, promoteurs ou particuliers, s'exerce sur les conseils municipaux et, par ricochet, sur les services de l'Etat, en charge de l'urbanisme.

Cette dynamique entraîne la croissance de l'urbanisation, parfois mal maîtrisée et anarchique, résultant sur un phénomène de mitage, caractérisé par l'expansion des habitations aux abords des zones boisées, voire au sein même de la forêt (Lampin-Maillet, 2009). Le mitage est le résultat des politiques d'aménagement du territoire d'après la seconde guerre mondiale, où les politiques de protection des espaces naturels et forestiers exigeaient des surfaces supérieures à 5 000 m² pour autoriser la construction (Bonnier, 2008). J. Bonnier cite Albert Astier, Directeur départemental de l'agriculture des Bouches-du-Rhône, qui a baptisé le résultat de cette pratique, « *le mitage* » en 1973. Ce phénomène aujourd'hui généralisé, on assiste « *depuis la frontière italienne jusqu'à la frontière espagnole* » à la colonisation des collines et des garrigues par « *l'habitat dispersé et diffus* » (Bonnier, 2008). En parallèle, l'espace entre les zones d'habitat et les zones de forêt se réduit progressivement, il en résulte l'atténuation des zones tampons à de faibles périmètres, insuffisants pour stopper la propagation d'un feu. Le mitage multiplie les points potentiels de départs d'incendies accidentels, et disperse les effectifs de lutte contre les incendies, rendant les habitations d'autant plus vulnérables. La multiplication des zones de contact entre espaces anthropisés et espaces naturels, appelées interfaces habitat-forêt, influence lourdement le risque incendie de forêt (Lampin-Maillet, 2009). Ces interfaces sont à la fois des lieux privilégiées de départs de feux, et des lieux de vulnérabilité du fait de la présence des biens et des personnes.

2.2. La base de données Prométhée, un outil au service de la mémoire des feux

À l'occasion d'un article sur l'histoire des incendies de forêt, le scientifique M. Faure (1987), appelle à tirer les leçons du passé : « *la mémoire des hommes est courte : ils oublient facilement ce qui s'est passé seulement un an plus tôt ; à plus forte raison certains événements un peu anciens qui ne figurent pas dans les livres d'histoire* ». Nous avons constaté (§ 2.2.2) que le feu est un élément moteur dans la dynamique du territoire méditerranéen, depuis les temps anciens. Conserver les traces du passé, les stocker pour mieux les analyser est alors une manière de pallier la sélectivité des souvenirs.

En France, la base de données Prométhée fait office de « mémoire » statistique des feux de forêt et de l'espace péri-urbain, en accès libre sur internet. Créée en 1973, elle couvre 15 départements du sud-est de la France, soit les régions Languedoc-Roussillon, Provence-Alpes-Côte-d'Azur et Corse (Fig. 14).

La période 1960-1970 marque le début d'une volonté d'affronter la problématique des incendies de forêts en région méditerranéenne. En effet, pour le seul département du Var, il brûle en moyenne 8 000 ha par an, sur la période 1962-1972 (Faure, 1987). Cette dynamique, qui donne naissance à l'Opération Prométhée, se traduit par la mise en place simultanée de l'Entente Interdépartementale en vue de la protection de la forêt contre les incendies, en 1963, de la base de canadais de Marignane et de celle du centre de la Sécurité Civile sur le site de Valabre. La création de Prométhée répond à un besoin de communiquer, de quantifier certaines caractéristiques des incendies mais aussi de disposer d'une terminologie homogène, ainsi que d'une mémoire collective. Prométhée a donc pour objectifs de fédérer et d'harmoniser les données issues d'une grande variété de services (Gendarmerie, SDIS, DDT(M), ONF), puis de redistribuer les résultats aux personnes concernées par le problème des incendies de forêts.

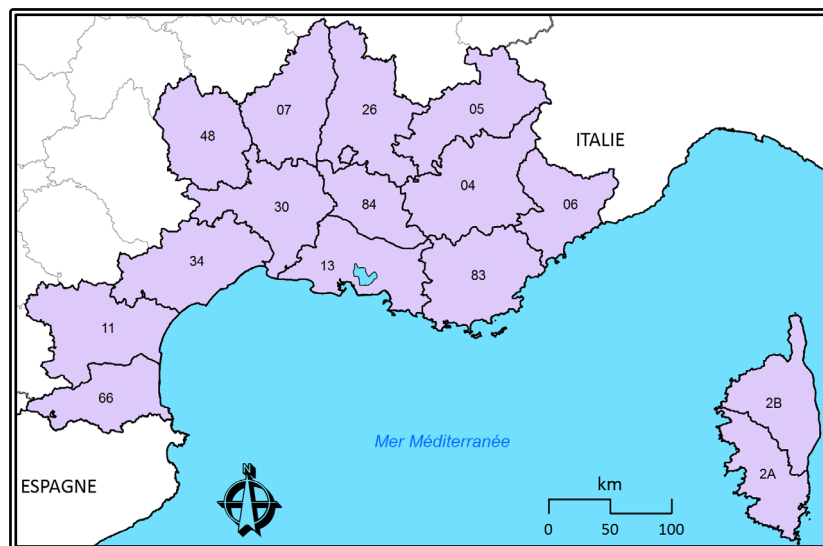


Fig. 14 : Départements couverts par la base de données Prométhée (BD_Topo v2 ©IGN)

La base de données renseigne plusieurs variables relatives à chaque incendie. Elles caractérisent la localisation spatiale (département, commune, lieu-dit, carré DFCI) et la localisation temporelle (année, mois, jour, heure) de chaque feu ainsi que les surfaces incendiées. Les valeurs sont brutes. Les données complémentaires (facultatives) sont rarement fournies de manière exhaustive : la proximité d'une structure anthropique (voie carrossable, habitation, etc.), le type de végétation concerné, la surface menacée et la cause de l'éclosion. L'interrogation de la base Prométhée permet d'extraire un certain nombre

d'éléments quantifiés parmi lesquels le bilan de l'année en cours pour les feux de forêts, les statistiques par zones administratives et des listes de feux à partir d'une sélection multicritère.

Les résultats tirés de la base Prométhée ont accru de manière significative la connaissance des expressions spatiales et temporelles des feux de forêt en France. La distribution des moyens de lutte et les stratégies préventives adoptées (bombardiers d'eau, parcours de reconnaissance en vol...) ont grandement évolué grâce à elle. De plus, les données collectées contribuent à affiner constamment la description des lieux d'éclosion, des zones affectées, des itinéraires et des conditions de propagation. Elles permettent également d'appréhender l'incendie à différentes échelles spatio-temporelles, afin d'analyser la multiscalarité du phénomène (Mangiavillano, 2008).

2.2.1. Les surfaces brûlées – échelles spatiale et temporelle

L'évolution annuelle des surfaces brûlées (Fig. 15) est irrégulière. Les feux de forêts ont brûlé en moyenne 21 398 hectares de forêt chaque année sur la période 1973-2013. Si dans la première partie de la période (1973 à 1990), la surface brûlée annuellement représente 33 209 ha, elle est 2,7 fois moins importante dans la seconde partie de la période (1991 à 2013) avec environ 12 154 ha. L'année 2003 présente le meilleur bilan depuis 1973 en matière de surfaces brûlées : 1 944 ha brûlés.

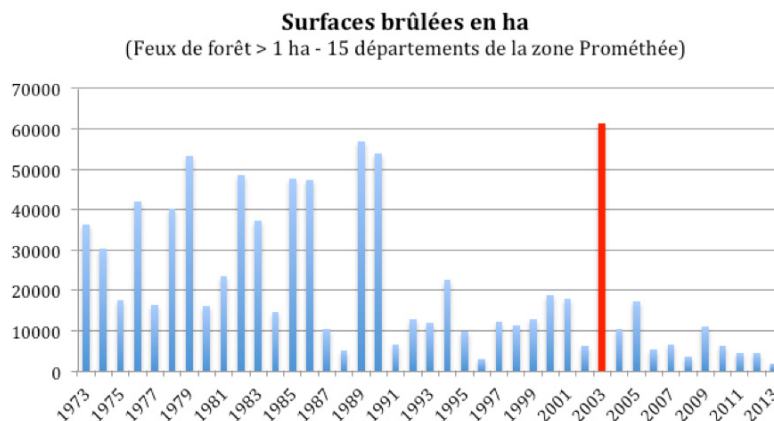


Fig. 15 : Évolution annuelle des surfaces brûlées (ha) sur les 15 départements de la zone Prométhée, de 1973 à 2013

L'amélioration sensible des résultats est supposément liée à une efficacité accrue des dispositifs de prévention et de lutte. Malgré la tendance à la baisse des surfaces incendiées depuis plusieurs années, des bilans lourds peuvent encore être d'actualité, à l'image de l'année 2003, qui présente un bilan particulièrement élevé : 10 morts, des dizaines d'habitations touchées et plus de 60 000 ha brûlés sur l'ensemble des 15 départements du Sud de la France.

La base de données Prométhée fournit une vision générale de l'espace méditerranéen français. Elle permet de synthétiser les données à différentes échelles. À l'échelle départementale (Fig. 16), nous présentons les densités de surfaces brûlées, afin de comparer les dynamiques du phénomène d'incendie de forêt. Le Var et les deux départements corses, surtout la Haute-Corse, se distinguent nettement par une concentration des feux jusqu'à quatre fois supérieure à celles du Vaucluse, de l'Hérault ou encore de l'Aude. Une continuité apparaît entre la vallée du Rhône et la Côte d'Azur.

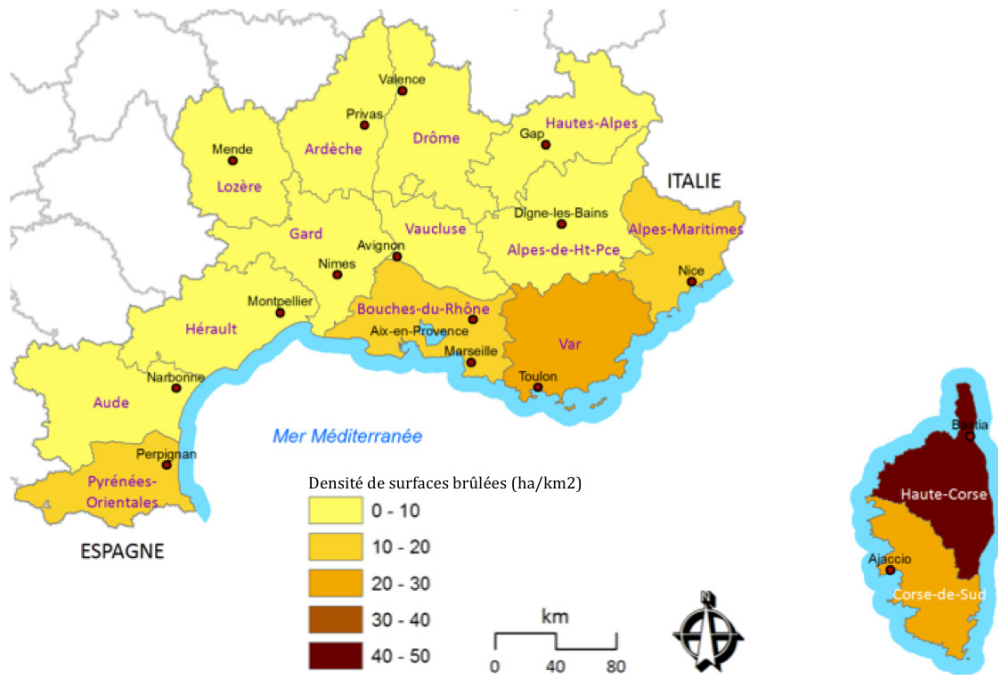


Fig. 16 : Cartographie des densités de surfaces brûlées (en ha/km²) sur les 15 départements de la zone Prométhée, de 1973 à 2013 (source Prométhée)

2.2.2. La fréquence des incendies – échelles spatiale et temporelle

Le nombre moyen annuel d'incendies est de 2 537 sur la période 1973-2013 (Fig. 17). Comparé à l'évolution des surfaces brûlées qui affiche une baisse de presque 50 % entre les deux périodes (1973-1990 et 1991-2013), le nombre annuel d'incendies évolue également à la baisse, mais cette diminution n'est que de 23 % à peine passant de 2 895, à 2 234. L'année 2013 présente également le meilleur bilan depuis 1973 en matière de nombre d'incendies : 1 192 incendies. Ces bilans ne concernent que les feux de forêt de plus de 1 ha. Ainsi le nombre d'incendies de forêt est 3,3 fois moins important que celui des feux de l'espace rural et périurbain (8 233 incendies de l'espace rural et périurbain recensés en moyenne chaque année sur la période 1973-2013 comparés aux 2 537 feux de forêt sur la même période).

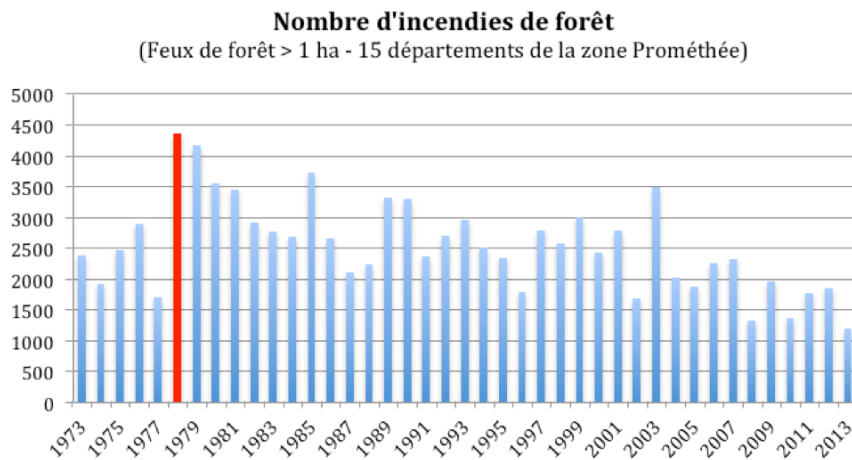


Fig. 17 : Évolution annuelle du nombre d'incendies sur les 15 départements de la zone Prométhée, de 1973 à 2013.

De la même manière que pour les densités de surfaces brûlées, nous avons synthétisé les données pour traduire la fréquence des incendies sous forme de densités, à l'échelle départementale (Fig. 18).

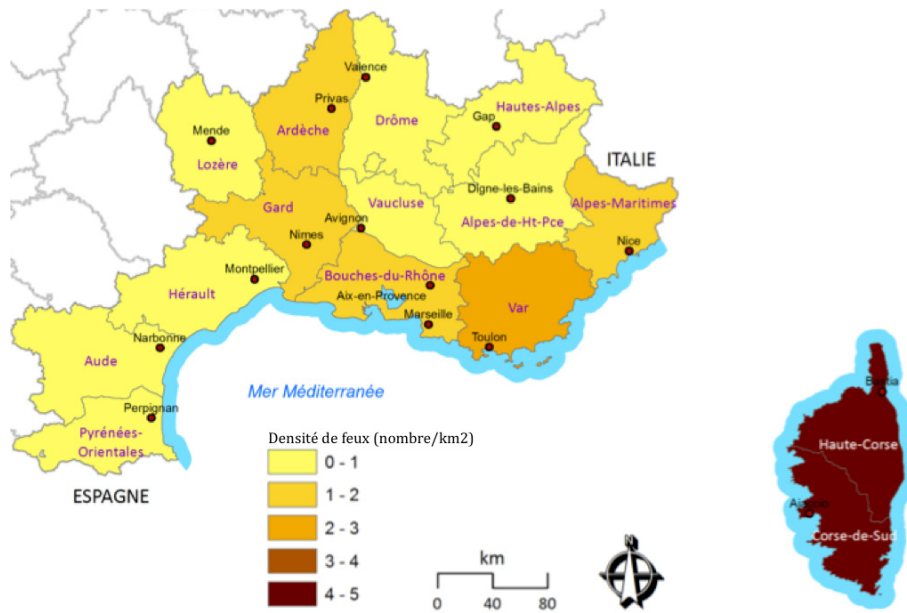


Fig. 18 : Cartographie des densités de feux de forêt (en nombre/km²) sur les 15 départements de la zone Prométhée, de 1973 à 2013 (source Prométhée)

La Haute-Corse et la Corse-du-Sud sont fortement impactées, et se distinguent nettement des autres départements. Par ailleurs, une autre continuité se dessine, coupant l'espace en deux, de l'Ardèche en passant par le Gard pour arriver au niveau des Alpes-Maritimes en longeant le littoral.

La base offre la possibilité de vérifier l'influence de la saisonnalité méditerranéenne sur la quantité mensuelle de feux (Fig. 19). On distingue les feux des périodes sèches (mois de Mars et période estivale), correspondant aux plus fortes proportions, de ceux des périodes humides (le reste de l'année) ayant les proportions les plus faibles. De même, la répartition des feux par heure montre un pic d'activité entre 13 h et 16 h, correspondant aux fortes chaleurs à l'échelle de la journée (Fig. 20).

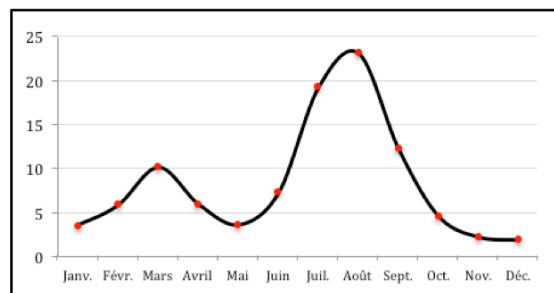


Fig. 19 : Pourcentage de feux par mois sur l'ensemble de la zone Prométhée, entre 1973 et 2013

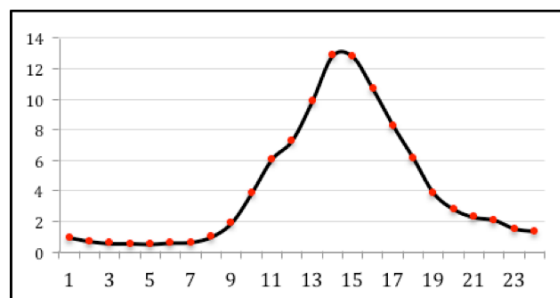


Fig. 20 : Pourcentage des feux par heure sur l'ensemble de la zone Prométhée, entre 1973 et 2013

Mis à part le bilan exceptionnel de l'année 2013, les chiffres confirment l'importance de maintenir toute la vigilance nécessaire en matière de prévention contre les incendies de forêt. En effet malgré la nette diminution des surfaces incendiées, le nombre d'incendies reste quant à lui élevé, exerçant le maintien d'une pression importante en termes d'aléa incendie.

2.2.3. Les causes des départs de feux

En région méditerranéenne française, les causes naturelles de départ de feux sont minoritaires. Sur la période de 1973 à 2013, 3% leur sont imputables (Fig. 21). Les causes humaines à l'origine des incendies ont évolué au fil des décennies, nous aborderons cette question dans les paragraphes suivants (§1.3.2). Notons toutefois que par le passé, les écobuages ont été parmi les pratiques les plus fréquentes, en région méditerranéenne, à la fois pour régénérer des parcours par feux courants ou pour mettre en valeur des sols ingrats afin de les rendre aptes à la culture (Barbero, 1998).

L'acte de mise à feu est l'objet de toutes les attentions, en particulier l'acte volontaire, qui renvoie à de vieux fantasmes. Partant du principe que le feu est forcément d'origine humaine, les recherches sont axées, après chaque sinistre, sur la recherche du ou des responsables. De nos jours, la cause de l'éclosion est recensée dans la base de données Prométhée. La typologie des causes s'organise en cinq familles : les causes d'origine naturelle (foudre), accidentelle liées aux installations (lignes électriques, voies ferrées...), humaine intentionnelle (malveillance, conflits, intérêt), involontaire où se distinguent celles liées aux travaux professionnels (agricoles, forestiers) et celles liées aux particuliers et leurs imprudences (loisirs).

Les statistiques issues de la base Prométhée portent à 67 % la part des causes indéterminées sur la période 1973-2013 (Fig. 21), à l'échelle de la région méditerranéenne française. Les feux de cause inconnue restent dans des proportions constantes pour la plupart des pays méditerranéens (Alexandrian *et al.*, 1998).

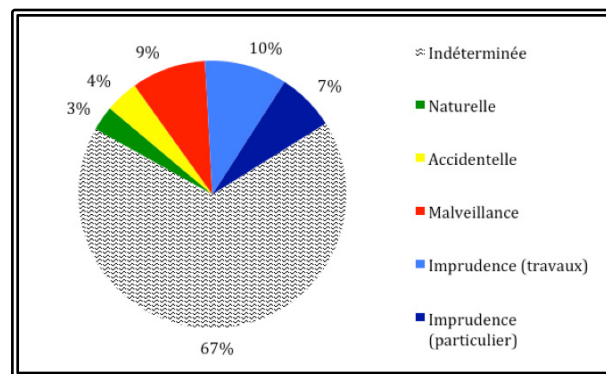


Fig. 21 : Répartition des causes de départs de feux sur l'ensemble de la zone Prométhée, entre 1973 et 2013

Les proportions attribuées à ces cinq familles sont à considérer avec prudence, du fait de la variabilité des enquêtes ainsi que celle des protocoles de détermination selon leur évolution et les départements. Ces causes restent toujours très difficiles à déterminer. A. Challot met en lumière qu'« il n'a jamais été possible de produire des statistiques exactes en matière de causes directes d'incendie. La proportion de feux dont l'origine demeure inconnue est toujours importante » (Challot, 2004). Il renchérit : « (...) hier comme aujourd'hui dans nos médias, on a tendance à attribuer à la malveillance une forte proportion des incendies d'origine douteuse ».

L'intérêt de la base Prométhée se trouve dans sa capacité à fédérer et centraliser l'information sur les incendies de forêt. Cet outil œuvre à la mise en place d'une mémoire collective, appropriable par l'ensemble des populations concernées par le phénomène incendiaire. Il rend alors possible la détermination d'un aléa de référence, par zone exposée, cher à la gestion du risque sur le territoire méditerranéen.

Cependant, l'outil présente des lacunes en ce qui concerne la compréhension de la réalité sociale, économique et environnementale du risque incendie de forêt. Le social est réduit le plus souvent à la figure de l'incendiaire (Abbatecci, 1970 ; Bolo, 1973 ; Nougarede et Bolo, 1989). Les enjeux sociaux sont abordés, dans la base Prométhée, de manière dichotomique : d'un côté l'organisation des secours, de l'autre la recherche du responsable (Arnould et Calugaru, 2008). Aucune donnée n'est disponible sur les répercussions économiques, sur l'endommagement généré par la confrontation physique du phénomène avec la société, ses biens et son environnement. L'étude de l'aléa se place en marge de la société, avec comme seule caractéristique physique d'endommagement, les surfaces brûlées. Les dommages sur les constructions et les infrastructures humaines ne sont pas précisés, cette lacune ne permet pas d'appréhender les conséquences, donc la vulnérabilité révélée, ou latente du territoire.

2.3. La gestion du risque incendie de forêt dans l'aménagement du territoire méditerranéen

Le risque d'incendie de forêt est une réalité en région méditerranéenne française, son intégration dans la gestion et l'aménagement du territoire est devenue incontournable.

Cette prise de conscience institutionnelle remonte au 12 juillet 1966, où la loi 66-505 crée une référence particulière aux forêts du territoire méditerranéen. Celles-ci retiennent l'attention des pouvoirs publics car elles brûlent souvent et beaucoup (Bonnier, 2009). Déjà en 1963, la première Entente interdépartementale de France voit le jour, l'Entente interdépartementale en vue de la protection des forêts contre l'incendie. Son objectif est de donner à l'État un seul interlocuteur pour représenter, peu à peu, les quinze départements méditerranéens concernés par la question. Cette politique de prévention et de protection a permis la création des unités de forestiers sapeurs en 1973 puis le développement des plans intercommunaux de débroussaillage et d'aménagement forestier (PIDAF) à partir de 1980.

Après la loi du 22 juillet 1987 qui consacre un titre spécifique à la protection de la forêt contre l'incendie et à la prévention des risques majeurs, la loi du 3 janvier 1991 élabore les plans de zones sensibles aux incendies de forêt (PZSIF) qui ont pour objectif de définir les mesures de prévention à mettre en œuvre tant par les propriétaires que par les collectivités publiques pour réduire le risque d'incendie de forêt (Bonnier, 2009).

La loi 95-101 du 2 février 1995, dite loi Barnier, a soumis tous les risques naturels à une procédure unique de prévention : le plan de prévention des risques naturels (PPR), parmi lesquels les plans de prévention des risques d'incendie de forêt (PPRIF). Les PPRIF définissent les prescriptions d'interdiction ou de condition de construction et les mesures concernant l'existant, les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde qui doivent être prises par les collectivités publiques ou les particuliers dans les zones exposées aux incendies de forêts (article L. 562 du Code de l'environnement).

En 1998, le député Jean-Louis Bianco publie un rapport, *La forêt une chance pour la France*, dans lequel est posé le principe de la multifonctionnalité des forêts françaises, sans

que soient négligés les aspects économiques et institutionnels structurant la politique forestière. S'appuyant sur ce rapport, la loi 2001-602, du 9 juillet 2001, loi d'orientation forestière institue les chartes forestières de territoire, et modifie le livre III du Code forestier. Cette modification vise la prévention des feux et comporte des dispositions concernant l'élaboration de plans intercommunaux de débroussaillage, d'aménagement forestier et d'aménagement de la forêt contre l'incendie.

La loi du 9 juillet 2001 vient renforcer ces dispositions relatives à la prévention des feux de forêt, notamment le débroussaillage obligatoire autour des habitations, des infrastructures et des installations de toute nature. Il est recherché une meilleure cohérence et une meilleure synergie des mesures sur les espaces où les risques sont les plus forts (Bonnier, 2009). Il est également prévu une clarification et une facilitation du rôle des autorités publiques vis-à-vis d'une meilleure prise en compte du risque d'incendie de forêt dans l'aménagement des espaces sensibles.

Par ailleurs, le code forestier se conforme au règlement CEE n° 2158/92 du 23 juillet 1992, prorogé par le règlement n° 308/97 du 17 février 1997, en prévoyant l'élaboration des plans départementaux de protection des forêts contre l'incendie (PDPFCI) qui se substituent aux schémas départementaux.

Un souci de cohérence est recherché entre toutes ces procédures et démarches de prise en compte du risque incendie. L'État français exprime le besoin d'accélérer la réflexion sur les moyens de connaissance des phénomènes, d'évaluation de l'aléa et des enjeux. Leur objectif est de mieux définir les espaces à réglementer et les mesures de prévention à prendre. Ces décisions sont amenées à être prises dans le cadre des PPRIF.

2.3.1. Le PPRIF : quelle réponse à la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt ?

Le PPRIF a pour objectif, en application de l'article L. 562-1 du Code de l'environnement, de « *délimiter les zones exposées aux risques, en tenant compte de la nature et de l'intensité du risque encouru, d'y interdire tout type de construction, d'ouvrage, d'aménagement ou d'exploitation agricole, forestière, artisanale, commerciale ou industrielle ou, dans le cas où des constructions, ouvrages, aménagements ou exploitations agricoles, forestières, artisanales, commerciales ou industrielles, notamment afin de ne pas aggraver le risque pour les vies humaines, pourraient y être autorisés, prescrire les conditions dans lesquelles ils doivent être réalisés, utilisés ou exploités* ». En ce sens, il œuvre à la prescription des mesures de maîtrise de l'urbanisation, véritablement adaptées à l'aléa, et aux caractéristiques du territoire sur lequel il s'applique.

Comme l'exprime C. Ribot, « *l'aménagement, la protection des territoires en difficulté est une condition, souvent, une garantie parfois, de la défense des personnes susceptibles de devenir vulnérables* ». L'auteur remarque également qu'« *avec le droit de l'urbanisme, le droit de l'environnement est le domaine par excellence où la protection du territoire vulnérable est minutieusement organisée* » (Ribot, 2000). À l'intersection entre ces deux domaines d'intervention juridique, la création des PPRIF repose sur le raisonnement suivant : si l'aléa incendie est inhérent aux forêts méditerranéennes, les dommages humains et matériels, eux, sont dus à la trop grande proximité des personnes et des biens à la source de danger. On retrouve ici la composante *exposition* de la vulnérabilité : « *les effets d'un aléa sont conditionnés par la localisation géographique des enjeux par rapport à la source de danger* » (Veyret et Reghezza, 2005). Ce document, pourtant régi par le Code de l'environnement, doit être considéré comme un document d'urbanisme au même titre que, par exemple, les plans locaux de l'urbanisme (PLU) ou les schémas de cohérence territoriale (SCOT). Il a pour objet

de réglementer l'aménagement des zones concernées par le risque, dont il fixe les contours, et d'y prescrire des mesures de prévention.

Il s'agit non seulement de maîtriser l'urbanisation future mais aussi de résorber progressivement les situations actuelles d'habitats résidentiels enclavés au cœur des massifs. On comprend ainsi en quoi la notion d'urbanisation participe à la compréhension géographique du risque : elle implique l'intensification des peuplements et des flux, la multiplication et la concentration des éléments vulnérables : « *l'urbanisation favorise le risque et sa déclaration* » (Pigeon, 2005). Le PPRIF vient donc en complément des documents d'urbanisme préexistants et s'impose à eux, dans le sens où il rend obligatoire certaines mesures de prévention, de protection et de sauvegarde (Guide PPRIF, 2003). Cette façon d'envisager la problématique de l'urbanisme péri-urbain constitue une avancée et possède des conséquences importantes notamment en termes de responsabilité des acteurs compétents.

L'outil PPRIF doit permettre d'agir sur de nombreux facteurs tant matériels qu'humains et environnementaux de la vulnérabilité du territoire. En agissant sur l'aléa, sur l'urbanisme, sur le bâti, sur l'occupation du sol, il a des effets positifs sur les facteurs structurels et non structurels de la vulnérabilité. La mise en œuvre de ces plans influence également favorablement, bien que de façon moins directe, quelques facteurs humains de vulnérabilité. Par exemple, le renforcement de l'information des populations sur le risque auquel elles sont exposées agit sur la préparation des personnes, donc sur leur capacité de réponse.

Dans le cadre des PPRIF, la priorité est donnée aux communes qui présentent des niveaux d'aléa et d'enjeux élevés, par la réalisation de cartes. Cette section sera l'occasion d'aborder la façon dont le PPRIF définit ces deux notions et les méthodes mises en œuvre pour les caractériser. Puis de soulever l'apport des PPRIF dans une perspective de gestion de la vulnérabilité territoriale. Enfin, nous effectuerons une critique de l'outil et de ses lacunes.

a. *Présentation de l'outil*

Les PPR sont, aujourd'hui en France, l'un des socles majeurs des politiques de prévention des risques. Comme le souligne T. Hubert (2003), « *l'objet du PPR est donc surtout de délimiter les zones exposées à des risques ou certaines zones non directement exposées, y interdire les projets nouveaux ou les autoriser sous réserve de prescriptions et y définir les mesures de prévention, de protection et de sauvegarde à prendre par les collectivités ou les particuliers ainsi que des mesures d'aménagement, d'utilisation ou d'exploitation relatives à l'existant. [...] Au terme de l'évaluation de l'aléa et des enjeux, le PPR délimite les zones soumises aux risques naturels pour y définir les prescriptions d'urbanisme, de construction et de gestion qui s'appliqueront au bâti existant et futur. Des zones inconstructibles ou constructibles sous conditions particulières sont ainsi déterminées selon l'intensité et l'occurrence des aléas qui menacent soit des espaces libres, soit des enjeux présents dans les espaces urbanisés. Lorsque les lieux sont habités ou qu'il existe des activités en zones à risque, des mesures sont définies pour sauvegarder et protéger les populations et les biens* ».

Le risque se définit comme la probabilité qu'un événement dommageable se produise, les dommages étant les « *conséquences particulières découlant de cet événement* » (Guide PPRIF, 2003). L'aléa correspond à « *la probabilité qu'un phénomène naturel d'intensité donnée se produise en un lieu* », en l'occurrence l'incendie de forêt. Les notions de probabilité d'occurrence et d'intensité sont précisées :

- La probabilité d'occurrence d'un feu se manifeste sous deux aspects :

- Probabilité temporelle : elle correspond à la période de retour d'un feu. Celle-ci est fondée sur l'analyse de données historiques. Elle permet de retenir un temps de retour de l'événement pour l'ensemble du bassin de risque (10-20-30-50 ans) ;
- Probabilité spatiale : elle correspond à la probabilité, pour chaque zone du bassin de risque, d'être soit à l'origine d'un départ de feu, soit d'être touchée par un incendie.
- L'intensité d'un incendie de forêt, correspond à la puissance linéique du front de feu (en kW. m⁻¹), soit l'énergie libérée par unité de temps et unité de longueur du front de feu. Trois seuils d'intensité sont fixés (Tab. 3).

Intensité du front de feu	Détermination des seuils
< 2 000 kW. m ⁻¹	Feu maîtrisable par les moyens terrestres
2 000 – 4 000 kW. m ⁻¹	Les moyens aériens sont nécessaires
> 4 000 kW. m ⁻¹	Impossible de contenir la tête du feu

Tab. 3 : Seuils d'intensité fixés pour l'aléa incendie de forêt, en France (sources : SDIS 83 ; Guide PPRIF, 2003)

Les enjeux représentent « *ce que la collectivité risque de perdre lors d'un incendie de forêt* ». Ils concernent les personnes, les biens, les infrastructures et les espaces naturels.

Cette définition du risque permet la réintroduction de la géographie (Reghezza, 2006). À l'aide des SIG, l'étude de la distribution spatiale des enjeux est rendue possible, afin de produire une carte, appelée carte de vulnérabilité. L'évaluation du risque s'effectue par la superposition de la carte d'aléa à celle de la vulnérabilité :

$$\text{Risque} = \text{Aléa} + \text{Vulnérabilité}$$

Cette équation n'a aucune valeur mathématique, elle exprime la nécessité de la coprésence entre l'aléa et les enjeux, le signe « + » symbolisant l'exposition (Reghezza, 2006). Dans la suite de cette section, nous passerons, en revue, les principes généraux à respecter pour réaliser la cartographie des risques.

Une fois prescrit, à l'initiative du préfet, l'élaboration d'un PPRIF repose sur une procédure de concertation et de dialogue (Fig. 22), animée par les services de l'État, de manière à mettre en commun les informations détenues par chacun et favoriser la transparence des étapes de la procédure et l'instauration d'un « climat de confiance ».

Différents acteurs administratifs, techniques et politiques sont associés : les services de l'État, les collectivités locales, les experts du domaine (sapeurs pompiers, forestiers, scientifiques) les professionnels concernés par les risques feux de forêt (agriculteurs, exploitants forestiers...) ainsi que les associations locales ayant une connaissance particulière du patrimoine, des milieux et de leur histoire.

Le processus de réalisation de la carte règlementaire s'articule en trois étapes (Fig. 23). **L'analyse préalable** vise à recueillir l'ensemble des connaissances disponibles sur le sujet et sur la zone d'étude (contexte, feux passés, retours d'expériences...). Les données relatives aux feux passés (base Prométhée) permettent de dresser un état statistique concernant les surfaces brûlées, le nombre annuel de feux par commune, les tendances, les causes, les faits marquants. Elles offrent des indications sur les zones de départ préférentielles, les surfaces parcourues. De cette analyse préalable découle l'étude de l'aléa qui a conduit à réaliser la carte d'évaluation d'une ou de deux composantes de l'aléa : l'intensité et l'occurrence.

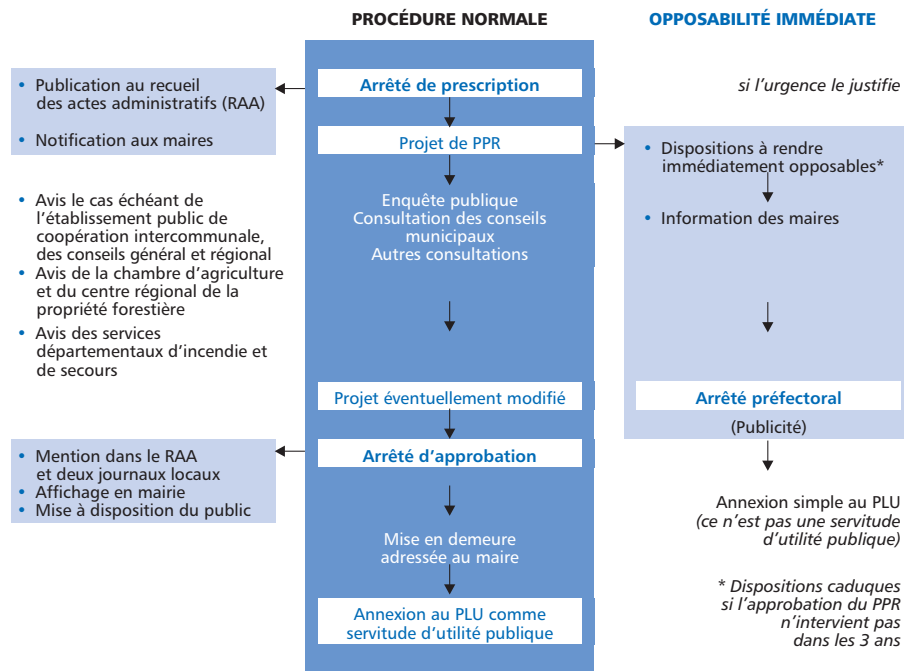


Fig. 22 : La procédure PPRIF, une volonté de concertation et de transparence pour intimer confiance (source : Guide PPRIF, 2003)

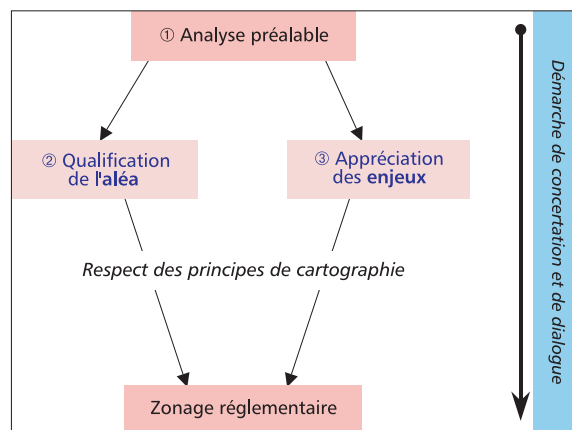


Fig. 23 : Processus d'élaboration d'un PPRIF (Guide PPRIF, 2003)

La qualification de l'aléa a pour objectif d'apporter des connaissances sur la localisation des zones soumises à un incendie de forêt ainsi que sur l'ampleur de ce dernier. Elle comprend différentes phases complémentaires : la définition d'un aléa de référence (ou conditions de référence), l'étude des multiples composantes influençant à la fois l'éclosion et la propagation d'un feu (la végétation, les paramètres climatiques, la topographie et les facteurs humains). L'évaluation et la qualification de l'aléa sont réalisées à dire d'experts. En fonction de la disponibilité des données et des besoins de précisions supplémentaires, il peut y avoir recours en complément à des modèles mathématiques. Des approches quantitatives sont conseillées mais il est aussi reconnu que les jugements d'expert sont indispensables pour pallier l'incertitude dans la connaissance des phénomènes et formuler les scénarios de référence sur la base de l'information disponible (Barbolini, 2008 ; Brundl *et al.*, 2008 ; Tacnet *et al.*, 2005).

La carte des enjeux correspond à un inventaire des enjeux spécifiques à la zone d'étude. L'approche se veut qualitative et pragmatique, et doit permettre d'assurer la cohérence entre

les objectifs de prévention des risques et les dispositions qui seront retenues. Sur chaque zone sont étudiés : la population menacée, les établissements publics, les équipements sensibles, les outils liés à l'activité économique, les réseaux de communication. Les enjeux sont évalués de façon simple à partir de données issues du cadastre, des plans locaux d'urbanisme, de photographies aériennes, d'expertise de terrain. L'évaluation se base sur la valeur financière, patrimoniale, et d'autre part, sur la fréquentation par l'homme. Les aménagements futurs sont également pris en compte lors de l'élaboration du PPRIF. Ils ont un impact direct sur l'aléa en le diminuant (suppression de zones combustibles, densification de l'habitat) ou en aggravant le risque par leur présence. Les notions de zones défendables et de zones non défendables seront utilisées afin de définir le zonage réglementaire.

Il convient ensuite de superposer la carte des enjeux à la carte des aléas. L'étude des deux cartes permet de délimiter le plan de zonage réglementaire, de préciser le contenu du règlement, et de formuler un certain nombre de mesures de prévention et de protection. Chaque zone d'aléa est matérialisée par un code de couleur conventionnel dont l'intensité caractérise le niveau d'aléa (jaune pour aléa faible, orange pour aléa moyen et marron pour l'aléa fort). La carte des enjeux est réalisée en reportant les enjeux sous forme ponctuelle (établissements sensibles), linéaire (infrastructures) ou zonale (zones d'habitat ou de forêt).

b. L'action du PPRIF sur l'aléa incendie de forêt

Les actions entreprises pour réduire l'aléa permettent logiquement de réduire le risque, et indirectement la vulnérabilité. La capacité à anticiper l'aléa, à en connaître la probabilité d'occurrence, l'intensité, sont donc autant d'éléments permettant de définir des mesures d'adaptation et de prévention véritablement pertinentes.

Dans la pratique, les PPRIF sont élaborés après que les collectivités territoriales et les propriétaires forestiers aient fait la démonstration de la maîtrise de l'aléa par la mise en place d'une politique de prévention et de lutte, afin que les massifs forestiers atteignent un niveau d'aléa aussi bas que possible. La politique de prévention se trouve renforcée par l'adoption de la loi d'orientation sur la forêt du 9 juillet 2001, qui définit cinq types d'action (Guide PPRIF, 2003).

La résorption des causes de feux donne la priorité à la gestion des causes accidentelles (imprudences et négligences), par l'intermédiaire de trois actions :

- L'information et la sensibilisation des propriétaires, des gestionnaires et des utilisateurs de l'espace forestier, sur les comportements à risque.
- La recherche des causes (par les gendarmes, forestiers, pompiers) facilitant l'action sur la probabilité d'occurrence du phénomène.
- La gestion des interfaces habitat-forêt, qui concentrent la majorité des départs de feu (bords de zones habitées, bords de routes...).

La surveillance des massifs forestiers cherche à optimiser l'intervention sur les feux naissants. Cette action repose sur l'évaluation quotidienne du risque à partir des prévisions météorologiques (indice IFM), et la mobilisation préventive de patrouilles aériennes et terrestres.

L'équipement des massifs forestiers est destiné à favoriser les actions de lutte. Cette mesure se traduit par la création de coupures de combustibles, limitant l'intensité du phénomène redouté. En addition, la création de pistes forestières et l'implantation de citernes viennent renforcer l'efficacité des personnels de secours. Le système de défense contre les incendies de forêt (DFCI) est étendu à toutes les régions exposées à l'aléa incendie de forêt. Il regroupe l'intégralité des équipements implantés dans et à proximité des zones à risque afin

de faciliter les interventions en cas d'incendie. Ce document est réactualisé chaque année. Le Code forestier, par l'intermédiaire de la circulaire interministérielle du 15 février 1980 (JO du 28 mars 1980) institue des plans de débroussaillage en forêt. Élaborés par les communes ou par des associations syndicales, à l'échelle du massif forestier, ces plans sont approuvés par les préfets et mis à exécution.

La prise en compte du risque dans l'aménagement cherche à protéger les enjeux et à éviter l'implantation de nouvelles installations. La priorité est donnée aux interfaces entre la forêt et les zones urbanisées, par le biais de la réglementation, la politique de prévention impose aux propriétaires de se conformer aux obligations légales de débroussaillage (OLD). Cette mesure a pour effet recherché, la réduction de l'intensité d'un feu arrivant sur ces interfaces, offrant un bénéfice double : maîtrise de l'aléa intensité et réduction de l'exposition des biens et des personnes. En parallèle, la création de coupures vertes (pastoralisme, zones agricoles) permet de cloisonner les massifs forestiers, et de maintenir une zone tampon. Ces mesures sont regroupées dans le Code forestier (Livre III), qui attribue aux préfets la possibilité d'édicter, sur l'ensemble du territoire, toutes mesures de nature à assurer la prévention des incendies et à faciliter la lutte contre ces derniers (réglementation de l'usage du feu, débroussaillage obligatoire à proximité des lieux habités, nettoyage des coupes après exploitation forestière...). Les maires ont quant à eux la possibilité de porter de 50 à 100 mètres l'obligation de débroussaillage à proximité des habitations et installations dans les zones situées à moins de 200 mètres de terrains en nature de bois, forêts, landes, maquis, garrigue, plantations ou reboisements des communes visées à l'article L. 321-1 et des régions visées à l'article L. 321-6 du code forestier.

L'information préventive vise à avertir la population sur les dangers de l'incendie. Elle a été instaurée en France par l'article 21 de la loi du 22 juillet 1987. La circulaire du 25 février 1993 a imposé aux préfets d'établir la liste des communes à risques, avec obligation d'informer le citoyen. Les cellules d'analyse des risques et d'information prévention (Carip) ont été créées dans ce but, au niveau de chaque département.

La prescription et la réalisation de ces mesures, qui permettent de maîtriser le risque à la source en agissant à la fois sur la probabilité de survenance de l'incendie de forêt et son intensité, ont réellement été générées par la mise en œuvre de la démarche PPRIF. Cela peut s'expliquer notamment par l'obligation de communication avec le public lors de sa procédure d'élaboration : il semble impossible de faire passer des mesures de maîtrise de l'urbanisation contraignantes pour les particuliers si tous les efforts de réduction du risque à la source n'ont pas été faits. Dans les situations où l'aléa resterait fort malgré la mise en place de toutes les mesures de prévention à la source, le PPRIF peut alors permettre d'agir sur l'intensité de l'aléa par la prescription de mesures supplémentaires de réduction du risque à la source.

c. L'action du PPRIF sur la vulnérabilité des enjeux

La vulnérabilité est ici entendue dans un sens large, comme « *le degré auquel un système est susceptible d'être affecté négativement. La vulnérabilité dépend alors du caractère, du rythme des changements auxquels le système est exposé, ainsi que de sa sensibilité et de sa capacité d'adaptation* », d'après la définition donnée par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans son appel à projets 2007, *Vulnérabilité milieux et climat*. Il s'agit en fait d'élargir la notion de vulnérabilité et de prendre en compte, au-delà des seuls critères physiques permettant de mesurer les dommages potentiels, l'ensemble des facteurs propices aux endommagements ou influant sur la capacité de répondre à une situation de crise. Autrement dit, « *la vulnérabilité est en ce sens une propriété intrinsèque d'une société, d'un groupe social, d'un individu, un facteur interne du risque, quasi indépendant de l'aléa au sens où elle préexiste à ce dernier ; mais qui est cependant révélée par lui. Cette vulnérabilité sociale dépend de la*

préparation d'une société à faire face à la crise et de son comportement pendant la crise. Elle explique qu'un aléa pourtant de faible ampleur puisse avoir des conséquences dramatiques et que deux aléas d'intensité égale provoquent dans deux groupes sociaux différents des dommages de nature et d'ampleur inégales » (Veyret et Reghezza, 2005). La prise en compte de ce type de vulnérabilité en matière de gestion des risques présente l'intérêt de permettre d'agir encore un peu plus sur le risque, lorsqu'il n'est plus possible d'intervenir sur l'aléa, l'exposition ou la résistance des cibles.

Les composantes *exposition* et *sensibilité* de la vulnérabilité du territoire sont celles dépendant des facteurs techniques. Elles correspondent à l'endommagement potentiel que chaque enjeu est susceptible de subir du fait de la présence de l'incendie et se rapproche de ce que de nombreux auteurs ont appelé la « *vulnérabilité biophysique* » (Barroca *et al.*, 2005 ; Reghezza, 2006 ; Veyret, 2006). Sous cet angle, on envisage l'impact physique de l'aléa sur les enjeux. Cet impact dépend non seulement des caractéristiques de l'aléa, mais aussi de l'exposition et de la sensibilité des enjeux, c'est-à-dire des personnes, des biens matériels, et de l'environnement, menacés par l'incendie et susceptibles d'être endommagés par celui-ci.

Il est possible de réduire la vulnérabilité entendue sous cet aspect technique en intervenant de différentes façons. Tout d'abord en diminuant l'intensité de l'aléa par la recherche de solutions techniques (équipements de protection, coupures de combustibles...) à mettre en œuvre au sein même des massifs forestiers. Il est également possible de tempérer les impacts sur les biens matériels par la réduction de la charge en combustible autour des habitations à l'intérieur ou à proximité des massifs forestiers, et en augmentant la capacité de résistance physique de celles-ci. Ces actions permettent la réduction à la fois de leur exposition et de leur sensibilité grâce à des normes d'aménagement et de construction adaptées.

Lorsque les mesures prises pour la prévention de l'aléa s'avèrent insuffisantes au regard des enjeux environnants, il est nécessaire d'agir sur les enjeux sensibles et exposés. L'ensemble des zones à risque est identifié en fonction des niveaux d'aléa, suivant les principes suivants :

- Dans les zones à risque fort (zone rouge), les constructions nouvelles sont interdites à l'exception des aménagements destinés à protéger la forêt et des mesures seront définies pour sauvegarder les constructions existantes. Dans les zones urbanisées défendables, les conditions d'extensions limitées et d'implantation d'équipements nécessaires à la vie locale seront définies de façon stricte ;
- Dans les zones à risque moyen (zone bleue), les constructions nouvelles seront interdites, sauf dans les parties défendables où elles pourront être constructibles sous condition d'entretien des dispositifs de défense.
- Dans les zones à risque faible (zone verte), les constructions nouvelles seront soumises à des prescriptions visant à la fois à se prémunir du risque et à éviter de l'aggraver.

Les prescriptions (Tab. 4) qui s'appliquent aux projets nouveaux doivent obligatoirement être respectées. Les mesures sur l'existant et les mesures générales de prévention définies par le PPRIF peuvent être rendues obligatoires, dans un délai de 5 ans maximum.

Critères	Prescriptions
Accès	Chaque construction doit être reliée à une voie principale par une desserte d'une largeur minimale de 3 m, d'une longueur inférieure à 50 m et d'une pente inférieure à 15%. Lorsque la longueur de la desserte est supérieure à 50 m, elle doit être constituée d'une aire de retournement, à l'extrémité de la voie et tous les 500 m à partir de l'origine.
Desserte en eau	Le réseau d'eau devra être à même de fournir à tout moment 120 m ³ d'eau en 2h. Les hydrants seront espacés de 200 m au plus l'un de l'autre et toute construction devra s'en trouver éloignée de 200 m (tuyaux déroulés) au plus.
Dispositions constructives	<p>D'une manière générale, l'emploi du PVC est à proscrire (volets, gouttière,...). L'enveloppe des bâtiments doit être constituée par des matériaux présentant une résistance coupe-feu (CF) 1 heure. Les revêtements de façades doivent présenter un critère de réaction au feu M0.</p> <p>Toutes les ouvertures doivent être en matériaux de catégorie M0 ou M1 équipés d'éléments verriers pare-flamme de degré ½ heure ; ou ; être occultées par des dispositifs de volets présentant une résistance de degré coupe-feu (CF) ½ heure.</p> <p>Les matériaux de couverture doivent être classés en catégorie M0. Toutefois, les matériaux classés M1, M2, M3 – ou équivalents européens – peuvent être utilisés s'il sont établis sur un support continu en matériau incombustible ou tout autre matériau reconnu équivalent</p> <p>La jonction entre la toiture et les murs ne doit présenter aucun élément combustible. Les toitures doivent être régulièrement curées des aiguilles et feuillages.</p> <p>Les gouttières doivent être réalisées en matériaux M1 minimum et être régulièrement entretenues.</p> <p>Les réserves de combustibles devront être éloignées d'au moins 10 m de toute construction, ceinturées par un mur de protection en maçonnerie et exemptée de tous matériaux ou végétaux combustibles sur une distance de 5 m.</p>
Espaces naturels	<p>Débroussaillage de 50 m autour des habitations.</p> <p>Les arbres seront en permanence élagués et taillés, les premiers feuillages doivent être maintenus à une distance minimale de 3 m de tout point des constructions.</p> <p>Débroussaillage sur une profondeur de 10 m de part et d'autre de la voie privée donnant accès aux constructions.</p> <p>Les haies conservées ne devront pas représenter un volume (épaisseur x hauteur x un mètre) > 5 m³ par mètre linéaire.</p>

Tab. 4 : Exemples de prescriptions délivrées par les PPRIF (source : PPRIF Grambois (84) ; PPRIF Puget-sur-Durance (84) ; PPRIF massif d'Uchaux (84) ; PPRIF Ménerbes (84) ; PPRIF Le Boulou (66) ; PPRIF Céret (66))

La vulnérabilité globale du territoire dépend non seulement de la sensibilité et de l'exposition à l'aléa, mais elle est également conditionnée par les caractéristiques humaines du territoire. Elle est fortement influencée par l'ensemble des savoirs, savoirs faire et comportements (règles, normes, interdits, valeurs...) qui se transmettent et s'acquièrent au sein de la population, la culture du risque. En effet, plus les connaissances des habitants concernant les risques auxquels ils sont soumis sont grandes, plus ils seront aptes à éviter de se mettre dans des situations dangereuses et à réagir correctement lors de la survenance d'un phénomène dangereux (Pottier *et al.*, 2004).

Si l'effet premier, direct, du PPRIF est, par la maîtrise de l'urbanisation péri-urbaine, d'agir pour réduire les facteurs de vulnérabilité d'exposition et de sensibilité, l'article L. 562-1 IV du Code de l'environnement prévoit que les mesures envisagées dans le PPRIF doivent être prises conformément aux dispositions du titre II du livre III et du livre IV du Code forestier, qui introduit un certain nombre de dispositifs procéduraux permettant également d'influencer les comportements des organismes et du public.

Citons, par exemple (Guide PPRIF, 2003) :

- L'obligation d'informer des contraintes que subira, tout acquéreur d'un bien immobilier situé dans les zones où la prévention contre les incendies de forêts est

imposée. Ces contraintes doivent être mentionnées dans l'acte notarié ou sous-seing privé (article L. 151-38-1 du Code Forestier) ;

- La réalisation d'un document d'information, l'organisation des modalités d'affichage des consignes de sécurité dans les locaux publics et privés recevant plus de 50 personnes. Celle-ci s'effectue conformément aux articles 5 et 6 du décret 90-918 du 11 octobre 1990 relatif à l'exercice du droit à l'information sur les risques majeurs ;
- L'organisation d'exercices d'évacuation des populations habitant dans les zones d'aléa fort ou moyen ;
- Le renforcement des capacités d'autodéfense des habitations isolées (bassins, motopompes à moteur thermique...);
- L'identification et la mise à jour de la liste des commerces de vente de produits inflammables et explosifs. Cet inventaire précise le nombre de bouteilles stockées, la nature des produits, le lieu de stockage ;
- La possibilité pour l'État d'accorder une aide technique et financière aux personnes publiques et privées qui entreprennent des travaux pour protéger ou reconstituer des massifs particulièrement exposés aux incendies, notamment des pare-feu, des voies d'accès, des points d'eau (article L. 321-5 du Code forestier).
- Selon l'article 5, 2^{ème} alinéa du décret n° 95-1089 du 5 octobre 1995, les travaux de prévention imposés à des biens construits ou aménagés conformément aux dispositions du Code de l'urbanisme avant l'approbation du plan et mis à la charge des propriétaires, exploitants ou utilisateurs ne peuvent porter que sur des aménagements limités dont le coût est inférieur à 10 % de la valeur vénale ou estimée du bien à la date d'approbation du plan.

Les PPRIF, dans le cadre des procédures de concertation, ont donc des effets positifs sur certains facteurs sociaux de vulnérabilité tels que la culture du risque partagée par tous, la cohérence de l'organisation politique et administrative ou les capacités économiques des acteurs concernés. La connaissance de la réalité du risque favorise l'acceptation, le respect et l'application des mesures destinées à le prévenir ou à en limiter les effets, lesquelles peuvent parfois être très contraignantes et contestées (Pottier *et al.*, 2004). L'efficacité d'un système de prévention des risques, de réduction de la vulnérabilité ne sera ainsi acquise que par une généralisation de la culture du risque, au plan national et local, seule apte à obtenir la mobilisation des pouvoirs publics, des exploitants, des acteurs économiques, des riverains et du public.

d. Synthèse critique sur les PPRIF

Les plans de prévention des risques naturels instaurés par la loi 95-101 du 2 février 1995, dite loi Barnier, parmi lesquels les plans de prévention des risques d'incendie de forêt, qui permettent d'agir sur l'intensité de l'aléa, sur l'exposition des enjeux et sur leur sensibilité, peuvent être considérés comme des outils offrant une réponse à la « *vulnérabilité biophysique* » du territoire (Veyret et Reghezza, 2005). Ces documents de planification introduisent également des procédures particulières permettant d'agir, bien que de façon moins directe, sur des facteurs sociaux de vulnérabilité. Cependant, si la vulnérabilité du territoire reflète l'ensemble des relations entre risques et espace, lesquelles sont de plus en plus étroites et complexes, prendre en considération la vulnérabilité, c'est également tenir compte de tous les autres aspects du territoire. L'analyse globale de la vulnérabilité sous-entend, en effet, l'intégration de paramètres très nombreux, variés et complexes dans leurs

interactions tels que la présence d'enjeux humains et matériels, l'aménagement urbain, les caractéristiques environnementales, les représentations et pratiques sociales...

L'approche de la vulnérabilité dans le cadre des PPRIF malgré les efforts réalisés, reste réduite, assimilée à la notion d'enjeux, sans qu'elle soit réellement spécifiée dans les résultats cartographiques. *« L'appréciation des enjeux est réalisée sous forme d'inventaire, très peu d'études de vulnérabilité sont mentionnées. La démarche technique conduit ainsi à analyser principalement l'aléa, ce qui a pour conséquence de réaliser le zonage des PPR non sur l'évaluation d'un risque, mais sur l'évaluation de l'aléa »* (Blanchi et al., 2003). L'approche du risque incendie de forêt, dans les PPRIF, est une approche *« aléa-centrée »* (Sorensen, 2000). Dans les faits, même si le risque est désormais défini comme un composé d'aléa et de vulnérabilité, *« on demeure largement dans l'idée que le risque est contenu dans les aléas »* (Gilbert, 2003). C. Gilbert résume cet état de fait de la façon suivante : *« si, dans le champ des sciences humaines et sociales, le débat a permis de renouveler le questionnement en soulignant le caractère de plus en plus endogène des risques, la discussion, tant avec les autorités, les experts, qu'avec la société civile, les médias, reste prisonnière d'une approche assez conventionnelle »* (Gilbert, 2008). L'accent mis sur la vulnérabilité résulte en grande partie d'un effet d'affichage. Les risques sont encore, dans la réalité, très largement envisagés à travers les caractéristiques propres des aléas. Selon l'approche de R. D'Ercole et P. Metzger, la localisation des enjeux doit être effectuée pour *« localiser la racine spatiale du risque et non à partir de l'aléa »*. Il est donc nécessaire d'avoir une connaissance approfondie des espaces où évoluent les interactions et dynamiques entre les sources du risque et les enjeux.

Pour C. Gilbert, l'usage classique et majoritaire de la cartographie tel qu'il est fait dans le domaine des PPR, témoigne d'une vision déterministe du risque. La mise en carte des risques, bien que le rendant intelligible, n'en donne qu'une vision partielle : la réalisation des cartes est trop largement *« focalisée lors de l'analyse des risques, sur les aléas et accidents au détriment des vulnérabilités »* (Gilbert, 2003). Pour l'auteur, *« ce que l'on appelle spontanément risques n'est autre que la projection spatiale de ces aléas naturels et accidents donnant figure à des ennemis potentiels dont il convient de mesurer l'impact et par rapport auxquels des lignes de défense doivent être organisées »*. Cette conception très militaire représente alors un aléa actif menaçant des enjeux passifs, et justifie alors selon l'auteur *« l'administration des risques »*, ou *« l'idée de vulnérabilité se confond ainsi à celle de dommages humains et matériels »*. L'exposition est entendue comme un potentiel de perte, exposition à une menace, aucune interaction n'est spécifiée. En adoptant une *« lecture duale, déterministe et exogène, du risque »* (Pigeon, 2005), le PPRIF occulte le fait *« qu'une collectivité puisse être soumise à un risque tant en raison des menaces que font peser sur elle des aléas et accidents, qu'en raison des vulnérabilités, très actives, liées aux modes d'urbanisation, de construction, d'organisation (notamment des systèmes d'alertes et d'urgences), de réparation, etc. n'est pas vraiment pris en compte »* (Gilbert, 2003). Cette approche extériorise le problème public que constitue le risque et technicise le débat. Lequel, lorsqu'il a lieu, est souvent conflictuel.

La procédure d'élaboration d'un PPRIF s'avère très longue et complexe, 7 ans en moyenne sur les PPRIF étudiés (Tab. 5), et des controverses persistent, entre les services de l'État et les collectivités, notamment concernant la façon dont les aléas doivent être appréhendés. Malgré l'implication des différentes parties prenantes lors des phases de concertation, les PPRIF souffrent de rejets de la part de la population et des élus ce qui a pour effet de limiter le taux d'approbation (Fig. 24).

Commune	Département	Date de prescription	Date d'approbation	Durée
Communes du massif d'Uchaux : Bollène, Lagarde-Paréol, Mondragon, Mornas Piolenc, Sérignan du Comtat, Uchaux (département de Vaucluse) ; Rochebude (département de la Drôme)	Vaucluse et Drôme	26/05/2003	30/09/2011 (Vaucluse) 10/10/2011 (Drôme)	8 ans
Puget-sur-Durance	Vaucluse	02/07/2001	01/08/2007	6 ans
Ménerbes	Vaucluse	06/07/2000	20/07/2007	7 ans
Grambois	Vaucluse	28/10/2010	20/03/2013	3 ans
Maureillas Las Illas	Pyrénées-Orientales	26/08/2002	15/12/2010	8 ans
Le Boulou	Pyrénées-Orientales	26/08/2002	22/07/2013	11 ans
Céret	Pyrénées-Orientales	26/08/2002	31/05/2013	11 ans

Tab. 5 : Exemples révélant la longue durée entre prescription et approbation des PPRIF (sources : DDTM 66, DDT 84)

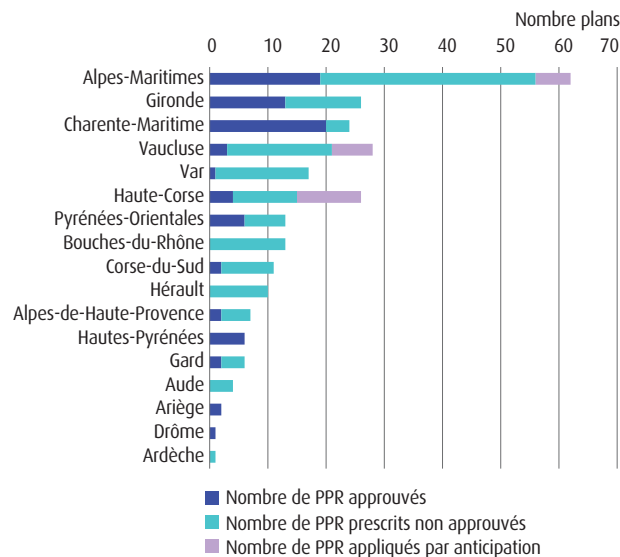


Fig. 24 : État des lieux 2010 sur les PPRIF prescrits dans 17 départements français (source : MEDDE, 2011)

Suite aux incendies dramatiques de l'été 2003 dans le Var, 17 PPRIF ont été prescrits sur ce département. Seuls deux ont été signés : un à Fréjus et l'autre à Saint-Raphaël, soulevant la colère des associations de propriétaires qui estimaient que leurs terrains étaient bloqués ou leurs maisons dévalorisées. En juin 2009, le plan de Fréjus est annulé. Un an plus tard, c'est celui de Saint-Raphaël. En 2012, le PPRIF de Fréjus est de nouveau approuvé, suite aux modifications apportées. En l'espace de dix années, le PPRIF de Fréjus reste l'unique approuvé. Les associations des Maires, des Communes Forestières et des Maires Ruraux du Var ont lancé en 2007 une demande de moratoire en matière d'élaboration des PPRIF dans le département du Var (AMR, 2007) :

« Les signataires de cette saisine sont favorables à la mise en œuvre de moyens de prévention du risque incendie de forêt visant à limiter les conséquences des feux de forêt sur la sécurité des personnes et la protection des habitations. [...] Les massifs de l'Esterel, des Maures et du sud de la Sainte-Baume sont les premiers concernés. La phase d'élaboration qui dure depuis 3 ans pour les

17 communes concernées laisse planer le doute sur la capacité de l'Etat à mettre en œuvre ces mesures compte tenu de la lenteur que nous observons.

Au-delà du préjudice subi par le blocage des permis de construire dans ces communes durant cette phase, les expériences des uns et des autres soulèvent de nombreux problèmes. Dans l'avenir, 126 communes forestières du Var devraient y être confrontées ».

Dans cette saisine, les associations soulèvent des problèmes rencontrés lors de la phase de concertation. Elles déplorent, en premier lieu, le manque et parfois même l'absence de tout contact avec les communes : celles-ci se voient informées *a posteriori*, sans qu'aucune donnée spécifique ne leur ait été transmise sur l'élaboration de la carte d'aléa. « *Les communes souhaitent un partenariat dans l'instruction de leurs PPRif avec les services de l'Etat. Elles demandent en effet que l'élaboration des PPRif repose sur une démarche de concertation, de transparence et de mise en commun des informations* ».

Dans un deuxième temps, elles reprochent que « *la cartographie des zonages, achevée ou en cours d'achèvement montre de nombreux secteurs aux divergences conséquentes avec les « avis d'experts », parfois contradictoires sur la même commune* ». Elles réclament « *que les moyens de protection et de prévention soient pris en compte dans l'établissement des PPRif, en particulier pour supprimer les zones rouges en zone habitée* », et soulèvent le préjudice moral et financier : « *Les biens détruits par un incendie de forêt deviennent inconstructibles en zone rouge. Aucune mesure de protection préventive n'y est admise afin de diminuer le risque et ainsi de permettre le reclassement de ces zones. Cette position de principe pose le problème de la sécurité des habitants : si aucune mesure de protection n'est possible, faut-il laisser les habitants en danger ?*

De plus, les biens fonciers sont immédiatement dépréciés par un classement en zone rouge. Dans un second temps, le cas de maison détruite par l'incendie laisse présager des drames humains ».

Des problèmes liés au choix d'échelle pour les cartes de zonage réglementaire ont été soulignés (Blanchi *et al.*, 2003). En effet, le choix d'une représentation à l'échelle de la parcelle (1:2000 voire 1:5000) permet une meilleure appropriation des PPR, contrairement aux échelles plus grossières 1:10000 qui facilitent la rapidité de réalisation des PPR, mais aussi les conflits liés au traitement des espaces limitrophes entre deux zonages.

À la lecture de cette étude des PPRIF, et des problèmes qu'ils soulèvent, nous apparaît un problème majeur, se situant au niveau des dires d'experts. Les associations varoises font référence aux divergences de jugements, à leur subjectivité, par extension, à l'absence de cadre dans l'élaboration du jugement global résultant. Cette question nous intéresse dans la problématique de la vulnérabilité, elle amène et demande la formalisation d'une procédure d'objectivation des jugements provenant d'experts.

Les PPRIF sont des outils prescrivant des réglementations, des décisions. Les experts (Pompiers, Forestiers, Scientifiques), quant à eux, ont un rôle support à la prise de décision. Il nous semble pertinent d'inscrire notre démarche d'évaluation de la vulnérabilité territoriale aux incendies de forêt, dans une perspective d'aide à la décision pour la gestion des aménagements futurs.

2.3.2. Les interfaces habitat-forêt

Une dichotomie entre aléa et vulnérabilité est bien présente dans l'inconscient collectif. L'effet pervers de cette « *pensée duale* » (Pigeon, 2005) conduit à occulter la question des interactions, dans un même espace, entre l'homme et son milieu. De la même manière, l'étude de la vulnérabilité d'un territoire ne doit pas diviser la pensée du géographe. Son travail ne

consiste pas à préférer l'angle physique ou humain, mais bien à se positionner, en rapport avec la discipline qui lui est propre, à l'interface, toujours en quête de la connaissance des interactions. Le phénomène incendie de forêt et l'endommagement qu'il génère, oblige le chercheur à se pencher sur les interactions entre l'homme et son milieu. L'endommagement, son processus et son résultat (le dommage), renvoie aux travaux de certains géographes, qui l'abordent par ces interactions (Pigeon, 2002, 2005 ; Leone, 1996, 2004, 2007 ; Thouret et Leone, 2003). Tel est l'intérêt d'aborder la vulnérabilité du territoire, par le prisme des interfaces habitat-forêt. Celles-ci sont, aujourd'hui, le théâtre des interactions entre l'homme, son habitat résidentiel, et la forêt.

Par extension, l'interface est donc le lieu des interactions entre l'aléa et la vulnérabilité, elle autorise alors une vision holistique dépassant la pensée duale, classique, du risque. Cette approche envisage le rôle fondamental de l'espace en matière de risque (November, 2000, 2002, 2006), et vise à en améliorer la connaissance en abordant la question de la vulnérabilité. Ces interfaces, mêlant végétation combustible et infrastructures humaines, sont des espaces clés en matière de gestion du risque incendie de forêt (Weise, 2010).

Dans un premier temps, nous exposerons les différentes définitions proposées dans la littérature et les méthodes employées pour les identifier géographiquement. Puis nous expliciterons notre position dans une perspective d'étude de la vulnérabilité de celles-ci au regard du phénomène incendie de forêt.

La littérature sur le concept d'interface habitat-forêt (IHF), et les besoins de leur gestion, est croissante. Les besoins de définition des IHF diffèrent grandement, allant de la nécessité de gestion des espaces naturels environnants (Gibbons *et al.*, 2012), d'évaluer le risque dans une logique assurantielle (Chen et McAneney, 2004), et la nécessité pour la sensibilisation de la communauté et la planification du développement urbain (Mell *et al.*, 2010). Certains auteurs ont souligné le fait qu'aucune définition des IHF n'a été établie sans équivoque (Mell *et al.*, 2010).

Mell *et al.* (2010) se réfèrent au Registre Fédéral américain (FEDERAL REGISTER, 2001) et distinguent trois formes d'« interface habitat forêt » (*Wildland-Urban Interface* – WUI), pour lesquelles les critères varient :

- **Type 1** : la « communauté d'interface habitat-forêt » (*WUI communities*) est définie comme une zone de démarcation entre la végétation forestière et l'aire de développement urbain. Au sein de ces communautés d'interface, la densité des « unités bâties » (HU, *housing unit*) est au moins de 7,5 HU/ha, soit 96 personnes/km².
- **Type 2** : les formes mélangées des « communautés d'interface habitat-forêt » (*intermix WUI communities*) ne présentent pas de démarcations clairement identifiées. Les habitations sont dispersées au sein même de la forêt. La densité des « unités bâties » varie, elle est forte au niveau des groupes d'habitations rapprochées, et passe à 1 HU pour 16 ha, pour les habitations isolées.
- **Type 3** : les formes occluses de « communautés d'interface habitat-forêt » (*Occluded WUI communities*) sont définies comme des zones forestières, généralement inférieures à 400 ha, et entourées par les habitations. Cette troisième forme présente une densité d'habitations équivalente au premier type.

Ce registre a été établi pour l'ensemble des communautés au voisinage des zones qui présentent un fort risque incendie de forêt, afin de mieux allouer les ressources nécessaires à la réduction du risque, et d'entreprendre, en collaboration avec les communautés locales, des mesures de réduction du risque aux abords des habitations. Par souci de clarté et dans une perspective de gestion, de prévention mais aussi de prospective territoriale, certains auteurs

préfèrent l'emploi du nombre d'habitants au km², plus représentatif des interfaces aux yeux des gestionnaires du risque, qu'une densité traduite en unité bâtie par km² (Theobald et Romme, 2007). Ainsi en supposant qu'il y a deux personnes par bâti, il en résulte au moins 96 personnes/km² soit une habitation pour 2 ha. Un autre critère est retenu, l'interface doit s'étendre sur au moins 10 ha. Les zones mélangées possèdent un intervalle de densité allant d'une habitation pour 16 ha, à une habitation pour 2 ha. Le type 3 n'est pas considéré.

De leur côté, Stewart et al. (2003) définissent les deux premiers types d'interfaces comme ayant tous les deux au moins une habitation pour 16 ha. Le type 1 doit comprendre moins de 50 % de couvert forestier et être dans le voisinage direct (moins de 2,4 km) d'une étendue de plus de 500 ha, au couvert forestier supérieur à 75 %. Le type 2 doit posséder un couvert forestier supérieur à 50 %. Les deux types sont caractérisés par la densité d'habitation, trois seuils sont distingués : forte densité (> 7,5 HU/ha), densité modérée (de 1 HU pour 2 ha à 7,5 HU/ha) et faible densité (de 1 HU pour 2 ha à 1 HU pour 16 ha). Le type 3 n'est pas considéré.

Les trois types d'interfaces retenus par le registre fédéral (FEDERAL REGISTER, 2001) sont considérés à risque lorsqu'ils sont au voisinage des zones forestières non entretenues, sans pour autant que cette notion de voisinage soit définie. Stewart *et al.* (2003) considèrent la distance de 2,4 km à la végétation non entretenue, comme déterminante, concernant le risque encouru par les interfaces. Ils fondent leur raisonnement sur l'observation des distances parcourues par les matières incandescentes projetées lors des incendies. D'autres auteurs définissent des distances correspondant aux différentes zones de débroussaillage : 0,8 km, 1,6 km et 3,2 km (Theobald et Romme, 2007).

Une étude récente définit les zones forestières sur la base des pertes observées lors des incendies du Victoria (2009), en Australie, les considérant comme étant une zone d'arbres indigènes supérieure à 0,4 ha avec une largeur minimale de 22 m (Newnham *et al.*, 2012). Ils ont constaté, que la probabilité de perte des habitations diminue de façon exponentielle avec la distance aux forêts, ainsi définies. Cette définition corrobore d'autres études (Ahern et Chladil, 1999 ; Chen et McAneney, 2004). Contrairement à Stewart *et al.* (2003), Newnham *et al.* (2012) ne limite pas l'étendue de l'examen à 2,4 km. Ils considèrent les parcelles herbacées et les autres types de végétation suffisamment inflammables pour conduire le feu jusqu'aux îlots de végétation environnants. De plus, en Australie, les sautes de feu sont extrêmes, elles peuvent atteindre 36 km (Tolhurst, 2009). Chen et McAneney (2010) définissent les zones forestières, associées à l'endommagement des habitations, comme étant continues et de surface supérieure à 1,6 ha.

Aux États-Unis, comme en Australie, l'attention particulière portée aux interfaces habitat-forêt est liée aux pertes conséquentes de maisons et de vies humaines, lors des grands incendies. Ces événements dramatiques ont révélé l'extrême vulnérabilité de celles-ci, au regard des incendies de forêt. Dans les pays européens, plus spécifiquement dans le bassin méditerranéen, les interfaces constituent un contexte spatial complexe qui soulève également de nombreuses questions relatives au contexte social, à la gestion des espaces naturels et aux incendies de forêt. Les études sur le sujet ont commencé, dans les années 1990, du fait des dommages sérieux que causaient les incendies, à l'environnement, aux biens et aux populations (Velez, 1992, 1997, cités dans Lampin-Maillet, 2009).

Nous avons montré (cf. §2.1.2) que l'évolution des usages de la forêt et de l'occupation du sol a contribué peu à peu à fragmenter le paysage rural et forestier, qui s'est ainsi retrouvé cerné, voire mélangé aux zones de développement urbain et économique. De façon générale, ce développement urbain, situé au cœur, ou à proximité, des forêts, pose une menace majeure sur l'environnement (Johnson, 2001 ; Radeloff *et al.*, 2005). Les interfaces habitat-forêt ne sont pas des lieux de rencontre d'unités spatiales homogènes, clairement délimitées. En réalité, il existe un continuum (Tolhurst *et al.*, 2013). Les zones de contact sont marquées de

ruptures plus ou moins franches sur le territoire, entre des parties où dominant les processus anthropiques et d'autres toujours dominées par des processus naturels (Lampin-Maillet, 2009). En intégrant, de manière hétérogène, des massifs forestiers avec des fonctionnalités liées aux systèmes urbains, les interfaces constituent de « *nouvelles configurations spatiales qui forment des territoires plus ou moins complexes* » (Lampin-Maillet, 2009), ce qui a pour effet de rendre caduque « *la durable distinction de l'urbain et du rural* » (Ferrier, 1998).

En France, dans le cadre de la gestion des coupures de combustible, on emploie le terme interface habitation-forêt (ou urbanisation-forêt) qui se définit comme une bande de 50 à 100 m séparant l'espace naturel combustible de l'espace urbain (SUAMME, 2007). L'interface habitation-forêt représente un espace dans lequel le système urbain et le système naturel sont en interaction (OCR-INCENDI, 2008).

Dans sa thèse de doctorat, C. Lampin-Maillet (2009) observe les interfaces habitat-forêt comme des objets géographiques, définis par les multiples discontinuités entre différentes natures d'occupation du sol contiguës, caractérisées par des structures spatiales spécifiques : habitat résidentiel et végétation (forêt, maquis, garrigues...). Son approche s'inscrit dans une démarche d'évaluation et de prévention des incendies de forêt.

Dans les régions françaises exposées à l'aléa incendie, la loi d'orientation forestière du 11 juillet 2001 (Art. L.322.3) impose l'obligation de débroussailler : « [...] *l'objectif est de diminuer l'intensité et de limiter la propagation des incendies par la réduction des combustibles végétaux en garantissant une rupture de la continuité du couvert végétal, et en procédant à l'élagage des sujets maintenus et à l'élimination des rémanents de coupes* ». Le débroussaillage est à la charge des propriétaires des parcelles bâties, et doit être exécuté dans un rayon de 50 m autour des habitations situées à moins de 200 m des massifs forestiers. En s'appuyant sur la législation, C. Lampin-Maillet (2009) fixe donc une distance de 200 m permettant d'identifier les zones d'interfaces, et délimite la zone d'interface par un rayon de 100 m autour des habitations résidentielles (le débroussaillage légal pouvant être porté à 100 m dans les cas extrêmes). Cette limite de 100 m intègre la zone exposée au contact des flammes ainsi que celle exposée aux phénomènes de radiation et de convection des flammes, rendant vulnérables les habitations (Cohen, 2002, 2003 ; Nowicki, 2002 ; Randall, 2003 ; Southern Forest alliance, 2003 ; Caballero *et al.*, 2004). De plus, ainsi définie, l'interface habitat-forêt inclut la mise en danger par l'action des brandons, puisque ceux-ci atteignent en moyenne une distance de 228 m, pour les pays méditerranéens européens (Colin *et al.*, 2002).

Sur la base de cette définition, l'auteur précise les deux systèmes constituant l'interface. D'une part, la structure de l'habitat résidentiel se caractérise par des critères spatiaux relatifs au risque incendie : surface moyenne à débroussailler, périmètre moyen à protéger et densité de bâtis. Quatre types sont distingués (Tab. 6) : isolé, diffus, groupé dense, groupé très dense.

Type	Densité (nombre/km ²)	Surface à débroussailler par bâtis (m ²)	Périmètre à protéger par bâtis (m)
Isolé	105 (22 ; 21 %)	9929 (1831 ; 18 %)	327 (66 ; 20 %)
Diffus	168 (49 ; 29 %)	6337 (1535 ; 24 %)	150 (42 ; 28 %)
Groupé dense	198 (87 ; 44 %)	6006 (2534 ; 42 %)	187 (106 ; 57 %)
Groupé très dense	479 (173 ; 36 %)	2324 (743 ; 32 %)	34 (17 ; 50 %)

Tab. 6 : Caractéristiques des structures d'habitat : moyennes (écarts type ; CV %) calculées dans un rayon de 50 m autour des bâtis (Lampin-Maillet, 2009)

D'autre part, la structure de la végétation se caractérise par sa continuité horizontale, traduisant la propension à propager le feu, et influençant son intensité. La structure horizontale de la végétation est mesurée par un indice d'agrégation AI (*Aggregation Index*),

qui renseigne la fréquence de connexions entre pixels de végétation et de non végétation. La carte raster résultante détaille trois classes d'agrégation :

- Agrégation nulle ($AI = 0$) correspondant à une absence de végétation ;
- Agrégation faible ($0 < AI \leq 95 \%$) caractérisant une végétation éparse, discontinue ;
- Agrégation forte ($AI \geq 95 \%$) caractérisant une structure horizontale continue de végétation.

La typologie résultante se fonde sur le croisement de ses deux composantes, formant alors 12 types d'interfaces habitat-forêt.

D'autres géographes français se sont questionnés à ce sujet, A. Mangiavillano (2008) propose d'utiliser une approche de nature fractale. Il utilise l'information vectorielle de la base *CORINE Land Cover*, et extrait deux couches d'information raster de 20 m de résolution : répartition de la végétation et répartition du bâti. L'auteur attribue un codage binaire (0 ou 1) pour marquer la présence ou l'absence de la végétation (même procédé pour le bâti).

Deux cartes sont alors obtenues, puis traitées en parallèle : pour chaque pixel, la densité végétale et urbaine de son voisinage est mesurée. Cette densité est rapportée au pixel central de la fenêtre, synthétisant l'aire plus ou moins grande qui l'entoure. L'information passe d'une valeur binaire (0 ou 1) à une valeur graduée (de 0 à 1) traduisant l'intensité du voisinage de chaque pixel (Mangiavillano, 2008). Par croisement des deux couches, l'auteur détermine les lieux centraux à mixité maximale (LCMM), composés de pixels à valeur proche de 0,5, et des lieux centraux à mixité faible (LCMF), composés de pixels à valeurs 0,1 ou 0,9 selon le voisinage (végétation ou bâti).

Cette méthode autorise une vision multiscalaire, en variant la taille de la fenêtre de voisinage : de 0,025 km² à 25 km². C'est une méthodologie de cartographie des interfaces souple et adaptée à tout type de questionnement (global ou local), qui adopte un regard structurel sur le risque (Mangiavillano, 2008).

Il est important de constater qu'à l'exception des distances utilisées, pour identifier les zones à risque, ces définitions ne se basent ni sur le comportement de l'incendie, ni sur les caractéristiques liées à l'inflammabilité ou à la combustibilité de la végétation. Certains auteurs proposent alors une redéfinition du concept (Radke, 2007 ; Standards Australia, 2009 ; Tolhurst *et al.*, 2013), ils abordent la question des interfaces par le prisme de l'incendie et proposent le concept de « Zone d'Interface du Feu » (*Wildfire Interface Zone*). J. Radke utilise un modèle de propagation de l'incendie basé sur les automates cellulaires et les SIG, afin de quantifier la nature et la probabilité d'exposition à l'incendie sur tout le territoire. L'emploi d'un modèle de propagation permet d'intégrer la contribution de la topographie, de la végétation et des conditions météorologiques pour décrire les paramètres physiques du feu (intensité, géométrie du front de flammes) (Tolhurst *et al.*, 2013). Cette approche nécessite la construction d'une typologie de la végétation adaptée aux caractéristiques des interfaces, plus ou moins entretenues.

Le modèle de J. Radke prédit l'ampleur de la pénétration des incendies dans la zone urbaine, en se basant sur les principes de propagation du feu. Celui de la norme australienne (AS 3959-2009) évalue l'exposition au rayonnement thermique et au contact direct avec les flammes, en fonction des conditions météorologiques à l'interface, de la pente du terrain à moins de 100 m d'une habitation, ainsi que de la distance à la végétation inflammable la plus proche et le type de végétation. Les deux approches considèrent donc les facteurs liés à la végétation, la météo et la topographie dans le voisinage immédiat d'une habitation, cependant l'approche adoptée par la norme australienne s'avère plus statique que celle de J. Radke.

Selon Tolhurst *et al.* (2013) le principal défaut des deux approches, réside dans l'absence de prise en compte du mécanisme d'endommagement par projection de brandons, et l'absence de représentation spatiale des vents causés par l'incendie. Des études australiennes ont pourtant prouvé que plus de 90 % des pertes d'habitation étaient liées à l'action des brandons ou de leur combinaison avec le rayonnement thermique ou l'effet convectif (Blanchi *et al.*, 2006).

Les auteurs préconisent l'introduction d'un modèle dynamique pour la simulation de la propagation des feux, PHOENIX Rapidfire (Tolhurst *et al.*, 2008). Ce modèle possède la particularité de déterminer les différents mécanismes d'endommagement (contact avec la flamme, densité de brandons, rayonnement thermique et force convective) induisant la destruction d'une habitation. K. Tolhurst et D. Chong (2011) ont développé une fonction étudiant la probabilité de perte suivant trois mécanismes (densité de brandons, force convective et hauteur de flamme), et proposent de la combiner à d'autres facteurs (indice météo, topographie...) pour explorer l'étendue des « zones d'interface du feu ». Ils adoptent ainsi une vision aléa-centrée et dynamique de la problématique des interfaces habitat-forêt.

« Par essence, l'espace géographique est une étendue différenciée » (Ferrier, 1984), la notion de contact est aujourd'hui au cœur des définitions de l'interface, car celle-ci représente le « nerf » des interactions spatiales. Lévy et Lussault (2003) définissent l'interface comme « l'une des interspatialités caractérisée par la mise en contact de deux espaces ». Le territoire est le domaine privilégié des interactions entre l'homme et la nature. En nous basant sur la définition proposée par C. Lampin-Maillet (2009), nous aborderons la question de la vulnérabilité avec l'objet interface habitat-forêt en clé de lecture du territoire. L'interface habitat-forêt se prête à une approche holistique de la vulnérabilité, elle intègre, en effet, les différentes composantes de la vulnérabilité que nous avons retenues : la vulnérabilité d'exposition, liée à ses caractéristiques d'aménagement mais aussi naturelles (topographie, structure de la végétation...), la vulnérabilité physique des habitations, liée à leur capacité de résistance, et enfin la capacité de réponse de la population en son sein. Ces trois composantes correspondent au socle de notre approche. Nous pensons que la vulnérabilité globale du territoire interface s'articule autour des interactions entre ces différentes vulnérabilités, et repose donc sur de multiples critères.

L'interface habitat-forêt facilite l'appréhension des interrelations construisant la vulnérabilité territoriale. Zone de « *transition, brutale ou progressive* » (Carroué *et al.*, 2002), elle assure avant tout une fonction de mise en relation d'un système naturel (la forêt), et d'un système anthropique (l'habitat résidentiel), auxquels s'ajoutent l'homme et ses représentations.

Par le concept interface habitat-forêt, nous envisageons deux approches pour répondre à la question de leur vulnérabilité, l'une reposant sur l'élicitation des interrelations entre de multiples critères, en accord avec les différentes formes de vulnérabilité, et proposant une vision systémique ; l'autre basée sur un modèle de propagation, offrant la possibilité d'effectuer des simulations de feu en interface, afin d'anticiper la nature, la localisation et la sévérité de l'endommagement. Par la combinaison de ses deux approches nous souhaitons révéler l'intérêt d'une approche transversale, pour la gestion de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt au regard de l'aléa incendie.

2.4. Conclusion du chapitre

Les spécificités du territoire méditerranéen français sont co-construites, au fil des époques, par les interactions entre le système anthropique et le système naturel. L'histoire de celui-ci est traversée par une diversité d'usages ou de non usage des écosystèmes forestiers, et, de tout temps, par le retour périodique des incendies (Amouric, 1992). On constate que le morcellement de la forêt d'autrefois, les cultures, l'éclaircissement du sous-bois, n'ont jamais empêché les incendies. Le feu est un phénomène récurrent du territoire méditerranéen, il ne résulte pas seulement des caractéristiques du milieu mais est, avant tout, un fait culturel (Clément, 2005). Les causes des incendies, aujourd'hui comme autrefois, dépendent des activités humaines qui se déploient à l'intérieur des massifs forestiers. L'incendie n'est pas seulement le mécanisme physique de combustion d'une végétation, il est l'expression de rapports sociaux, de modes d'utilisation de l'espace (Bouisset, 1998).

« *La plus grande administration forestière dans notre pays est celle qui se consacre à la lutte contre les nuisances résultant de la combustibilité des forêts* » (Leonard, 2004). À ce sujet, J.P. Leonard fait remarquer que cette lutte désigne de manière explicite, la lutte pour la défense des forêts. Or, implicitement et principalement, celle-ci est « *avant tout dirigée contre la menace que constituent les interfaces urbanisme-forêts, du fait de l'inflammabilité de celles-ci et de l'incurie des hommes. Le vaste dispositif mis en œuvre n'aurait jamais vu le jour si seuls étaient en cause la protection de la biodiversité, des paysages, des sols, et même, de l'économie du bois... Dans les zones où l'habitat et les espaces arborés sont inextricablement mélangés, ceux-ci sont une menace permanente pour les installations humaines... et réciproquement* » (Leonard, 2004).

Les interfaces habitat-forêt, avec pour cibles principales l'Homme et les habitations résidentielles, représentent un enjeu majeur dans le cadre de la gestion du risque incendie de forêt sur le territoire méditerranéen. Le danger d'une telle cohabitation résulte de la capacité forestière à relayer le feu jusqu'aux habitats humains. Il génère un considérable réseau de moyens de lutte sans que la sécurité des hommes soit pour autant complètement assurée (Leonard, 2004).

Le risque incendie de forêt a pris de l'ampleur ces dernières années en même temps que changeait le statut de la forêt. Y. Rinaudo montre comment l'incendie, phénomène ancien, est venu au cœur des préoccupations depuis quelques décennies seulement, au point d'être à présent « *vu comme la caractéristique essentielle, pour ne pas dire unique, de la forêt méditerranéenne* » (Rinaudo, 1994).

Ce constat nous invite immédiatement à explorer la composante du risque qu'est la vulnérabilité, puisqu'en effet, le phénomène incendie de forêt n'a pas fondamentalement changé de nature. Par ailleurs, si l'on pense les interfaces habitat-forêt comme des espaces d'extrême vulnérabilité, encore faut-il définir cette dernière pour mieux en dégager ses spécificités.

La gestion de la vulnérabilité territoriale implique la prise de décision, visant sa réduction. Ces décisions doivent se baser sur de nombreux critères, du fait de la complexité du problème. Les gestionnaires du territoire font face à de nombreuses incertitudes, au manque de connaissance sur les conséquences potentielles des incendies au niveau des interfaces habitat-forêt. Évaluer la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt est chose ardue, d'autant plus lorsque l'évaluation s'effectue dans des contextes présentant des données insuffisantes, et un manque de recul sur les processus d'endommagement. Les problèmes de prise de décisions se posent. Quels sont alors les recours permettant de légitimer leur choix d'action ? Dans le cadre des PPRIF, il est souvent fait appel au jugement des experts. À partir de leur

connaissance et de leur expérience, ceux-ci fournissent une interprétation, une évaluation ou une recommandation à la question posée. L'expert, en France, joue un rôle incontournable pour le diagnostic et l'analyse des risques. Toutefois, les divergences entre les jugements freinent la bonne gestion du problème incendie. Disposer d'une expertise de haut niveau, et représentative de tous les jugements apparaît donc essentielle pour les gestionnaires.

Dans ce contexte, l'objectif du prochain chapitre sera de proposer une méthode d'évaluation de la vulnérabilité, intégrant les connaissances des experts et leurs nombreuses expériences vécues. Cette méthode se positionne dans une perspective d'aide à la décision, pour une meilleure gestion de la vulnérabilité des interfaces.

Chapitre 3. Évaluation et aide multicritère à la décision dans une logique multi-acteurs

3.1. Réflexion sur la notion d'évaluation

L'évaluation est inhérente à l'activité humaine, constitutive de son mode de pensée : « *quiconque juge évalue ; à ce titre, l'évaluation est universelle* » (Brousselle *et al.*, 2011). Elle permet à l'homme de construire une représentation du réel. À titre d'exemple, la quantité de temps que l'on peut accorder à telle ou telle activité, dans une journée, repose sur la notion d'évaluation. Cette évaluation peut être quantitative, on attribue une valeur en unité de temps, ou qualitative, on utilise alors une valeur sémantique (beaucoup, peu...). Qui plus est, les valeurs attribuées peuvent varier en fonction des personnes et de leur perception.

Dans la littérature, multiples sont les disciplines traitant de l'évaluation. Face au caractère polymorphe de l'activité d'évaluation, nous proposons, dans un premier temps de nous référer aux définitions trouvées dans le dictionnaire *Petit Robert* :

- (1) « *Porter un jugement sur la valeur* » ;
- (2) « *Déterminer (une quantité) par le calcul sans recourir à une mesure directe* » ;
- (3) « *Fixer approximativement* ».

Évaluer renvoie donc à l'action d'estimer, expertiser, chiffrer, jauger, conjecturer, apprécier, juger. Nous sommes alors face à une activité alliant jugements de valeurs et observations plus ou moins précises. Au regard des définitions proposées, l'évaluation peut se baser sur le jugement d'une ou plusieurs personnes relatif à la valeur d'un objet matériel ou immatériel, son appréciation. Mais elle peut également se fonder sur un calcul, sans prétendre forcément à l'objectivité. Elle peut être univoque et très précise, tout comme elle peut relever de la subjectivité de l'évaluateur et représenté une approximation, une estimation.

Il est un domaine où l'évaluation est essentielle, l'enseignement. Ce domaine a donné lieu à une formalisation de l'activité d'évaluation. Voici une revue, non exhaustive, des différentes définitions énoncées par les principaux théoriciens de l'évaluation.

Dans sa thèse traitant de l'évaluation des compétences linguistiques, E. Aboubaker (1996) avance que « *la définition qu'on donne actuellement à l'action d'évaluation assigne à celle-ci une nouvelle dimension : alors qu'elle visait initialement et principalement la sélection et l'orientation des élève, à partir des années 1970, l'acte d'évaluation considère que les résultats des élèves ne sont qu'un moyen permettant un jugement et de prendre une décision au niveau de l'organisation de l'acte d'enseignement/apprentissage* ». L'acte d'évaluation est passé d'un objectif de sélection à un objectif d'amélioration, désigné comme « *l'évaluation formative* », qui amène à diagnostiquer les forces et faiblesses des élèves ainsi que leur degré de préparation (Scallon, 1991).

L'étude sur la psychologie de l'évaluation scolaire amène G. Noizet à proposer une définition dépassant le cadre de l'activité scolaire : « *Dans son acception la plus large, le terme évaluation désigne l'acte par lequel, à propos d'un événement, d'un individu ou d'un objet, on émet un jugement en se référant à un (ou plusieurs) critère(s), quels que soient par ailleurs ce(s) critère(s) et l'objet du jugement* » (Noizet et Caverny, 1978). Plusieurs notions entrent en jeu et soulèvent diverses questions :

- Sur quoi porte l'évaluation ? ou la question de l'évalué : « *événement* », « *individu* », « *objet* », ce qui n'oppose aucune restriction sur la nature de l'évalué.

- Qui est chargé de l'évaluation ? ou la question de l'évaluateur : l'utilisation du « on » laisse envisager le caractère non singulier de l'évaluateur (groupe de personne).
- Comment évaluer ? ou la question de la méthode d'évaluation : « on » émet un jugement en « *se référant à un (ou plusieurs) critère(s)* » (renvoie au caractère multicritère de l'évaluation).

Selon G. Noizet, l'évaluateur se réfère à des critères pour émettre son jugement, quels que soient les objectifs de l'évaluation. Une autre définition de l'acte d'évaluation vient à la fois compléter celle de G. Noizet et s'en distinguer. Il s'agit de celle énoncée par J.M. De Ketele dans son étude sur l'évaluation scolaire (De Ketele *et al.*, 1997). Selon lui, le verbe évaluer « *signifie* :

- *recueillir un ensemble d'informations suffisamment pertinentes, valides et fiables,*
- *et examiner le degré d'adéquation entre cet ensemble d'informations et un ensemble de critères adéquats aux objectifs fixés au départ ou ajustés en cours de route en vue de prendre une décision. »*

Il la complète en introduisant la nécessité du recueil d'informations préalables à la construction des critères représentatifs des objectifs. Il nuance l'activité d'évaluation en lui conférant un caractère itératif. Il considère donc l'évaluation comme un processus alternant des phases de définition d'objectifs et de recueil d'informations.

L'auteur se distingue de G. Noizet en inscrivant l'évaluation dans un processus de prise de décision. De ce fait, il se rapproche d'un autre chercheur en science de l'éducation, C. Hadji (1989). Selon C. Hadji, évaluer c'est « *mettre en relation* » des éléments issus d'un observable ou « *référé* » avec un « *réfèrent* » pour « *produire de l'information éclairante* » sur l'observable, afin de prendre des décisions (Hadji, 1989). Le « *référé* », c'est l'observable à évaluer, la vulnérabilité d'un territoire. Le « *réfèrent* » c'est ce à quoi se rapporte le « *référé* », sa structure, articulée autour de critères sur lesquels s'appuie l'évaluation, et ainsi supporter la prise de décision.

L'auteur propose une vision d'ensemble du concept d'évaluation et des notions périphériques qu'il traverse (mesurer, interpréter, juger, apprécier, évaluer, critères, référents, représentations). Il distingue trois types d'évaluations (Tab. 7), qui sont à mettre en relation avec trois enjeux, dans le domaine scolaire (Hadji, 1989) :

- Réguler le développement de l'individu ;
- Réguler le fonctionnement du système ;
- Réguler les individus dans l'ensemble du système.

L'évaluation suppose la construction d'un jugement scientifiquement valide. Celui-ci découle d'un processus rationnel par lequel on estime « *ce que vaut la réalité* » (Hadji, 1989). Ainsi, l'évaluation suppose une transformation des représentations afin de passer d'éléments factuels à une interprétation de ceux-ci, sur la base d'une grille de lecture composée de critères permettant de porter un jugement (Barbier, 1985).

L'évaluation se caractérise à la fois par une dimension cognitive et une dimension instrumentale. Elle ne produit pas seulement des effets de connaissance, mais aussi des effets de légitimation. Pour revenir à la problématique de la vulnérabilité, elle permet d'en connaître les ressorts, dans le but d'améliorer sa gestion et d'accroître la légitimité des décisions, parfois contraignantes, qui en découlent.

	Évaluation estimative	Évaluation appréciative	
Démarche	Évaluation par défaut de mesure Peser alors que l'on ne dispose pas d'une balance. → Orientation quantitative	Avec modèle prédéterminé Apprécier la situation par rapport à un critère cible. → Orientation qualitative	Sans modèle prédéterminé Dégager la signification d'une pratique en construisant le « référent » multidimensionnel permettant de la « penser » → Orientation qualitative
Intentions	Mesurer Dire le « poids » de l'être.	Apprécier Dire la valeur de l'être.	Interpréter Dire le sens de l'être.
Modèle de fonctionnement	Saisir la réalité en la soupesant → Parole objective	Juger l'être à la lumière du devoir être → Parole appréciative	Comprendre l'être dans sa multi-dimensionnalité → Parole interprétative
Figure emblématique	L'expert	Le juge	Le philosophe

Tab. 7 : Typologie de l'évaluation, dans le domaine scolaire d'après (C. Hadji, 1989)

L'évaluation est donc une composante essentielle à la résolution d'un problème de décision. Nous plaçons l'évaluation comme support de la décision, non confondue avec celle-ci, et la définissons en tant que jugement, conçu comme une incitation à l'action, susceptible de faire naître de nouveaux enjeux décisionnels.

Toute évaluation se construit selon un modèle de pensée (Vial, 1999). M. Vial propose de mettre en relation les modèles d'évaluation avec les modèles de pensée. Selon lui, « *les modèles de pensée nous agissent, ils nous donnent des cadres pour concevoir l'être-au-monde. Ils ne sont pas propre à l'évaluation, mais supervisent tous les domaines des sciences humaines* ». Les modèles de pensée présentés par l'auteur sont les suivants : le déterminisme, le fonctionnalisme, le structuralisme, la systémique et la complexité.

Face à cela, l'auteur propose ensuite une classification des modèles d'évaluation en trois catégories :

- **L'évaluation-mesure** : modèles historiques d'explication causale, métrique, docimologie, provenant du déterminisme.
- **L'évaluation-gestion** : modèles contemporains de rationalisation par les objectifs, évaluation comme aide à la prise de décision, découlant du fonctionnalisme, du structuralisme et de la systémique.
- **L'évaluation-problématisation du sens** : modèle basé sur la systémique, la dialectique, l'herméneutique.

Au regard des différentes catégories présentées, le présent travail se situe à l'interface entre l'évaluation-mesure et l'évaluation-gestion. L'évaluation est, alors, une approche qui emprunte au déterminisme, par l'explication causale des effets des critères sur la vulnérabilité, et à la systémique, par l'étude des relations entre les critères construisant cette dernière. Ainsi, nous envisageons de passer d'une problématique centrée sur le produit, à une problématique centrée sur le processus de production. Nous cherchons à estimer, mesurer la vulnérabilité (le produit), mais en l'appréhendant par les processus à sa source, afin d'aider les citoyens et les gestionnaires dans leurs tâches de réduction du risque sur le territoire. De fait, les critères d'évaluation s'apparentent à des facteurs de vulnérabilité. Ce sont des critères de « *réalisation* » (Bonniol et Genthon, 1989), impliqués dans la construction de la vulnérabilité.

L'évaluation suit alors une interprétation estimative, orientée vers la recherche du « poids » de la contribution des différents critères construisant l'objet évalué. En ce sens elle relève du jugement de l'expert (Hadji, 1989).

La première étape du processus renvoie à l'identification et à la définition de ce que l'on cherche à évaluer (la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt au regard des incendies de forêt). Il s'agit aussi de définir qui sont les personnes que l'on inclut dans le processus, quel est l'horizon temporel de l'étude, etc.

Ensuite, l'évaluation doit s'effectuer selon un système de valeurs précis, un référentiel commun à l'évaluation. L'objectif visé est la construction d'un indice de vulnérabilité, sur une échelle de valeurs textuelles allant de « très faible » à « très forte ».

Dès lors, il s'agit de déterminer les critères construisant la vulnérabilité du territoire, puis d'appréhender la performance de chaque critère, leur contribution à la vulnérabilité globale. Cette étape fait appel à l'acte même de l'évaluation, le jugement, nous procéderons donc à l'élicitation de la connaissance des experts.

Enfin, nous chercherons à vérifier la cohérence des résultats de l'évaluation, selon une approche *a posteriori*, la confrontation avec l'endommagement observé. À travers cette démarche évaluative, nous souhaitons répondre à plusieurs objectifs :

- faire le constat, le diagnostic de la vulnérabilité d'un territoire au regard des incendies de forêt ;
- identifier les forces et faiblesses du territoire ;
- communiquer avec transparence sur l'état du territoire, pour instaurer le dialogue et faciliter la négociation concernant les objectifs à retenir ;
- réaliser le suivi de l'évolution de la vulnérabilité au cours du temps ;
- faire apparaître de nouveaux enjeux décisionnels ;
- anticiper les conséquences de certaines prises de décisions ;
- comparer plusieurs scénarii d'aménagement.

3.2. L'expertise dans un processus d'évaluation pour l'aide à la décision

« Nous soussignés, membres de la communauté scientifique et intellectuelle internationale, [...] exprimons la volonté de contribuer pleinement à la préservation de notre héritage commun, la Terre. Toutefois, nous nous inquiétons d'assister, à l'aube du XXI^{ème} siècle, à l'émergence d'une idéologie irrationnelle qui s'oppose au progrès scientifique et industriel et nuit au développement économique et social.

Nous affirmons que l'état de nature, parfois idéalisé par des mouvements qui ont tendance à se référer au passé, n'existe pas et n'a probablement jamais existé depuis l'apparition de l'homme dans la biosphère, dans la mesure où l'humanité a toujours progressé en mettant la nature à son service, et non l'inverse.

Nous adhérons totalement aux objectifs d'une écologie scientifique axée sur la prise en compte, le contrôle et la préservation des ressources naturelles. Toutefois, nous demandons formellement par le présent appel que cette prise en compte, ce contrôle et cette préservation soient fondés sur des critères scientifiques et non sur des préjugés irrationnels.

[...] Notre intention est d'affirmer la responsabilité et les devoirs de la science envers la société dans son ensemble. Cependant, nous mettons en garde les autorités responsables du destin de notre planète contre toute décision qui s'appuierait sur des arguments pseudo-scientifiques ou des données fausses ou inappropriées. »

Extrait de l'appel d'Heidelberg, Sommet de Rio 1992

3.2.1. Définition et rôle de l'expert

Étymologiquement, le terme *expert* remonte au XIII^{ème} siècle, il est issu du latin *expertus*, participe passé de *experiri* « faire l'essai de » (Petit Robert). Employé comme adjectif au XIII^{ème} siècle, il désignait une personne ayant acquis par l'expérience et la pratique une grande habileté, compétence, connaissance. Au XVI^{ème} siècle, apparaît son emploi en tant que substantif masculin pour désigner une personne choisie pour ses connaissances techniques, chargée de faire des examens, des évaluations à propos d'un sujet précis. Le terme *expert* rassemble une diversité de définitions : il désigne à la fois une personne dotée d'une habileté pratique acquise par l'expérience, et une personne compétente et savante. L'expert se voit attribuer plusieurs fonctions : il est chargé de faire des constats, des évaluations, dans le but de résoudre un problème auquel est confronté un décideur.

Dans son ouvrage consacré à l'expertise scientifique, P. Roqueplo considère l'expert comme la personne délivrant la connaissance (Roqueplo, 1997). L'auteur met en garde sur l'ambiguïté sémantique existant entre l'emploi du substantif masculin « expert » et celui de l'adjectif « expert(e) ». Selon lui, « employé comme adjectif, le mot *expert(e)* signifie compétent(e), qualifié(e) dans un domaine donné. [...] Le substantif quant à lui désigne quelqu'un dont la fonction est de formuler une expertise » (Roqueplo, 1997). Il soulève alors une ambiguïté, qui pousse à distinguer deux rôles :

- **Rôle de négociateur qualifié** : qu'il attribue à la personne experte, ou spécialiste, qui met ses connaissances au service du décideur politique dans le cadre de négociations. L'expertise est alors utilisée comme mode de légitimation des décisions (Habermas, 1973). L'expert cherche à convaincre du bien fondé d'une décision. Le décideur se sert alors de l'expertise comme d'un instrument pour fonder scientifiquement une décision qu'il aurait déjà prise (Dumoulin, 2001).

- **Rôle d'expert** : il est demandé au nom de son expérience et de ces connaissances comme expert chargé de contribuer à l'élaboration d'un « *jugement de vérité* » sur un problème donné. Dans ce contexte, le rôle de l'expertise est de fournir une connaissance pour éclairer le décideur dans ses actions.

L'expert scientifique dans le processus de décision, auquel il est associé, se situe donc à « *l'interface de la connaissance et de la décision* » (Roqueplo, 1997). Sa fonction spécifique au sein d'un processus de décision consiste précisément à apporter toute connaissance susceptible d'éclairer la décision : « *les sciences sont convoquées pour éclairer, justifier ou fonder au moins partiellement une décision politique* » (Roqueplo, 1991). L'expert délivre la connaissance, non pas la décision.

Dans le domaine de la gestion des risques naturels, le décideur dépourvu des connaissances nécessaires à une action raisonnée se tourne vers l'expert pour qu'il lui fournisse des éléments d'aide à la décision. Néanmoins, P. Roqueplo nuance, par la suite, son propos en introduisant la subjectivité de l'expert. En effet, selon lui, « *l'expert transgresse inéluctablement les limites de son propre savoir* » (Roqueplo, 1997). Dans des cas complexes, l'expert est amené à évaluer, estimer, malgré parfois l'insuffisance des connaissances dont il dispose. Le recours à des équipes d'experts issus de disciplines différentes permet alors, par la confrontation des différents jugements et le dépassement des désaccords, de rendre à l'expertise un statut scientifique. Ce modèle d'expertise se rapproche alors de l'expertise judiciaire : l'expertise ne peut être que collective et contradictoire (Roqueplo, 1997). Dans cette acception, l'expertise, rejetant l'idée d'une objectivité scientifique *a priori*, tend donc vers l'objectivation, vers l'obtention d'une « *connaissance raisonnable aussi objectivement fondée que possible* » (Roqueplo, 1997). Elle n'est toutefois concrètement réalisable qu'à la condition de l'appuyer sur une « *éthique de l'objectivation* » permettant une « *confrontation instruite, raisonnée et de bonne volonté de regards pluriels* » (Mironesco, 1997).

M. Callon et A. Rip proposent de « *cadrer* » la formulation de l'expertise (Callon et Rip, 1992). Les énoncés d'expertise sont produits en unissant des considérations de divers ordres dans un compromis le plus solide possible. Celui-ci fait intervenir le pôle des connaissances scientifiques, celui des contraintes réglementaires, et celui des intérêts sociaux, politiques ou économiques. Les auteurs s'écartent de la thèse de P. Roqueplo en préconisant non pas un processus d'objectivation, mais un processus d'élargissement du débat social, où l'expertise n'est plus affaire de scientifiques mais doit être ouverte aux groupes intéressés, qui détiennent des savoirs locaux spécifiques. Ils introduisent le concept de « *forums hybrides* » (Callon et Rip, 1992), et confèrent un caractère robuste à l'expertise, qui se construit par confrontation des différents intérêts et arguments des acteurs concernés.

Lors de son intervention à l'occasion du Colloque *L'expertise scientifique : dispositifs et nouveaux enjeux*, le 18 juin 2013, P. Le Coz dégage trois représentations de l'expert, le sachant, le prudent et le discutant (Le Coz, 2013) :

- **Le modèle du sachant** : modèle rationaliste/discontinuiste, l'expert est celui qui est capable de réfuter l'opinion commune en fonction du savoir qu'il a acquis par l'élévation conceptuelle de son esprit.
- **Le modèle du prudent** : modèle continuiste, celui de l'empiriste, où les savoirs dérivent d'expériences. On doit enraciner le savoir dans l'intuition, le concret. On passe de l'opinion au savoir par un processus de rectification. Le savoir est provisoire, vraisemblable, approximatif.
- **Le modèle du discutant** : modèle procédural où l'expert revêt peu à peu la figure du discutant. L'expertise consiste en une confrontation des opinions. Les règles de

production du savoir émergent au cours de la discussion. La démocratie participative prime alors sur l'omniscience des experts isolés.

En France, le risque concerne l'État, ses administrations mais également les collectivités locales, les acteurs politiques et les citoyens. La géographe Y. Veyret, dans son ouvrage intitulé *Géographie des risques naturels en France – De l'aléa à la gestion*, analyse le positionnement relatif des scientifiques, des experts et des ingénieurs (Veyret, 2004). Les scientifiques et les techniciens analysent l'aléa et les modalités de l'endommagement. Comme nous l'avons énoncé précédemment, la culture de l'expertise a longtemps favorisé les réponses techniques face aux aléas dangereux. Aujourd'hui, le rôle de l'expert a évolué. Il doit faire face à la fois aux incertitudes liées aux phénomènes physiques et aux divergences d'avis, tout en étant contraint, du fait de son statut, à fournir des solutions. En effet, du fait de la pression sociale, dès qu'un problème complexe soulève une difficulté de résolution non ordinaire, le recours à l'expert est envisagé.

Malgré ces dilemmes, l'expert reste un acteur central de la connaissance. Distinction faite entre l'expert et le spécialiste, P. Roqueplo rappelle que le premier est non seulement instruit, mais aussi, qu'il a identifié et éprouvé par l'expérience les problèmes auxquels il tente d'aider à la résolution.

Dans le cadre de notre recherche, le rapport que l'expert entretient avec la réalité nous semble déterminant. Sa confrontation sur le « terrain » avec l'incendie de forêt, son analyse des processus d'endommagement, lui confèrent une connaissance théorique, pratique (déduite de l'expérience), et une connaissance réflexive (induite par l'expérience).

3.2.2. La connaissance propre à l'expert

« La connaissance est le résultat de l'appréhension, de la perception d'une réalité. Lorsque l'humain acquiert la connaissance d'une chose, il construit en lui une image de cette chose, il sémantise en interprétant l'objet perçu. La connaissance est une manière de s'approprier un objet, de transformer l'information perçue à travers sa manifestation en quelque chose porteur de sens » (Caplat, 2002). L'humain, grâce à ses capacités cognitives, construit une représentation de « l'objet ». Les psychologues cognitivistes admettent généralement que les représentations sont des constructions mentales circonstanciées, liées à des contextes et à des fins spécifiques, alors que les connaissances sont des constructions mentales qui ont une permanence et sont stockées en mémoire à long terme (Richard, 1998).

Plus généralement, les connaissances sont propres à chaque individu et désignent différents types de savoirs (savoir faire, savoir être...) détenus par un individu et mobilisables pour interpréter un phénomène, évaluer ses ressorts et résoudre des problèmes décisionnels.

La connaissance de l'expert se situe à l'interface de l'expérience et de la science. Il dispose d'une base de connaissances à la fois théoriques et empiriques, en constante interaction. Elle est à distinguer de la connaissance du savant. Le savant est une « personne qui a des connaissances approfondies dans un domaine déterminé et restreint » (Petit Robert). Il se définit avant tout par rapport aux connaissances reconnues par la communauté scientifique relative à sa discipline. Tandis que le savant maîtrise des savoirs formalisés, l'expert se situe dans l'aide à la décision et l'évaluation pour l'action, domaines singuliers et contextualisés où les savoirs empiriques peuvent servir de repères pertinents pour agir ou proposer des actions adaptées (Dubois *et al.*, 2005).

Les connaissances de l'expert sont à distinguer de celles du profane, qui possède une vision fragmentaire et analytique des situations. L'expert, quant à lui, détient une connaissance de règles générales, qui lui permet d'appréhender de nombreuses situations

particulières : « *par intégration de nombreuses expériences particulières, par accommodation et assimilation, pour reprendre les termes de Piaget, il se construit des règles ou des connaissances générales robustes qu'il applique ensuite aux situations nouvelles. Il est ainsi capable de comprendre les situations par référence à des structures génériques pour détecter le connu dans le nouveau, le général dans le particulier* » (Dubois et al., 2005).

Selon la conception classique de la formation de l'esprit scientifique, « *la nécessité de l'expérience étant saisie par la théorie avant d'être découvert par l'observation, la tâche du physicien est d'épurer assez le phénomène pour retrouver le noumène organique* » (Bachelard, 1968). L'expert ne cherche pas le principe général dans le cas particulier, mais reconnaît des situations particulières à partir de règles générales. Sa force ne résiderait donc pas dans sa capacité à « *épurer assez le phénomène pour retrouver le noumène organique* » (Dreyfus, 1992), mais dans sa capacité à contextualiser en permanence ses savoirs et savoir-faire.

Selon H.L. Dreyfus, l'expert n'utilise pas de règle, pas de suivi systématique de procédures. Il évalue la situation à l'aide de quelques indicateurs pertinents que le cerveau discrimine en un temps record. Cette évaluation, jointe à une comparaison automatisée de la situation avec une classe de situations antérieures déjà rencontrées, définit alors l'expert.

« *Le stade logico analytique y a été littéralement digéré, ou compilé, au sein d'ensembles cognitifs composites de niveau supérieur qui fonctionnent essentiellement sur l'analogie avec les expériences antérieures mémorisées* ». (Dreyfus, 1992)

Dans ce cas, la connaissance de l'expert ne se caractérise pas par la force de ses modèles théoriques assimilés, mais plutôt par la variété des expériences travaillées et pensées, à travers sa configuration cognitive où la connaissance théorique tient sa place à côté de la richesse des expériences vécues et des actions menées.

L'objectif majeur de l'évaluation de la vulnérabilité réside dans la volonté de comprendre l'interaction complexe des facteurs qui la dirigent, et ainsi, d'identifier les zones laissant prise à l'endommagement par l'incendie de forêt. Une fois ces zones vulnérables déterminées, les gestionnaires et les propriétaires pourront planifier et mettre en œuvre les mesures adéquates et nécessaires pour atténuer les impacts potentiels.

Compte tenu du fait que la vulnérabilité représente un phénomène non directement mesurable, nous chercherons à l'évaluer grâce aux jugements d'experts. Le défi d'une telle évaluation est alors de quantifier un phénomène que nous ne pouvons pas directement « voir », « sentir » ou mesurer. Nous pensons que le recours à la connaissance des experts permet d'appréhender les relations s'exerçant entre une multitude de facteurs de vulnérabilité (environnementaux, humains et matériels), et, de ce fait, favoriser l'évaluation dans le cadre de l'aide à la décision pour la gestion du risque incendie de forêt.

3.3. Processus décisionnel et aide à la décision

La question de la décision, individuelle ou collective, est inhérente à l'activité humaine, qu'elle se pose dans la vie privée, publique ou professionnelle. L'analyse de la décision s'est construite progressivement selon différentes perspectives : rationalité parfaite/rationalité limitée (Simon, 1947), théorie normative/théorie descriptive du comportement humain (March, 1978), science d'analyse de décision/conception de décision (Le Moigne, 1986), optimisation monocritère/analyse multicritère...

On présente souvent la décision comme émanant d'un individu isolé (le décideur), à un moment donné dans le temps, sur la base d'un objectif (résoudre son problème), désireux de choisir la solution optimale dans l'ensemble des solutions possibles afin de mettre en œuvre

ses actions (le remède). En d'autres termes, la décision est un choix et se définit comme l'expression de préférence, « *entre plusieurs solutions possibles, d'une action portant sur la mise en œuvre de ressources ou la détermination des objectifs, compte tenu d'un ou plusieurs critères d'évaluation des solutions* » (Darbelet *et al.*, 1995).

Dans le langage commun, la notion de décision est souvent assimilée à un phénomène immédiat, une sentence. La décision est alors synonyme de choix, or cette instantanéité est trompeuse, H.A. Simon⁶ la récuse et introduit alors le concept de « *processus de décision* » (Simon, 1947). En effet, même si la démarche cognitive reste souvent implicite, la prise de décision suit un processus mental durant lequel l'acteur suspend sa réflexion, compare, évalue, consulte ses connaissances enfouies et tranche. Le choix n'est alors que le résultat : la décision est « *un processus qui permet à un opérateur de réaliser des choix* » (Lévy et Lussault, 2003). La décision s'inscrit dans un processus temporel de recherche d'informations, d'identification et d'évaluation. Elle n'est plus assimilée à une activité ponctuelle. On peut citer quelques exemples de décisions dans l'espace géographique, que les décideurs ou gestionnaires du territoire sont amenés à prendre : quel est le meilleur site pour l'implantation d'une centrale de production d'électricité ? Quelles sont les zones où imposer une interdiction de construire, en raison des risques (naturels ou technologiques) encourus ? Sur quel site doit-on choisir d'implanter un aéroport ?

Une distinction est introduite, dans la littérature (Roy et Bouyssou, 1993 ; Tsoukiàs, 2003a ; Tsoukiàs, 2003b ; Rousseau, 2003), entre la notion de processus de décision et de processus d'aide à la décision (cf. §3.3.1 et §3.3.2). L'aide à la décision est un domaine extrêmement vaste. Nous chercherons à en donner une vue d'ensemble, sans prétendre à l'exhaustivité.

3.3.1. *Le processus de décision : un ensemble d'activités cognitives*

De gros progrès ont été réalisés pour raisonner en termes de processus décisionnel. Le modèle de décision le plus connu est celui de H.A. Simon, qui introduit le concept de « *processus de décision* » (Simon, 1947). Ce processus concerne l'ensemble des activités cognitives du décideur, soulevant une problématique dont la résolution n'est pas instantanée. H. Mintzberg propose la définition suivante : « *le processus décisionnel est considéré comme un ensemble d'activités déclenché par un stimulus, et aboutissant à un engagement spécifique à l'action* » (Mintzberg *et al.*, 1976 ; d'après la traduction de Laaribi, 2003). Ce concept est fondé sur l'hypothèse de traçabilité des activités cognitives, impliquant une modélisation possible du comportement décisionnel (Tsoukiàs, 2003b).

Son introduction amène deux innovations majeures traitant de la rationalité (Tsoukiàs, 2003b) :

- (1) La rationalité relève du processus non de la décision finale. La cohérence est exigée durant tout le processus ;
- (2) La rationalité, l'espace et la capacité cognitive sont limités dans le temps.

H.A. Simon insiste sur le caractère dynamique du processus. Il le décline en quatre étapes : en partant de l'apparition du problème, il aborde alors sa structuration et identifie une gamme d'alternatives, pour enfin évaluer toutes les conséquences possibles.

⁶ Herbert Alexander SIMON est l'un des précurseurs de l'école de la décision. Il impulsa une véritable théorie administrative de la décision avec son livre, *Administrative Behavior*, publié en 1945. Ses contributions à l'analyse des processus décisionnels lui ont valu le Prix Nobel de science économique en 1978.

Son modèle a pour objectif spécifique la caractérisation du « comment » une organisation sociale réagit face à un problème décisionnel. Ayant défini le processus de décision, il articule son modèle cognitif autour de quatre phases (Fig. 25), qui sont la recherche d'informations (*Intelligence*), la conception (*Design*), le choix (*Choice*) et la révision (*Review*), et le nomme IDCR (Intelligence-Design-Choice-Review).

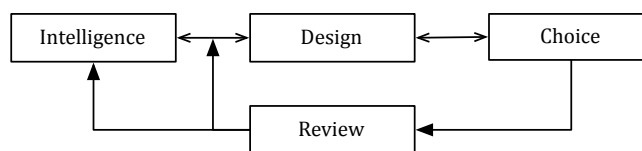


Fig. 25 : Processus de décision d'après H.A. Simon, 1947

Le processus de décision n'est pas linéaire et séquentiel, il s'apparente à une boucle et possède un caractère rétroactif. Toute avancée est susceptible de générer des conséquences, impliquant des modifications pour une ou l'ensemble des étapes. C'est un modèle itératif où les causalités s'enchevêtrent (Simon, 1947).

L. Sfez, dans sa *Critique de la décision* (1981), estime que la complexité actuelle des organisations sociales appelle une conception inédite de la décision. Selon lui, étant frappée du sceau de l'aléatoire généralisé, la décision doit être lue comme « *un récit multirationnel, énoncé à plusieurs voix par tous les acteurs d'un processus quelconque, qui vise à dissimuler l'incertitude totale dans laquelle ceux-ci se trouvent. Il y a, au sein de ce récit, non point juxtaposition, mais enchevêtrement des rationalités* » (Lévy & Lussault, 2003). La multitude des rationalités soulève le problème du choix irrationnel, l'argumentaire devient alors une incontournable étape de la décision (Sfez, 1992). Par ailleurs, cette vision corrobore celle de H.A. Simon, qui amène l'idée qu'un décideur ne détient pas une connaissance totale de la situation, d'où le terme de « *rationalité limitée* » (Simon, 1947). L. Sfez lui emboîte le pas en démythifiant la représentation de « *l'homme certain* », qui laisserait entendre qu'un décideur agit, maîtrisant sa pensée et sa volonté, alors qu'il est un « *agi* » (Lévy & Lussault, 2003), du fait des contraintes de l'organisation qui sélectionne ou favorise tel ou tel scénario en fonction de ses intérêts.

La plupart des acteurs rejettent aujourd'hui la conception de la décision linéaire et causale, et insistent sur les mutations radicales de la décision en univers incertain (Callon *et al.*, 2002 ; dans Lévy & Lussault, 2003).

3.3.2. L'aide à la décision : évaluer pour supporter les problèmes décisionnels

B. Roy définit l'aide à la décision comme « *l'activité de celui qui, prenant appui sur les modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, cherche à obtenir des éléments de réponses aux questions que se pose un intervenant dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à prescrire, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels cet intervenant se trouve placé d'autre part* » (Roy, 1985).

L'aide à la décision est donc perçue comme une « *activité* », qui correspond à une démarche visant à « *éclairer la décision* ». La notion de décideur « *désigne en dernier ressort l'entité qui apprécie le possible et les finalités, exprime les préférences et est censé les faire prévaloir dans l'évolution du processus* » (Roy, 1985). Même si, « *en dernier ressort* », la décision incombe à un individu clairement identifié, celle-ci est « *souvent la résultante*

d'interactions entre de multiples acteurs » (Roy et Bouyssou, 1993). Parmi ces acteurs, les auteurs distinguent : les intervenants qui, « par leur intervention conditionnent directement la décision en fonction du système de valeurs dont ils sont porteurs » et les « agis » (en référence à Sfez, 1992) qui subissent la décision, laquelle doit, dans la mesure du possible, tenir compte de leurs préférences (Roy et Bouyssou, 1993).

L'aide à la décision est prise en charge par l'homme d'étude, ou l'analyste, dont l'activité se situe à l'interface réflexion-action (Roy, 1985). Il correspond à la personne qui tente d'organiser le processus d'aide à la décision. Interlocuteur privilégié des différents acteurs, il conçoit la méthodologie et ses différentes étapes, et instaure un langage commun au sein du processus de décision. De plus, l'homme d'étude peut recourir, du fait de sa connaissance parfois incomplète, aux jugements d'experts, hommes dont les activités se situent à l'interface connaissance-décision (Roqueplo, 1997).

La définition de B. Roy recouvre deux aspects essentiels : d'une part, la modélisation des préférences du décideur, et, d'autre part, l'analyse des solutions, et l'évaluation de leurs conséquences. La modélisation des préférences du décideur est un point crucial, puisque certains reprochent l'inexistence de méthodes exactes, capables de dépasser la subjectivité des décideurs, de l'information disponible ou même de la nature du problème décisionnel (Voogd, 1983 ; Can, 1993).

Il est à noter que l'expression « aide à la décision » est elle-même sujette à caution (Laaribi, 2000). Aux Etats-Unis, « prise de décision » (*decision making*) lui est préférée. D'un côté, on met en lumière des éléments de manière à soutenir le problème décisionnel, de l'autre, on indique comment prendre la bonne décision.

L'objectif de l'aide à la décision est d'établir une prescription, une recommandation (Roy et Bouyssou, 1993). Elle joue donc un rôle considérable puisqu'elle constitue tout ou partie de l'information portée au décideur, sur laquelle il légitime son choix. Précisons toutefois que le décideur demeure seul responsable des décisions qu'il prend (Darbelet *et al.*, 1995). Il est en outre nullement obligé de respecter les choix qui lui sont proposés, en particulier lorsque son intuition lui dicte des tactiques que l'aide à la décision ne saurait mettre en évidence. De plus, l'aide à la décision « ne se limite pas au contenu de la recommandation finale » (Roy et Bouyssou, 1993), les auteurs rejoignent H.A. Simon et L. Sfez en considérant « un arbitraire certain » inhérent à la pratique de l'aide à la décision. Néanmoins, ils demeurent dans l'idée que l'usage de concepts et procédures appropriées, précises et rigoureuses, ouvre la voie à une science de l'aide à la décision (Roy et Bouyssou, 1993).

Dans le domaine de l'aide à la décision, deux approches se distinguent :

- **Monocritère** : les modèles de problème monocritère sont du type $\{g(x)|x \in A\}$ où A est l'ensemble des actions admissibles et $g(x)$ est la fonction critère à optimiser. Cette approche traduit généralement un problème bien structuré et mathématiquement bien défini, auquel on fournit la solution optimale.
- **Multicritère** : lorsque les actions potentielles d'un problème de décision ne sont pas évaluées par un critère unique, mais par plusieurs critères que l'on désigne par $g_1(x), g_2(x), \dots, g_n(x)$, le modèle de problème multicritère est de type $\text{opt}\{g_1(x), g_2(x), \dots, g_n(x)|x \in A\}$. Cette approche est généralement introduite face à un problème complexe, peu structuré, qui nécessite un compromis du fait qu'en dehors des cas triviaux, il n'existe pas dans l'ensemble A une action optimisant simultanément tous les critères (Brans, 1986).

Avant l'apparition des méthodes multicritères, les problèmes de décision se ramenaient le plus souvent à l'optimisation d'une fonction économique, constituant l'unique critère de sélection. L'approche monocritère avait le mérite de déboucher sur des problèmes mathématiques bien posés mais qui n'étaient pas toujours représentatifs de la réalité : la comparaison de plusieurs actions possibles se fait rarement suivant un seul critère. Le domaine de réussite de l'approche monocritère est constitué de tous les problèmes qu'il est possible d'isoler du processus de gestion (par exemple, recherche du matériau présentant une résistance au feu optimale). Par complément, son domaine d'échec comprend toutes les décisions de gestion qu'on ne peut isoler de leur contexte (par exemple, l'étude d'impact sur l'environnement).

Les critiques adressées aux méthodes monocritères révèlent que les hypothèses implicites au postulat de l'optimum ne sont pas toujours vérifiées (Schärlig, 1985). J.L. Le Moigne critique l'aspect contraignant d'une telle approche qui, d'après lui, restreint « *le champ des solutions admissibles et satisfaisantes au regard des multiples critères susceptibles d'être considérés, solutions qui, en général, ne sont pas données à l'avance, mais doivent précisément être inventées ou construites par le concepteur* » (Le Moigne, 1986).

Sur ces critiques, l'aide multicritère à la décision s'est construite, non pas pour évincer la première, mais plutôt la densifier : « *il ne me paraît nullement destiné à remplacer le paradigme monocritère : il est différent et il a sa place à côté, en complément... Ce nouveau paradigme repose sur une autre façon de regarder et/ou construire le réel* » (Roy, 1987).

3.4. L'aide multicritère à la décision

Dans un processus d'aide à la décision, lors de la construction du modèle d'évaluation, il est rare d'aboutir uniquement à un seul critère correspondant à un point de vue unique sur lequel le décideur exprimera ses préférences. La multiplicité des points de vue dans un contexte d'évaluation multidimensionnel exige que l'on révise la formalisation des modèles de décision.

L'aide multicritère à la décision apporte alors certains éléments intéressants (Martel, 1988, dans Laaribi, 2000) :

- Possibilité de prendre en considération des critères qualitatifs et quantitatifs ;
- Elle permet de traiter des critères hétérogènes et conflictuels ;
- Elle distingue l'importance, parfois inégale, de ceux-ci dans la résolution du problème.

P. Vincke définit l'aide multicritère ainsi : « *l'aide multicritère à la décision vise, comme son nom l'indique, à fournir à un décideur des outils lui permettant de progresser dans la résolution d'un problème de décision où plusieurs points de vue, souvent contradictoires, doivent être pris en compte* » (Vincke, 1989). Cette démarche est justifiée par les analyses suivantes (Bouyssou et Roy, 1993) :

- Bâtir différents critères autour de plusieurs axes de signification, communs aux différents acteurs, favorise la réduction des jugements dépendant d'un système de valeurs particulier ;
- Ces méthodes respectent mieux le processus réel de construction d'une décision dans leur principe et dans leur mise en œuvre.
- L'analyse multicritère permet de choisir, ranger, classer, trier des alternatives ou des actions en vue d'une décision sur la base d'éléments d'appréciation multiples, antinomiques ;

Dans un premier temps, nous proposons de développer les concepts centraux de l'aide multicritère à la décision. Nous développerons par la suite le processus et les méthodes qui la concernent.

3.4.1. Définition des concepts liés à l'aide multicritère à la décision

a. Objectifs et points de vue

Dans un processus de décision, le décideur se voit confronté à un problème. De ce problème découle un objectif à atteindre. L'objectif se définit alors comme la direction traduisant une perspective de changement d'état pour obtenir le système souhaité par le décideur.

Se posent alors diverses questions (Roy et Bouyssou, 1993) :

- Sous quelle forme convient-il de modéliser la décision ?
- Où placer la frontière entre ce qui est possible et ce qui ne l'est pas ?
- Comment différencier les diverses possibilités d'action ?
- Quelle forme doit prendre l'éventuelle recommandation ?

Lors de la définition de l'objectif, on procède également à l'identification des différents points de vue, permettant de le concrétiser et de répondre aux questions précitées. Un point de vue « *représente tout aspect de la réalité décisionnelle que l'homme d'étude perçoit comme important pour la construction d'un modèle d'évaluation d'actions existantes ou à créer. Un tel aspect, qui découle du système de valeurs et/ou de la stratégie d'intervention d'un acteur dans le processus de décision, regroupe des éléments primaires qui interfèrent ensemble dans la formation des préférences de cet acteur* » (Bana e Costa, 1992 ; dans Laaribi, 2000). De ces différents points de vue découle la construction des critères.

b. Actions

« *Une action est la représentation d'une éventuelle contribution à la décision globale susceptible, eu égard à l'état d'avancement du processus de décision, d'être envisagée de façon autonome et de servir de point d'application à l'aide à la décision* » (Roy et Bouyssou, 1993).

Terme générique, *action* désigne l'objet sur lequel porte la décision (un territoire, une habitation...). Les recommandations relèvent des différentes actions, également appelées alternatives ou solutions. Les caractéristiques des actions apparaissent comme autant de contributions éventuelles à une décision globale (Roy et Bouyssou, 1993). Les auteurs distinguent les « *actions réelles* » des « *actions réalistes* » :

- Les premières proviennent d'un projet formalisé attendant exécution, opposées aux « *actions fictives* », qui se rattachent à un projet idéalisé, produit de l'imagination.
- Les secondes s'inscrivent dans un projet raisonnable et s'opposent aux « *actions irréalistes* » issues d'objectifs incompatibles.

Les actions potentielles (réelles ou fictives) sont jugées réalistes par au moins un des acteurs. En aide à la décision l'ensemble des actions potentielles, noté A, se construit généralement sous forme d'une liste : $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$. Cet ensemble se voit attribuer plusieurs propriétés (Roy et Bouyssou, 1993) :

- **Stable** : l'ensemble A n'accepte pas de révisions ;
- **Évolutif** : l'ensemble A accepte les révisions ;

- **Imposé** : l'ensemble A ne peut pas être remis en cause ;
- **Révisable** : il n'est pas imposé ;
- **Permanent** : il est durable ;
- **Transitoire** : il n'est pas permanent.

c. Préférences

Une des étapes cruciales dans la pratique de l'aide à la décision repose sur l'élicitation des préférences d'un ou plusieurs acteurs. L'acteur compare deux actions selon quatre situations fondamentales (Azibi, 2003) :

- (1) une situation d'indifférence : les deux actions sont équivalentes face à l'objectif de la décision ;
- (2) une situation de préférence stricte : une des deux possibilités est strictement préférée à l'autre ;
- (3) une situation de préférence faible : une des possibilités est faiblement préférée à l'autre ;
- (4) une situation d'incomparabilité : les actions ne sont pas comparables.

Les préférences s'établissent sous la forme d'une relation binaire H , sur un ensemble A . Une relation binaire H dans un ensemble A est un sous-ensemble du produit cartésien $A \times A$, c'est-à-dire un ensemble de couples (a, b) d'éléments de A . Si le couple (a, b) appartient à l'ensemble H , nous noterons $a H b$ au lieu de $(a, b) \in H$. Cette relation peut posséder différentes propriétés (Roy et Bouyssou, 1993) :

- Réflexivité : $\forall a \in A, a H a$;
- Symétrie : $\forall a, b \in A, a H b \Rightarrow b H a$;
- Transitivité : $\forall a, b, c \in A, [a H b \text{ et } b H c] \Rightarrow a H c$;
- Semi-transitivité : $\forall a, b, c, d \in A, [a H b \text{ et } b H c] \Rightarrow [a H d \text{ ou } d H c]$;

Il existe des liens entre ces propriétés (par exemple, une relation irréflexive et quasi-transitive est obligatoirement transitive). Une relation d'indifférence respecte à la fois la réflexivité et la symétrie. L'incomparabilité implique l'irréflexivité et la symétrie. Enfin, une relation de préférence stricte implique l'irréflexivité et l'asymétrie. À chaque occurrence d'une relation de préférence est attachée une valeur sémantique.

Les préférences s'apparentent à des jugements de valeur. La notion de valeur demande alors de définir l'échelle dans laquelle elle s'inscrit et sa signifiante. La notion de signifiante est issue de la « *théorie du mesurage* » (Suppes, 1959). Une proposition est dite signifiante, si sa véracité est invariante au changement d'échelle, tant que cette dernière représente la même information. Par exemple, une méthode de rangement est signifiante si le rangement des actions induit par un calcul sous-jacent ne dépend pas des transformations admissibles d'échelles. Cette notion est importante lorsqu'on est amené à effectuer des traitements (comme l'agrégation des critères) sur un ensemble de données. La pertinence de ces traitements repose en grande partie sur l'identification de la nature de ces données. Dans la pratique de l'aide à la décision, cela consiste à identifier la nature des échelles de chaque critère avant de choisir une procédure d'agrégation.

Une échelle de valeur peut être définie comme étant le couple formé par un ensemble de nombre, et sa représentation numérique. Une échelle de valeur se définit selon trois caractéristiques (Stevens, 1951) : l'ordination des valeurs (ordre), la différence entre les

couples de valeurs (distance) et le rôle attribué au zéro vis-à-vis des valeurs constituant la série (origine). Selon ces caractéristiques, quatre types d'échelles sont définis :

- **Échelle nominale** (ou qualitative) : elle implique un simple groupement des observations en catégories qualitatives identifiées par un symbole. La seule opération mathématique possible avec cette échelle est de compter le nombre d'éléments (les effectifs) dans chacune des catégories. Ce type d'échelle ne donne sens à aucune des trois caractéristiques.
- **Échelle ordinale** : elle est similaire à l'échelle nominale exceptée qu'elle permet d'établir une relation d'ordre entre les éléments d'un ensemble, sans toutefois être capable d'évaluer de façon quantitative la distance qui les sépare (notes scolaires). Une échelle ordinale représente des rangs.
- **Échelle d'intervalle** : échelle ordinale à laquelle on donne sens à la caractéristique de distance (échelle métrique), mais la position du zéro est purement conventionnelle (échelle de température).
- **Échelle de ratio** : elle implique une distance égale entre deux unités, tout au long de l'échelle (tout comme dans l'échelle d'intervalle) mais aussi que le zéro existe (autrement que par un choix arbitraire). En plus de permettre de quantifier la différence entre deux éléments, elle permet aussi de calculer des rapports entre deux mesures.

Les quatre types d'échelle ont été présentés dans un ordre ascendant de précision. Il est toujours possible de passer d'une échelle d'un niveau donné à une échelle moins précise. L'inverse n'est cependant pas possible.

d. Critère

« Aider à décider, c'est en tout premier lieu, aider à clarifier la formation, la transformation et l'argumentation des préférences » (Roy et Bouyssou, 1993). Le concept de critère est donc dévolu à cette tâche. Un critère est un outil permettant d'évaluer et de comparer des actions selon un objectif bien défini. À chaque critère est associée une donnée descriptive unique.

Formellement, un critère g est une fonction à valeurs réelles définie sur l'ensemble A des actions potentielles de telle sorte qu'il soit possible de raisonner ou de décrire le résultat de la comparaison de deux actions a et b à partir des deux nombres $g(a)$ et $g(b)$. Au critère g est associée une échelle E_g , ensemble ordonné des valeurs *a priori* possibles qu'il peut prendre.

Lorsque le problème repose sur la considération de plusieurs critères, la représentation des points de vue s'effectue au moyen d'une famille $F = \{g_1, \dots, g_j, \dots, g_n\}$ de critères. La famille F des critères doit si possible représenter toutes les facettes du problème tout en évitant les redondances.

e. Problématiques

La problématique est la façon dont le problème de décision est posé. Elle conditionne l'orientation de la démarche à adopter pour répondre au problème décisionnel, et traduit le type de résultats attendus. Quatre problématiques de référence ont été définies, tout problème de décision se ramenant à l'une d'entre elles (Roy, 1985) (Tab. 8).

Problématique	Objectifs	Résultats
Alpha (choix)	Éclairer la décision par le choix d'un sous-ensemble aussi restreint que possible, en vue du choix final d'une seule action	Choix ou procédure de sélection
Bêta (tri)	Éclairer la décision par un tri résultant d'une affectation de chaque action à une catégorie	Tri ou procédures d'affectation
Gamma (rangement)	Éclairer la décision par un rangement, obtenu en regroupant tout ou partie des actions, en classes d'équivalence	Rangement ou procédures de classement
Delta (description)	Éclairer la décision par une description, dans un langage approprié, des actions et de leurs conséquences	Description ou procédure cognitive

Tab. 8 : Les problématiques de références en aide multicritère à la décision (Roy, 1985)

Ce découpage des problématiques ne s'applique pas aux méthodes d'agrégation totale, inspirées des méthodes d'optimisation monocritère, qui établissent un classement pouvant être interprété en termes de choix, de tri ou de classement (Tacnet, 2009). Nous détaillerons les différentes méthodes dans la section 3.5.2.

3.4.2. Les approches d'aide à la décision

Les problèmes pratiques rencontrés ont d'abord conduit à élaborer des méthodes fondées sur le bon sens, plus ou moins intuitives (Bernard et Besson, 1971). Puis, la question de la justification du choix d'une méthode s'est posée, ce qui a impulsé l'approche axiomatique en décision multicritère. L'aide multicritère à la décision est une activité fondée sur « *des concepts rigoureux, des modèles bien formalisés, des procédures de calcul précises, des résultats d'ordre axiomatiques* » (Roy et Bouyssou, 1993). Nous allons maintenant expliciter les différents types d'approches de l'aide à la décision. La classification donnée ici est issue des travaux de (Roy, 1985) et (Bell *et al.* 1988).

a. Approche descriptive

La démarche descriptive suppose qu'il existe une vérité cachée dont il s'agit de faire prendre conscience au décideur. Outre l'existence de cette vérité, il faut aussi supposer qu'elle ne change pas au cours du temps et des observations.

De ce fait, les modèles sont généralement fondés sur des données, des comportements existants ou observations (Humpreys *et al.*, 1983 ; Poulton, 1994). Ils servent donc à décrire des phénomènes déjà réalisés pouvant se reproduire dans les mêmes conditions. Le décideur n'est pas directement sollicité pour la mise en œuvre de ces modèles. La validité des résultats fournis par ces modèles repose sur une approche *a posteriori*, les comparant aux observations et conséquences des phénomènes de même nature.

b. Approche normative

L'approche normative consiste à faire exprimer par le décideur, sous forme d'axiomes, les règles qui modélisent le comportement qu'il souhaiterait avoir, en tant que décideur rationnel. Cette approche permet de choisir la méthode multicritère à utiliser ou éventuellement de construire une nouvelle méthode directement à partir d'une batterie d'axiomes désirés (Pasquier-Dorthe et Raynaud, 1990). Devant la diversité des méthodes proposées, Bouyssou *et al.* (1993) constatent que cette analyse axiomatique des procédures est nécessaire pour rendre crédible l'approche multicritère.

Cette démarche est fertile en paradoxes (Durand, 2000). Les modèles construits dans une approche normative sont fondés sur une rationalité de type économique (Luce et Raiffa, 1957 ; Fishburn, 1970). La validité des résultats repose sur leur cohérence avec les axiomes de la rationalité économique. Par exemple, on cherche un modèle permettant d'ordonner des investissements selon leur rentabilité économique. Si un investissement a est plus rentable qu'un investissement b et l'investissement b plus rentable qu'un investissement c , alors l'investissement a doit être plus rentable que l'investissement c (axiome de transitivité).

c. Approche prescriptive

Dans (Bell *et al.*, 1988), les auteurs distinguent des deux démarches précédentes une démarche « *prescriptive* » dont le but est avant tout d'aider le décideur à améliorer ses décisions. L'intérêt est porté sur l'amélioration de la décision par la méthode plus que sur la méthode elle-même. Celle-ci est alors jugée bonne si elle permet au décideur d'améliorer ses décisions, sans considération sur ses propriétés ou sur la réalité de la situation (Keeney et Raiffa, 1992).

L'homme d'étude s'attache à collecter et structurer des informations afin de construire un modèle. L'intervention du décideur n'est donc pas nécessaire pour la construction du modèle, néanmoins, elle l'est pour sa validation.

d. Approche constructive

Parmi les variantes de la démarche normative, citons la démarche constructive (Pirlot, 1994). La principale nuance, par rapport à l'approche purement normative, est la recherche de résultats opérationnels. Les axiomes étudiés ne décrivent plus seulement des règles d'un comportement rationnel, mais aussi la façon dont la procédure fonctionne. La particularité de cette approche repose sur la place du décideur, celui-ci est sollicité, à la fois lors de la construction du modèle, mais aussi lors de sa validation (Bouyssou *et al.*, 2000). Les modèles sont donc fondés sur les connaissances des décideurs. L'homme d'étude cherche à les expliciter ou à les formaliser. La validation de ces modèles s'effectue, à l'image de l'approche prescriptive, par le décideur.

3.5. Procédure et méthodes d'aide multicritère à la décision

Face à un problème multicritère, toute décision doit s'effectuer en connaissance de cause. Le décideur a besoin de cerner au mieux les contributions des différents critères qui structurent le problème. Ceci conduit généralement à une phase d'agrégation des différentes contributions. Différentes méthodes sont proposées, dans la littérature, afin d'aborder l'agrégation. Avant de les présenter, nous proposons d'explicitier la procédure d'aide à la décision, sur laquelle sont fondées les différentes méthodes.

3.5.1. *Procédure d'aide à la décision*

À partir des quatre problématiques définies (§3.4.1.e.), la formulation multicritère d'un problème de décision peut se définir selon la structure $\{A, A/F, E\}$ (Vansnick, 1990) avec :

- **A**, l'ensemble des actions (ou alternatives) potentielles (envisageables ou admissibles) pouvant être défini par extension (ensemble fini) avec des contraintes implicites ou par compréhension sur la base de contraintes explicites (cas d'un ensemble infini ou fini de trop grande taille). La contrainte correspond à un facteur permettant de circonscrire et de limiter les actions prises en considération. Par exemple, **A** peut être

un ensemble d'interfaces habitat-forêt, soumises à l'aléa incendie de forêt, désignées de façon exhaustive et dénombrable (cas d'une définition par extension). **A** peut aussi être défini comme les interfaces habitat-forêt de la région méditerranéenne française (définition par compréhension sur la base d'une propriété, les interfaces sont dans une région donnée mais on ne les définit pas toutes) ;

- **A/F**, l'ensemble fini des critères généralement conflictuels à partir desquels les actions sont évaluées. Un critère peut être la distance d'une habitation résidentielle à la végétation, les caractéristiques topographiques de l'interface... ;
- **E**, l'ensemble des évaluations des performances des actions selon chacun des critères. Les performances sont alors représentées pour chaque action par un vecteur de performances. Par exemple, pour une interface donnée, le vecteur de performances correspond à une distance habitation-végétation de 3 m, une pente de 5 %, une exposition Sud...

En respect de ces principes, le processus d'aide multicritère à la décision s'articule selon quatre niveaux (Roy et Bouyssou, 1993) :

- **Niveau I** : Définition de l'objet de la décision

Étape de représentation et de formulation de la problématique, qui fait intervenir les différents acteurs du processus de décision : décideurs, experts, hommes d'étude (Azibi, 2003). Lors de cette étape, l'homme d'étude commence par identifier avec les différents acteurs la portée de la décision (l'ensemble des actions possibles).

- **Niveau II** : Élaboration et choix des critères

Étape de construction du modèle sur lequel va se fonder l'évaluation. L'élaboration et le choix des critères, par l'homme d'étude, peut s'effectuer par une approche hiérarchique, de l'objectif global vers les sous-objectifs (Keeney et Raiffa, 1976 ; Saaty, 1980), ou par une approche du bas vers le haut, se fondant sur l'analyse des conséquences des actions (Roy, 1985).

L'homme d'étude construit les dimensions, permettant de caractériser l'ensemble des actions, et les critères, permettant d'évaluer cet ensemble. Les dimensions représentent l'information disponible sur l'ensemble des actions. La collecte de l'information s'effectue avec ou sans le décideur. Les dimensions sont généralement codées sur des échelles, qui garantissent une représentation formelle de **A**. Les critères correspondent à une agrégation de dimensions traduisant un même point de vue et autorisant l'évaluation des actions sur ce point de vue.

- **Niveau III** : La modélisation des préférences, évaluation des performances et agrégation

Les conséquences d'une action permettent la comparaison entre deux actions. Ainsi, les critères préalablement regroupés sont définis en une famille de critères qui synthétise toute l'information contenue dans le modèle d'évaluation (Roy, 1985). Une famille de critères est dite cohérente si elle répond aux trois exigences déterminées par B. Roy (1985) :

- (1) exigence d'exhaustivité ;
- (2) exigence de cohésion ;
- (3) exigence de non redondance.

Chaque critère d'une famille cohérente est représenté par une performance (contribution). Les performances peuvent être additionnées purement et simplement lorsque

les échelles font intervenir des unités homogènes. Le cas contraire force la normalisation (le passage à des pourcentages (indice de 0 à 100) ou passage à des rangs (pour chaque critère, les actions sont rangées par ordre croissant et un score correspondant à leur rang leur est affecté). Affecter un poids à chaque critère permet de se substituer à la simple addition. Ainsi, la pondération évite de traiter tous les critères comme s'ils avaient la même importance et constitue une amélioration du modèle (Roy, 1985).

Un décideur ayant à comparer deux actions a_1 et a_2 de l'ensemble A pourra avoir l'une des trois réactions suivantes (Vincke, 1989) :

- Préférence pour l'une des deux actions, notée P de a_1 sur a_2 soit $a_1 P a_2$;
- Indifférence entre les deux actions, notée I entre a_1 et a_2 soit $a_1 I a_2$;
- Refus (Incomparabilité) entre les deux actions, notée R entre a_1 et a_2 soit $a_1 R a_2$.

Les trois relations $\{P, I, R\}$ définissent une structure de préférences. Elles remplissent les propriétés suivantes : $\forall a_1, a_2 \in A$:

- $a_1 P a_2 \Rightarrow a_2 \bar{P} a_1$: la préférence P est antisymétrique ;
- $a_1 I a_1$: l'indifférence I est réflexive ;
- $a_1 I a_2 \Rightarrow a_2 I a_1$: l'indifférence I est symétrique ;
- $a_1 \bar{R} a_1$: l'incomparabilité R est irréflexive
- $a_1 R a_2 \Rightarrow a_2 R a_1$: l'incomparabilité R est symétrique.

Toute structure de préférence peut être définie par une relation S dite de préférence au sens large définie par :

$$a_1 S a_2 \Leftrightarrow a_1 P a_2 \text{ ou } a_1 I a_2 \quad (S = P \cup I)$$

On a en effet :

- $a_1 P a_2 \Leftrightarrow a_1 S a_2 \text{ et } a_2 \bar{S} a_1$;
- $a_1 I a_2 \Leftrightarrow a_1 S a_2 \text{ et } a_2 S a_1$;
- $a_1 R a_2 \Leftrightarrow a_1 \bar{S} a_2 \text{ et } a_2 \bar{S} a_1$

Traditionnellement, l'approche consiste à ramener un problème de décision à l'optimisation d'une fonction g définie sur l'ensemble A des actions ou alternatives. Cette approche suppose que les préférences du décideur suivent le « modèle traditionnel » suivant :

$$\forall a_i, a_j \in A \begin{cases} a_i P a_j \Leftrightarrow g(a_i) > g(a_j) \\ a_i R a_j \Leftrightarrow g(a_i) = g(a_j) \end{cases}$$

Cette structure satisfait les propriétés suivantes $\forall a_i, a_j, a_k \in A$:

- $a_i \bar{R} a_j$: il n'y a pas d'incomparabilité ;
- $a_i P a_j \text{ et } a_j P a_k \Leftrightarrow a_i P a_k$: P est transitive ;
- $a_i I a_j \text{ et } a_j I a_k \Leftrightarrow a_i I a_k$: I est transitive ;

La relation caractéristique S associée au modèle traditionnel est telle que :

$$\forall a_i, a_j, a_k \in A \begin{cases} a_i S a_j \text{ ou } a_j S a_i : S \text{ est une relation complète} \\ a_i S a_j \text{ et } a_j S a_k \Leftrightarrow a_i S a_k : S \text{ est transitive} \end{cases}$$

Cette relation s'appelle un préordre total (ou complet) et correspond à la situation où l'on peut ranger les éléments de A du meilleur au moins bon avec la possibilité d'ex aequo car $a_i S a_j \Leftrightarrow g(a_i) \geq g(a_j)$. S'il n'y a pas d'ex aequo, S est un ordre total. Une structure de préférences est une structure de préordre total si elle peut être représentée par le « modèle traditionnel ». C'est une structure d'ordre total si la relation d'indifférence I se limite aux couples identiques.

La non-transitivité de l'indifférence est une remarque fondamentale dans la modélisation des préférences qui a motivé le développement de nouvelles structures de préférences. L'exemple introduit par D. Luce (1956, cité dans Vincke, 1989) illustre le principe : si l'on considère une tasse de thé T_i contenant i milligrammes de sucres. Un individu compare cette dernière avec une tasse T_{i+1} à laquelle on a enlevé 1 milligramme de sucre. Il est normal qu'il ne perçoive aucune différence entre les deux tasses : il y a indifférence. Cependant, il préfère une tasse bien sucrée à une tasse sans sucre, ce qui contredit la transitivité de la relation d'indifférence. Afin de la prendre en compte, on introduit un seuil d'indifférence q positif dans le modèle traditionnel et des variantes sur les seuils de préférences (Vincke, 1989). Cette approche conduit à définir un « modèle à seuil » :

$$\forall a_i, a_j \in A \begin{cases} a_i P a_j \Leftrightarrow g(a_i) > g(a_j) + q \\ a_i I a_j \Leftrightarrow |g(a_i) - g(a_j)| \leq q \end{cases}$$

La relation S associée au modèle à seuil est telle que :

$$\forall a_i, a_j, a_k, a_p \in A \begin{cases} a_i S a_j \text{ ou } a_j S a_i : S \text{ est une relation complète} \\ a_i S a_j \text{ et } a_k S a_p \Leftrightarrow a_i S a_p \text{ ou } a_k S a_j : S \text{ est de Ferrers} \\ a_i S a_j \text{ et } a_j S a_k \Leftrightarrow a_i S a_p \text{ ou } a_p S a_k : S \text{ est semi-transitive} \end{cases}$$

Une structure de préférence est une structure de quasi-ordre si elle est représentable par le « modèle à seuil ». Ces approches sont mises en œuvre dans le cadre des méthodes de sur-classement.

L'agrégation des préférences peut être définie comme « une opération permettant d'obtenir des informations sur la préférence globale entre les actions potentielles, à partir d'informations sur les préférences par critères » (Maystre et al., 1994). Soit un ensemble A d'actions (ou alternatives) évalué sur m critères c_1, c_2, \dots, c_m , elle peut se définir de la manière suivante : soit $n \geq 2$ relations binaires de préférences définies sur A évaluant les actions et notées \succsim_i avec $i \in \{1, 2, \dots, n\}$. L'agrégation des n relations de préférences est un mécanisme permettant de transformer tout n -uple de relations $(\succsim_1, \succsim_2, \dots, \succsim_n)$ sur A en une relation de préférences collectives \succsim . À partir des préférences définies pour chaque critère (les actions sont comparables selon chaque critère), on obtient une préférence qui « combine » toutes ces préférences et permet une comparaison globale des actions entre elles.

Les plus simples des méthodes d'agrégation totale des préférences sont la somme pondérée et la multiplication de ratios. La somme pondérée suppose que l'on puisse exprimer les critères dans les mêmes unités et que les écarts de valeurs sur des critères différents sont comparables et peuvent se compenser. Les poids, aux variations desquelles le résultat est extrêmement sensible, intègrent à la fois la notion d'importance relative des critères et un facteur de normalisation des échelles de critère (Vanderpooten et Vallin, 2002). Dans une somme pondérée, ce sont des taux de substitution qui visent à assurer un taux de conversion correct entre les critères (Roy, 1985). Ils doivent être interprétés comme exprimant sur une même échelle, les écarts de préférence relatifs à des critères différents ou comme un « gain sur un critère permettant de compenser une perte sur un autre » (Vincke, 1989). D'autres

méthodes sont basées sur des formes d'agrégation additive, multiplicative, lexicographique ou encore mixte (Roy et Bouyssou, 1993).

- **Niveau IV** : Analyse des résultats et élaboration des recommandations

Elle représente le retour à la réalité du processus d'aide à la décision. La recommandation finale doit traduire le résultat fourni par le modèle d'évaluation dans le langage courant du client et du processus de décision dans lequel il est impliqué. Lorsque les éléments de réponse fournis par les niveaux précédents sont suffisants, l'homme d'étude peut s'affranchir de cette dernière étape, la prescription en découlant de manière évidente. L'homme d'étude doit être sûr que le modèle est formellement correct. Le modèle doit représenter l'acteur, être compris pour que l'acteur puisse s'approprier ses conclusions. La recommandation doit être légitime du point de vue du processus de décision pour lequel l'aide à la décision a été demandée.

Le processus d'aide à la décision est une activité qui introduit une certaine distance entre les participants d'une part, la réalité du processus de décision et de ses dimensions organisationnelles d'autre part. Le retour à la réalité demande une vérification de la légitimité des résultats. La mise en œuvre de la recommandation finale dépend de cette légitimité.

Selon B. Roy et D. Bouyssou (1993), ces quatre niveaux ne se succèdent pas nécessairement, ils peuvent se nourrir les uns les autres. La procédure est donc considérée non linéaire.

L'aide à la décision associe les acteurs du processus de décision qui doivent participer activement à l'élaboration du modèle, considéré comme un support à la réflexion, la négociation et la créativité (Martel, 1999 ; Roy, 1985). L'évaluation des performances des critères provient de formules, de mesures ou de jugements.

3.5.2. Les méthodes multicritères d'aide à la décision

Les méthodes d'analyse multicritère ne cessent de se développer. Dans cette section, nous souhaitons présenter une typologie des méthodes existantes, sans prétendre à l'exhaustivité. Un état de l'art détaillé peut être trouvé dans les références suivantes (Schärlig, 1985 ; Vincke, 1989 ; Roy et Bouyssou, 1993 ; Figueira *et al.*, 2005).

Les trois premières étapes du processus d'aide multicritère à la décision sont communes à toutes les méthodes, exceptée la méthode AHP (*Analytic Hierarchy Process*) élaborée par T.L. Saaty (1972, 1977), à laquelle nous réservons une présentation au §3.5.3. La dernière étape est, quant à elle, propre à chaque méthode (Tab. 9). Elles sont définies en fonction du type d'agrégation proposé (Vincke, 1989) :

- La théorie de l'utilité multi-attribut (MAUT) et ses dérivés (AHP), basées sur des agrégations complètes ;
- Les méthodes de sur-classement de synthèse, basées sur des agrégations partielles ;
- Les méthodes itératives, basées sur des agrégations locales.

Le choix d'une méthode représente un véritable problème de décision. Il peut s'effectuer en fonction du nombre d'intervenants, de la compréhension du principe de la méthode par les intervenants (par exemple comparaison par paires), de la problématique de décision (choix, tri, rangement, description), du niveau de compensation accepté par le décideur (Guitouni et Martel, 1998).

Approches	Principe	Exemples
Agrégation complète (École Américaine)	Agrégation complète des critères : on cherche à les réduire en un critère unique de synthèse, en supposant que les jugements sont transitifs. Le résultat correspond à une synthèse totale des jugements des experts. Ces méthodes sont basées sur la théorie de l'utilité.	Procédure d'Analyse Hiérarchique (AHP) (Saaty, 1980), Théorie de l'Utilité Multi-Attributs (MAUT) (Keeney et Raiffa, 1976)
Agrégation partielle (Écoles Française)	Elle respecte à la fois l'incomparabilité et l'intransitivité. Il s'agit d'obtenir un résultat établissant des relations de surclassement sur toutes les actions. Les jugements sont agrégés partiellement, le résultat n'est pas complètement représentatif des jugements de départ.	Méthode ELECTRE (Roy, 1968, PROMETHEE (Brans <i>et al.</i> , 1984)
Agrégation locale et itérative	Elle s'attache à trouver un compromis acceptable dans le cadre d'un va-et-vient entre l'homme d'étude et le décideur. Elle procède à une exploration locale et renonce à toute vision globale. Elle concerne des problèmes impliquant un nombre très important d'actions, contrairement aux deux premières approches qui supposent d'être en présence d'un ensemble d'actions de dimension raisonnable.	UTA interactive (Siskos, 1980), PREFCALC (Jacquet-Lagrèze, 1983)

Tab. 9 : Synthèse des méthodes multicritères d'aide à la décision en fonction des approches retenues. D'après (Schärlig, 1985 ; Roy, 1985 ; Vincke, 1989)

a. Méthode d'agrégation complète - La théorie de l'utilité multi-attribut

La théorie MAUT (*Multiple Attribute Utility Theory*) (Keeney et Raiffa, 1976) concerne les problèmes décisionnels représentés par un nombre fini d'actions potentielles. À ce titre, elle fait partie des méthodes dites discrètes. Son objectif principal est de fournir une base pour la comparaison de ces actions potentielles à partir de plusieurs critères. Elle repose sur un principe d'agrégation complète transitive.

Axiome : tout décideur devant évaluer un ensemble A d'actions selon n dimensions (critères), essaie, consciemment ou non, de maximiser une fonction $U = U(c_1, c_2, \dots, c_i, \dots, c_n)$ ou c_i représente la relation (fonction) de préférence du décideur pour la $i^{\text{ème}}$ dimension (Vincke, 1989).

Il s'agit donc « d'extraire du cerveau » du décideur cette fonction d'utilité, ou sa manière d'exprimer les choses (Schärlig, 1985), ce qui implique un caractère subjectif.

Principe : le modèle MAUT consiste à mesurer l'utilité globale d'une action pour le décideur à partir des utilités partielles correspondant à chacun des critères de la décision. C'est la fonction d'agrégation qui assure le passage des utilités partielles à l'utilité globale. Celle-ci peut prendre différentes formes : additive, multiplicative ou mixte. Les fonctions d'utilités partielles servent à transformer les critères de manière à ce qu'ils s'expriment tous suivant la même échelle de mesure. Ainsi, les problèmes d'unité sont alors évités, et la somme, exprimée sous forme adimensionnelle, demeure une opération qui a du sens à cet égard.

Ce modèle additif ne reconnaît pas la préférence faible et l'incomparabilité (indifférence préférentielle), il impose que les structures de préférences sur chaque critère et sur la préférence globale soient des préordres complets : il considère la préférence stricte et l'indifférence comme transitives.

L'avantage de l'approche MAUT est qu'elle repose sur une base axiomatique solide. Cependant, elle est source de plusieurs critiques (Schärlig, 1985). Tout d'abord, elle suppose que les décideurs possèdent à la fois une vision claire et préexistante du problème de décision. Les jugements récoltés sur la base des différents critères sont alors supposés

commensurables. Les fonctions d'utilités partielles, représentant des taux de substitution pour tous les critères, sont fortement influencées par la subjectivité des décideurs et parfois même par leur vision non rationnelle du problème. Enfin, contrairement aux méthodes basées sur le sur-classement, l'approche MAUT se fonde sur une méthode d'agrégation complète et de ce fait emprunte la voie monocritère, elle est fortement compensatoire.

Cette méthode a été appliquée pour des problèmes sur le territoire américain, notamment sur l'étude de l'agrandissement de l'aéroport de Mexico (Keeney et Raiffa, 1976). Certaines recherches tentent de l'appliquer au domaine des risques en intégrant une perspective bayésienne (Magne et Vasseur, 2006).

b. Méthodes d'agrégation partielle, dites de surclassement

Les méthodes de surclassement ont été élaborées afin d'enrichir la manière de progresser dans la résolution d'un problème décisionnel (Vincke, 1989). Le principe de ces méthodes consiste à comparer, à agréger les critères au moyen d'une relation binaire partielle, relation de surclassement, puis d'exploiter cette relation afin de fournir un résultat répondant à l'une des trois premières problématiques (choix, tri, rangement).

Définitions :

« Une action en surclasse une autre si elle est au moins aussi bonne que l'autre relativement à une majorité de critères, sans être trop nettement plus mauvaise que cette autre relativement aux autres critères » (Schärlig, 1985).

« On dit qu'une alternative **a** surclasse une alternative **b** et on note **a S b** si, étant donné ce que l'on sait des préférences du décideur, de la qualité des évaluations et de la nature du problème, il y a suffisamment d'arguments pour admettre que **a** est au moins aussi bonne que **b** et qu'il n'y a pas d'arguments importants prétendant le contraire (vétos) » (Roy, 1975).

Ces deux définitions révèlent un caractère général, les modèles de surclassement ne s'appuient pas, à la différence de l'approche MAUT, sur une axiomatique mathématique solide : ils traitent l'information avec ses imprécisions pour une explication partielle des préférences (Zoller et Beguin, 1992).

Principe : on commence par comparer les actions par paires en respectant l'incomparabilité et l'intransitivité afin de déterminer laquelle surclasse l'autre. On exploite par la suite ces relations de surclassement en se basant, le plus souvent, sur la théorie des graphes. Ce type de procédure ne cherche pas l'agrégation complète, elle est partielle. La clarté est relayée au profit d'une meilleure modélisation de la réalité (Schärlig, 1985).

Nous prenons l'exemple de la méthode ELECTRE I de la famille ELECTRE (ELimination Et Choix Traduisant la REalité) (Roy, 1968), élaborée pour un problème de choix.

La construction de la relation de surclassement s'effectue en attribuant à chaque critère un poids p_j proportionnel à l'importance du critère. Puis, chaque couple d'actions (a_i, a_k) est soumis à un indice de concordance, variant de 0 à 1. La concordance s'apparente au principe de la majorité électorale : il est nécessaire qu'une majorité de critères, représentés par leur poids (nombre de votants), soient en faveur de l'action surclassante. L'indice de concordance c est défini ainsi (Vincke, 1989) :

$$c(a_i, a_k) = \frac{1}{p} \sum_{j: g_j(a_i) \geq g_j(a_k)} p_j, \text{ où } p = \sum_{j=1}^n p_j \text{ et } g \text{ la relation de dominance}$$

En même temps, on soumet le couple d'actions à un indice de discordance d . Ce nouvel indice, compris entre 0 et 1, doit être relativement petit et impose qu'il n'existe pas une trop forte pression, dans un des critères de la minorité, en faveur du classement inverse. L'indice de discordance fonctionne comme un veto (respect des minorités) (Vincke, 1989) :

$$d(a_i, a_k) = \begin{cases} 0 & \text{si } g_j(a_i) \geq g_j(a_k), \forall j, \\ & \text{sinon} \\ \frac{1}{\delta} \max_j [g_j(a_i) - g_j(a_k)] & \end{cases}$$

où $\delta = \max_j [g_j(c) - g_j(d)]$ avec c et d les valeurs respectivement maximales et minimales.

Ayant défini le seuil de concordance \hat{c} et, un seuil de discordance \hat{d} , on définit alors la relation de surclassement S (Vincke, 1989) :

$$a_i S a_k \Leftrightarrow c(a_i, a_k) \geq \hat{c} \text{ et } d(a_i, a_k) \leq \hat{d}$$

La relation de surclassement peut être représentée sous la forme d'un graphe dont les sommets sont les solutions. On cherche donc un sous-ensemble N de solutions tel que toute solution n'appartenant pas à N est surclassée par au moins une solution de N et les solutions de N sont incomparables entre elles. Dans la théorie des graphes, un tel ensemble porte le nom de noyau du graphe et des algorithmes existent pour le déterminer. Pour évoluer vers le meilleur compromis, il reste alors à analyser de façon plus fine les solutions du noyau (Vincke, 1989).

Les différentes méthodes de la famille ELECTRE ont été conçues pour répondre aux différentes problématiques de l'aide à la décision. Sur la base d'ELECTRE I est venue se greffer ELECTRE II (Roy et Bertier, 1973) qui introduit la notion de surclassement faible et surclassement fort. ELECTRE III (Roy, 1978) propose la notion de degré de crédibilité du surclassement. Enfin, ELECTRE IV (Roy et Hugonnard, 1982) abandonne l'exigence d'établir des poids sur les critères. Leurs mécanismes d'agrégation tolèrent des compensations quand les écarts entre critères sont faibles et les rejettent autrement. Ils évitent les critiques faites aux méthodes d'agrégation totale, additive et fortement compensatoire (Vanderpooten et Vallin, 2002). Par contre, les algorithmes utilisés sont, d'un point de vue pratique, parfois jugés compliqués et difficilement compréhensibles par les décideurs (Linkov *et al.*, 2006).

3.5.3. La méthode Analytic Hierarchy Process

Appartenant à la famille des méthodes du critère unique de synthèse, la Procédure d'Analyse Hiérarchique (PAH) ou *Analytic Hierarchy Process* (AHP) a été élaborée à la Wharton School of Business de l'Université de Pennsylvanie par T.L Saaty (1972, 1977). L'AHP a été inspirée par les travaux conduits dans le domaine de la psychologie. En effet, certains psychologues ont privilégié les comparaisons par paire, l'essence de l'AHP, à l'allocation directe de poids (Yokoyama, 1921 ; Thurstone, 1927). L'échelle de comparaison par paire est basée sur des observations psychologiques (Stevens, 1957). L'autre caractéristique majeure de l'AHP, la structuration hiérarchique, a d'abord été proposée et appliquée par G.A. Miller (1956), qui recommande de fixer une limite de 5 à 9, pour le nombre d'éléments à comparer sur chaque niveau hiérarchique.

L'AHP est l'une des méthodes d'aide multicritère à la décision les plus utilisées et ce, dans de nombreux domaines comme la finance, la gestion de l'environnement, l'ingénierie, la politique ou la santé (Vaidya et Kumar, 2006 ; Subramanian et Ramanathan, 2012). De nombreux auteurs ont réalisé des états de l'art sur la méthode AHP (Shim, 1989 ; Saaty et

Forman, 1992 ; Forman et Gass, 2001 ; Vaidya et Kumar, 2006 ; Ho, 2008 ; Sipahi et Timor, 2010 ; Ishizaka et Labib, 2011 ; Subramanian et Ramanathan, 2012).

C'est une méthode d'aide multicritère à la décision singulière (non respect de la procédure définie au §3.5.1), élaborée dans le but de faciliter la prise de décision en situation complexe par le biais d'une approche structurée. Cette section s'attache à décrire les principes généraux et les différentes étapes permettant la mise en œuvre de la méthode.

a. Principes généraux

Longtemps, l'Homme s'est intéressé à la mesure du tangible et de l'intangible. Le domaine du tangible concerne la réalité objective, extérieure au sujet. En revanche, le domaine de l'intangible est le royaume de la pensée subjective, des croyances de l'individu et du monde de l'expérience. L'AHP propose une théorie cohérente reliant ces deux domaines.

Elle est définie comme une « *théorie générale de la mesure* » (Saaty, 1987). Son objectif principal est d'aider les acteurs intervenant dans un processus de décision, à résoudre des problèmes complexes en organisant et en hiérarchisant les informations et les jugements. Le système et son environnement sont décomposés en composantes interactives. L'approche de T.L. Saaty fournit une mesure de l'ensemble de ces interactions en attribuant des valeurs relatives correspondant à l'impact de chaque composante sur la totalité du système (Saaty, 1980).

Les fondements de cette méthode reposent sur deux approches simultanées que sont la pensée systémique et la pensée causale. La première intervient au moment de la simplification du problème en composantes interactives, articulées au sein d'une structure hiérarchique. La seconde, basée sur les représentations mentales et les jugements des experts, intervient dans l'évaluation de l'impact d'une composante sur une autre. L'AHP offre ainsi un cadre non linéaire, où des raisonnements déductifs et inductifs contribuent à l'évaluation de divers facteurs interdépendants, pour aboutir à un résultat synthétique, basé sur les processus cognitifs de chaque intervenant.

La méthode AHP est dite compensatoire, elle permet de compenser la dégradation de performance d'une action sur certains critères par sa performance sur d'autres. Elle repose principalement sur une démarche descriptive afin de « *tenir compte de la nature humaine* » plutôt que de lui imposer un mode de pensée particulier (Saaty et Vargas, 1981). L'AHP offre trois originalités :

- elle utilise une décomposition et une modélisation hiérarchique pour formuler un problème complexe (non structuré) sous une forme multicritère ;
- elle explicite l'importance relative de chaque critère à partir de jugements subjectifs, selon un principe basé sur une échelle de ratio sémantique ;
- les actions, ou alternatives, occupent le dernier niveau de la hiérarchie mais leur évaluation est faite sur le même principe que les autres niveaux de la hiérarchie.

L'AHP s'articule en plusieurs étapes, que nous allons successivement détailler.

b. Définition et décomposition hiérarchique du problème complexe

Cette étape essentielle a pour objectif de poser le problème à résoudre, de le positionner dans son environnement afin d'identifier de manière précise ses divers aspects et caractéristiques. Elle sert également à identifier les experts qui pourraient être impliqués dans la procédure d'évaluation ou d'aide à la décision.

Dans un premier temps, la démarche se veut analytique, en accord avec la faculté naturelle que l'homme a de raisonner en termes d'objets, sur la base de sa propre expérience et de son intuition (Whytte, 1969). Ce découpage logique constitue l'énoncé du premier principe de la méthode. La construction de la hiérarchie s'opère selon une démarche descendante. Elle conduit à structurer la réalité complexe en une arborescence hiérarchique. La décomposition en ensembles homogènes de niveaux hiérarchiques différents a pour avantage principal d'associer d'importantes quantités d'informations à la structure d'un problème décisionnel.

La construction du modèle repose donc sur une approche analytique visant à décomposer le problème pour le rendre accessible au raisonnement humain. Chaque entité matérielle ou abstraite est décomposée en éléments constitutifs. L'AHP est donc à la fois analytique en termes de construction du modèle et synthétique en termes d'agrégation (Fig. 26) (Tacnet, 2009). Elle permet ainsi « d'identifier, de comprendre et d'évaluer les interactions d'un système considéré dans sa globalité » (Saaty et Vargas, 1981).

La construction des hiérarchies dépend principalement du type de décision qui est en jeu (Saaty, 1984). De ce fait, aucune règle précise n'est établie au préalable. Cependant certaines conditions essentielles doivent être respectées :

- **Condition 1** : les éléments, d'un niveau donné, doivent tous être reliés à l'élément du niveau supérieur, qui conditionne l'évaluation de l'impact d'un élément sur l'objectif global.
- **Condition 2** : une structure hiérarchique doit intégrer les différentes composantes du problème ainsi que les objectifs visés de chaque acteur. Elle nécessite l'intégration de suffisamment de détails pertinents afin de donner la définition la plus complète du problème.

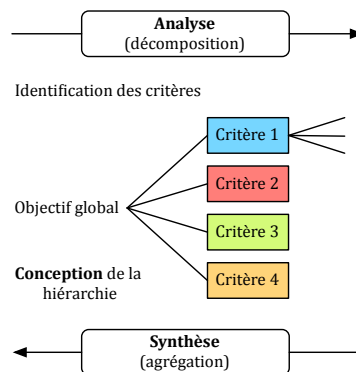


Fig. 26 : Analyse et synthèse au travers de l'AHP, d'après (Tacnet, 2009)

La structure hiérarchique décompose le système complexe en fonction des relations essentielles reliant chaque critère. Le niveau supérieur de la hiérarchie correspond à un élément unique, dominant, appelé *objectif global*. Les niveaux suivants peuvent comporter chacun plusieurs critères, de cinq à neuf selon G.A. Miller (1956). Les critères d'un niveau donné sont comparés deux à deux, par rapport à l'objectif global. Les critères sont ensuite ventilés en alternatives (qui doivent être évaluées en fonction de chaque critère). Pour un nombre d'alternatives limité, la hiérarchie est de type [1-n] (Fig. 27), le type [1-∞] (Fig. 28) est employé lorsque le nombre d'alternatives est grand (Fumey, 2001).

L'analyse logique d'un problème décisionnel conduit à le décomposer en ses composantes principales, et à réitérer cette décomposition sur les composantes ainsi obtenues autant de

fois que nécessaire. Chaque critère ou composante d'un même niveau hiérarchique ne revêt pas la même importance dans sa capacité à résoudre le problème. Afin de déterminer leur importance relative, une matrice de comparaison par paires de critère est construite.

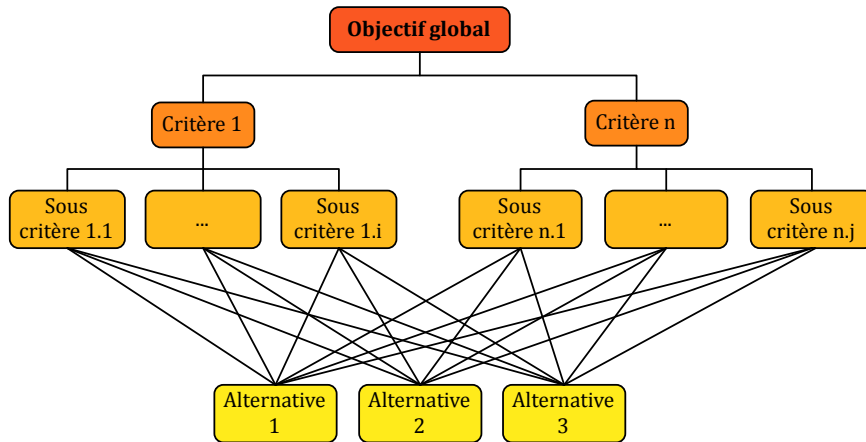


Fig. 27 : Hiérarchie de type [1-n] - Nombre d'alternatives limité

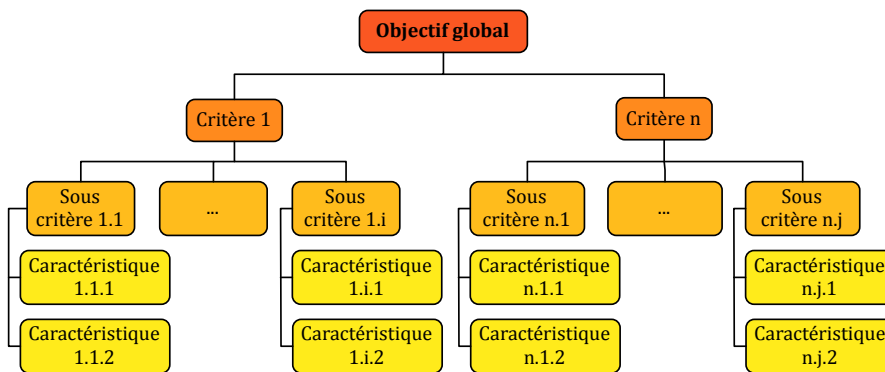


Fig. 28 : Hiérarchie de type [1-∞] - Nombre d'alternatives grand

c. Matrice de comparaison binaire

La hiérarchie étant établie, la deuxième étape s'attache à quantifier les intensités de contribution pour les critères d'un même niveau. Les relations complexes entre différents critères peuvent être étudiées selon une approche dite causale. Deux types de relations causales peuvent être définis :

- les relations causales de type symétrique (A influence B) : $A \rightarrow B$;
- les relations causales de type réciproque (les deux critères s'influencent mutuellement) : $A \leftrightarrow B$.

L'analyse des relations causales entre les critères, c'est-à-dire l'importance relative des critères deux à deux par rapport à l'objectif global, s'effectue par le biais de comparaisons par paires de critères (*pairwise comparison*) et repose sur une approche matricielle.

Soit $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, un ensemble de n critères, qu'il s'agit de comparer afin d'obtenir les performances relatives de chacun au regard de l'objectif global fixé. Les jugements sont alors

adressés sur des paires de critères (C_i, C_j) , et sont représentés par une matrice carrée : $C = [c_{ij}]$, de dimension n , $ij = 1, 2, \dots, n$. Les entrées c_{ij} sont définies par les règles :

Règle 1. Si $c_{ij} = c$, alors $c_{ji} = 1/c$, $c \neq 0$.

Règle 2. Si C_i est jugé comme équivalent à C_j , alors $c_{ij} = 1$, et $c_{ji} = 1$. Ainsi, $\forall i \in [1, n]$ on obtient $c_{ii} = 1$.

En conséquence, la matrice C s'écrit :

$$C = \begin{bmatrix} 1 & c_{12} & \cdots & c_{1n} \\ 1/c_{12} & 1 & \cdots & c_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1/c_{1n} & 1/c_{2n} & \cdots & 1 \end{bmatrix}$$

Pour compléter la matrice ci-dessus, il s'agit de comparer successivement le critère C_1 de la colonne de gauche, aux critères C_2, C_3, \dots, C_n de la ligne supérieure en fonction de l'objectif global. La comparaison, de type réciproque, peut être :

- soit favorable et positive, le jugement correspondra à une valeur entière ;
- soit défavorable et donc négative, le jugement sera exprimé à l'aide d'une fraction.

L'opération est ensuite répétée pour chaque critère de la colonne. Le nombre de jugements devant être réalisé pour compléter une matrice d'ordre n est égal à $\frac{n(n-1)}{2}$. La matrice obtenue est alors réciproque.

Chaque niveau de la structure hiérarchique génère un ensemble de matrices permettant de réaliser les jugements. Sur la base des matrices créées, il est fait appel aux jugements d'un ou plusieurs experts. Le travail de l'expert consiste à évaluer l'importance (ou la priorité relative) d'un critère par rapport à un autre appartenant au même niveau hiérarchique. Les experts jugent, par exemple, si un critère domine, influence, ou contribue davantage à l'objectif global que le critère auquel il est comparé. L'AHP offre un moyen simple pour évaluer l'importance relative de chaque critère : l'échelle fondamentale de comparaison par paires.

Les comparaisons sont effectuées à l'aide d'une échelle sémantique à laquelle est associée une échelle numérique à 9 moments (Tab. 10). L'échelle sémantique reflète en nature et en intensité l'expression de l'importance partielle entre chaque critère. Le choix de cette dernière repose sur la capacité naturelle de l'homme à « *établir des distinctions dans la force des relations qui existent entre les éléments* » (Saaty, 1981). C'est une démarche d'ordination qui s'appuie sur le jugement relatif du degré ou de l'intensité de la domination d'un critère de la paire comparée, en fonction de l'objectif fixé. De cette manière, l'intensité de dominance reflète l'évaluation quantitative de l'expert, telle que définie par C. Hadji (1989) : « *peser alors que l'on ne dispose pas d'une balance* ». Ainsi, il est possible de formaliser la connaissance de l'expert sur la problématique en question, sous forme quantitative, tout en conservant l'information qualitative du jugement (Saaty et Vargas, 1981).

L'AHP utilise une échelle de ratios, qui, contrairement aux méthodes employant une échelle d'intervalle (Kainulainen *et al.*, 2009), est sans unité. Elle autorise alors la comparaison de facteurs, différents par nature, et nous apparaît, de ce fait, adaptée à notre problématique portant sur l'évaluation de la vulnérabilité. L'expert fournit un jugement qui peut être soit numérique, soit sémantique, et évalue aussi bien des critères quantitatifs que qualitatifs en s'affranchissant des unités de mesure.

Intensité	Définition	Explication
1	Importance égale	Les deux critères contribuent de manière égale à l'explication de l'objectif global.
3	Importance modérée	Un critère est jugé un peu plus important que l'autre à l'explication de l'objectif global
5	Importance forte	Un critère est jugé plus important que l'autre à l'explication de l'objectif global
7	Importance très forte	Un critère est jugé beaucoup plus important que l'autre à l'explication de l'objectif global
9	Importance extrême	Un critère est jugé absolument plus important que l'autre à l'explication de l'objectif global

Les intensités 2, 4, 6 et 8 peuvent être utilisées pour affiner le jugement.

Réciproques

1/9, ..., 1/3	Si le critère i se voit attribuer l'un des chiffres précédents lorsqu'il est comparé au critère j , j a donc la valeur réciproque lorsqu'on le compare à i .
---------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Tab. 10 : Échelle fondamentale de comparaison par paires (Saaty et Vargas, 1981)

d. Détermination des performances de chaque critère

Une fois les matrices complétées, il s'agit maintenant d'attribuer à l'ensemble $\{C_1, C_2, \dots, C_n\}$, un ensemble de poids numériques $\{w_1, w_2, \dots, w_n\}$, qui reflète les jugements enregistrés.

Cette étape introduit alors une modélisation mathématique précise du problème, qui consiste à représenter une situation de la vie réelle par une structure mathématique abstraite. L'objectif étant de refléter les jugements d'un individu, de manière quantitative, la méthode AHP répond alors à la question suivante : quelle relation, en termes arithmétiques précis, le poids w_i doit-il entretenir avec le jugement c_{ij} ?

Supposons que l'expert dispose d'un appareil de mesure précis, alors, en situation idéale, la relation entre w_i et c_{ij} est simple (Saaty, 1996) :

$$\frac{w_i}{w_j} = c_{ij}, \text{ avec } i, j \in [1, n]$$

On trouverait alors :

$$C = \begin{bmatrix} w_1/w_1 & \dots & w_1/w_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ w_n/w_1 & \dots & w_n/w_n \end{bmatrix}$$

Toutefois, T.L. Saaty considère irréaliste d'exiger que ces relations idéales soient valides dans le cas général : « *il n'existe aucune mesure physique exacte au sens mathématique* » (Saaty, 1996). De plus, cette relation stricte rendrait la plupart des problèmes insolubles. Il est donc nécessaire d'autoriser des écarts, lesquels peuvent être exacerbés lorsque l'on fait appel aux jugements humains sur des propriétés intangibles.

L'AHP autorise alors certaines incohérences, afin de prendre en compte l'imprécision des mesures sur des propriétés intangibles :

- Incohérence cardinale : $C_1 = 2C_2$ et $C_2 = 3C_3$, mais $C_1 = 5C_3$;

- Incohérence ordinale : $C_1 > C_2$ et $C_2 > C_3$, mais $C_1 < C_3$.

Le poids de chaque critère doit être unique, et refléter les intensités de dominances exprimées dans la matrice de jugements. L'AHP utilise la méthode de la valeur propre maximale (*principal Eigenvalue Method* – EM) afin de déterminer le vecteur de performances des critères issu de la matrice de jugements (Saaty, 1998).

Le vecteur de performances correspond à un classement numérique des contributions de chaque critère. L'ordre des performances tient compte des intensités de dominance, et doit rester invariant pour une même structure hiérarchique. De plus, le vecteur de performances doit être invariant à la multiplication par une constante λ positive (Saaty, 2003).

Dès lors, le vecteur de priorité w doit satisfaire la relation :

$$Cw = \lambda w \text{ avec, } w = (w_1, w_2, \dots, w_n) \text{ et } \sum_{i=1}^n w_i = 1$$

avec C la matrice de jugements, w le vecteur propre principal de C , et λ la valeur propre principale de C .

La matrice C ayant un rang unitaire, toutes ses valeurs propres λ_i sont nulles, à l'exception de l'une d'entre elles. Sachant que $\sum_{i=1}^n \lambda_i = \text{trace}(C) = n$, n est alors la valeur propre maximale, λ_{max} . T.L. Saaty (1977, 1980) justifie l'emploi de cette méthode, pour les matrices légèrement incohérentes, par la théorie de la perturbation, qui suggère que de légères variations dans une matrice consistante impliquent de légères variations du vecteur propre et de la valeur propre. Le calcul du vecteur propre, correspondant à la valeur propre maximale, s'effectue au moyen de la méthode de la puissance, qui repose sur un processus itératif.

Exemple :

Soit la matrice de jugements C , complétée par un expert, où trois critères (C_1, C_2, C_3) ont été comparés.

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 1/5 \\ 1/3 & 1 & 1/3 \\ 5 & 3 & 1 \end{bmatrix}$$

Première itération.

$$C_1 = C * C = \begin{bmatrix} 3 & 6,6 & 1,4 \\ 2,333 & 3 & 0,733 \\ 11 & 21 & 3 \end{bmatrix}$$

On somme par les lignes et, en normalisant, on obtient le premier vecteur de priorité :

$$W_1 = (0,2113 ; 0,1165 ; 0,6722)$$

Deuxième itération.

$$C_2 = C_1 * C_1 = \begin{bmatrix} 39,8 & 69 & 13,24 \\ 22,067 & 39,8 & 7,667 \\ 115 & 198,6 & 39,8 \end{bmatrix}$$

$$W_2 = (0,2239 ; 0,1276 ; 0,6485)$$

Le processus est interrompu lorsqu'il y a convergence de la valeur du vecteur de performance :

$$W_3 = (0,2225 ; 0,1268 ; 0,6506)$$

$$W_4 = (0,2225 ; 0,1268 ; 0,6506)$$

Dans cet exemple, la convergence est obtenue à partir de la quatrième itération. On obtient alors la performance (ou poids de contribution) de chaque critère à la réalisation de l'objectif global : $C_1 = 0,2225$; $C_2 = 0,1268$; $C_3 = 0,6506$.

D'autres méthodes sont utilisées pour obtenir la pondération des critères, comme la moyenne géométrique en ligne (Escobar *et al.*, 2004) ou la méthode de régression linéaire dont les résultats sont similaires lorsque les matrices sont cohérentes (Saaty, 1998 ; Dong, 2008).

e. Évaluation de la cohérence des jugements

Dans un problème de décision, il est important de connaître la cohérence des jugements afin de s'assurer que les décisions qui pourront être prises se fondent sur un ensemble de jugements homogènes. Or, les jugements fournis par les experts s'avèrent rarement parfaitement cohérents (Merunka, 1987).

Au sein des méthodes d'analyse multicritère, l'AHP est la seule méthode qui permette une telle vérification pour s'assurer que les poids relatifs ne sont pas dictés arbitrairement ou aléatoirement par l'expert (Aguarón et Moreno-Jiménez, 2003). D'un point de vue pratique, un certain degré d'incohérence traduit un raisonnement humain normal (Merunka, 1987). Celle-ci peut résulter d'un manque de concentration (Forman, 1993) ou d'une fatigue mentale (Akomode *et al.*, 1998) dans le processus d'évaluation. De ce fait, mesurer la cohérence s'avère primordial pour déceler les failles pouvant affecter grandement le résultat de l'analyse finale.

Il faut cependant noter qu'une cohérence parfaite n'existe que rarement puisque les individus, sur une base quotidienne, prennent des décisions qui ne sont pas toujours cohérentes entre elles (Saaty, 1996 ; Apostolou *et al.*, 2001). La méthode AHP permet donc d'inclure une certaine marge d'erreur lors du calcul du ratio de cohérence. De cette façon, on tend à accepter les solutions dont la transitivité est quasi-parfaite. Lorsque nous évaluons des propriétés tangibles, les jugements caractérisant la matrice de comparaison par paires peuvent être parfaitement cohérents, mais tout autant erronés. Un minimum d'incohérence peut être considéré comme bénéfique, en revanche, forcer la cohérence sans avoir connaissance des valeurs précises se révèle improductif (Saaty, 2008).

Pour calculer la cohérence des jugements, il faut commencer par former une matrice diagonale D avec le vecteur propre déterminé :

$$D = \text{diag}(W)$$

Puis, on calcule la matrice inverse de D , D^{-1} . On procède ensuite au calcul suivant :

$$E = D^{-1}CD$$

De cette nouvelle matrice, on effectue une sommation par lignes que l'on divise par la dimension de la matrice de jugements C , afin d'obtenir la valeur propre maximale λ_{max} . T.L. Saaty définit alors un indice de cohérence IC :

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}$$

Pour une meilleure appréciation du degré de cohérence, T.L. Saaty a développé, par expérimentation à partir de IC , un ratio de cohérence RC :

$$RC = \frac{IC}{IA}$$

où IA (Tab. 11) représente l'indice de cohérence d'une matrice de comparaison aléatoirement générée, de dimension n .

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
IA	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Tab. 11 : Indice aléatoire de cohérence (Saaty, 2008)

La valeur de RC ne doit pas dépasser 10 % auquel cas les jugements sont susceptibles d'être quelque peu aléatoires et exigent certaines révisions (Saaty et Vargas, 1981). Il n'est en aucun cas recherché une cohérence absolue, cette méthode permet simplement d'attirer l'attention de l'expert sur des points d'incohérence, et lui offre la possibilité de reconsidérer le problème en connaissance de cause. De plus, une forte valeur d'incohérence n'est pas forcément synonyme d'erreur : l'expert peut intégrer dans son raisonnement des variables importantes qui ne figurent pas dans la structure hiérarchique (Merunka, 1987).

f. Critique de la méthode AHP

L'AHP est une méthode souple qui permet la prise en compte logique des jugements de valeur individuels. Elle procède à une décomposition de la réalité complexe d'un problème, le traduit par une structure hiérarchique regroupant des critères de nature différente, afin de le rendre intelligible.

Cependant, bien que largement reconnue et utilisée, l'AHP est critiquée à plusieurs niveaux :

- La mesure relative et les comparaisons par paires qu'elle implique ne font pas l'unanimité. En effet, une critique majeure prononcée envers la méthode AHP porte sur l'échelle de jugement et sur le manque de prise en compte de l'incertitude des jugements ou des perceptions différentes des experts (Cheng, 1996). Certains auteurs ont donc proposé l'utilisation de « nombres flous » (*fuzzy number*) pour effectuer les jugements (Mikhailov, 2004 ; Kahraman *et al.*, 2004). La réponse de T.L. Saaty est vive, deux articles, aux titres évocateurs, s'attachent à démontrer le manque de validité mathématique de telles pratiques (Saaty, 2006 ; Saaty et Tran, 2007). Par hypothèse, la méthode de comparaison par paires correspond en effet à une approche floue et subjective.
- Les limitations cognitives qui justifient la décomposition hiérarchique l'empêchent de traiter simultanément un grand nombre d'alternatives. Le nombre limité d'éléments comparables pour un même niveau hiérarchique, et les regroupements effectués pour y faire face, impliquent une perte d'information et de pertinence (Dodd et Donegan, 1989).
- Certains auteurs critiquent le rangement des alternatives déterminés par l'AHP (Dyer 1990 ; Yue *et al.*, 1998, Perez *et al.*, 2006). Ils soulèvent le problème du « rang réversible » (*rank reversal*) qui apparaît lorsqu'une alternative est supprimée ou ajoutée. Cependant, ce phénomène est, selon T.L. Saaty, légitime dans le cas de critères multiples (Saaty, 1993). La question n'est pas tant de savoir si le rang doit être préservé, car il est largement admis qu'il ne peut et ne doit pas toujours être conservé (Saaty et Vargas, 1984 ; Tversky *et al.*, 1990), mais si l'hypothèse d'indépendance

s'applique. Certains auteurs de la théorie de l'utilité considèrent que l'indépendance des critères entre eux doit être assumée (Keeney et Raiffa, 1976 ; Kamenetzky, 1982). Contrairement à cette hypothèse, dans la méthode AHP, qui se veut systémique, l'interdépendance est de rigueur (Saaty *et al.*, 2009). Le rang est toujours autorisé à changer. Il est conservé uniquement lorsque les critères sont des conditions imposées (Saaty, 1991a).

- Sur le fond, la signification des poids calculés est discutée comme ne reflétant pas les véritables préférences des décideurs (tout comme la théorie de l'utilité multi-attribut) (Linkov *et al.*, 2006).
- D'autres auteurs, dans leur souci de toujours préserver le rangement, cherchent des procédés afin de déterminer les performances des critères (Holder ; 1990). La seule méthode alternative proposée est celle de la moyenne géométrique (Barzilai, 1997). Les éléments de chaque ligne de la matrice sont multipliés, la racine $n^{\text{ième}}$ prise et le vecteur résultant normalisé. Ce processus ne tient pas compte de la transitivité de la dominance dans le cas de jugements incohérents et par conséquent, conduit à des résultats erronés, à la fois sur la pondération et le classement (Saaty, 1991b) : il induit qu'une alternative ayant une valeur inférieure sous un critère moins important est considérée plus importante qu'une alternative ayant une plus grande valeur sous un critère plus important (Saaty *et al.*, 2009).

Malgré les critiques et les lacunes de la méthode AHP, nous pensons que son potentiel n'est pas négligeable, dans le cadre d'un projet d'évaluation de la vulnérabilité et pour la mise en place d'une plateforme d'organisation des connaissances des experts sur le sujet. Elle permet de regrouper et d'organiser des données de nature diverse (qualitatives et quantitatives) dans un modèle unique considérant le système dans sa globalité (approche systémique). Pour cela, elle établit, sur la base des jugements d'experts, des niveaux de priorité (que nous appellerons contribution) entre les critères (ou facteurs de vulnérabilité). La méthode AHP offre alors plusieurs avantages (Fig. 29), que nous pensons déterminants pour la problématique traitée dans le cadre de ce travail de thèse :

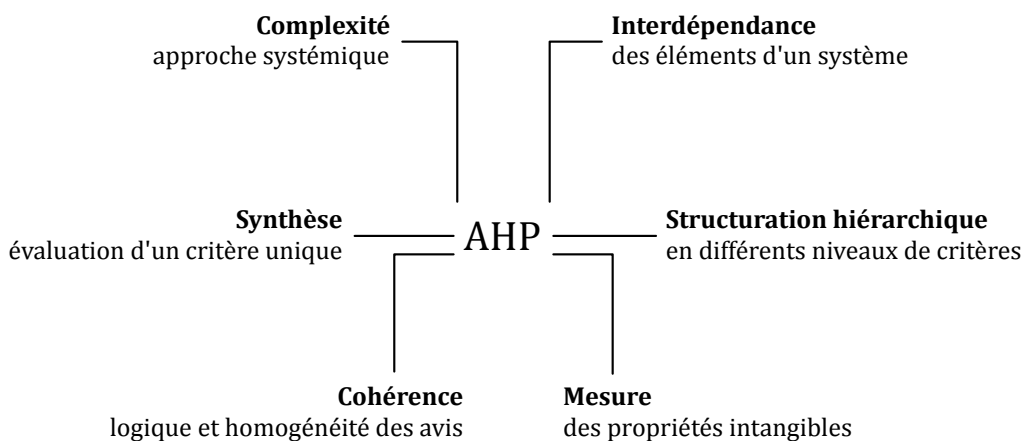


Fig. 29 : Avantages de la méthode AHP (Saaty, 1984)

Complexité : l'AHP intègre une démarche déductive et holistique. Elle propose un modèle unique, souple et facilement compréhensible pour résoudre des problèmes non structurés.

Structuration hiérarchique : elle reflète la tendance naturelle de l'esprit à trier les éléments d'un système en différents niveaux et à regrouper les éléments semblables sur un même niveau.

Interdépendance : elle intègre l'interdépendance des éléments du système, sans se focaliser sur une pensée linéaire.

Mesure : elle fournit une échelle qui permet de mesurer les propriétés intangibles et d'établir des priorités entre les critères.

Synthèse : basée sur le principe d'agrégation totale, elle fournit un résultat sous forme d'indice, intéressant pour notre étude de la vulnérabilité.

Dans une perspective d'aménagement du territoire, elle offre, aux gestionnaires et aux personnes concernées par la problématique incendie, la possibilité d'affiner leur représentation des forces et faiblesses du territoire, et constitue ainsi un véritable outil d'aide à la décision.

Les méthodes multicritères ELECTRE, par ailleurs largement utilisées pour la résolution de problèmes d'aide à la décision en environnement (ROY, 1985 ; Laaribi, 2000), ne nous apparaissent pas adaptées à notre problématique. En effet, nous ne nous positionnons pas dans une perspective de choix, de tri ou de rangement en comparant des interfaces plus ou moins vulnérables, mais plutôt dans une perspective descriptive et constructive, au sens où nous souhaitons organiser et structurer des facteurs environnementaux, matériels et humains, afin de calculer un Indice Global de Vulnérabilité (IGV), résultant de leurs interactions. Nous faisons l'hypothèse du caractère compensatoire des interactions, et souhaitons décomposer l'IGV afin d'obtenir des indices de contribution spécifique aux grandes familles de critères.

3.6. L'agrégation des jugements individuels et l'obtention d'un jugement de groupe

Dans le cadre de cette thèse, nous souhaitons conduire une évaluation de la vulnérabilité se fondant sur les jugements d'experts. La méthode AHP, que nous considérons comme un cadre rigoureux pour la formalisation de la connaissance des experts, repose sur l'attribution de valeurs précises et produit des structures d'importance relative entre les critères.

La question inhérente à notre approche réside dans l'agrégation des expertises individuelles. L'agrégation, dans un souci d'objectivité scientifique, doit reconnaître la pluralité des points de vue sur une même question. L'expertise collective résultante ne consiste pas à juxtaposer un ensemble de contributions spécialisées d'experts, mais à les mettre en synergie pour dégager un avis qui va au-delà des positions individuelles. Nous posons alors l'hypothèse que tous les jugements sont d'importance égale, ainsi, nous ne chercherons pas à attribuer des poids aux experts. Nous partons du principe que l'objectivité réside dans la confrontation des subjectivités. Le jugement de groupe doit respecter la multiplicité des jugements individuels, sans discriminer les avis divergents ou conflictuels.

Selon R.M. Cook (1991), l'objectif fondamental de la science étant d'établir un consensus rationnel, le processus d'agrégation doit, par conséquent, respecter cinq principes :

- **Reproductibilité** : tous les résultats doivent être reproductibles, et les données clairement définies et rendues disponibles ;
- **Responsabilité** : la source des données doit être identifiée ;
- **Contrôle empirique** : les expertises doivent être en accord avec la réalité du phénomène observé ;

- Neutralité : la procédure d'agrégation doit se baser sur les jugements bruts (non modifiés) émis par les experts ;
- Équité : tous les experts doivent être considérés égaux, avant agrégation.

La question de l'agrégation des jugements individuels en un jugement collectif, plonge ses racines dans l'analyse mathématique du vote, apparue en France dès la fin du XVIII^{ème} siècle. Les mathématiciens Jean-Charles de Borda et Nicolas de Condorcet en sont les principaux instigateurs. Tous deux ont travaillé sur un mode de scrutin permettant de transformer le plus fidèlement possible un ensemble de préférences individuelles en une préférence collective (Borda, 1781 ; Condorcet, 1785). En règle générale, les procédures de votes sont formalisées et étudiées dans un contexte ordinal où chaque votant est supposé être capable de classer par ordre de préférence l'ensemble des alternatives soumises à la décision collective. En effet, il s'agit ici d'agréger des listes ordonnées pour déterminer le candidat le mieux soutenu par l'ensemble de ces listes, ou même d'établir un classement global censé résumer au mieux les préférences exprimées.

Pour un tel scrutin, la procédure établie par Nicolas de Condorcet, la méthode majoritaire, propose de comparer les candidats par paires.

Méthode de Condorcet : un candidat a est majoritairement préféré à un candidat b si et seulement si la somme des poids des votants qui préfèrent a à b est supérieure à la somme des poids des votants qui préfèrent b à a (en cas d'égalité les deux candidats sont jugés indifférents).

Principe de Condorcet : s'il existe un candidat préféré à tous les autres en utilisant la méthode majoritaire, c'est ce candidat qu'il faut élire. Ce candidat est le vainqueur de Condorcet, il est nécessairement unique.

Appliquée à un nombre supérieur à deux candidats, cette méthode introduit un paradoxe, rendant toute décision impossible : il n'existe pas de vainqueur de Condorcet.

Paradoxe de Condorcet : soit m le nombre de votants préférant le candidat i au candidat j . On considère que i est collectivement préféré à j si $m_{ij} > m_{ji}$. Supposons 3 votants et 3 candidats x, y, z . Le profil des votes est le suivant :

Préférences	Nombre
$x > y > z$	23 votants
$y > z > x$	17 votants
$y > x > z$	2 votants
$z > x > y$	10 votants
$z > y > x$	8 votants

$$m_{xy} = 33, m_{yz} = 42, m_{zx} = 35$$

Le candidat x est préféré au candidat y . Ce dernier est préféré au candidat z . Mais la confrontation de x et de z révèle que z est préféré à x . La méthode majoritaire conduit à une préférence collective non transitive, cyclique. Chaque candidat est battu par au moins un autre, il n'existe donc pas de vainqueur de Condorcet. Diverses méthodes ont été proposées pour tenter de tirer parti de la relation de préférence bâtie en utilisant la méthode majoritaire (Fishburn, 1977 ; Nurmi, 1987).

Une approche alternative pour traiter de tels scrutins a été proposée par Jean-Charles de Borda. Elle consiste à associer un score global à chaque candidat en fonction de son rang moyen de classement dans les listes des votants.

Méthode de Borda : un candidat a est préféré à un candidat b si la somme des rangs de a dans les listes des votants est strictement inférieure à celle de b (on suppose ici que les listes sont des ordres complets (sans ex aequo) et on attribue le rang 1 au premier de la liste, 2 au second et ainsi de suite. C'est donc le score minimal remporte le vote. La méthode se généralise sans difficulté pour traiter les cas d'ex aequo.

Exemple de Borda : appliquons la méthode de Borda à l'exemple de Condorcet.

- Score de $x = 23 \times 1 + 17 \times 3 + 2 \times 2 + 10 \times 2 + 8 \times 3 = 122$
- Score de $y = 23 \times 2 + 17 \times 1 + 2 \times 1 + 10 \times 3 + 8 \times 2 = 111$
- Score de $z = 23 \times 3 + 17 \times 2 + 2 \times 3 + 10 \times 1 + 8 \times 1 = 127$

Le candidat y est le vainqueur de Borda.

Comparaison des méthodes de Borda et de Condorcet : soit $\{x, y, z, t\}$ l'ensemble des candidats à une élection. Considérons trois votants pour le profil des votes suivant :

Préférences	Nombre
$y > x > z > t$	2 votants
$x > z > t > y$	1 votants

La méthode de Borda annonce x vainqueur de l'élection avec un score de 5, et conduit au classement $x > y > z > t$, les candidats recevant respectivement les scores 5, 6, 8 et 11. En utilisant la méthode de Condorcet c'est y qui l'emporte, et on obtient une préférence collective transitive, qui conduit au classement $y > x > z > t$.

Les deux méthodes divergent : la méthode de Borda ne respecte pas le principe de Condorcet, mais présente cependant un avantage important sur la méthode de Condorcet. Elle permet non seulement de désigner un (ou plusieurs) vainqueur(s) dans tous les cas de figure (candidats dont la somme des rangs est minimale) mais fournit un rangement de tous les candidats du meilleur au pire. Ce n'est pas le cas de la méthode de Condorcet qui conduit parfois à des préférences non transitives ne permettant pas d'ordonner les candidats. De plus, la méthode de Borda est neutre, anonyme, séparable, monotone et incite à la participation.

La méthode de Borda possède en revanche une caractéristique qui peut sembler peu naturelle : supposons, dans l'exemple précédent, que les candidats z et t retirent leur candidature. On constate alors que y devient le vainqueur avec la méthode de Borda comme avec celle de Condorcet. Ainsi, la défection des candidats z et t a inversé les résultats de la méthode de Borda entre x et y . Contrairement à ce que l'on observe pour la méthode de Condorcet, la relation de préférence liant deux candidats x et y avec la méthode de Borda dépend non seulement des positions relatives de x et y dans les classements des votants, mais aussi de leurs situations respectives vis-à-vis de tous les autres candidats. Le fait qu'un candidat x batte un candidat y est donc contingent à l'ensemble des candidats qui se sont présentés. Une telle contingence peut sembler problématique, cependant, appliquée à notre sujet, qui vise à déterminer un ordre de contribution pour différents critères bâtissant la vulnérabilité, et non pas un critère « vainqueur », elle devient alors très intéressante.

Au cours des années 1950, les travaux des économistes K.J. Arrow (1951), K.O. May (1952) et D. Black (1958) ont formalisé ce que l'on appelle aujourd'hui la *Théorie du Choix Social* (*Social Choice Theory*). Leur objectif était de proposer une méthode permettant de

choisir parmi plusieurs solutions, celle optimale au sens de Pareto. Une solution est optimale, au sens de Pareto, si elle n'est pas moins bonne qu'une autre pour chacun des critères considérés, et strictement moins bonne pour au moins un critère. Plusieurs fonctions d'utilités collectives ont alors été proposées dans le but d'agrèger les préférences individuelles sur les différents optima de Pareto pour obtenir une préférence collective.

Le résultat le plus célèbre soulève un paradoxe assez déconcertant : le théorème de l'impossibilité d'Arrow (Arrow et Raynaud, 1986). Ce théorème est central en théorie du choix social. Il concerne les méthodes qui visent à agréger n ($n \geq 3$) préordres complets (classements avec ou sans ex aequo) en un préordre complet synthétique. Chaque votant (expert) fournit donc une liste classant par ordre de préférence l'ensemble des candidats (critères), avec possibilité d'ex aequo. K.J. Arrow s'est intéressé aux fonctions d'agrégation, F_a , vérifiant les conditions suivantes :

- **Universalité** : toute configuration de listes est admissible, chaque expert peut établir n'importe lequel des $n!$ préordres complets possibles.
- **Transitivité** : la méthode doit fournir un classement sous la forme d'un préordre complet. Cette condition impose la transitivité du résultat quelles que soient les préférences exprimées.
- **Unanimité** : le résultat de la méthode ne doit pas contredire un avis unanime des votants. Si un jugement sur une paire de critères est identique pour tous les experts, F_a doit respecter ce jugement. Plus précisément, si x est classé devant y dans chacune des listes, il doit figurer devant y dans le classement global.
- **Indépendance** : le résultat de la comparaison entre deux candidats ne dépend que de leur position relative dans les listes ordonnées fournies par les votants. Cette condition fait reposer la relation de préférence entre deux critères sur la seule donnée de la relation liant ces deux critères dans les listes individuelles. Ceci exclut alors la prise en compte de l'intensité de préférence dans le traitement des listes individuelles, et la position de deux candidats vis-à-vis d'un tiers pour mieux les comparer.
- **Non-dictature** : pour tout expert i , il existe un profil Π et un couple de critère (x, y) tel que le jugement collectif sur (x, y) soit différente de la préférence de i sur (x, y) .

Le théorème d'Arrow soulève alors un paradoxe : dès lors qu'il y a plus de trois critères, aucune méthode d'agrégation ne peut satisfaire les conditions d'universalité, de transitivité, d'unanimité, d'indépendance et de non dictature.

La méthode de Borda respecte les conditions d'universalité, de transitivité, d'unanimité et de non dictature, mais ne respecte pas la condition d'indépendance, comme nous l'avons vérifié précédemment. La méthode de Condorcet, pour sa part, respecte les conditions d'universalité, d'unanimité, d'indépendance et de non dictature, mais ne satisfait pas la condition de transitivité.

Quand des économistes ou des statisticiens parlent d'agrégation, ils entendent la fonction utilisée qui, à une multiplicité de valeurs numériques, en associe une seule de nature à représenter la pluralité des valeurs individuelles. À titre d'exemple, supposons que plusieurs experts forment des jugements quantifiables sur la mesure de l'influence d'un critère sur la vulnérabilité, ou, sur le ratio d'une telle mesure (combien plus influant un critère est-il par rapport à un autre ?). L'étude de la vulnérabilité demande la prise en compte de critères souvent interdépendants. Notre volonté est de l'aborder sous un angle systémique, considérant de fait les interactions entre ceux-ci. La méthode AHP est adaptée à cette problématique.

Selon E. Forman et K. Peniwati (1998), dans l'AHP, l'agrégation des jugements collectés peut s'effectuer selon deux approches : l'agrégation des jugements individuels (AJI) ou l'agrégation des priorités individuelles (API). Afin de choisir la méthode d'agrégation, il est nécessaire de se demander si les experts agissent en synergie ou de manière individuelle. De plus, il faut aussi savoir si les experts ont la même influence sur la décision.

Agrégation des Jugements Individuels (AJI). Cette approche, la plus communément employée, considère que les experts œuvrent en synergie et peuvent ainsi être apparentés à un individu unique. Traiter de multiples jugements comme unique, requiert de satisfaire aux conditions de réciprocité pour les jugements (Forman et Peniwati, 1998). L'agrégation des jugements individuels est réalisée à l'aide de la moyenne géométrique (Saaty, 1984 ; Forman, et Peniwati 1998) car elle permet de s'affranchir des valeurs extrêmes. Lorsque les experts influencent différemment le processus de décision, la moyenne géométrique pondérée est utilisée (Forman et Peniwati, 1998). Dans ce cas, une matrice globale, synthétisant les jugements, est établie. Les priorités sont ensuite déduites à partir de cette matrice globale.

Agrégation des Priorités Individuelles (API). Cette méthode est utilisée lorsque les experts interrogés n'œuvrent pas en synergie. Les priorités sont calculées sur chaque matrice individuelle, puis agrégées, à l'aide de la moyenne géométrique normalisée. Lorsque les membres du groupe n'ont pas le même poids dans le processus de décision, la moyenne géométrique pondérée est préconisée pour agréger les priorités.

Transposée à notre problématique, la Théorie du Choix Social supposerait que les experts établissent leurs jugements par l'affirmation : le critère x contribue davantage à la vulnérabilité que le critère y , ou le contraire, sans exprimer l'intensité de l'importance ou de l'influence sur la vulnérabilité. Dans cette situation, le jugement d'importance est ordinal. La méthode AHP, par le biais de son échelle fondamentale de comparaison par paires, offre la possibilité de quantifier l'importance des contributions. L'expert peut ainsi juger que x contribue beaucoup plus que y , à la vulnérabilité. L'échelle semi-quantitative de l'AHP permet de donner sens à « beaucoup plus ». Ainsi, il devient possible d'obtenir un jugement cardinal, suite aux comparaisons réciproques par paires.

Pour des profils de comparaisons réciproques par paires, toutes les fonctions ne sont pas adaptées (Saaty et Vargas, 2012). J. Aczel et T.L. Saaty (1983) ont prouvé que la seule procédure d'agrégation, pour ce type de profil, satisfaisant les conditions de séparabilité, d'unanimité, d'homogénéité et de réciprocité, est la moyenne géométrique (Saaty et Vargas, 2012). De plus, cette procédure vérifie les conditions d'Arrow, que les jugements soient cohérents ou incohérents (Saaty et Vargas, 2012).

La motivation associée à l'emploi de la moyenne géométrique (s'affranchir des valeurs extrêmes) ne nous semble pas opportune. En effet, à l'issue de l'agrégation, nous souhaitons conserver la multiplicité des jugements, des plus modérés aux plus extrêmes. Une méthode a alors été proposée, reposant sur l'introduction d'une incertitude probabilisée dans les jugements et l'emploi de la méthode de Borda, pour l'obtention des performances de chaque critère (Escobar et Moreno-Jiménez, 2007). Cette méthode d'agrégation permet de capturer la richesse de l'incertitude inhérente aux êtres humains, la subjectivité de chaque expert, les interdépendances entre les critères ainsi que les intensités des contributions (Escobar et Moreno-Jiménez, 2007). Elle assoie alors davantage le caractère holistique de la méthode AHP et cherche à assurer une meilleure représentativité des jugements individuels au niveau du jugement du groupe. Nous nous plaçons dans la lignée de leur travail et présenterons leur méthode et son application à notre problématique dans le chapitre 4. Nous la comparerons aux différentes techniques d'agrégation préconisées dans l'AHP.

Chapitre 4. Proposition d'une méthode de caractérisation de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt

Ce chapitre est consacré à la construction du modèle multicritère d'évaluation de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt. L'objectif d'aide à la décision a conduit à analyser le rôle de l'expert et de l'exercice d'évaluation. La démarche proposée privilégie la connaissance et l'expérience des experts dans l'évaluation des facteurs de vulnérabilité. L'idée est alors d'exploiter cette culture du risque incendie de forêt, de la formaliser afin de tendre vers l'objectivation des jugements individuels qui, par nature, sont subjectifs.

La première partie du chapitre s'attache à présenter le processus d'identification des critères de vulnérabilité, basé sur l'analyse des retours d'expérience français et étrangers, des Plans de Prévention du Risque incendie de forêt (cf. §2.3.1) et sur des entretiens réalisés avec des experts du sujet. Une fois identifiés, les critères sont décomposés en familles de sous-critères et structurés sous forme d'un modèle conceptuel qui sera présenté dans la deuxième partie. Le modèle conceptuel est une représentation graphique de l'ensemble des éléments (critères, sous-critères et modalités) structurant la vulnérabilité selon une hiérarchie descendante par niveaux.

Ensuite, les deux dernières sections s'intéressent à la formalisation des connaissances des experts, et à l'exploitation de leurs jugements sur les différentes composantes du modèle. La prise en compte de la vulnérabilité, variable multifactorielle et dépourvue d'unité de mesure proprement dite, s'avère délicate. Des valeurs abstraites, exprimées sous la forme du langage, sont proposées pour l'appréhender. Il est ainsi possible de rendre compréhensible le problème posé par son évaluation et de l'appréhender de façon simplifiée. Nous verrons quelle méthode a été mise en œuvre pour traiter la multiplicité des jugements, souvent contradictoires, et comment la méthode AHP et l'arithmétique floue s'articulent pour proposer une modélisation de l'indice global de vulnérabilité (IGV).

Les différentes étapes de la démarche sont présentées sous forme d'un schéma commenté dans la figure suivante (Fig. 30).

ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ DES INTERFACES HABITAT-FORÊT

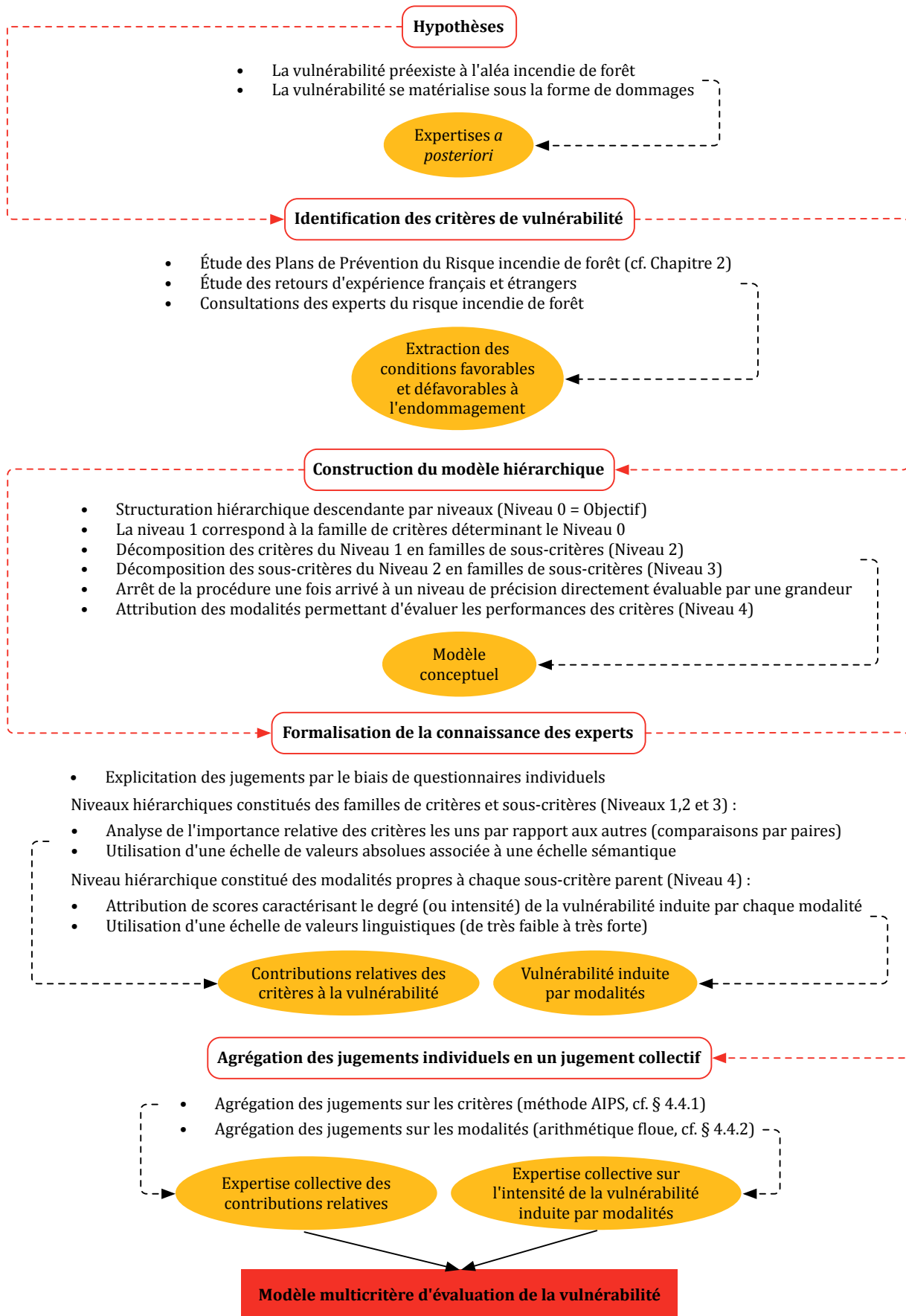


Fig. 30 : Présentation des différentes étapes de la démarche

4.1. Identification des critères pour l'évaluation de la vulnérabilité

Notre démarche de recherche s'intéresse à l'évaluation de la vulnérabilité latente du territoire des interfaces habitat-forêt. En effet, nous nous basons sur l'hypothèse selon laquelle la vulnérabilité préexiste au phénomène incendie de forêt. Cependant, elle se matérialise sous l'action des mécanismes d'endommagement propres à ce dernier. Dès lors, les dommages générés la révèlent, et témoignent des faiblesses du territoire impacté. Ils sont perçus comme des symptômes de la vulnérabilité. L'endommagement permet alors d'appréhender les conditions favorables à son apparition.

La base de données Prométhée, présentée au Chapitre 2, ne renseigne pas les dommages observés au niveau des interfaces habitat-forêt (cf. §2.2). En France, il n'existe aucun organisme recensant les habitations résidentielles endommagées par les incendies de forêt. Notre regard s'est alors porté sur les sociétés et les mutuelles d'assurance, avec pour objectif l'exploitation des dossiers relatifs aux sinistres passés. Cependant, pour les compagnies d'assurance, les dommages occasionnés par les incendies de forêts ne font pas l'objet d'un suivi spécifique, ils sont instruits pour remboursement auprès des assurés au même titre que les incendies d'habitation. Lors d'un entretien téléphonique, ceci nous a été confirmé par le Directeur de la Mission des sociétés d'assurance pour la connaissance et la prévention des Risques Naturels, regroupant la Fédération Française des Sociétés d'Assurance (FFSA) et le Groupement des Entreprises Mutuelles d'Assurance (GEMA). Les problèmes liés à l'accessibilité des données détenues par les compagnies d'assurance ont été soulevés par certains auteurs (Napoleone *et al.*, 2002).

Alors, nous avons recherché les informations nécessaires à la construction du modèle conceptuel au niveau des retours d'expérience effectués sur les grands feux passés. Le retour d'expérience (REX) représente un véritable outil d'apprentissage, et a pour objectif l'amélioration de la gestion des risques pour les services qui le pratiquent. Il s'inscrit comme l'un des principes de base de la cindynique, science de l'analyse des dangers et de la prévention des risques (Kervern et Rubise, 1991). « *Le retour d'expérience est une démarche consistant à apprendre de ce qui se passe et de ce qui s'est passé pour mieux maîtriser l'avenir. C'est une démarche organisée et systématique de recueil et d'exploitation des signaux que donne un système* » (Mortureux, 2004). Cette démarche est reconnue et prise en compte dans la quasi-totalité des domaines où se posent des problèmes de sécurité : transport ferroviaire (Tea, 2009), risques liés aux mouvements de terrains (Léone, 1996), risques d'inondation (Torterotot, 1993 ; Huet, 2003), risques liés aux transports de matières dangereuses (Griot, 2003).

Transposé à notre problématique, le REX a l'avantage de formaliser les connaissances issues de l'analyse du comportement réel des processus d'endommagement d'un incendie de forêt, et de fait, leur étude doit permettre de déceler les critères (facteurs) conditionnant les situations dommageables. Nous souhaitons que le modèle hiérarchique du système « vulnérabilité » soit représentatif des connaissances sur le comportement passé et réel du phénomène dommageable (Fig. 31).

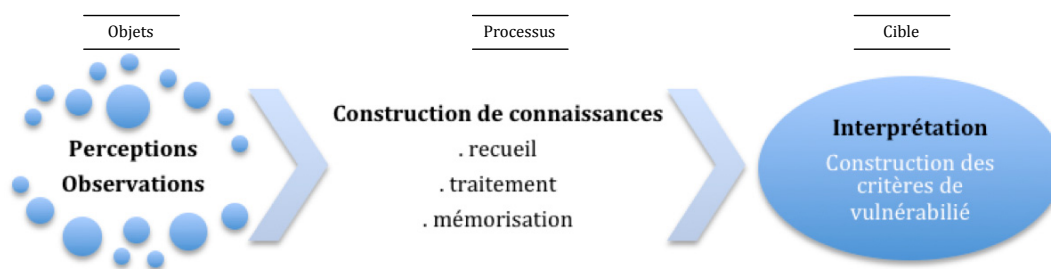


Fig. 31 : Le retour d'expérience comme un processus de construction de connaissances utile à l'élaboration du modèle hiérarchique

Nous avons étudiés plusieurs retours d'expérience provenant de différents organismes français (ONF, CEREN, Cellule Pyroscope, DDTM), australien (CSIRO) et nord-américain.

4.1.1. Les retours d'expérience en France

Dans un premier temps, notre regard s'est porté sur les retours d'expérience effectués en France, ces dernières années. En 2003, le bilan des feux de forêt est le plus lourd jamais enregistré selon la base de données Prométhée, avec 61 507 hectares parcourus pour 3 490 incendies de forêts. Cette année a marqué les esprits, et a été le moteur d'une volonté cherchant à réduire les conséquences parfois désastreuses de ces phénomènes. Une série de retours d'expérience, menée par différents organismes, a donc vu le jour. Cependant, il n'y a pas de dispositif national encadrant la réalisation des retours d'expérience. Les données collectées sont donc hétérogènes. Par ailleurs, l'exercice du retour d'expérience est lié à une approche très opérationnelle et présente alors un caractère non représentatif sur le plan statistique.

a. Retour d'expérience de la Cellule Pyroscope (Corse)

En 2001, la Corse-du-Sud s'est dotée d'une structure spécialisée d'observations et de collecte de données, dédiée à la réalisation de retours d'expérience, la cellule Pyroscope, avec pour objectif, l'analyse *a posteriori* des sinistres. La cellule comprend 11 personnes, issues de l'Office National des Forêt (ONF) et de la Direction Départementale des Territoires et de la Mer (DDTM).

En 2007, la Cellule Pyroscope a effectué un retour d'expérience sur les dégâts observés aux constructions lors des feux de Coti Chiavari et de Santa Maria di Lota en 2003, d'Ajaccio et de Sainte Lucie de Porto-Vecchio en 2006 (Cellule PYROSCOPE, 2007). L'objectif principal de leurs retours d'expérience est de synthétiser les données relevées pour faire ressortir les facteurs et leurs combinaisons qui ont abouti à la destruction partielle ou totale des constructions, et d'expliquer la cause des dommages constatés.

Pour chacun des feux cités précédemment, des fiches de relevés d'informations ont été renseignées (une fiche par construction). Ces fiches regroupent un certain nombre de données relatives au feu, à la construction (implantation, exposition et matériaux), à l'état général de ses abords, à la végétation environnante et au respect de l'arrêté préfectoral de débroussaillage en vigueur. Les retours d'expérience se concentrent sur les maisons détruites ou fortement endommagées et croisent les données à différents niveaux (Fig. 32).

Sur l'ensemble des incendies, en moyenne 5 % des maisons concernées ont été impactées, et 3 % entièrement détruites (Tab. 12). Leur travail a permis de dégager des conclusions à deux niveaux, le rôle du débroussaillage et les facteurs aggravants. Les résultats concernent les 47 constructions endommagées.

En ce qui concerne le débroussaillage, ou plutôt son absence, aucune maison détruite ne respectait l'arrêté préfectoral en vigueur (AP n°03-1438, du 28 juillet 2003). Les statistiques relevées sont les suivantes :

- 25 % des constructions détruites et 18 % des maisons fortement endommagées n'étaient pas débroussaillées ;
- 86 % des constructions détruites et 64 % des maisons fortement endommagées étaient débroussaillées à moins de 5m.

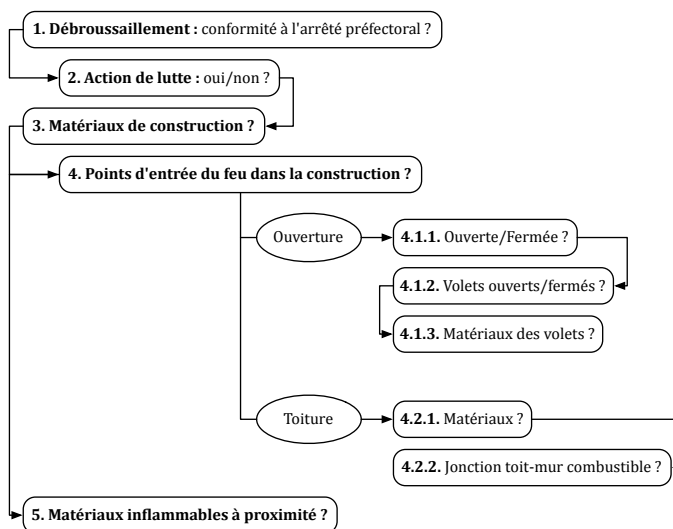


Fig. 32 : Schéma du croisement pour l'exploitation des données (Pyroscope, 2007)

Dommages observés	Incendie			Total
	Coti	Santa Maria di Lota	Ste Lucie de Porto-Vecchio	
Destruction totale	7	20	1	28
Endommagement partiel	3	16	0	19
Total	10	36	1	47
Nombre de maisons concernées	69	780	116	965
% d'endommagement	14 %	5 %	1 %	5 %

Tab. 12 : Statistiques des dommages observés lors des incendies de Coti, Santa Maria di Lota et Porto-Vecchio (Cellule Pyroscope, 2007)

Les résultats démontrent l'importance de « nettoyer » entièrement les trois premiers mètres aux abords des maisons. En effet, 98 % des constructions détruites ou endommagées présentaient de la végétation à moins de 3 m d'une ouverture. En ce qui concerne les facteurs aggravants, la cellule Pyroscope préconise de veiller à l'étanchéité de la jonction mur-toiture pour limiter l'espace à l'accumulation des particules de végétations, 23 % des constructions impactées présentaient des éléments combustibles à la jonction entre les murs et la toiture. Les matériaux inflammables (tas de bois, bouteilles de gaz...), stockés à proximité des maisons, ont participé à l'endommagement de 28 % des maisons.

À l'issu de ce retour d'expérience, l'équipe propose d'améliorer la collecte d'informations sur l'action des services de lutte, de procéder à un recueil des données sur l'ensemble des maisons concernées par l'incendie et de cibler davantage la collecte des données relatives aux facteurs aggravants.

b. *Retour d'expérience sur l'incendie de Vidauban en 2003 (Joliclerq, 2004) et d'Esparron-de-Verdon en 2005 (Reymond et Duché, 2007)*

Le premier incendie (Tab. 13) s'est étendu sur plusieurs communes, dont celles de Vidauban et Plan de la Tour. Le retour d'expérience a été réalisé en 2004 par François Joliclerq (Société E.G.A, Environnement Gestion Aménagement).

Date	Commune	Coordonnées DFCI	Surface parcourue	Nombre de bâtis touchés
28/07/2003	Vidauban	LD22H65	5 646 ha	38

Tab. 13 : Identification de l'incendie de Vidauban.

La zone étudiée se situe au niveau de la commune de Plan de la Tour, dans le département du Var. 360 maisons ont été visitées, 129 étaient situées dans la zone sinistrée. L'auteur dresse l'état du débroussaillage avant l'incendie (Tab. 14).

Distance du débroussaillage effectué	Proportion de bâtis concernés
50 m	32 %
36 - 50 m	30 %
21 - 36 m	22 %
Moins de 20 m	16 %

Tab. 14 : État du débroussaillage avant l'incendie sur l'ensemble de l'échantillon (Joliclerq, 2004).

La méthode employée diffère de la précédente, les observations sont concentrées sur les maisons et la végétation à leurs abords, trois niveaux d'impact ont été définis (Tab. 15).

Niveau d'impact	Description de la végétation	Description pour le bâti
Faible	Verte	Non touché
Moyen	Roussie	Impact sur l'extérieur
Fort	Calcinée	Impact intérieur

Tab. 15 : Typologie des impacts au niveau de la végétation et du bâtiment (Joliclerq, 2004).

Plusieurs facteurs ont été décrits, la topographie du site, les actions de lutte, le type de végétation en présence, les modes de propagation de l'incendie ainsi que l'aménagement autour des habitations. Les résultats présentés dans le retour d'expérience mettent en relation les niveaux impacts avec les caractéristiques du débroussaillage (Tab. 16).

Niveau d'impact	Distance de débroussaillage					
	< 20 m		20 - 50 m		50 m	
	Bâti	Végétation	Bâti	Végétation	Bâti	Végétation
Faible	9 %	9 %	53 %	nc	38 %	71 %
Moyen	32 %	29 %	56 %	nc	12 %	26 %
Fort	38 %	62 %	54 %	nc	8 %	3 %

Tab. 16 : Impact sur les habitations et la végétation aux abords des bâtiments en fonction du débroussaillage effectué (Joliclerq, 2004).

Sur l'ensemble des habitations visitées (comprenant toutes les habitations endommagées), 10 % ont subi des dommages intérieurs (impact fort), 19 % ont subi des dommages sur l'extérieur de l'habitation (impact moyen) et 71 % n'ont subi que des dommages périphériques à l'habitation (impact faible). Le bilan joue en faveur du

débroussaillage, 90 % des habitations débroussaillées sur 50 m n'ont pas été touchées, en revanche, 62 % de celles dont le débroussaillage n'excédait pas 20 m ont été impactées. Au niveau de la mise en relation entre l'impact sur la végétation et le débroussaillage effectué, 69 habitations débroussaillées entre 20 m et 50 m n'ont pas été analysées. Pour ces cas de figure, les données ne sont pas communiquées.

Le second retour d'expérience a été réalisé par B. Reymond en collaboration avec Y. Duché sur les années 2005 et 2006. L'étude porte sur l'incendie qui a touché les communes de Saint-Martin-de-Brômes, Esparron-de-Verdon et Quinson le 7 août 2005, et parcouru 2 013 ha (Tab. 17). L'analyse concerne 179 propriétés bâties (dont 4 campings) situées à l'intérieur ou à proximité immédiate du feu. Le recueil des données a été réalisé par quartiers, en décrivant les paramètres relatifs à la situation géographique et au respect des obligations légales de débroussaillage. B. Reymond et Y. Duché disposaient de l'état du débroussaillage effectif, avant incendie. De plus, ils ont analysés les facteurs influençant localement la puissance du front de flammes.

Date	Commune	Coordonnées DFCI	Surface parcourue	Nombre de bâtis touchés
07/08/2005	Esparron-de-Verdon	KD86G3	2 013 ha	86

Tab. 17 : Identification de l'incendie d'Esparron-de-Verdon.

Une échelle de dommage a été définie selon cinq niveaux :

1. Pas de dégâts (hormis la végétation)
2. Dégâts matériels périphériques (matériel de jardin, aménagement extérieur...)
3. Dégâts à une installation périphérique à l'habitation (abris de jardin, abris de voiture, hangar...)
4. Habitation touchée extérieurement (volets brûlés, toitures endommagées, gouttières fondues, façade fissurée...)
5. Habitation touchée intérieurement (habitation partiellement ou totalement détruite)

Au total, 48 % des habitations ont été endommagées (Tab. 18), 45 % présentaient un débroussaillage insuffisant. La seule habitation non débroussaillée a été détruite.

Échelle de dommages	Débroussaillage		
	Non réalisé	Incomplet	Réalisé
Niveau 1	-	32	61
Niveau 2	-	9	15
Niveau 3	-	20	13
Niveau 4	-	15	8
Niveau 5	1	3	2

Tab. 18 : Bilan des niveaux de dommages perpétrés sur l'ensemble des 179 propriétés bâties, en fonction de l'état du débroussaillage (Reymond et Duché, 2007)

Une soixantaine d'installations légères ont été détruites pendant l'incendie. Elles présentaient souvent une mauvaise étanchéité à l'air, et donc aux brandons. Les matériaux qui les composent sont souvent très combustibles et peuvent créer des foyers très violents « contaminant » les habitations environnantes. D'après les conclusions du retour d'expérience, les toitures qui n'étaient pas suffisamment étanches et présentaient des défauts d'entretien ont favorisé l'endommagement par les projections de brandons.

Ce problème d'étanchéité des toitures mais aussi des constructions dans leur ensemble est particulièrement prégnant pour les bâtis traditionnels dont les annexes (granges, remises, greniers...) offrent de multiples points d'entrée au feu. En l'absence de lutte ou d'auto-défense (habitants évacués, propriétaires absents), les flammes ont alors contaminé l'ensemble des bâtiments adjacents. On a pu observer ainsi la destruction d'une ferme et de ses annexes alors même qu'elle était située en bordure du massif forestier.

De nombreux dégâts n'ont pas été causés directement par la combustion de la forêt environnant l'habitation mais par l'incendie d'une réserve de combustible (tas de bois, citerne de gaz...), des haies ou encore par la présence d'aiguilles de pins sur la toiture.

Ces retours d'expérience ont permis de mettre en évidence des critères limitant ou aggravant les dommages sur les habitations :

- La répartition spatiale des habitations pose problème lorsque qu'elles sont dispersées ;
- La réduction de la charge en combustible, par le respect du débroussaillage, permet la réduction de l'intensité du front de feu, et facilite l'action des pompiers ;
- Les habitations situées à l'abri du vent dominant ont subi moins de dommages ;
- Les flammes peuvent se propager par tous les couloirs boisés, en particulier les haies au sein des zones urbaines ou en zone agricole ;
- On constate qu'une profondeur du débroussaillage de 50 m est insuffisante sous l'effet combiné d'une exposition au vent dominant et d'une pente ascendante, ou dans certaines conditions topographiques particulières (versants, crêtes).
- La lutte s'avère limitée lorsque les habitations sont peu ou pas accessibles, du fait des largeurs d'accès.
- La lutte nécessite l'emploi de points d'eau normalisés proches des habitations, accessibles et visibles.

En plus du débroussaillage et des conditions de lutte, les retours d'expériences laissent supposer que d'autres critères ont une influence sur l'endommagement des habitations :

- Les installations légères (cabanons, annexes) présentent souvent une inflammabilité et une combustibilité importantes qui contaminent les habitations voisines ;
- De même la qualité des gouttières doit leur permettre de résister aux flammes ;
- Les volets doivent également résister à la chaleur : en cas de déformation, combustion ou rupture, ils permettent au feu d'entrer dans la maison ;
- L'étanchéité à l'air des toitures est particulièrement importante pour éviter l'intrusion de brandons ;
- L'habitat traditionnel comporte souvent des points facilitant l'entrée des flammes : poutres apparentes, toitures peu étanches, portes de granges absentes ou ajourées ou stockage de matières très inflammables (paille, foin, engrais...) ;
- Les matières plastiques résistent mal à la chaleur dégagée par le feu. Elles se déforment ou s'enflamment, créant des foyers violents. Les métaux subissent également des déformations importantes sous l'effet de la chaleur. Le bois plein offre lui une certaine résistance structurelle, tant qu'il brûle superficiellement ;
- L'inflammation des stockages de combustible (bouteille de gaz, tas de bois...) à proximité des habitations entraîne des dégâts majeurs. De la même manière, les végétaux d'ornements employés dans les jardins sous forme de haies ou de bosquets

sont parfois à l'origine de flammes conséquentes. Dès lors, leur proximité avec les bâtiments provoque de graves dégâts directement (contact direct avec les flammes) ou indirectement (rayonnement et projections).

Les dégâts enregistrés sur des habitations, pourtant bien débroussaillées, sont souvent dus à de multiples facteurs qui peuvent se combiner. Ceux-ci concernent la position topographique de l'habitation, l'équipement du quartier, la conception de la construction et de ses abords. De fait, il est impératif de prendre en compte tous ces éléments lors de l'élaboration de mesures de prévention et de sauvegarde.

c. Centre d'Essais et de Recherche de l'Entente (CEREN) pour la forêt méditerranéenne

En 2005, à la demande du Ministère de l'Écologie et du Développement Durable, une étude sur la dangerosité de la périurbanisation à l'intérieur des massifs forestiers a été réalisée, par le CEREN (CEREN, 2005). Celle-ci a donné lieu à plusieurs retours d'expérience sur les feux significatifs des années 2002, 2003, 2004 et 2005 (Tab. 19).

Année	Commune	Surface (ha)	Nombre de bâtis étudiés	Nombre de bâtis endommagés
2002	Pierrevert	617	2	2
	Saint Julien	230	1	1 maison et 2 bergeries
	Les Pennes Mirabeau	120	6	nc
	Ensuès	56	8	nc
2003	Vidauban (Enquête sur Plan de la Tour)	6744	8	3
	Lambesc	480	7	7
	Carry le Rouet	15	5	nc
2004	Le Rove (Enquête sur La Nerthe)	476	1	1 maison et des bergeries
	Velaux	1931	13	1
	Le Beausset	6	1	3
	Esparron	2000	2	2
2005	Aix-en-Provence	520	4	3 maisons et 2 garages
	Gardanne	9,6	2	1 maison et 2 abris de jardin

Tab. 19 : Récapitulatif des incendies et des infrastructures étudiés (CEREN, 2005)

Les paramètres étudiés sont nombreux :

- Type de structure touchée (maison, cabanon, usine, chenil...) et niveaux des dommages sur les structures et leur environnement ;
- Éléments aggravants (citernes, matériau en PVC) et limitants, présence ou absence d'actions de lutte ;
- Conditions de la maison au moment de l'arrivée du feu (présence d'habitants, fenêtres ouvertes) ;
- Mode de propagation du feu, distance entre la source de chaleur et la cible, nature des matériaux endommagés, végétation environnante (hauteur et densité) et source de chaleur à l'origine des dégâts ;

La synthèse des principaux résultats est présentée sous forme d'un tableau, présentant les éléments favorables et défavorables à la défense des infrastructures contre l'incendie (Tab. 20). Ces éléments font références à la lutte, aux caractéristiques physiques des habitations, à l'aménagement de leur environnement proche (équipements), aux caractéristiques de la végétation (débroussaillage, rôle des haies...) ainsi qu'aux comportements et connaissances des résidents.

Eléments défavorables	Eléments favorables
Secours	
<ul style="list-style-type: none"> Mauvais guidage des secours extra départementaux. 	<ul style="list-style-type: none"> Rapidité d'intervention des secours. Moyens de lutte présents (aérien et au sol). Propriétaire participant à la lutte.
Localisation des infrastructures	
<ul style="list-style-type: none"> Présence de points sensibles (raffinerie). Présence de nombreuses lignes électriques. Topographie. Mauvais accès aux maisons menacées. 	<ul style="list-style-type: none"> Absence d'autres sinistres. Présence d'une zone agricole. Nombreuses pistes d'accès au massif. Ensemble groupé de maisons.
Végétation proche des infrastructures	
<ul style="list-style-type: none"> Entretien médiocre des massifs forestiers. Zone non débroussaillée. Terrain voisin non débroussaillé. Débris du débroussaillage non évacués. Présence de haies. Clôture végétale (canisse). Pins ou résineux trop proches des maisons. 	<ul style="list-style-type: none"> Zone proche de la maison débroussaillée Distance de sécurité entre la maison et la végétation. Pas de continuité verticale entre les strates de végétation.
Environnement des infrastructures	
<ul style="list-style-type: none"> Peu ou pas de moyens de protection. Absence de clôture et/ou présence de clôture végétale. Stockage de matériaux (bois contre la maison, fenêtre, etc.). Produits inflammables stockés dans le garage ou à l'extérieur de la maison. Voiture ou autres véhicules à proximité de la maison. Citerne. Mobilier de jardin en PVC. Lampadaire mural en PVC. Porte de garage en PVC. 	<ul style="list-style-type: none"> Equipements de protection (asperseur d'eau). Présence de piscine (point d'eau). Mur de clôture (de plus de 2m de haut : les cimes des grands arbres ont été brunies, mais les dégâts sont moindres).
Description de l'infrastructure	
<ul style="list-style-type: none"> Inadéquation des matériaux de construction : <ul style="list-style-type: none"> store en PVC ; gouttières non nettoyées ; simple vitrage ; poutres apparentes en bois. Aménagements inappropriés : <ul style="list-style-type: none"> store en tissu ou en « canisse » ; moustiquaires aux fenêtres ; absence de volets. 	<ul style="list-style-type: none"> Matériaux de construction adaptés : <ul style="list-style-type: none"> volets en bois massif ; pas de PVC ; gouttières métalliques ; génoise (protège les chevrons apparents) ; double vitrage.
Facteur humain	
<ul style="list-style-type: none"> Mauvaises connaissances des habitants. Règles de sécurité inconnues : <ul style="list-style-type: none"> fuite des habitants ; propriétaires rejoignant leur maison. Portail automatique (lors de l'absence du propriétaire, la maison reste inaccessible aux moyens de secours). 	<ul style="list-style-type: none"> « Habitudes responsables » des habitants : <ul style="list-style-type: none"> ferment les volets ; ferment les fenêtres ; éloignent la voiture de la maison ; ferment le gaz et l'électricité ; ouvrent le portail de la maison.

Tab. 20 : Synthèse des éléments favorables et défavorables à la défense des infrastructures contre l'incendie (CEREN, 2005).

d. Retour d'expérience sur les incendies de forêt du 30 août 2010 en Hérault (DDTM 34)

En 2011, le Service Agriculture Forêt et Gestion Espace Naturel (SAFEN), de la Direction Départementale des Territoires et de la Mer de l'Hérault (DDTM 34) ainsi que l'ONF, furent à l'initiative d'un retour d'expérience sur les grands incendies qui ont impacté le territoire héraultais le 30 août 2010 (Tab. 21). En l'espace d'une journée, environ 3 000 ha ont brûlés soit plus de la moitié du bilan annuel de la région méditerranéenne française 2010. Le feu de Fontanés représente à lui seul 2 544 ha, c'est le plus gros feu de forêt connu dans l'Hérault depuis la création de la base Prométhée. Du fait de la concomitance et de la puissance des incendies, un nombre très important de sapeurs-pompiers a été mobilisé. De nombreuses régions ont participées à la lutte (Languedoc-Roussillon, PACA, Auvergne, Rhône-Alpes, Midi-Pyrénées, Ile-de-France...).

Le retour d'expérience se présente sous la forme d'un diaporama. Il présente un par un les incendies, leur déroulement ainsi que leurs conséquences. Le document se veut très explicite et pédagogique. En effet, la description des incendies est détaillée à l'aide de nombreuses photographies prises pendant leur déroulement.

Date	Commune	Coordonnées DFCI	Surface parcourue	Personnel de lutte
30/08/2010	Fontanés	HD26E4	2 544 ha	1000 sapeurs-pompiers 200 véhicules
	Villeveyrac	GD82L5	407 ha	400 sapeurs-pompiers 80 véhicules

Tab. 21 : Identification des incendies de forêt du 30 août 2010 de l'Hérault (source Prométhée)

Le premier incendie étudié est celui de Villeveyrac. Le feu, d'origine involontaire (travaux agricoles) a éclaté sur la commune de Villeveyrac, puis s'est étendu sur le territoire de deux autres communes (Montagnac et Mèze), impactant majoritairement la commune de Mèze (323 ha). La particularité de cet incendie tient au fait que seulement 35 % de sa surface étaient situés en zone forestière. Après avoir traversé une succession de pinèdes et de cultures de céréales, il a sauté l'autoroute A9, et a été stoppé au milieu des habitations de la ville de Mèze, où il se propageait au milieu des friches agricoles, le long des fossés ou par les haies.

Le protocole utilisé pour le retour d'expérience, sur les deux incendies, est celui de l'ONF. 181 propriétés bâties ont été étudiées (Tab. 22). Le recensement des dommages occasionnés s'organise autour de cinq catégories.

Type de constructions	Quantité	Pas de dommage	Dommages Périphériques	Dommages Dépendances	Dommages Enveloppes	Dommages Intérieurs
Habitation résidentielle	118	59	57	8	6	2
Mazet urbain	25	2	21	1	13	12
Mazet agricole	16	2	12	1	6	4
Hangar	22	13	4	1	7	5
Total	181	76	94	11	32	23

Tab. 22 : Types de dommages recensés par types de constructions pour l'incendie de Villeveyrac (source DDTM 34)

Le second incendie étudié est celui de Fontanés. D'origine malveillante, le feu s'est étendu sur le territoire de huit autres communes. Dès son départ dans une zone de pinède à pin d'Alep (*Pinus halepensis*), cet incendie a été très puissant et a généré des sautes de feu

considérables (jusqu'à 1 km). Il a parcouru les mêmes surfaces que l'incendie du 27 avril 1989, qui avait brûlé 1835 ha. Les villages de Guzargues et Saint-Bauzille de Montmel ont été encerclés par le feu, et particulièrement impactés. 155 propriétés bâties ont été étudiées (Tab. 23). Cet échantillon comprend tous les bâtis compris dans l'enveloppe du feu, ainsi que tous ceux ayant été endommagés.

Le retour d'expérience a soulevé divers facteurs favorisant l'endommagement :

- En absence de débroussaillage, le feu arrive proche des habitations avec virulence.
- L'accumulation de matériaux combustibles et l'absence d'entretien des propriétés permettent à l'incendie, par l'action combiné du rayonnement thermique et des projections de brandons, de créer des foyers très violents à proximité des habitations.
- Les défauts des constructions (volets trop fins, charpente apparente) créent des points de vulnérabilité au niveau des infrastructures et favorisent l'endommagement de l'enveloppe externe des habitations, si ce n'est des dommages à l'intérieur provoquant la destruction des habitations.

Suite à cette sombre journée, le préfet demanda l'élaboration d'un plan d'action pour chacune des 11 communes concernées par les incendies. Il appella les communes à renforcer les actions de prévention par trois types de mesures :

- Non réglementaires : elles renvoient à la sensibilisation des populations, la formation et l'information des élus, l'élaboration d'outils de prévention (Plan Communal de Sauvegarde, Comité Communal Feux de Forêt), ainsi qu'un appel au renforcement des coupures de combustibles.
- Réglementaires : il semble indispensable de renforcer les contrôles relatifs au débroussaillage obligatoire, aux constructions en zone à risque et à la prise en compte du risque lors de la révision des documents d'urbanisme (notamment dans les interfaces habitat-forêt).
- Immédiates et curatives : il est demandé d'interdire la chasse sur les secteurs les plus touchés, de nettoyer les zones incendiées dans les secteurs ayant un enjeu paysager, et d'inventorier les dégâts forestiers et ceux sur les constructions.

Type de constructions	Quantité	Pas de dommage	Dommages Périphériques	Dommages Dépendances	Dommages Enveloppes	Dommages Intérieurs
Habitation résidentielle	127	118	25	9	2	4
Mazet urbain	2	1	1	0	0	0
Mazet agricole	17	14	3	1	1	1
Hangar	9	8	1	0	0	0
Total	155	141	30	10	3	5

Tab. 23 : Types de dommages recensés par types de constructions pour l'incendie de Fontanés (source DDTM 34)

4.1.2. Les retours d'expérience en Australie

Au cours des 70 dernières années, plus de 7 400 maisons et 290 personnes ont péri dans des incendies de forêt (« bushfire ») (Tab. 24), en Australie (Leonard and McArthur, 1999 ; Ellis *et al.*, 2004 ; cités dans Blanchi, 2006). Ces pertes semblaient inévitables avant 1944, mais l'arrivée d'enquêtes après incendie et de retours d'expérience ont induit une amélioration des connaissances sur les mécanismes d'attaque du feu causant la destruction des maisons, ainsi que sur la vulnérabilité des interfaces urbaines (Leonard and McArthur,

1999). Ces retours d'expérience sont devenus systématiques après les grands incendies de 1983 (Blanchi *et al.*, 2006), qui ont ravagé plus de 1 500 maisons dans le sud-est australien.

En Australie, les retours d'expérience sont principalement l'œuvre du *Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO). Les recherches qui y sont menées s'attachent à répondre à la problématique des incendies de forêt par l'amélioration de leur compréhension, l'amélioration des technologies et des stratégies au service des biens et des personnes.

Date	Localisation	Pertes humaines	Maisons détruites
13/01/1939	Victoria	71	1300
01/01/1944	Victoria	20	927
02/12/1957	New South Wales	4	123
16/01/1962	Victoria	8	454
07/02/1967	Tasmania	62	1293
28/11/1968	New South Wales	14	120
08/01/1969	Victoria	23	230
12/02/1977	Victoria	8	116
16/02/1983	Victoria	47	1511
16/02/1983	South Australia	28	383
14/01/1985	Victoria	5	180
08/01/1994	New South Wales	4	202
25/12/2001	New South Wales	-	121
18/01/2003	ACT	4	519

Tab. 24 : Les incendies de forêt en Australie impliquant des pertes considérables (humaines et matérielles) depuis 1939 (Leonard, 1999 ; Ellis, 2004 ; Blanchi *et al.*, 2006)

Nous présentons une synthèse de trois retours d'expérience menés par les équipes du CSIRO sur les incendies d'Otway, « *Ash Wednesday fires* », en 1983 (Ramsey, 1985 ; Ramsey *et al.*, 1987), de Sydney en 1994 (Ramsey and McArthur, 1995) et de Canberra en 2003 (Leonard and Blanchi, 2005) (Tab. 25). Cette synthèse s'inspire très largement de la présentation faite par R. Blanchi lors de la cinquième Conférence Internationale sur la Recherche sur les Incendies de Forêt du 27 au 30 Novembre 2006, à Coimbra (Blanchi *et al.*, 2006).

Incendie	Conditions météorologiques	Dommages	Maisons enquêtées
Otway 1983	Température : 40 °C	75 morts 2000 maisons détruites 290 000 ha brûlés	1153 dans la zone d'Otway (Victoria)
	Humidité relative : 15 %		
	Vitesse du vent : 55 km/h		
	Indice de danger météo : 102		
Sydney 1994	Température : 35 °C	202 maisons détruites 600 000 ha brûlés	491 dans la zone Lane Cove
	Humidité relative : 9 %		
	Vitesse du vent : 45 km/h		
	Indice de danger météo : 88		
Canberra 2003	Température : 32 °C	4 morts 519 maisons détruites 160 000 ha brûlés	226 dans la banlieue Duffy
	Humidité relative : 5 %		
	Vitesse du vent : 52 km/h		
	Indice de danger météo : 103		

Tab. 25 : Présentation des incendies de forêt ayant menés à des retours d'expérience par le CSIRO (Blanchi *et al.*, 2006)

Au total, 1870 habitations ont été enquêtées sur l'ensemble des trois incendies. 846 ont été endommagées ou détruites. Chaque retour d'expérience utilise une approche commune, la démarche favorise l'harmonisation des données afin d'assurer la validité de l'analyse

statistique. Cette analyse se concentre sur les propriétés des constructions en vue de quantifier une probabilité de dommages. Les choix pour la sélection des sites d'étude différaient selon les incendies. Pour l'incendie d'Otway, les données sont collectées sur le terrain, au niveau des habitations comprises dans le périmètre des incendies. La priorité est faite sur les zones affectées où la propagation de l'incendie était uniforme (Ramsay, 1985). Pour l'enquête menée sur l'incendie de Sydney, les maisons étudiées sont celles dont le périmètre de la propriété a été atteint par le front de feu, indépendamment des dommages générés. La propagation de l'incendie, sur les zones affectées, était très hétérogène du fait de la complexité topographique et des habitations implantées. Enfin, en ce qui concerne l'incendie de Canberra, seules les zones présentant les plus lourdes pertes ont été sélectionnées. Les données collectées sont identiques pour les trois incendies et se focalisent sur quatre points :

- Les mécanismes d'endommagement : l'attaque directe par la flamme, l'attaque par les brandons et celle par le rayonnement thermique ;
- L'influence des matériaux et de la conception des habitations ;
- L'influence de l'environnement proche des habitations ;
- L'influence des comportements avant, pendant et après le passage de l'incendie.

Les équipes du CSIRO ont utilisé une échelle de valeurs qualitatives, construite sur 6 niveaux, pour caractériser la sévérité des dommages (Tab. 26). Les maisons non détruites se sont révélées très intéressantes, elles permettent une meilleure caractérisation des mécanismes d'impact.

Niveau de dommages	Otway	Sydney	Canberra
Épargné	254	175	41
Très faible	184	129	59
Faible	81	44	20
Modéré	12	10	0
Lourd	0	14	0
Détruit	621	119	106
Total	1153	491	226

Tab. 26 : Sévérité des dommages observés sur les habitations (Blanchi *et al.*, 2006)

Les niveaux de l'échelle de sévérité sont définis de la façon suivante :

- Épargné : les impacts ne sont pas générés par l'incendie (l'impact dû aux fumées correspond à cette catégorie) ;
- Très faible : dommages ne nécessitant aucuns travaux (léger noircissement des façades, décolorations...) ;
- Faible : dommages nécessitant des travaux (vitres cassées, encadrement des fenêtres brûlés, combustions localisées sur l'habitation...) ;
- Modéré : combustion de plus grande envergure, les flammes sont rentrées dans le bâtiment (majorité des fenêtres brisée, larges parties de la façade impactées...) ;
- Lourd : les flammes sont entrées dans la maison et ont englouti au moins une pièce, ou, combustion de la façade suffisamment forte pour compromettre l'intégrité de la maison ;
- Détruit : plus de 50 % de la maison est brûlé, maison inoccupable.

a. Les principaux mécanismes d'endommagement observés

Au cours des enquêtes, trois mécanismes d'endommagement ont été identifiés : le contact direct avec les flammes, le rayonnement thermique et les projections de particules incandescentes.

Les projections de brandons apparaissent être le principal mécanisme de destruction des maisons, pour l'incendie d'Otway. L'identification de ce mécanisme repose sur l'expertise des scientifiques impliqués dans les enquêtes (Ramsey *et al.*, 1987 cité dans Blanchi *et al.*, 2006).

Pour l'incendie de Sydney, l'identification des mécanismes découle de témoins oculaires et des enquêtes menées sur les maisons ayant survécu à l'incendie. Le nombre important de maisons étudiées assure le traitement statistique des données. Sur les 68 habitations classées entre une intensité faible et forte, de dommages, 76 % d'entre elles ont été impactées par l'attaque de brandons. L'action combinée des brandons et de l'inflammation des éléments bordant les maisons est perçue comme la source principale de l'endommagement des 26 % restants (Ramsey *et al.*, 1995 cité dans Blanchi *et al.*, 2006).

Plus de 90% des maisons affectées lors de l'incendie de Canberra, l'ont été par les projections de brandons uniquement, et la combinaison des projections avec le rayonnement thermique. Le rayonnement thermique, induit par la combustion d'éléments périphériques, génère l'inflammation des maisons, à défaut, il provoque des brèches favorisant l'action des brandons. Une synergie opère entre ces deux mécanismes. Les nombreuses vitres brisées sont essentiellement dues au rayonnement thermique issu de la combustion de végétation ornementale.

Un effet domino a été identifié. Une fois une maison en feu, celle-ci génère un très fort rayonnement, projette de nombreuses particules incandescentes et crée d'importantes flammes, ce qui provoque l'inflammation des habitations environnantes. Au cours de l'incendie de Canberra, environ 35 maisons ont subi cet effet, soit 16 % de l'échantillon.

Les trois retours d'expérience s'accordent sur l'impact prépondérant des projections de brandons et sur leurs interactions avec les éléments combustibles aux abords des maisons. Le contact direct avec le front de flamme et son effet radiatif jouent un rôle minoritaire (le feu n'approche pas suffisamment près des maisons). Pour l'ensemble des attaques par projections de brandons sur la première ligne de maisons, la réduction de la biomasse combustible, par collecte du bois ou création de routes d'accès, fût suffisante pour réduire l'intensité des flammes.

b. Influence des matériaux et de la conception des habitations sur leur vulnérabilité

En ce qui concerne les propriétés des constructions et de leur environnement proche, les enquêtes se sont concentrées sur les matériaux de revêtements du sol, des murs de façade, les ouvertures (portes et fenêtres), les toitures afin de vérifier si leur résistance aux différents mécanismes précités a eu une influence sur la destruction des habitations. L'objectif était de déterminer les points faibles qui rendent l'habitation vulnérable.

La vulnérabilité des matériaux dépend de leur propension à faciliter le développement local des flammes. Les toitures aux profils complexes favorisent à la fois l'accumulation de combustible et celle des brandons. De plus, les avant-toits ou les aérations non protégées sont d'excellents points d'entrée pour les brandons.

Les résultats des trois enquêtes montrent que les terrasses en bois ont été les principaux éléments à s'enflammer du fait de l'accumulation des brandons, suivis des avant-toits, des

gouttières et des encadrements de fenêtres. Les espaces d'air autour des portes et des fenêtres sont des points d'entrée et d'accumulation des brandons.

Les vitres sans protections, sont très sensibles aux effets radiatifs induits par le front de flammes ou la combustion d'éléments environnants (végétation, abris en bois, véhicule...).

c. *Influence d'équipements aux abords des maisons*

L'environnement des habitations est un point clé. Les éléments (murs, abris, végétation...) ont une double influence, ils jouent à la fois un rôle de protection contre le rayonnement thermique, et de vulnérabilisation une fois enflammés.

Les trois incendies ont permis d'identifier une corrélation entre la présence d'arbres à proximité des structures et la propension à la destruction des maisons. La présence des strates herbacées et arbustives n'apporte pas les mêmes conclusions. Les résultats montrent une augmentation de la probabilité de perte quand les arbres et les arbustes sont adjacents aux constructions, et une diminution lorsqu'aucune végétation n'est présente. La végétation en surplomb des toitures induit une forte accumulation de particules végétales qui augmente le risque d'endommagement. Dans certains cas, les arbres brûlent de façon très violente, même si ils sont isolés, particulièrement les cyprès. De plus, les haies ont favorisé la progression de l'incendie à l'intérieur des zones urbanisées.

Les structures secondaires (garage ou abris de jardin) provoquent de lourds dommages en fonction de leurs matériaux et de leur distance à la maison. Les résultats montrent que ces éléments sont plus facilement endommagés que la construction principale. Ils présentent plus de faiblesses (ouverture) et sont donc susceptibles de s'enflammer. Ils deviennent alors une source de danger pour les habitations.

Les enquêtes ont aussi évalué l'influence des différents types de clôtures (bois, mur, acier...). Les clôtures en bois favorisent la propagation du feu dans les jardins alors que les clôtures incombustibles font effet d'écran.

d. *L'importance des comportements avant, pendant et après le passage de l'incendie*

La politique australienne en matière de gestion de crise recommande aux occupants ou propriétaires de rester pour participer à la défense de leur habitation ou d'évacuer bien avant l'arrivée du front de flammes : « *Prepare, stay and defend or leave early* » (Haynes *et al.*, 2010). Leurs interventions permettent d'éteindre les départs de feux autour du bâtiment avant qu'ils ne deviennent incontrôlables. Toutefois l'intervention efficace des occupants dépend de leur capacité physique, leur connaissance de l'incendie de forêt et leur comportement avant, pendant et après le passage du feu. Couplée aux efforts des services de lutte, l'action des personnes améliore grandement les chances de survie de la maison.

Cette combinaison d'efforts s'est révélée salvatrice dans les trois enquêtes (Fig. 33). Elle est considérée comme le facteur principal qui influence le risque de pertes. Cependant, cette information est nuancée par le faible nombre d'informations sur l'action des occupants pour les maisons détruites.



Fig. 33 : Influence des activités de luttes avant et après le passage du feu, sur les dommages occasionnés aux constructions, synthèse des trois enquêtes (Blanchi *et al.*, 2006)

e. Quels apprentissages ?

En Australie, les projections de brandons représentent le principal mécanisme d'endommagement lors des incendies. Ce mécanisme requiert la plus grande attention en ce qui concerne l'aménagement des interfaces habitat-forêt. Les brandons n'épargnent aucun des éléments des structures ou de leur environnement. C'est sans surprise que le comportement des personnes et des services de lutte ont la plus grande influence sur la survie des habitations, étant donné que 90 % des maisons sont détruites alors même qu'elles ne sont pas atteintes par les flammes ou le rayonnement résultant de la combustion de la forêt, mais seulement par des bandons.

Ces retours d'expérience sont utiles pour déceler les points faibles et/ou forts des propriétés, et doivent permettre de mettre en oeuvre des mesures pour la réduction de la vulnérabilité des habitations. Les enseignements tirés des enquêtes après feux peuvent être directement utilisés pour développer des modèles d'évaluation du risque, pour informer les décideurs impliqués dans la gestion du risque (planification et prévention) et les politiques publiques d'urbanisme, d'aménagement du territoire et pour l'information des populations.

4.1.3. Les retours d'expérience aux États-Unis

Les pertes d'habitations résidentielles, liées au passage des incendies de forêt, ont commencé à mobiliser l'attention des américains au cours de l'année 1985, où 1 400 maisons ont été détruites (Cohen, 1995). Cet événement a soulevé une question critique, celle des incendies de forêt à « l'interface habitat-forêt » (*Wildland-Urban Interface*), lors de la conférence *Wildfire Strikes Home* en 1986 (Laughlin et Page, 1987). Aux États-Unis, les incendies de forêt font des ravages dans les interfaces habitat-forêt (Tab. 27), au total, environ 12 686 maisons ont été perdues sur la période 1990-2007 (Cohen, 2008).

Année	Incident	Localisation	Maisons détruites
1990	Painted Cave	Santa Barbara, CA	479
1991	Spokane « Firestrom »	Spokane, WA	108
	Tunnel/Oakland	Oakland, CA	2900
1993	OldTopanga	Laguna and Malibu, CA	634
1996	Millers Reach	Big Lake, AK	344
1998	Florida Fires	Flagler and Volusia counties, FL	300
2000	Cerro Grande	Los Alamos, NM	235
2002	Hayman	Lake George, CO	132
	Rodeo-Chediski	Herber-Overgaard, AZ	426

2003	Aspen Old, Cedar, etc.	Summerhaven, AZ Southern CA	340 3640
2006	Texas-Oklahoma Fires	Texas and Oklahoma	723
2007	Angora Witch, Slid, Grass Valley, etc.	Lake Tahoe, CA Southern CA	245 2180

Tab. 27 : Les sinistres causés en interface habitat-forêt lors des incendies de forêt sur la période 1990 -2007 (Cohen, 2008)

À l'occasion de l'incendie de Los Alamos (*Cerro Grande Fire* – Mai 2000), J. Cohen effectua une enquête sur les conditions d'endommagement des maisons (Cohen, 2000). Environ 235 habitations ont été détruites ou irrémédiablement endommagées par le front principal de l'incendie, dans la nuit du 10 au 11 mai 2000. Bien que les actions de lutte aient permis de sauver quelques maisons, la grande inflammabilité de la plupart des zones résidentielles a engendré de nombreux incendies de maisons, simultanés, entraînant la désorganisation des forces de lutte. Le feu présente un comportement hétérogène :

- Il s'est propagé en cimes sur la majorité des surfaces brûlées. Il était alors très intense ;
- Arrivé au niveau de l'aire résidentielle, le feu se propage en surface, à faible intensité. Les houppiers des arbres ont été roussis, mais non consumés, à l'inverse des maisons avoisinantes totalement détruites.

J. Cohen (2000) tire plusieurs conclusions :

- Dans certaines zones, où les maisons étaient proches les unes des autres, le feu s'est propagé de structure en structure, du fait de leur grande inflammabilité. Cet effet domino est la cause première des dommages observés sur les houppiers avoisinants.
- Les maisons étaient exposées à un feu de surface, sans grande envergure. Cependant l'abondance et l'omniprésence des aiguilles de pin, des feuilles mortes, des arbustes inflammables, des tas de bois, etc. adjacents à, touchant, ou couvrant les maisons ont principalement contribué à leur perte.
- Les projections de brandons sont à la source de la propagation dans les zones habitées. Une végétation continue de Pin ponderosa se mélangeait aux habitations. Les aiguilles étaient abondantes au sol comme sur les toitures et dans les gouttières. Cette litière de pins très inflammable contribue alors aux multiples départs suite aux projections, y compris dans les zones protégées par des routes.
- L'examen des habitations endommagées, mais non détruites, démontre qu'un feu de surface de faible intensité reste une menace, capable d'atteindre les maisons et d'enflammer leur bardage en bois. L'aménagement aux abords des maisons et les matériaux de constructions sont des facteurs déterminants à la survie de la maison.

La survie d'une habitation résidentielle lors d'un incendie en interface habitat-forêt peut être examinée au regard de sa sensibilité, qui se définit par sa résistance à l'incendie (propriété physique) ; son exposition, ou la susceptibilité de son environnement à influencer la propagation et l'intensité du feu ; la capacité de réponse des services de lutte et des particuliers, qui prend en compte l'accessibilité, les équipements et la préparation des personnes (Cohen, 1991).

4.1.4. Bilan

Le fruit de l'analyse des retours d'expérience après incendie est riche en enseignement et invite à adopter une conduite de bon sens en matière de développement des interfaces

habitat-forêt. Les mesures permettant d'évaluer la vulnérabilité des interfaces sont à la fois collectives et individuelles.

a. Actions collectives

Concernant le milieu naturel, des recommandations dans les interfaces sont formulées pour la réduction du combustible (Conard *et al.*, 2001). En France, l'enlèvement de la végétation est rendu obligatoire pour les collectivités à travers la loi d'orientation forestière du 11 juillet 2001 qui impose l'obligation de débroussailler autour des bâtiments dans un rayon de 50 m (parfois 100 m) et 10 m de part et d'autre des routes (parfois 20 m) situés à moins de 200 m d'un massif boisé et garrigues. Les recherches pour une gestion adaptée du combustible (comme des éclaircies ou des coupes), afin d'éviter que la biomasse ne s'accumule, sont reconnues comme des plus prometteuses pour maîtriser les feux de forêts et les dommages occasionnés dans les interfaces (Kalabokidis et Omi, 1998).

Concernant le milieu anthropique (zones d'habitation), l'habitat groupé est à promouvoir de façon préférentielle. La lutte contre l'incendie est d'autant plus difficile que les habitations sont dispersées, les dégâts qu'elles subissent s'en ressentent. Certaines situations topographiques (vallons, crêtes, hauts de pente) sont à éviter. L'intensité du feu s'accroît dans les vallons exposés au vent. Les habitations exposées à de fortes puissances de front de feu sont plus touchées que celles qui sont abritées. Par ailleurs, les feux peuvent devenir explosifs sur les flancs ou en bordure de vallons. La lutte s'avère risquée ou impossible lorsque les habitations sont peu ou pas accessibles. Il est impératif que les accès soient sécurisés : largeur de voie, débroussaillage latéral, présence d'aires de croisement et de retournement. La lutte nécessite l'emploi de points d'eau normalisés (débit, pression, débroussaillage), accessibles et visibles.

b. Actions individuelles

La maison constitue pour l'habitant un rempart de protection contre l'incendie. Elle doit donc bénéficier d'un maximum d'attention de manière à revêtir le rôle d'« *une structure qui ne s'enflamme pas, ne brûle pas, en dépit de ce qui se passe autour* » (Nowicki, 2002).

Pour en percevoir tout l'intérêt, il est important de rappeler les trois mécanismes d'attaque des incendies de forêt, sources de l'endommagement des habitations :

- (1) les flammes peuvent générer un flux de chaleur radiative suffisant pour enflammer la façade d'une maison, sans entrer en contact direct avec la maison ;
- (2) les flammes peuvent atteindre la maison par le biais de la végétation environnante, ou d'éléments inflammables à proximité ;
- (3) les brandons projetés en avant d'un front de flammes peuvent être transportés par le vent et tomber sur, ou à l'intérieur d'une maison ;

Concernant la végétation combustible autour du bâti, sa réduction apparaît comme une action efficace de prévention contre l'incendie (Winter et Fried, 2002). En interface, les habitations sont généralement entourées par de la végétation naturelle, d'ornement, des haies qui facilitent la propagation du feu à leurs abords. Une grande proportion de maisons brûle durant un feu de forêt, non pas du fait d'un feu de cime, mais du fait d'un feu de surface de faible intensité (Cohen, 2001). Les résultats des recherches de J.D. Cohen (2003) confirment que les feux de surface détruisent plus de maisons que l'effet direct des feux de cime de forte intensité. Des recommandations en termes de débroussaillage sont donc préconisées dans le voisinage immédiat des maisons en interface habitat-forêt (Cohen, 2000). Des études

expérimentales et de modélisation ont montré qu'un enlèvement partiel d'arbres dans les 40 m autour de la maison protège cette dernière contre l'inflammation par rayonnement des flammes (Cohen, 2000). Aux États-Unis, 95 % des maisons sont épargnées, là où la végétation est maintenue propre à une distance de 10 à 20 m de la maison (Cohen, 1999). En France, l'analyse de retours d'expérience réalisés après incendies montre que 98 % des habitations ayant été débroussaillées dans un rayon de 50 m n'ont pas subi de dégâts intérieurs lors du passage de l'incendie et que seuls quelques dégâts extérieurs ont été signalés dans 18 % des cas. Si le débroussaillage est insuffisant en surface traitée (rayon inférieur à 30 m autour de l'habitation) ou en qualité (pas de mise à distance des houppiers, ..), près de 50 % des habitations concernées par un incendie subissent des dégâts.

Concernant les habitations, la source la plus répandue de leur inflammation est l'émission de particules incandescentes (Cohen et Saveland, 1997 ; Cohen, 2003). Propulsées dans les colonnes de convection du front de flammes et transportées par le vent, elles sont à l'origine de feux secondaires. En tombant sur les toits des maisons ou sur des équipements inflammables (annexe en bois, tas de bois...), les brandons sont à la source de violents foyers pouvant endommager les habitations alors même que l'incendie principal se propage à des centaines de mètres.

Le traitement de base de la maison contre les incendies impose l'utilisation de matériaux résistants au feu dans la construction du bâtiment et des structures environnantes. L'entretien de l'habitat est préconisé : recouvrement ou retrait des matériaux inflammables dans les coins et recoins où les brandons peuvent se nicher et retrait des branches, feuilles et aiguilles mortes sur les toits et gouttières (Nowicki, 2002). L'étanchéité à l'air des toitures est également particulièrement importante pour éviter l'intrusion de brandons à l'intérieur de la construction. L'habitat traditionnel comporte souvent des points facilitant l'entrée des flammes : poutres apparentes, toitures peu étanches, portes de granges absentes ou ajourées ou stockage de matières très inflammables (paille, foin, engrais...). Les dépendances (cabanons, annexes...) présentent souvent une inflammabilité et une combustibilité importantes qui contaminent les habitations voisines. Les volets doivent également résister à la chaleur : en cas de déformation, combustion ou de rupture, ils permettent au feu d'entrer dans la maison. De même la qualité des gouttières doit leur permettre de résister aux flammes. Les matières plastiques résistent mal à la chaleur dégagée par le feu. Elles se déforment ou s'enflamment, créant des foyers violents. Les métaux subissent également des déformations importantes sous l'effet de la chaleur. Le bois plein offre lui une certaine résistance structurelle, tant qu'il brûle superficiellement ou se consume. L'inflammation de stockages de combustibles à proximité des habitations entraîne des dégâts majeurs : bouteilles de gaz, tas de bois...

Une maison en forêt offre un cadre de vie très agréable, cependant, s'installer et vivre dans ces espaces soumis à l'aléa incendie induit une mise en danger considérable pour les personnes et leurs biens. Il en revient à la liberté de chacun de prendre un tel risque, mais cette liberté s'accompagne d'une responsabilité qui incombe aux occupants et aux pouvoirs politiques de gérer le risque. Voici pour résumer, l'archétype d'une maison en mauvaise posture si elle venait à être soumise au phénomène d'incendie de forêt (Fig. 34).

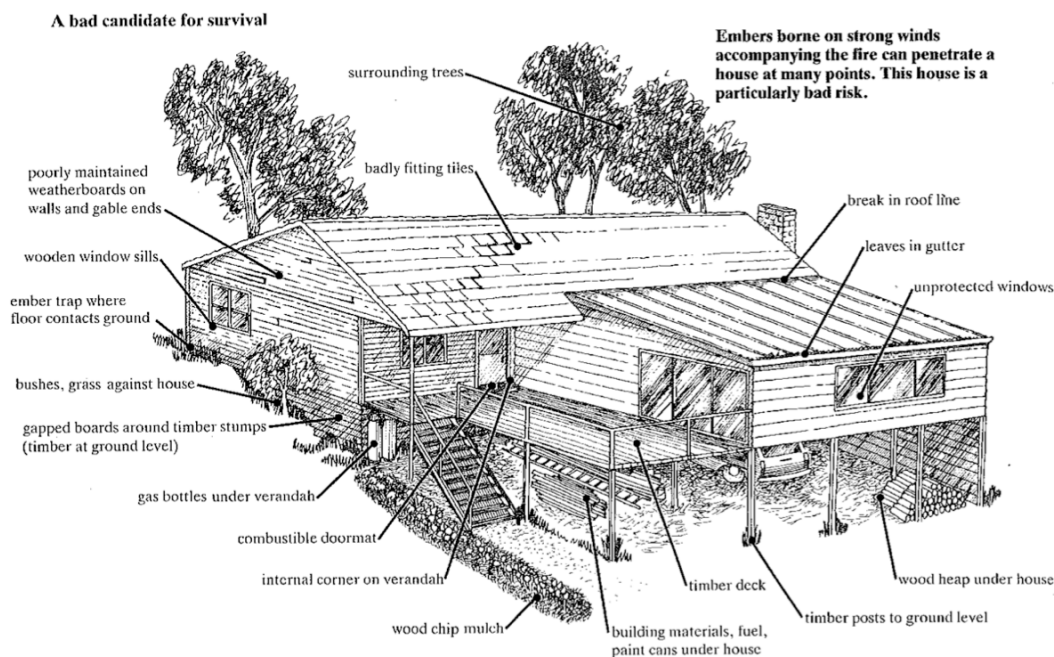


Fig. 34 : Exemple d'une « mauvaise candidate à la survie » (Ramsey, 1985)

4.2. Construction du modèle conceptuel hiérarchique

Nous allons à présent appliquer la méthode AHP à l'évaluation de la vulnérabilité territoriale des interfaces habitat-forêt, en commençant par la construction du modèle conceptuel (Fig. 35). L'ensemble des éléments constituant la structure hiérarchique repose sur les résultats de l'étude des retours d'expérience, précédemment exploités (cf. §4.1), et des consultations avec les experts du risque incendie de forêt, qui ont permis de les valider. Chaque élément fait référence à une ou plusieurs des trois composantes de la vulnérabilité : « sensibilité », « exposition », « capacité de réponse » (cf. §1.6). Ils sont regroupés par thématiques disciplinaires. Nous allons spécifier les objectifs attribués à chaque niveau :

- **Niveau 0** : correspond à l'objectif principal, il pose le problème à l'étude : l'évaluation de la vulnérabilité territoriale des interfaces habitat-forêt.
- **Niveau 1** : regroupe une famille de critères conditionnant le niveau 0. À ce stade, les critères ne sont pas directement évaluables par une seule grandeur, ils correspondent à des familles thématiques. Le niveau 0 est atteint par l'agrégation des performances obtenues sur chacun des critères du Niveau 1. Cette logique est commune à l'ensemble des niveaux inférieurs, sauf pour le Niveau 3-4.
- **Niveau 2** : chaque critère du Niveau 1 est décomposé en une famille de sous-critères.
- **Niveau 3** : les critères non directement évaluables du Niveau 2 sont décomposés en une famille de sous-critères.
- **Niveau 3-4** : correspond aux actions ou alternatives, que nous appelons modalités (ou indicateurs). Ces modalités sont propres aux sous-critères auxquels elles se rattachent. Elles constituent les entrées du modèle conceptuel qui permettent d'évaluer les performances des critères. Nous verrons par la suite qu'elles se voient attribuer un score, représentant l'intensité de vulnérabilité induite (cf. §4.4.2). L'objectif étant de traduire spatialement la vulnérabilité, nous établirons une couche d'information géographique pour chacune (cf. §5.3).

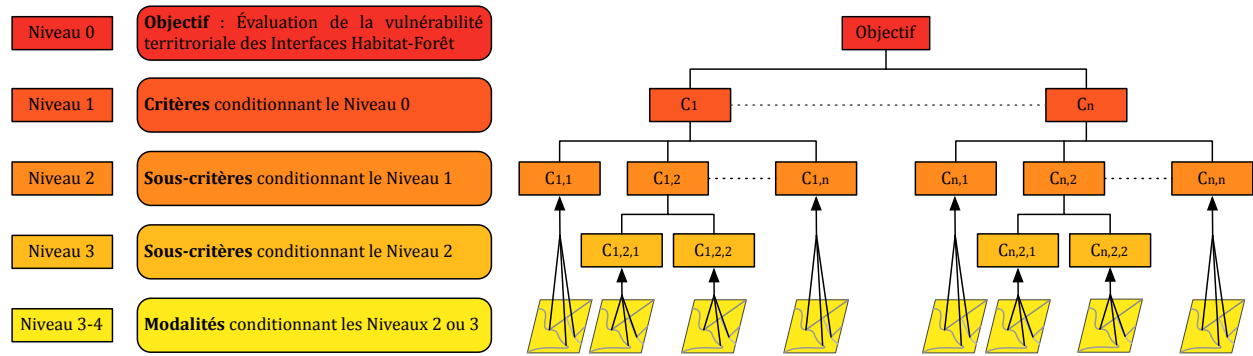


Fig. 35 : Structure hiérarchique générique du modèle conceptuel

Le modèle conceptuel constitue une structure hiérarchique composée de cinq niveaux. À la lumière des retours d'expérience, nous avons identifié six critères discriminants (Fig. 36), permettant l'évaluation de la vulnérabilité territoriale des interfaces habitat-forêt.

Notre étude sur la vulnérabilité fait abstraction des conditions climatiques qui pilotent sur un pas de temps long l'éclosion et la propagation du feu, ainsi que des conditions météorologiques locales, qui président, sur un pas de temps court, son entreprise destructrice. Nous partons du principe que le climat méditerranéen, particulièrement sur la période de Juin à Septembre, offre les conditions favorables (température, vitesse du vent, teneur en eau de la végétation) au développement des incendies. L'évaluation recherchée s'effectue à fine échelle géographique, celle de l'habitation résidentielle en interface habitat-forêt, qui n'est alors, spatialement, pas adaptée à l'échelle des données sur le climat ou la météorologie des sites étudiés.

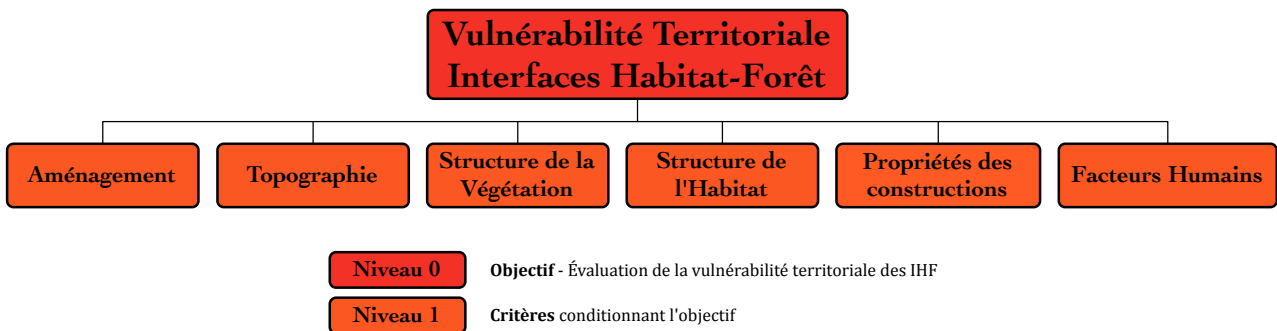


Fig. 36 : Premier niveau de la hiérarchie du modèle conceptuel – Les critères conditionnant la vulnérabilité territoriale des interfaces habitat-forêt

Dans cette section, nous allons aborder la construction des six critères du niveau 1 de la hiérarchie. Leur élaboration se fonde sur deux préoccupations principales :

- D'une part, nous cherchons à représenter chaque critère d'un point de vue opérationnel, de manière à faciliter leur compréhension, pour les particuliers et les gestionnaires. Les éléments du modèle conceptuel doivent constituer des leviers d'actions visant à soulever plusieurs options de réduction de la vulnérabilité ;
- Enfin, les modalités sont déterminées selon un principe compensatoire. En effet, la méthode doit permettre de considérer les différentes contributions à la vulnérabilité tout en traduisant les effets compensatoires (une faible vulnérabilité sur un critère peut compenser une forte vulnérabilité sur un autre). Dès lors, les modalités

définissant les sous-critères expriment des intensités favorables et défavorables à la vulnérabilité.

Nous proposerons une description détaillée de la décomposition de chaque critère, et une mise en perspective avec les différentes composantes de la vulnérabilité.

4.2.1. Le critère « Topographie »

Le critère « Topographie » est relatif à l'ensemble du territoire d'une interface habitat-forêt. D'un point de vue de la vulnérabilité, il correspond à un effet de site, c'est-à-dire, qu'il traduit la susceptibilité du milieu physique naturel à amplifier le potentiel d'endommagement et à relayer l'incendie, facilitant ainsi l'atteinte des habitations. En ce sens, il renvoie à la composante « exposition » de la vulnérabilité. Cependant, la topographie peut également influencer la capacité de réponse des particuliers (difficulté à réaliser le débroussaillage) et des services de lutte (lutte au sol impossible sur les parois rocheuses).

Il se décompose en une famille de quatre sous-critères (Fig. 38) :

- « **Pente** » : il a quatre modalités correspondant à une échelle d'intervalles ;
- « **Exposition au soleil** » : les modalités étudiées sont les expositions Adret, Ubac, Est et Ouest, et correspondent à une échelle nominale ;
- « **Exposition au vent dominant** » : le vent dominant en région méditerranéenne est le Mistral. Le sous-critère s'organise en trois modalités. L'échelle nominale définit les zones exposées au vent (de 270° à 360°), sous le vent (de 90° à 180°) et intermédiaires (de 0° à 90° et de 180° à 270°) (Fig. 37) ;

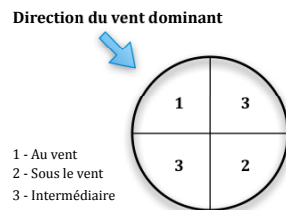


Fig. 37 : Définition des zones exposées au vent dominant

- « **Position topographique** » : les différentes positions déterminent les formes générales du relief sur une échelle nominale détaillant les crêtes, les versants et les talwegs.

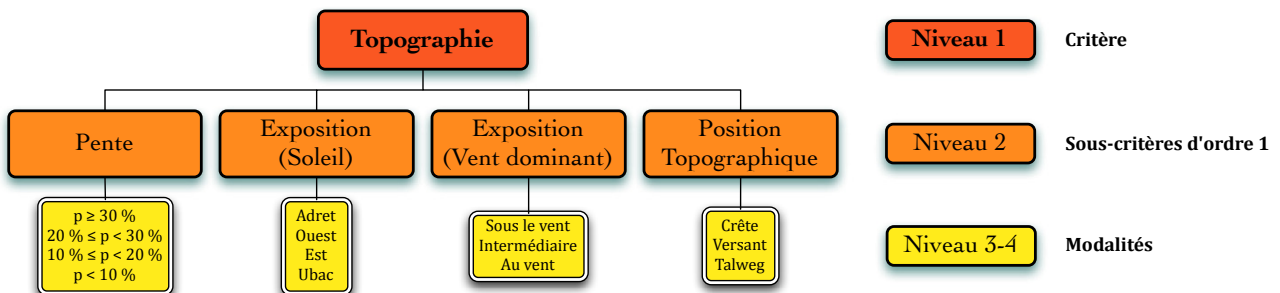


Fig. 38 : Structure hiérarchique associée au critère « Topographie »

À l'échelle du climat (temps long), les caractéristiques de la topographie telles que la pente, l'exposition et la morphologie entraînent des modifications des variables météorologiques, qui, alors, influencent la répartition de la végétation (Whiteman, 2000). Sur des échelles de temps plus courtes, elles affectent également la variabilité spatiale et temporelle des conditions météorologiques (direction et vitesse du vent, température, etc.) conditionnant ainsi le comportement du feu (Gorski et Farnsworth, 2000).

L'insolation reçue par une zone d'interface habitat-forêt varie en fonction du relief local (pente, exposition). Le rayonnement solaire est un facteur déterminant le microclimat de l'interface : il influence la distribution spatiale de la température, l'humidité relative, la teneur en eau et le type de végétation. L'adret correspond au versant le mieux exposé au soleil, et donc, le plus chaud, contrairement à l'ubac, versant le plus froid et moins ensoleillé. Les différentes expositions au soleil influencent la composante « sensibilité » de la vulnérabilité, en jouant sur la charge et la teneur en eau du combustible végétal (photosynthèse, évapotranspiration), mais aussi la teneur en eau des matériaux de constructions, modifiant la susceptibilité de l'interface habitat-forêt.

La pente exerce une influence significative sur le comportement des incendies de forêt (Weise, 1993). Elle conditionne l'inclinaison des flammes par rapport au sol et influe sur la vitesse de propagation du feu (Dupuy, 1997). La pente induit un accroissement du transfert de chaleur entre la flamme et les éléments situés en aval, l'ampleur du phénomène est relativement faible en l'absence de vent mais la combinaison des deux provoque des situations dramatiques (Curry et Fons, 1938, 1940). En règle générale, la vitesse de propagation est deux fois plus rapide sur des pentes de 10° et quatre fois plus rapide sur des pentes de 20° (McArthur, 1967). À l'échelle d'une interface habitat-forêt, les variations de pentes conditionnent les composantes « exposition » et « capacité de réponse » de la vulnérabilité. Les accélérations brusques de l'incendie posent des problèmes aux actions de lutte. De plus, les zones escarpées restreignent l'accès aux moyens terrestres.

Les interactions entre topographie et conditions météorologiques sont nombreuses. Les vents ont tendance à épouser les formes du relief. Pendant la journée, la chaleur accumulée par le sol entraîne des mouvements d'air ascendants, le vent remonte les versants, les vallons, et accélère à l'approche des crêtes. Durant son ascension, l'incendie conduit par le vent se charge en intensité, son cône de convection s'amplifie et favorise la projection de brandons vers les crêtes. Ce phénomène autorise le feu à franchir les parois rocheuses et à provoquer des départs secondaires en aval du front de flamme. Les habitations situées sur les crêtes se trouvent ainsi exposées aux projections de particules incandescentes.

De nombreux processus inhérents aux topographies complexes peuvent affecter la vulnérabilité globale des interfaces habitat-forêt au regard de l'incendie de forêt. La méthode AHP nous permet de structurer la réalité du critère « Topographie » selon une hiérarchie qui se veut à la fois analytique (décomposition en sous-critères) et systémique (interactions entre les sous-critères), ce qui rend alors possible l'étude de cette complexité. Les caractéristiques de la topographie d'une interface contribuent, par les interactions entre les conditions atmosphériques et le relief, à créer des phénomènes aérologiques favorables aux projections de brandons, à la propagation et à la sévérité de l'incendie. Le critère « Topographie » intervient sur les deux composantes de la vulnérabilité précitées et tente de capturer les synergies et les phénomènes compensatoires qui existent entre les différents sous-critères. Le résultat de l'agrégation sur ce critère doit permettre de déceler les zones problématiques cumulant de fortes vulnérabilités sur l'ensemble des sous-critères, mais également, les zones où les différentes vulnérabilités ont un effet compensatoire.

4.2.2. Le critère « Structure de la végétation »

La végétation représente le principal combustible en interface habitat-forêt. Le critère « Structure de la Végétation » est construit de manière à traduire l'arrangement spatial de la végétation du territoire en interface. C'est une variable continue dans l'espace et se décompose en deux sous-critères (Fig. 39) :

- « **Continuité horizontale** » : traduit la distribution horizontale de la végétation selon trois taux d'agrégation : nulle, faible et forte (Lampin, 2009) ;
- « **Continuité verticale** » : renvoie à l'arrangement spatial vertical entre les différentes strates de végétation. Quatre modalités sont distinguées : la strate herbacée seule, la strate arbustive (herbacée comprise), la strate arborée (herbacée comprise) et une stratification mixte regroupant l'ensemble des trois précédentes.

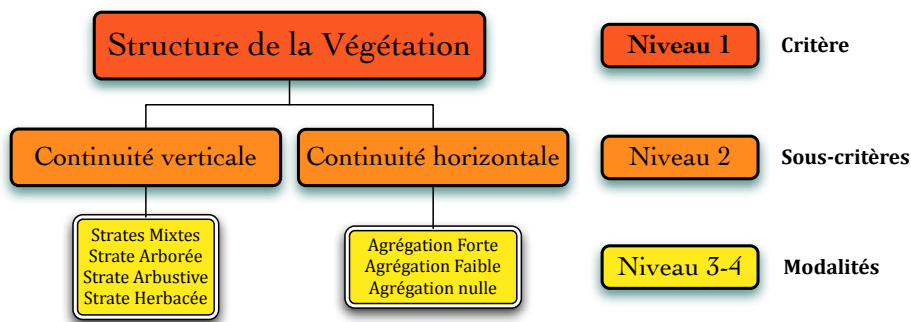


Fig. 39 : Deuxième et troisième niveaux de la hiérarchie du modèle conceptuel - Sous-critères conditionnant le critère « Structure de la Végétation » et modalités (alternatives) définissant chacun des sous-critères

Un incendie se propage s'il existe une continuité de l'agent de propagation, en l'occurrence la végétation. Ainsi la continuité horizontale de la végétation facilite l'avancée d'un feu en le « nourrissant » en continu, alors qu'une végétation éparse, discontinue, voire absente, entraîne une diminution brutale de son intensité. Le développement d'un feu est conditionné par la continuité de la végétation (Syphard *et al.*, 2008). Il en est de même pour la continuité verticale. Celle-ci favorise l'accession de l'incendie aux cimes des arbres, et entraîne alors un feu de cimes généralisé à fort potentiel de propagation et de destruction.

La structure de la végétation est intrinsèque à la notion d'interface habitat-forêt définie par C. Lampin (2009). Cependant, seule la continuité horizontale y est prise en compte. Dans un contexte d'évaluation de la vulnérabilité aux incendies, les deux formes de continuité apparaissent essentielles, même si elles ne sont pas suffisantes. Les critères d'inflammabilité et de combustibilité sont également très importants. Ces deux notions ne seront pas traitées dans notre étude. Certains retours d'expériences soulignent que la structure de la végétation prime sur sa nature dans la propagation d'un incendie de forêt (Joliclerq, 2003).

La structure de la végétation relève de la composante « exposition » de la vulnérabilité. Selon le même principe que pour le critère « Topographie », l'interaction entre les deux sous-critères repose sur un principe de synergie ou d'antagonisme.

4.2.3. Le critère « Structure de l'Habitat »

L'habitation résidentielle en interface habitat-forêt constitue l'enjeu majeur à protéger. Le critère « Structure de l'Habitat » est construit de manière à représenter précisément

l'organisation spatiale des habitations au sein des interfaces. Il se décompose en deux sous-critères (Fig. 40) :

- « **Type de structure** » : l'organisation des habitations est différenciée selon les types « isolé », « diffus », « groupé dense » et « groupé très dense » (Lampin, 2009) ;
- « **Positions internes aux structures** » : trois positions sont distinguées avec tout d'abord la position isolée, qui correspond aux secteurs hors de tout groupe d'habitations (un groupe étant constitué d'au moins deux habitations séparées par une distance maximale de 60 mètres). Les groupes formés au sein d'une interface présentent deux types de position : périphérique (entourant le groupe) et centrale (interne au groupe).

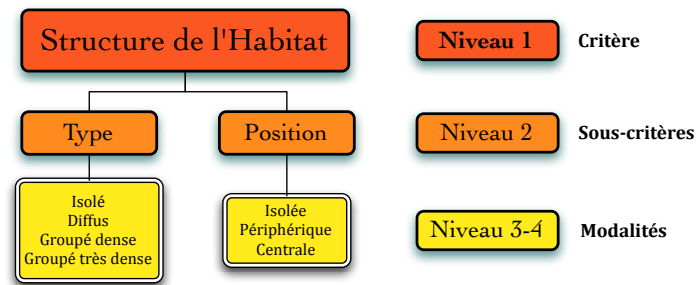


Fig. 40 : Deuxième et troisième niveaux de la hiérarchie du modèle conceptuel – Sous-critères conditionnant le critère « Structure de l'Habitat » et modalités (alternatives) définissant chacun des sous-critères

Les maisons en interface habitat-forêt sont susceptibles d'être impactées lors du passage d'un incendie. Dans les structures d'habitat isolé, elles sont généralement cernées par la végétation naturelle, et, de fait, sont plus exposées à l'incendie. La densification des interfaces réduit la proportion de végétation naturelle aux abords des bâtiments. Par conséquent, leur vulnérabilité d'exposition est réduite (Lampin, 2009).

Le nombre de maisons exposées augmente avec la densité liée à chaque type de structure, passant du simple au triple d'une structure isolée à une structure groupée dense, et du simple au double d'une structure groupée dense à une structure groupée très dense (Lampin, 2009). L'effort consenti par habitation pour maintenir un état débroussaillé est donc plus conséquent à mesure que la densité de bâti diminue. La vulnérabilité d'exposition augmente alors avec la diminution de la densité du bâti. De plus, l'habitat isolé favorise la dispersion des services de lutte et affaiblit donc leur capacité de réponse globale. En parallèle, l'effort attendu en termes de déploiement des moyens humains et matériels diminue à mesure que la densité du bâti augmente (Lampin, 2009). La capacité de réponse augmente alors avec la densité du bâti.

Le deuxième sous-critère, en interaction avec le premier, concerne les différentes positions au sein des interfaces habitat-forêt. Les groupes sont définis lors de l'intersection des zones tampons entourant les habitations (30 m). Une habitation trop éloignée se retrouve automatiquement en position isolée. Cette notion de position introduite dans le critère « Structure de l'Habitat » fait référence à la composante « exposition » de la vulnérabilité. En effet, en position centrale les habitations bénéficient de la protection de la première ligne (position périphérique), où se concentrent le plus souvent les efforts de lutte. Elles se trouvent donc moins exposées au rayonnement thermique et au contact direct avec les flammes. Elles restent cependant exposées aux projections de particules incandescentes. En position isolée, la survie de la maison dépend alors de sa capacité de résistance intrinsèque (sensibilité), de son aménagement extérieur et de la capacité de réponse des services de lutte et des particuliers. Les positions isolées présentent une forte perméabilité à l'incendie. Une

habitation dans une structure d'habitat isolé se retrouve automatiquement en position isolée, car un rayon de 100 m ou plus la sépare des habitations environnantes.

4.2.4. Sur la construction du critère « Aménagement »

Le critère « Aménagement » s'intéresse aux caractéristiques conditionnant les composantes « exposition » et « capacité de réponse » de la vulnérabilité des interfaces. Il s'organise autour d'une famille de sept sous-critères (Fig. 41).

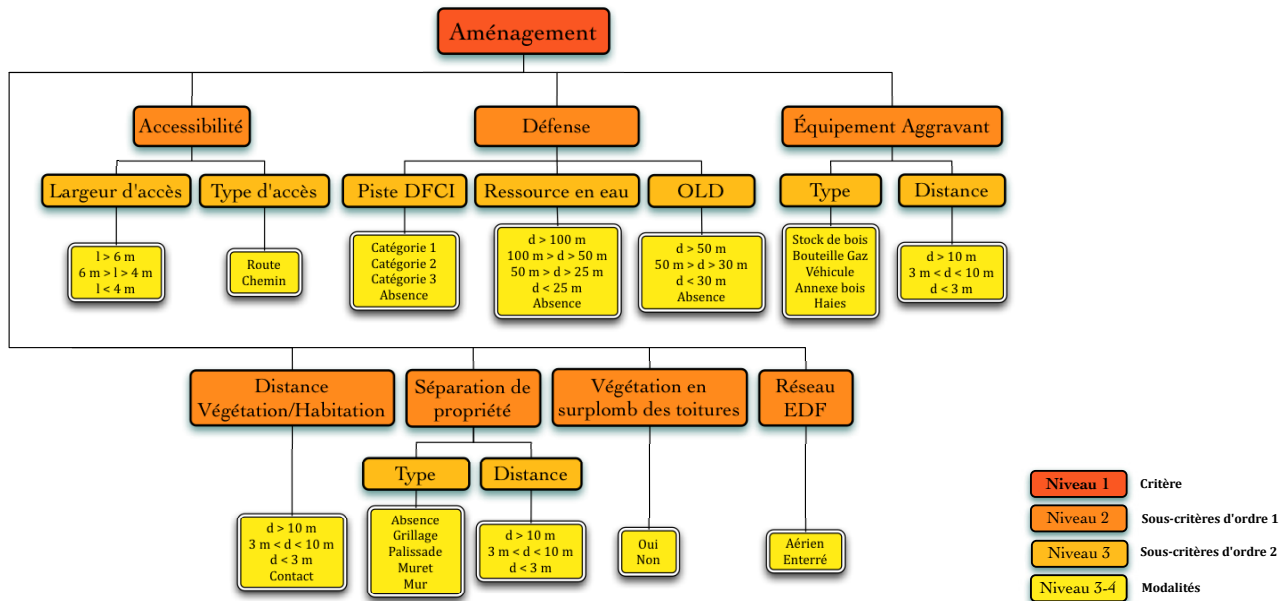


Fig. 41 : Construction du critère « Aménagement » et niveaux hiérarchiques associés à sa structure

Au sein de cette famille, seuls les sous-critères « Distance Végétation/Habitation », « Végétation en surplomb des bâtiments » et « Réseau EDF » sont directement définis selon des modalités caractérisant leurs contributions à la vulnérabilité d'exposition, pour les premiers, et de capacité de réponse pour le dernier. Les quatre autres se déclinent en sous-critères.

L'« Accessibilité » influence la défendabilité des enjeux, et concerne alors la capacité de réponse. L'accès se définit par son type de revêtement, qui conditionne son niveau de praticabilité, et sa largeur qui influence la capacité du transit de véhicules (arrivée des secours, évacuation). Ces deux sous-critères sont des attributs des habitations.

Les éléments de séparation entre les propriétés (grillage, murs en pierre, etc.) influencent la propagation de l'incendie. Ils concernent alors la vulnérabilité d'exposition, et possèdent une sensibilité intrinsèque (capacité de résistance aux effets thermiques). Leur distance à l'habitation permet de juger leur capacité occultante vis-à-vis de l'incendie. Cependant, en situation d'urgence, ils peuvent également limiter l'accès aux secours.

En ce qui concerne la défendabilité directe, trois sous-critères sont en interaction :

- La présence d'une piste DFCI favorise l'intervention au plus près de l'incendie, avant son arrivée au niveau des habitations, et le positionnement des services de lutte.
- Les Obligations Légales de Débroussaillage sont des mesures d'anticipation. Le débroussaillage permet de réduire la charge en combustible ce qui a pour effet de limiter l'intensité du feu. De plus, elles favorisent les discontinuités au niveau de la

végétation et de ce fait limite la propagation de l'incendie. Ce sous-critère se décompose en quatre modalités de distance qui influencent de manière favorable ou défavorable la capacité de réponse des particuliers et des services de lutte, ainsi que l'exposition des habitations.

- La présence d'hydrants (bornes incendies) et leur distance aux habitations influence le bon déroulement de la lutte (remplissage et réapprovisionnement des véhicules). Le sous-critère se décompose en cinq modalités de distance. Lorsque la distance est supérieure à 200 m, la zone ne bénéficie plus de l'effet protecteur des bornes, la modalité « absence » lui est attribuée.

Le sous-critère « Équipements Aggravants » concerne la composante « exposition » de la vulnérabilité. Chaque modalité traduit une susceptibilité à produire ou aggraver les dommages, en fonction de la nature de l'équipement et de la distance qui le sépare de l'enjeu (bâti). Ce critère présente deux particularités :

- La zone d'influence des équipements est fixée à 30 m. Au-delà, l'équipement est supposé, par les experts, ne plus contribuer à la mise en danger directe d'une habitation ;
- L'effet des différents équipements est cumulatif. Les contributions à la vulnérabilité sont donc additionnées.

4.2.5. Le critère « Propriétés des Habitations »

Un incendie de forêt peut être la source de dommages considérables sur les habitations. Les matériaux utilisés dans les constructions assurent ou non leur résistance au feu. Le choix des matériaux influence donc la sensibilité intrinsèque des enjeux. La survie d'une construction à l'incendie de forêt dépend fortement de l'inflammabilité des matériaux employés. La toiture est un élément central de vulnérabilité (Cohen, 2002). Les habitations sont plus souvent menacées par les projections de brandons que par un front de feu linéaire (Caballero *et al.*, 2004).

Le critère « Propriétés des Habitations » se compose de quatre sous-critères, chacun contribuant à la composante « sensibilité » de la vulnérabilité (Fig. 42). Les retours d'expérience permettent l'identification des principaux points faibles potentiels des habitations. Les sous-critères et leurs modalités sont construits de manière à prendre en compte les mesures sujettes à renforcer ou affaiblir la capacité de résistance des habitations.

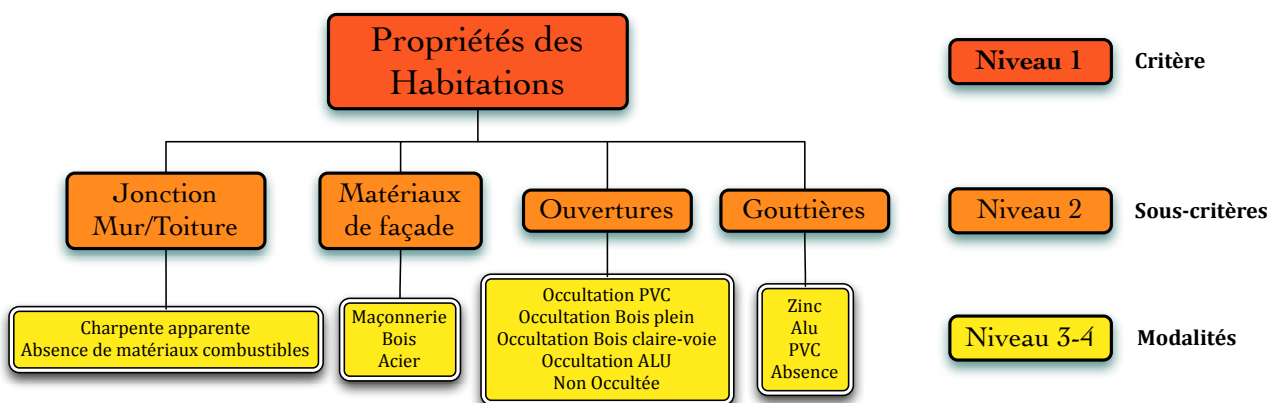


Fig. 42 : Deuxième et troisième niveaux de la hiérarchie du modèle conceptuel – Sous-critères conditionnant le critère « Propriétés des Constructions » et modalités (alternatives) définissant chacun des sous-critères

La jonction entre la toiture et les murs est considérée comme un point faible de l'habitation, si elle présente une partie combustible qui favorise l'endommagement. De même que les ouvertures (fenêtres, portes), qui, en fonction des types occultations, conditionnent l'entrée du feu dans les habitations. Les gouttières, selon leur matériau, sont plus ou moins facile à enflammer et donc susceptibles de soutenir le feu au plus proche de la toiture.

4.2.6. Le critère « Facteurs Humains »

Le critère « Facteurs Humains » traite de la capacité de réponse des personnes résidant en interface habitat-forêt. Il se décompose en trois sous-critères appartenant au Niveau 1 et quatre sous-critères appartenant au Niveau 3 (Fig. 43).

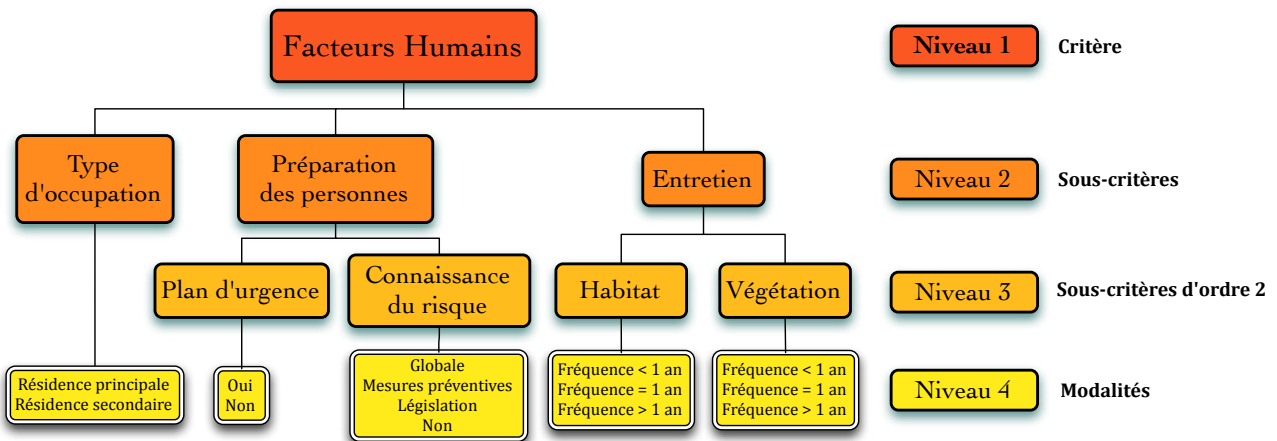


Fig. 43 : Construction du critère « Facteurs Humains » et niveaux hiérarchiques associés à sa structure

Nous étudions les rapports entre « Type d'occupation », « Préparation des personnes » et « Fréquence d'entretien ». Le sous-critère « Type d'occupation » concerne le type de résidence, à savoir, permanente ou secondaire. La préparation des personnes est considérée sous deux aspects : le premier est l'existence d'un protocole d'urgence, mis en place par les autorités locales, pour faire face à l'incendie ; le second renvoie à la capacité des individus à anticiper, réagir et interagir, grâce à leur connaissance sur les conduites à tenir et actions à mener pour renforcer leur sécurité face à l'incendie. Le dernier facteur de vulnérabilité correspond à l'entretien de la propriété, tant de l'habitat (curage des gouttières et des toitures, vérification de l'état des occultations...) que de la végétation (retrait du bois mort, élagage...), défini par trois modalités de fréquence.

Les six critères du niveau 1 de la hiérarchie sont en interactions et chacun contribue à renforcer ou à limiter la vulnérabilité globale des interfaces habitat-forêt. Le modèle conceptuel comprend 6 critères sur le niveau 1, 22 sous-critères sur le niveau 2 et 13 sous-critères sur le niveau 3 (Fig. 44). La structure hiérarchique, à travers la méthode AHP, permet de prendre en compte les interactions intra et inter familles de critères. L'ensemble des contributions entre alors dans un processus de compensation, où les bonnes performances des uns atténuent les mauvaises performances des autres. L'évaluation de la vulnérabilité territoriale des interfaces habitat-forêt résulte de l'agrégation des différentes performances sur les critères en fonction du poids de contribution de ces derniers.

Conceptualiser le problème de l'évaluation de la vulnérabilité face aux incendies de forêt est une première étape. L'approche proposée a été soumise à l'avis de plusieurs acteurs du risque incendie de forêt, venant d'univers différents : un sapeur-pompier du SDIS Vaucluse, un gestionnaire de la DDT Vaucluse, un scientifique du CSIRO, et un responsable de la mission incendie de forêt de l'Office National des Forêt. Un certain nombre de critiques ont émergé au cours des réunions de travail, mais tous ont accepté et approuvé la démarche.

Certaines modalités retenues s'avèrent complexes à évaluer et ne possèdent pas forcément d'unité de mesure. Dans l'idéal, l'évaluation de la vulnérabilité nécessiterait la réalisation d'analyses très poussées d'un point de vue physique, socio-psychologique et économique. Notre modèle conceptuel est basé sur l'analyse des retours d'expérience et les mesures préconisées par les différents PPRIF étudiés (§2.3.1 et §4.1). Notre objectif est d'exploiter la connaissance des experts du risque incendie dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité. Nous proposons une méthode d'évaluation de la vulnérabilité en vue de la réalisation de cartes de vulnérabilité. En parallèle, un travail de formalisation des connaissances de chaque expert a été mené, afin de déterminer une fonction d'agrégation des critères de vulnérabilité, en suivant la méthode AHP. Cette fonction repose sur un autre type d'agrégation, celle des jugements individuels. Les phases de travail précitées font l'objet de la prochaine section.

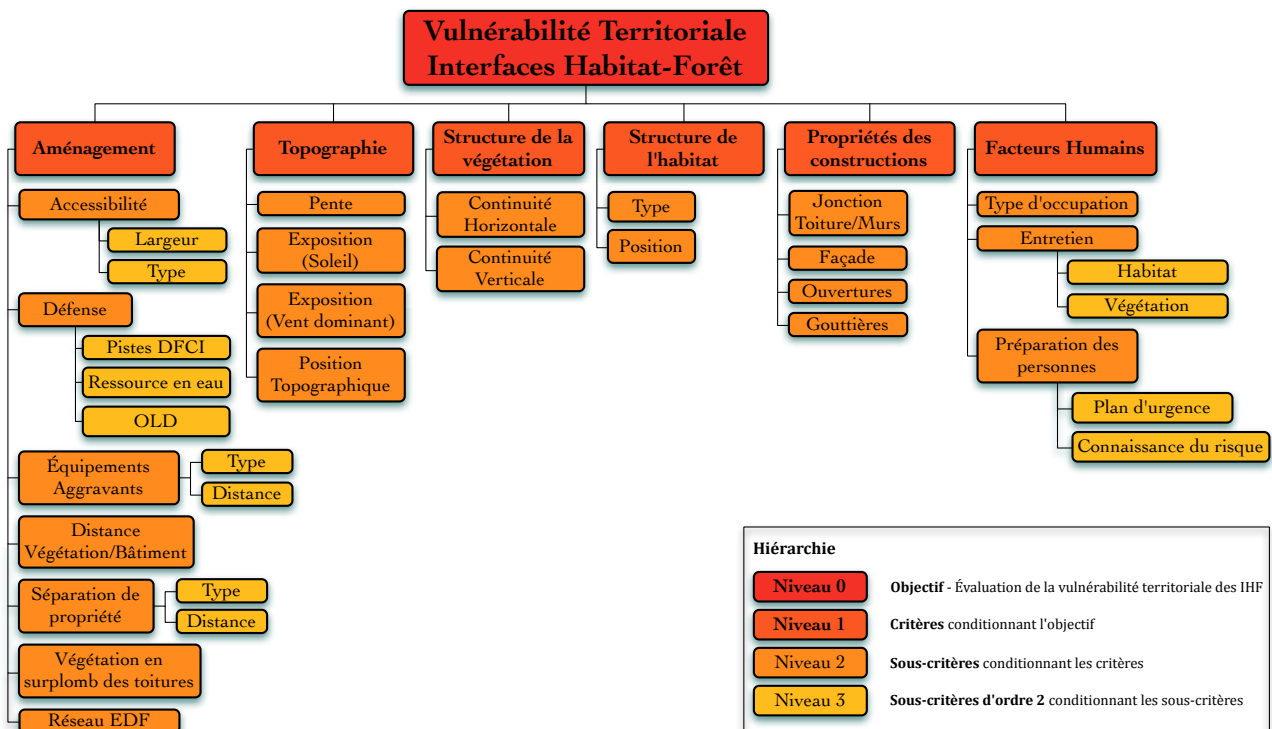


Fig. 44 : Modèle conceptuel pour l'évaluation de la vulnérabilité territoriale des interfaces habitat-forêt

4.3. Élicitation des connaissances propres aux experts

Notre approche implique la consultation d'experts. L'absence de méthodologie générale pour le recueil des expertises a déjà été signalée (Vincke, 1989 ; Griot, 2001). Pour mener cette étape à son terme, notre travail a été mené sur plusieurs phases :

- Présentation de la méthode aux participants, par le biais d'une synthèse écrite et/ou d'une réunion de travail ;

- Construction d'un questionnaire destiné au recueil des jugements d'experts (cf. Annexe 1) ;
- Calcul des pondérations individuelles ;
- Calcul du jugement du groupe d'experts et de la pondération associée.

4.3.1. Présentation des profils d'experts

La collecte des jugements a pour support un questionnaire où sont précisés les critères à comparer et où figurent les échelles de comparaison des éléments (numériques et/ou sémantique). Dans un premier temps, nous avons contacté par téléphone et par courrier électronique, les acteurs de différents organismes (SDIS, DDT(M), ONF, INRA, CSIRO), afin de leur présenter notre démarche de recherche, et de les solliciter pour y participer en tant qu'expert.

Au niveau des SDIS, nous avons contacté les Directeurs des Services Départementaux afin qu'ils nous aiguillent vers les personnes compétentes. Seuls les SDIS des Bouches-du-Rhône et du Vaucluse ont répondu à notre demande. Pour les DDT et DDTM, nous avons contacté directement les personnes en charge de l'activité feux de forêt. Durant cette thèse nous avons également travaillé en collaboration avec le CSIRO de Melbourne (Australie), la personne responsable des retours d'expérience sur les incendies de forêt et en charge de l'activité feux de forêt a donc répondu favorablement et participé à l'évaluation. Enfin, nous avons contacté le responsable de la mission zonale DFCI de l'ONF, qui a accepté de participer et proposé la participation de quatre de ses collègues.

À l'issue de ce premier contact, nous avons envoyé le questionnaire accompagné d'une synthèse expliquant la méthode de complétion, à tous les experts s'étant engagés à participer à l'étude. Pour certains cas, des réunions furent organisées afin de présenter plus précisément la problématique, la méthode et le questionnaire. Deux cas de figure ont été rencontrés : les réunions individuelles concernant les acteurs isolés, et celles collectives pour les acteurs d'une même localité. Pour le second cas, nous avons demandé que le travail d'évaluation soit effectué individuellement. Les experts se sont engagés à respecter une certaine échéance, qui a rarement été tenue.

La mise en œuvre de la méthode multicritère AHP s'est avérée longue et complexe. Tout d'abord, la problématique considérée présente une nature multidimensionnelle difficile à appréhender. Le questionnaire élaboré comporte de nombreuses questions qui ont nécessité un effort de contextualisation souvent chronophage. Ensuite, la procédure menée implique des personnes extérieures à l'étude. Les difficultés rencontrées ont donc concernées les points suivants :

- Certaines personnes contactées n'ont pas accepté de participer à l'étude ;
- Parmi les personnes ayant accepté de fournir leur expertise, les réponses n'ont pas toutes été retournées, ou certaines se sont avérées incomplètes.

Sur un total de 41 personnes contactées, seules 11 personnes ont participé et retourné le questionnaire (Tab. 28). Le taux de participation s'élève à 26 %.

Organisme	Contact	Accord	Participation
SDIS 04	3	0	0
SDIS 05	3	0	0
SDIS 06	3	0	0
SDIS 13	4	4	2
SDIS 34	3	0	0
SDIS 66	3	0	0
SDIS 83	3	0	0
SDIS 84	3	2	1
SDIS 2A	3	0	0
SDIS 2B	3	0	0
DDTM 06	1	0	0
DDTM 13	1	0	0
DDTM 34	1	1	1
DDTM 66	1	0	0
DDTM 83	1	0	0
DDT 84	1	1	1
ONF	1	1	5
CSIRO Melbourne	1	1	1
INRA Avignon	3	3	0
TOTAL	42		11
Taux de participation			26 %

Tab. 28 : Bilan des contacts et des participations effectués dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité territoriale des interfaces habitat-forêt par la méthode d'aide multicritère à la décision AHP

Le questionnaire se termine par une étape d'auto-évaluation, où il est demandé aux experts de renseigner leur nombre de participation aux activités de gestion de crise « Feux de forêt » et aux retours d'expérience sur l'analyse des dommages post-incendie. Enfin, ils sont conduits à noter sur une échelle de 1 à 5 leur expérience professionnelle en gestion de crise (E-GC), leur expérience professionnelle en analyse des dommages après incendie (E-REX), ainsi que leur compétence personnelle en diagnostic de vulnérabilité (C-DV). Ainsi, nous avons pu dresser le profil de chaque expert (Tab. 29) :

- Les deux experts « Gestionnaires » s'estiment, en moyenne, très compétents en matière de diagnostic de vulnérabilité (4,5 sur une échelle de 1 à 5). Tous deux possèdent une grande expérience en gestion de crise (4,5) et analyse des dommages post-incendie (5).
- En termes d'expérience, les experts « Forestiers » se sentent moins à l'aise en matière de gestion de crise (3), en revanche, ils possèdent généralement une bonne expérience des retours d'expérience (3,7). Les cinq se considèrent compétents en ce qui concerne l'évaluation de la vulnérabilité (4).
- L'expert du CSIRO, seul scientifique, possède une faible expérience en gestion de crise (2), mais sa très grande expérience en analyse des dommages (5) lui confère une très grande compétence en diagnostic de vulnérabilité (5).
- Les experts « Pompiers » ont, en moyenne, plus d'expérience en gestion de crise (4,2) qu'en analyse des dommages (2,2), mais s'estiment compétents pour diagnostiquer la vulnérabilité d'un territoire (3,8).

Expert	Organisme	Fonction	E-GC	E-REX	C-DV
E ₁	CSIRO	Chef de service – Impacts des incendies et vulnérabilité	2 (nc)	5 (>10)	5
E ₂	DDT 84	Responsable DFCI	4 (nc)	5 (nc)	4
E ₃	ONF	Responsable Mission Zonale DFCI	4 (> 10)	4 (> 10)	5
E ₄	SDIS 84	Responsable Direction Opérationnelle	4 (nc)	3 (nc)	4
E ₅	SDIS 13	Chef de Service Prévision/Prévention	4 (40)	2 (10)	4
E ₆	SDIS 13	Commandant d'opérations de Secours + Officier aéro-embarqué	4,5 (≈ 10)	1,5 (< 10)	3,5
E ₇	DDTM 34	Responsable DFCI et PPRIF	5 (> 10)	5 (> 10)	5
E ₈	ONF	Chef de projet – IAE	1,5 (0)	3,5 (4)	4
E ₉	ONF	Chef de service – IAE	3 (0)	3 (5)	4
E ₁₀	ONF	IAE	4 (nc)	4 (nc)	4
E ₁₁	ONF	IAE	3 (0)	4 (5)	4

E-GC = Expérience professionnelle en gestion de crise « feux de forêt » : **note personnelle** (nombre de participation)

E-REX = Expérience professionnelle en analyse des dommages après incendie et retours d'expérience « feux de forêt » : **note personnelle** (nombre de participation)

C-DV = Compétence personnelle pour les diagnostics de vulnérabilité : **note personnelle**

Tab. 29 : Profils des experts ayant participé à l'évaluation

4.3.2. Collecte des jugements individuels et calcul des pondérations associées

Sur la base des questionnaires, nous avons collecté l'ensemble des jugements sur l'intégralité du modèle conceptuel. Pour les niveaux 1, 2 et 3 de la hiérarchie, les jugements reposent sur des comparaisons par paire de critères. Pour le niveau 3-4, introduisant les modalités, les jugements consistent à exprimer l'intensité de vulnérabilité induite par ces dernières selon une échelle à cinq niveaux. L'évaluation des modalités sort du cadre de la méthode AHP, les résultats seront présentés à la section 4.3.3.

Les résultats présentés concernent les jugements bruts des experts. Nous avons étudié la dispersion des jugements, à partir des pondérations individuelles calculées selon la méthode des valeurs propres, décrite au Chapitre 3. Pour plus de clarté et éviter les redondances, nous réservons l'analyse exhaustive des jugements bruts en annexe 2. Nous ne traiterons que des résultats du premier niveau de la hiérarchie.

a. Les jugements bruts

Les comparaisons sont menées sur l'ensemble des critères composant le niveau 1, noté $\{C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6\}$ (Tab. 30). La notation vs dans C_i vs C_j signifie versus. Pour construire les matrices de jugement, les experts évaluent l'importance d'un critère par rapport à un autre, selon l'échelle de Saaty présentée au Chapitre 3. Les matrices sont réciproques, quinze comparaisons sont alors nécessaires à leur construction. L'objectif est de déterminer l'importance des contributions à la vulnérabilité d'un critère par rapport à un autre.

À chaque comparaison, les experts doivent répondre à deux questions :

- (1) Quel critère de la paire est plus important ou exerce une plus forte influence au regard de la vulnérabilité ? (exemples : Quel critère affecte plus la vulnérabilité – l'aménagement (C_1) ou la topographie (C_2) ? Au niveau du critère « Topographie », quel sous-critère traduit une plus grande vulnérabilité – la pente (C_{21}) ou l'exposition au soleil (C_{22}) ?) ;

(2) Quelle est l'intensité de leur rapport de contribution ? L'intensité est évaluée selon l'échelle sémantique transformée en échelle numérique en neuf moments (Saaty, 1980). Ainsi, l'évaluation est quantitative.

Comparaison	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁
C ₁ vsC ₂	6	1/5	3	1/9	1/5	7	1/5	1/5	1/5	1/3	5
C ₁ vsC ₃	2	1/7	1/5	1/7	1	3	1/5	1/5	1/3	1/5	1/5
C ₁ vsC ₄	6	1/3	1	1/3	2	7	7	1/5	7	1/5	1/3
C ₁ vsC ₅	1/7	1/3	3	1/5	2	7	1/7	7	1	1/5	3
C ₁ vsC ₆	1/4	1/3	7	1	5	1/5	1/5	7	7	5	9
C ₂ vsC ₃	1/3	1/3	1/5	3	3	1/7	1/5	1/3	3	1/3	1/3
C ₂ vsC ₄	3	5	1/3	7	5	7	3	5	5	1/5	1/3
C ₂ vsC ₅	1/6	5	1/3	5	5	3	1/5	7	3	1/5	1/3
C ₂ vsC ₆	2	5	1	9	7	1/7	5	9	9	7	9
C ₃ vsC ₄	4	7	3	5	2	5	7	5	7	1	3
C ₃ vsC ₅	1/7	7	3	7	2	7	7	7	1	3	5
C ₃ vsC ₆	3	7	5	9	5	1/5	7	9	7	9	9
C ₄ vsC ₅	1/8	1	3	3	1	1/5	1/7	7	1/7	3	3
C ₄ vsC ₆	1/3	1	3	7	2	1/7	1/5	9	1	9	9
C ₅ vsC ₆	5	1	5	5	2	1/7	5	3	7	7	9

C₁ = « Aménagement » ; C₂ = « Topographie » ; C₃ = « Structure de la végétation » ; C₄ = « Structure de l'Habitat »
C₅ = « Propriétés des Habitations » ; C₆ = « Facteurs Humains »

Tab. 30 : Ensemble des comparaisons construisant la matrice de jugement du Niveau 1 de la hiérarchie.

Au travers des différentes expertises, nous constatons les premières divergences : les jugements sont conflictuels. À chaque comparaison par paire, les experts se divisent (Tab. 31). Certains jugent la contribution du premier critère de la paire plus importante que celle du second, au regard de la vulnérabilité. Ils s'opposent alors à ceux qui la jugent moins importante ou équivalente. Malgré les fortes divergences inter-groupes, il existe des convergences intra-groupes sur l'intensité des rapports de contribution.

Comparaison	Supériorité	Équivalence	Infériorité	Min	Max	Médiane	Moyenne Géométrique
C ₁ vsC ₂	4	0	7	1/9	7	1/5	0,641
C ₁ vsC ₃	2	1	8	1/7	3	1/5	0,360
C ₁ vsC ₄	5	1	5	1/5	7	1	1,179
C ₁ vsC ₅	5	1	5	1/7	7	1	0,878
C ₁ vsC ₆	6	1	4	1/5	9	5	1,656
C ₂ vsC ₃	3	0	8	1/7	3	1/3	0,512
C ₂ vsC ₄	8	0	3	1/5	7	5	2,209
C ₂ vsC ₅	6	0	5	1/6	7	3	1,174
C ₂ vsC ₆	9	1	1	1/7	9	7	3,787
C ₃ vsC ₄	10	1	0	1	7	5	3,890
C ₃ vsC ₅	9	1	1	1/7	7	5	3,055
C ₃ vsC ₆	10	0	1	1/5	9	7	4,835
C ₄ vsC ₅	5	2	4	1/8	7	1	0,893
C ₄ vsC ₆	6	2	3	1/7	9	2	1,675
C ₅ vsC ₆	9	1	1	1/7	9	5	3,080

Tab. 31 : Statistiques descriptives sur les comparaisons du Niveau 1, et effectifs relatifs aux trois groupes

Afin de représenter les jugements moyens sur l'ensemble des comparaisons, nous calculons leur moyenne géométrique. En effet, considérons le cas simple où deux experts comparent la paire (C₁,C₂) : le premier juge la contribution de C₁ légèrement plus importante que C₂ (C₁vsC₂ = 3), et le second accorde une légère importance à C₂ (C₁vsC₂ = 1/3). Le jugement moyen s'accorde sur l'équivalence des deux critères, et prend alors la note 1, selon

l'échelle ratio de Saaty. Cette note est donnée par la formule géométrique de la moyenne géométrique entre 3 et 1/3.

En moyenne, le critère « Structure de la végétation » est jugé déterminant, il est supérieur aux autres sur toutes les comparaisons. La contribution du critère « Facteurs Humains » est, quant à elle, jugée inférieure aux autres. En termes de vulnérabilité, on remarque ainsi que la composante « exposition » semble plus déterminante que la composante « capacité de réponse. Cependant, certaines expertises tempèrent ce constat moyen.

b. Calcul des pondérations individuelles

Pour implémenter la procédure de calcul des pondérations, nous avons utilisé le logiciel R. Nous avons construit les matrices de jugement des experts (Fig. 45), et appliqué sur chacune la méthode des valeurs propres afin de calculer les poids des critères. Les poids ou contributions des critères d'un même niveau hiérarchique permettent de définir des structures de jugement. Elles correspondent au classement des critères par ordre de contribution décroissant. Logiquement, l'hétérogénéité, constatée sur les jugements bruts, se retrouve au niveau des structures de jugement élicitées (Tab. 32). Elle reflète les différences de points de vue, contraints par les systèmes de valeurs propres à chaque expert, intra et inter-groupes professionnels.

$$E_1 = \begin{matrix} & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ \begin{matrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \\ C_4 \\ C_5 \\ C_6 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 1 & 6 & 1/2 & 7 & 1/2 & 1/2 \\ 1/6 & 1 & 1/5 & 1/7 & 1/7 & 1/5 \\ 2 & 5 & 1 & 7 & 1 & 3 \\ 1/7 & 7 & 7 & 1 & 1 & 3 \\ 2 & 7 & 1 & 1 & 1 & 3 \\ 2 & 5 & 1/3 & 1/3 & 1/3 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Fig. 45 : Exemple d'une matrice de jugement - Expert 1 - Niveau 1 de la hiérarchie

Expert	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	Structure de jugement
E ₁	0,147	0,074	0,13	0,028	0,491	0,129	C ₅ > C ₁ > C ₃ > C ₆ > C ₂ > C ₄
E ₂	0,037	0,267	0,483	0,071	0,071	0,071	C ₃ > C ₂ > C ₄ = C ₅ = C ₆ > C ₁
E ₃	0,194	0,052	0,419	0,175	0,116	0,044	C ₃ > C ₁ > C ₄ > C ₅ > C ₂ > C ₆
E ₄	0,03	0,454	0,4	0,111	0,079	0,026	C ₂ > C ₃ > C ₄ > C ₅ > C ₁ > C ₆
E ₅	0,157	0,47	0,167	0,083	0,083	0,042	C ₂ > C ₃ > C ₁ > C ₄ = C ₅ > C ₆
E ₆	0,239	0,066	0,165	0,024	0,042	0,464	C ₆ > C ₁ > C ₃ > C ₂ > C ₅ > C ₄
E ₇	0,051	0,127	0,482	0,025	0,239	0,077	C ₃ > C ₅ > C ₂ > C ₆ > C ₁ > C ₄
E ₈	0,087	0,291	0,411	0,16	0,032	0,019	C ₃ > C ₂ > C ₄ > C ₁ > C ₅ > C ₆
E ₉	0,139	0,416	0,213	0,034	0,17	0,028	C ₂ > C ₃ > C ₅ > C ₁ > C ₄ > C ₆
E ₁₀	0,055	0,094	0,301	0,329	0,199	0,022	C ₄ > C ₃ > C ₅ > C ₂ > C ₁ > C ₆
E ₁₁	0,169	0,075	0,409	0,226	0,102	0,018	C ₃ > C ₄ > C ₁ > C ₅ > C ₂ > C ₆
Moyenne Géométrique	0,122	0,201	0,375	0,1	0,140	0,061	C ₃ > C ₂ > C ₅ > C ₁ > C ₄ > C ₆
Ecart-type	0,070	0,168	0,134	0,099	0,131	0,130	

Tab. 32 : Niveau 1 - Critères de vulnérabilité - Pondérations individuelles et structures de jugement associées

Les structures de jugement renseignent l'ordination des poids relatifs aux contributions de chaque critère. Ces poids intègrent les intensités exprimées au niveau des jugements bruts. En moyenne, les critères « Structure de la végétation » (32 %), « Topographie » (20 %) et « Propriétés des Habitations » (17 %) influencent majoritairement la vulnérabilité. Ils

expliquent 69 % de la vulnérabilité d'une interface habitat-forêt. L'exposition et la sensibilité des enjeux déterminent alors la vulnérabilité. Les critères « Aménagement » (12 %), « Structure de l'Habitat » (14 %) et « Facteurs Humains » (5 %) expliquent les 31 % restant. Les pondérations calculées respectent les jugements bruts des experts.

Étant donné les écarts importants concernant le poids de certains critères, nous avons mené une Analyse en Composantes Principales (ACP), couplée à une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH), afin d'identifier les groupes d'experts définissant des distributions de poids similaires, dans leur évaluation. Nous souhaitons déceler les convergences et les divergences intra et/ou inter-groupes professionnels.

L'ACP est une méthode bien indiquée à la recherche des interrelations entre les variables (dans notre cas, le poids des critères). Elle permet alors d'identifier les ressemblances et oppositions entre les expertises analysées. Ses résultats se présentent sous forme de composantes (axe factoriel), combinaisons linéaires de variables différenciant au maximum les experts, et correspondant à une association de critères conceptuellement liés qui classent les experts de manière comparable. Les axes factoriels ou composantes principales sont hiérarchisés selon le pourcentage de variance qu'ils expliquent entre les experts. La CAH est ensuite employée pour répartir les experts en groupes (ou classes). Nous avons utilisé la méthode de Ward afin de maximiser l'inertie inter-classe.

L'ACP a été réalisée sur l'ensemble des 11 experts avec les 6 variables du premier niveau hiérarchique (Fig. 46, 47). Les trois premières composantes expliquent 81 % de la variance des expertises.

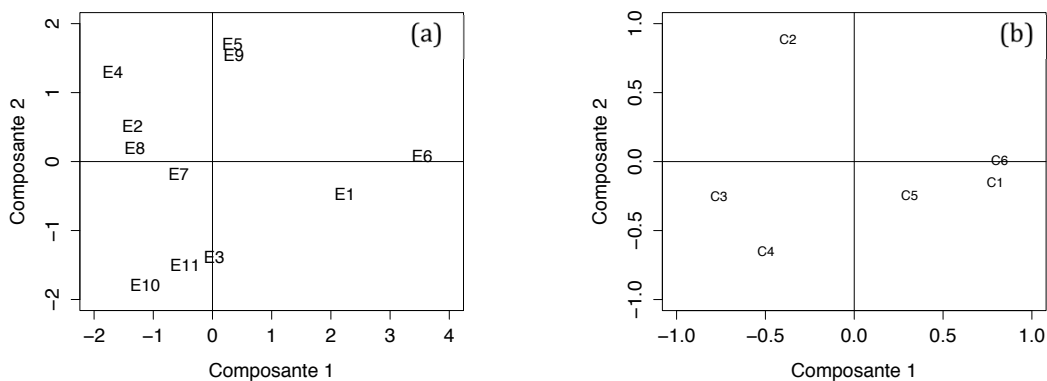


Fig. 46 : Distribution des Experts (a) et des poids de critères (b) sur le premier plan factoriel

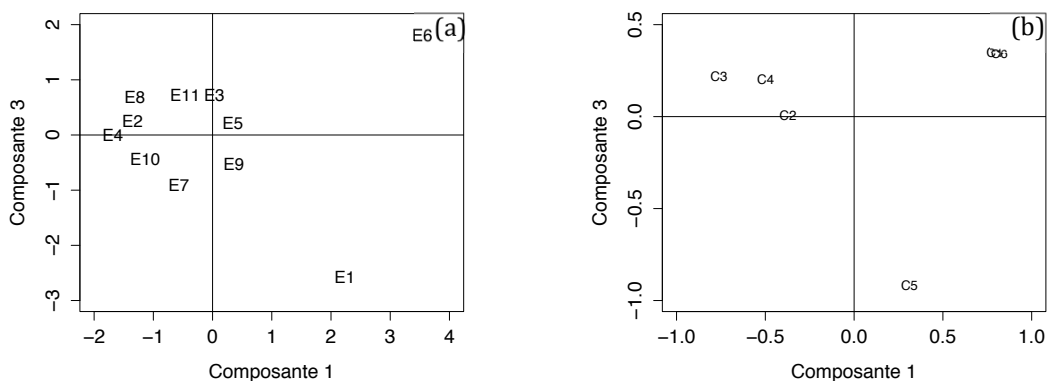


Fig. 47 : Distribution des Experts (a) et des poids de critères (b) sur le deuxième plan factoriel

Le premier axe factoriel explique 39 % de la variance et oppose principalement le critère « Structure de la végétation » (C_3) aux critères « Facteurs Humains » (C_6) et « Aménagement » (C_1). Ainsi, la part « exposition » de la vulnérabilité se retrouve opposée à la part « capacité de réponse ». Néanmoins, le critère C_1 renvoie aux deux composantes de la vulnérabilité précitées.

Le deuxième axe factoriel explique 23 % de la variance et oppose principalement les critères « Structure de l'Habitat » (C_4) et « Topographie » (C_2), tous deux représentant la part « exposition » de la vulnérabilité.

Le troisième axe factoriel explique 19 % de la variance et introduit une opposition entre les critères « Propriétés des Habitations » et « Aménagement, Facteurs Humains ».

En poursuivant l'analyse par la CAH sur les trois premiers facteurs, cinq groupes à effectif variable se distinguent (Tab. 33, Fig. 48). Le groupe 1, composé du seul scientifique se caractérise par une vision de la vulnérabilité privilégiant les critères C_5 et C_1 , avant C_3 . Il se rapproche du groupe 5 sur les deux premiers facteurs, mais ce dernier se différencie en considérant C_6 comme critère déterminant. Leur opposition est alors nette sur le troisième facteur. Les groupes 3 et 4 s'opposent sur le deuxième facteur. Enfin le groupe 2 s'oppose aux groupes 1,4 et 5 sur le premier facteur, et au groupe 3 sur le deuxième.

Niveau 1	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3	Groupe 4	Groupe 5
Experts	E1	E2 ; E4 ; E8	E3 ; E7 ; E10 ; E11	E5 ; E9	E6
Professions	1 Scientifique	1 Pompier 1 Forestier 1 Gestionnaire	3 Forestiers 1 Gestionnaire	1 Pompier 1 Forestier	1 Pompier

Tab. 33 : Classification des experts en cinq groupes, sur le premier niveau hiérarchique

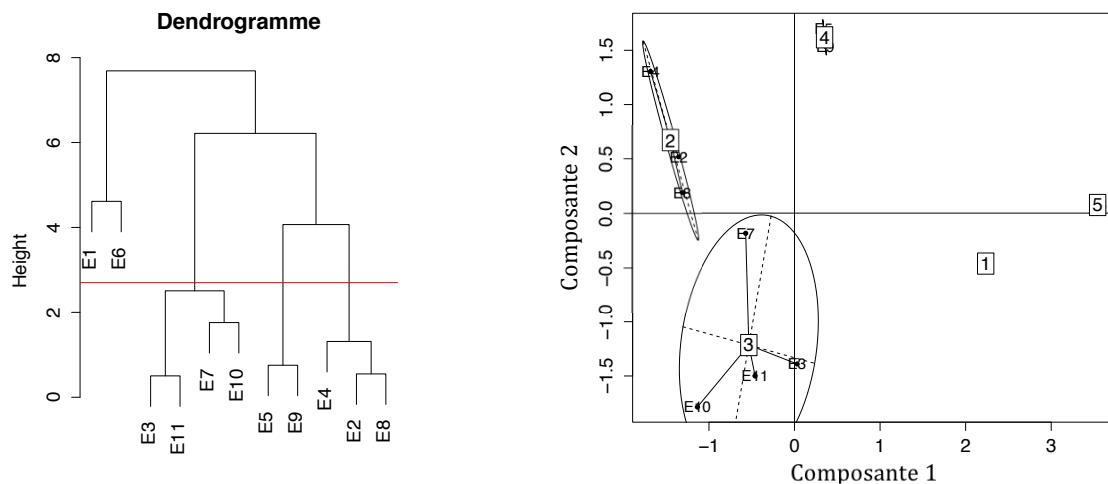


Fig. 48 : Classification des experts en cinq groupes, et leur position sur le premier plan factoriel

Le même type d'analyse a été effectué pour chaque niveau hiérarchique. Les groupes présentés pour le Niveau 1 ne se reproduisent pas sur les autres niveaux. On observe des conflits d'opinions intra et inter-groupes professionnels.

c. *Analyse de la cohérence des experts*

L'étape précédente nous a permis d'extraire une structure de jugement par experts. Nous calculons alors le ratio de cohérence du jugement associé. Nous avons vu au chapitre 3 que le seuil de tolérance à l'incohérence était fixé expérimentalement à 10 % (Saaty, 1980). Les ratios de cohérence ont été calculés pour toutes les matrices de dimension supérieure à deux, soit six matrices de notre modèle conceptuel. Les experts E₂ (DDT) et E₅ (SDIS) se distinguent par leur cohérence de jugement sur la totalité des matrices (Tab. 34). Aucune évaluation des experts E₇ (DDTM) et E₈ (ONF) ne respectent le seuil des 10 %.

On constate des difficultés à respecter le seuil de cohérence au niveau de chaque groupe professionnel. Le milieu scientifique est sous représenté, avec un seul expert, qui se révèle cohérent en moyenne (Fig. 49).

Expertise	Niveau 1	Niveau 2 - C ₁	Niveau 2 - C ₂	Niveau 2 - C ₅	Niveau 2 - C ₆	Niveau 3 - C ₁₂
E ₁	0,26	0,07	0,06	0,04	0,05	0,06
E ₂	0,04	0,08	0,06	0,06	0,03	0,03
E ₃	0,09	0,07	0,12	0,13	0,20	0,16
E ₄	0,11	0,79	0,08	0,04	0,25	0,12
E ₅	0,02	0,09	0,02	0,02	0,003	0,01
E ₆	0,21	0,18	0,25	0,14	0,06	0,12
E ₇	0,29	0,20	0,33	0,25	0,28	0,12
E ₈	0,18	0,19	0,28	0,13	0,16	0,25
E ₉	0,07	0,06	0,02	0,06	0,16	0,12
E ₁₀	0,09	0,06	0,02	0,06	0,25	0,18
E ₁₁	0,15	0,20	0,11	0,11	0,25	0,25

Tab. 34 : Bilan des ratios de cohérence des experts

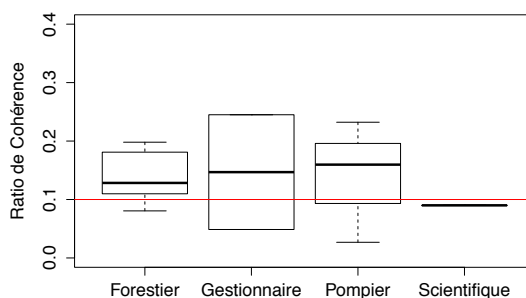


Fig. 49 : Distribution des ratios de cohérence par groupes professionnels

Bien que les moyennes de cohérence pour les trois autres groupes professionnels soient quasi-équivalentes, une variabilité intra-groupes est à noter. En moyenne, les Forestiers se révèlent plus à l'aise sur l'évaluation du premier niveau hiérarchique et sur celle du critère « Aménagement » (Fig. 50). En revanche, ils éprouvent des difficultés à émettre des jugements cohérents sur les critères « Topographie », « Facteurs Humains », « Propriétés des Habitations » et le sous-critère « Défense ». L'expert 1, seul scientifique, est à l'aise sur l'ensemble des critères excepté pour l'évaluation du niveau 1 de la hiérarchie. Les Pompiers sont cohérents sur les évaluations relevant des critères « Propriétés des Habitations », « Topographie » et « Facteurs Humains », mais pèchent sur les autres évaluations. Quant aux deux gestionnaires, l'un est parfaitement cohérent sur l'ensemble des évaluations, l'autre dépasse le seuil constamment. Il en résulte une cohérence moyenne bonne, sur le sous-critère « Défense » uniquement.

Il est également constaté (Fig. 51) que la moyenne calculée sur la cohérence des experts s'étant auto-évalués très compétents en matière de diagnostic de vulnérabilité (C-DV=5) ne respecte le seuil sur aucune évaluation.

En général, lorsqu'un grand nombre d'experts a pu être consulté, il est alors possible d'éliminer les résultats incohérents. Étant donné le faible taux de réponse, et les incertitudes liées aux manques de données empiriques sur la question de la vulnérabilité, nous conduiront notre étude en tolérant les incohérences, qui en moyennes frôlent le seuil d'acceptabilité.

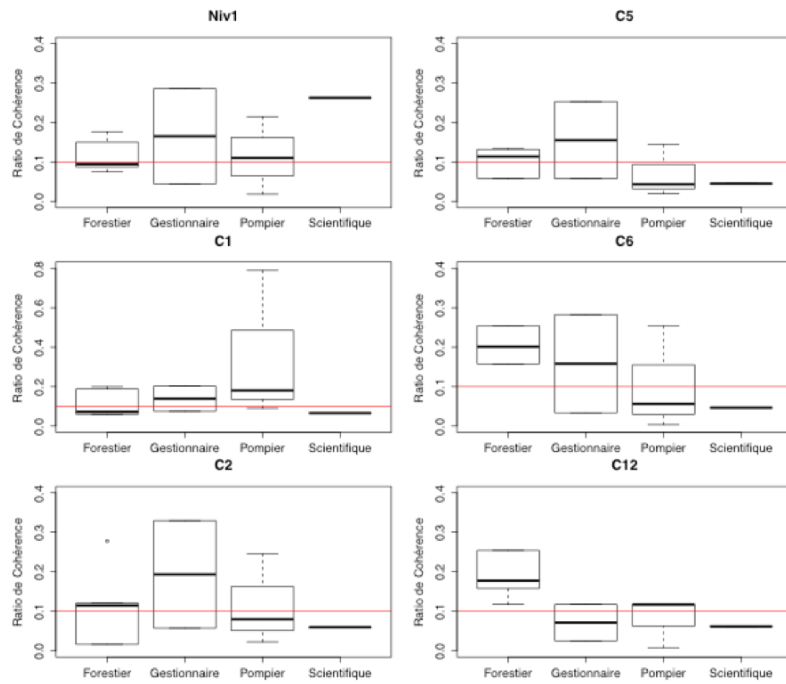


Fig. 50 : Distribution des ratios de cohérence par groupes professionnels sur les six matrices de dimension supérieure à 2

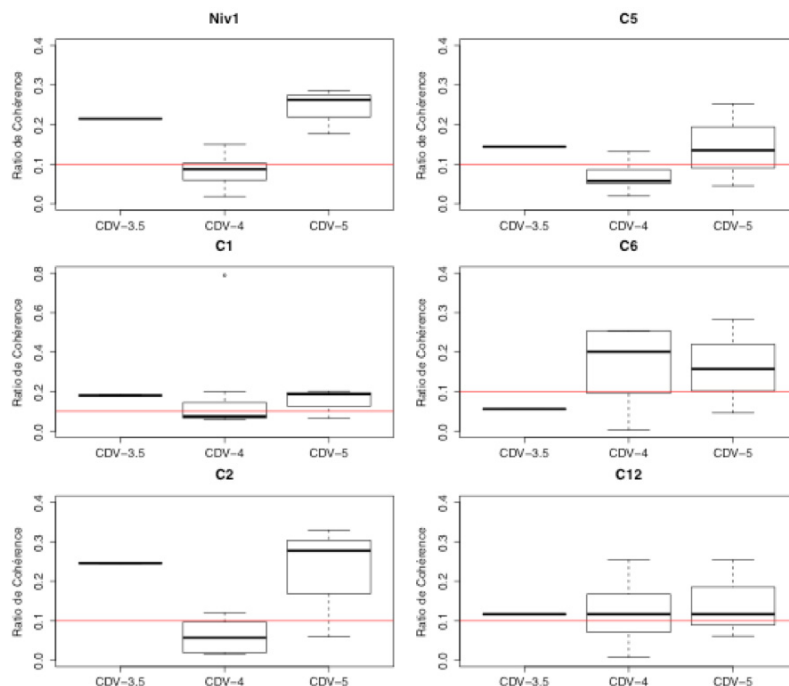


Fig. 51 : Distribution des ratios de cohérence par groupes de compétence en diagnostic de vulnérabilité

4.3.3. L'évaluation des modalités

Contrairement aux évaluations conduites sur les trois premiers niveaux de la hiérarchie, il n'est pas demandé aux experts de comparer les modalités. L'exercice consiste à leur attribuer un score caractérisant l'intensité de la vulnérabilité induite, selon une échelle de valeurs linguistiques en cinq moments (Tab. 35).

Codage numérique	Échelle sémantique
1	Vulnérabilité très faible
2	Vulnérabilité faible
3	Vulnérabilité modérée
4	Vulnérabilité forte
5	Vulnérabilité très forte

Tab. 35 : Échelle d'intensité de la vulnérabilité

À la suite des comparaisons, le questionnaire envoyé aux experts s'attache à recueillir les intensités de vulnérabilité induite par les différentes modalités. Le modèle conceptuel en compte 98. Parmi les onze experts, trois (E₄, E₆ et E₁₀) nous ont renvoyé un questionnaire incomplet vis-à-vis de l'évaluation des modalités. Cependant, contrairement à la partie précédente où l'incomplétude rendrait une matrice inexploitable, nous avons intégré leurs évaluations partielles.

De nouveau, nous constatons des divergences de jugements au niveau des intensités induites. Elles s'avèrent néanmoins moins marquées, et les jugements convergent sur certaines modalités. L'ensemble des résultats est présenté en annexe 3, nous nous limiterons ici aux évaluations concernant les modalités du critère « Propriétés des Habitations » (Tab. 25).

	C ₅		C ₅₁			C ₅₂			C ₅₃					C ₅₄			
Expert	C ₅₁₁	C ₅₁₂	C ₅₂₁	C ₅₂₂	C ₅₂₃	C ₅₃₁	C ₅₃₂	C ₅₃₃	C ₅₃₄	C ₅₃₅	C ₅₄₁	C ₅₄₂	C ₅₄₃	C ₅₄₄			
E1	2	1	1	4	1	3	4	2	1	2	3	3	1	1			
E2	4	1	1	2	3	1	1	4	1	5	1	1	3	1			
E3	3	1	1	3	1	1	1	5	4	5	1	1	5	1			
E4	3	1	1	2	1	1	2	1	1	2	3	1	1	1			
E5	3	1	1	2	1	1	1	2	1	5	1	1	2	1			
E6	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc			
E7	5	1	1	5	4	1	5	5	3	5	1	1	5	1			
E8	4	1	1	2	2	1	1	1	1	5	1	2	4	1			
E9	5	1	1	2	3	1	1	3	2	4	2	2	3	1			
E10	nc	nc	nc	nc	nc	1	1	5	3	5	1	1	3	1			
E11	4	1	1	2	2	1	4	4	4	5	2	2	2	1			
Statistiques	C ₅₁₁	C ₅₁₂	C ₅₂₁	C ₅₂₂	C ₅₂₃	C ₅₃₁	C ₅₃₂	C ₅₃₃	C ₅₃₄	C ₅₃₅	C ₅₄₁	C ₅₄₂	C ₅₄₃	C ₅₄₄			
Min	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1			
Médiane	4	1	1	2	2	1	1	3	1	5	1	1	3	1			
Max	5	1	1	5	4	3	5	5	4	5	3	3	5	1			

Tab. 36 : Évaluations des intensités induites par les différentes modalités du critère « Propriétés des Habitations »

Les experts sont unanimes sur l'évaluation des modalités C₅₁₂, C₅₂₁ et C₅₄₄. Les habitations construites en maçonnerie, ne possédant pas de gouttières et ne disposant pas de matériaux combustibles apparents à la jonction du mur et de la toiture, n'induisent qu'une très faible vulnérabilité au sein des interfaces habitat-forêt. Nous observons une faible variabilité des jugements sur les autres modalités. Il est intéressant de constater que pour la modalité

« PVC » concernant les matériaux des gouttières, les experts 1 et 4 attribuent une très faible vulnérabilité, qui selon eux s'explique par la difficulté de combustion du matériau. Ce dernier aura tendance à fondre. Dans l'hypothèse où ce type de gouttière serait chargé de particules végétales fines, en fondant, il empêcherait le feu naissant de résider trop longtemps au contact de la toiture. Cet avis n'est pas partagé par le reste des experts, en particulier E3 et E7, pour lesquels le PVC est à proscrire.

Sur la base des expertises conduites, nous obtenons alors une échelle de valeurs pour chaque critère du modèle conceptuel. Les modalités constituent les entrées du modèle. À titre d'exemple, supposons une interface habitat-forêt composée d'une seule habitation :

Son propriétaire (ou l'équipe chargée de réaliser un PPRIF) souhaite quantifier la vulnérabilité spécifique induite par le critère « Propriétés des Habitations » au sein de l'interface. Il commence par recenser les caractéristiques de sa maison :

- La charpente est apparente (C_{511}) ;
- Les façades sont en bois (C_{522}) ;
- Les ouvertures sont occultées par des volets en aluminium (C_{534}) ;
- L'habitation ne présente pas de gouttières (C_{544}).

Ensuite, il attribue à chaque modalité le score correspondant. Pour cet exemple nous utilisons les scores et les poids estimés par un seul expert (E7). Selon l'AHP, le calcul de la vulnérabilité spécifique induite par le critère C_5 ($V_s^{(E7)}(C_5)$) s'effectue par la méthode de la somme pondérée, où $P_{C_{5i}}^{(E7)}$ correspond au poids du sous-critère i et $S_{C_{5ij}}^{(E7)}$ au score de vulnérabilité de la modalité j définissant le sous-critère C_{5i} :

$$V_s^{(E7)}(C_5) = P_{C_{51}}^{(E7)} * S_{C_{511}}^{(E7)} + P_{C_{52}}^{(E7)} * S_{C_{522}}^{(E7)} + P_{C_{53}}^{(E7)} * S_{C_{534}}^{(E7)} + P_{C_{54}}^{(E7)} * S_{C_{544}}^{(E7)} = 4,6$$

Ainsi, du fait des caractéristiques de la maison, le critère C_5 contribue très fortement à la vulnérabilité de l'interface. Bien entendu, il est nécessaire de répéter l'opération sur les autres critères de manière à obtenir la vulnérabilité globale de l'interface.

Les modalités ont été définies, sur la base des retours d'expérience et des PPRIF étudiés, pour représenter l'éventail des configurations que l'on retrouve au sein des interfaces habitat-forêt. Pour un même critère, les modalités peuvent engendrer des réponses favorables ou défavorables au regard de la vulnérabilité. Ainsi, dans l'exemple précédent, le sous-critère C_{51} , relatif à la jonction entre les murs des constructions et leur toiture, contribue selon la modalité C_{511} très fortement à la vulnérabilité, contrairement à la modalité C_{512} , qui tempère la vulnérabilité. L'intérêt de cette approche réside dans la possibilité, qu'elle offre, de quantifier les scores de vulnérabilité pour chaque critère, et d'appréhender les effets compensatoires : les fortes intensités amenées par un critère peuvent être compensées par les faibles intensités induites par un autre. D'un point de vue opérationnel, cette approche doit alors permettre de cerner les actions potentielles de mitigation au niveau des interfaces habitat-forêt, en identifiant les critères névralgiques.

Les deux étapes de l'expertise (critères et modalités) ont été effectuées par les onze experts. Il s'agit maintenant de proposer une expertise collective, maximisant la représentativité des différentes évaluations. Ce travail fait l'objet de la prochaine section.

4.4. Agrégation des jugements d'experts

La flexibilité et l'adaptabilité de l'AHP lui procure la capacité d'intégrer les jugements de multiples experts dans le processus d'aide à la décision. Moreno-Jiménez *et al.* (2002) distinguent trois situations impliquant plusieurs experts, à savoir, (1) l'aide à la décision collective, (2) l'aide à la décision négociée et (3) l'aide à la décision systématique. Le premier scénario nécessite que les experts travaillent de concert à la résolution du problème. Dans le deuxième, chaque expert résout le problème séparément, puis ils se regroupent pour la recherche d'un consensus. Enfin, le troisième scénario autorise les experts à agir de manière indépendante, puis le principe de tolérance est alors invoqué pour définir la méthode intégrant les différents jugements.

Nous avons vu au chapitre 3 que la littérature sur l'AHP décrit deux approches d'aborder l'aide à la décision multi-experts (Saaty, 1989 ; Ramanathan et Ganesh, 1994 ; Forman et Peniwati, 1998). La première s'appuie sur l'agrégation des jugements individuels (AJI). Une nouvelle matrice de jugement est créée pour le groupe, sur la base des jugements individuels. Les poids sont dérivés de cette dernière afin d'obtenir la pondération collective. Les trois méthodes traditionnellement employées pour déterminer les entrées de la matrice de jugement du groupe sont : le consensus (méthode Delphi), le vote et l'agrégation des jugements (moyenne géométrique). La seconde approche propose de travailler sur les pondérations individuelles (API). La pondération collective est établie à partir des pondérations individuelles en utilisant une méthode d'agrégation. La technique d'agrégation la plus largement sollicitée repose sur la formule géométrique (pondérée ou non) de la moyenne.

Dans la section précédente nous avons constaté de nombreux jugements conflictuels entre les différents experts. À ces divergences s'ajoute le problème de l'incohérence de certaines matrices de jugement. Il existe, dans la littérature, des méthodes permettant d'améliorer la cohérence. T.L. Saaty conseille de reprendre le processus de comparaison avec les experts dépassant le seuil des 10 % d'incohérence, en pointant les comparaisons à réviser. Cao *et al.* (2008) ont développé une méthode qui génère automatiquement une matrice cohérente à partir de la matrice incohérente originale, et préservant au maximum l'intégrité des comparaisons initiales.

Nous ne sommes pas partis en quête d'une cohérence optimale, au détriment des informations brutes recueillies. L'évaluation de la vulnérabilité demande de s'aventurer dans le domaine de l'intangible. Il paraît alors légitime que les experts, malgré leurs compétences, leurs expériences, éprouvent des difficultés à rester cohérents dans leurs jugements, tant les facteurs s'entremêlent. T.L. Saaty et L.T. Tran (2007) ont par ailleurs démontré que la cohérence ne garantit pas la validité du résultat. D'une matrice incohérente peut résulter une pondération valide, davantage fidèle à la réalité (Saaty et Tran, 2007). Or c'est bien la validité qui nous intéresse, dans l'univers incertain de la vulnérabilité. L'incohérence, *a priori*, pourrait s'avérer cohérente, *a posteriori*. Tolérer l'incohérence des jugements s'est accepter la contradiction, s'est s'accorder sur l'idée que toute connaissance est évolutive, en constante révision elle tend vers une meilleure compréhension des processus réels.

La procédure d'analyse hiérarchique exige des jugements précis et reposent sur l'emploi de la moyenne, sous sa formule géométrique, pour agréger les jugements individuels. Face à la complexité de la vulnérabilité, nous adoptons la démarche holistique proposée par M.T. Escobar et J.M. Moreno-Jiménez (2007), qui permet de capturer :

- (1) La richesse des incertitudes inhérentes aux êtres humains ;

- (2) La vision de chaque expert sur la vulnérabilité ;
- (3) Les interdépendances entre les critères comparés ;
- (4) Les intensités des rapports de contribution que chaque expert donne à ces interdépendances.

Dans un premier temps, nous allons aborder points par points l'application de la méthode AIPS (*Aggregation of Individual Preference Structures*) à notre objet d'étude. Nous comparerons les résultats obtenus avec les méthodes classiques utilisées dans l'AHP. Dans un second temps, nous présenterons la méthode d'agrégation des scores de vulnérabilité relatifs aux modalités. Cette dernière, du fait de la nature des variables à agréger, diffère de la précédente. Nous confronterons également les résultats générés par plusieurs opérateurs d'agrégation.

4.4.1. Agrégation des expertises individuelles sur les comparaisons par paires de critères

Nous avons soulevé les conflits de jugements opposant les experts (cf. §4.3). Les groupes formés lors des ACP-CAH sont hétérogènes, et présentent une grande variabilité. Les divergences résultent de visions différentes sur la question de la vulnérabilité, où les systèmes de valeurs, implicites aux jugements, exercent leur influence sur les expertises. Il s'agit alors de n'en discriminer aucune.

À la lumière de ce qui précède, nous proposons d'appliquer la méthode AIPS sur les expertises recueillies pour les trois premiers niveaux hiérarchiques du modèle conceptuel. L'AIPS intègre des idées similaires à la méthode de Borda (cf. §3.6) et se veut systémique (Escobar et Moreno-Jiménez, 2007). Les méthodes d'agrégations traditionnelles (AJI et API) sont transposées aux structures de préférences (PS - *Preference Structures*) que nous appelons structures de jugements (SJ). L'AIPS se démarque également de la méthode de Borda traditionnelle, qui calcule des scores sur des classements ordinaux (fréquence absolue des experts classant un critère à une position donnée). Au caractère ordinal des SJ, l'AIPS intègre l'intensité de contribution relative d'un critère à une position, définie comme la somme des importances relatives des classements dans lesquels le critère occupe cette position.

Définitions (Escobar et Moreno-Jimenez, 2007)

Étant donné n critères C_1, \dots, C_n sont alors définis :

- (1) Un classement (*Ranking*) des n critères, $R_j = (r_{j1}, r_{j2}, \dots, r_{jn})$ comme toute permutation de $1, 2, \dots, n$. Il y a $n!$ classements possibles, $R_j (j = 1, \dots, s = n!)$, où $r_{jp} = i$ signifie que le critère i est placé à la $p^{\text{ième}}$ position du $j^{\text{ième}}$ classement ;
- (2) La distribution des structures de jugements, comme la distribution de probabilité des $n!$ classements possibles des n critères.

Procédure (Escobar et Moreno-Jimenez, 2007)

Afin d'obtenir le « poids global » (*holistic importance*) d'un critère i , noté $W_i^G = W^G(C_i)$, cinq étapes sont proposées :

- (1) Chaque expert restitue son évaluation (comparaisons). Sur la base des matrices formées, l'incertitude est intégrée par l'addition et la soustraction d'une unité, sur l'échelle de Saaty, à chaque entrée des matrices ;
- (2) La distribution des structures de jugements pour chaque expert est calculée ;
- (3) La distance entre chaque paire d'experts est ensuite calculée ;

- (4) Le poids relatif pour un classement donné pour l'ensemble des structures de jugements est calculé ;
- (5) La procédure se finalise en synthétisant le poids global d'un critère pour le groupe.


Nous avons introduit les bases de la méthode, il s'agit maintenant de présenter son application sur les Niveaux 1, 2 et 3 du modèle conceptuel. Dans les sous-sections suivantes nous présenterons les calculs pour le niveau 1 de la hiérarchie, sachant que la même procédure est répétée sur les Niveaux 2 et 3.

a. Distribution des structures de jugements pour le premier niveau de la hiérarchie

Le premier niveau de la hiérarchie est composé des six critères $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$. Les évaluations sont menées par onze experts. La première étape de l'AIPS introduit la notion d'incertitude dans les jugements émis par les experts. Les onze matrices de jugement sont alors transformées par addition et soustraction d'une unité (sur l'échelle de comparaison par paires) à chaque jugement brut afin de former des intervalles de jugements (Fig. 52).

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
C_1	1	6	1/2	7	1/2	1/2
C_2	1/6	1	1/5	1/7	1/7	1/5
C_3	2	5	1	7	1	3
C_4	1/7	7	7	1	1	3
C_5	2	7	1	1	1	3
C_6	2	5	1/3	1/3	1/3	1

$MJ^{(E_1)} =$



Transformation

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
C_1	1	(5,7)	(1/3,1)	(6,8)	(1/3,1)	(1/3,1)
C_2	(1/7,1/5)	1	(1/6,1/4)	(1/8,1/6)	(1/8,1/6)	(1/6,1/4)
C_3	(1,3)	(4,6)	1	(6,8)	(1/2,2)	(2,4)
C_4	(1/8,1/6)	(6,8)	(1/8,1/6)	1	(1/2,2)	(2,4)
C_5	(1,3)	(6,8)	(1/2,2)	(1/2,2)	1	(2,4)
C_6	(1,3)	(4,6)	(1/4,1/2)	(1/4,1/2)	(1/4,1/2)	1

$MJ'^{(E_1)} =$

Fig. 52 : Exemple d'insertion de l'incertitude dans une matrice de jugement - E_1 - Niveau 1

Les matrices carrées formées sont réciproques et de dimension 6. À l'issue de la transformation, chaque cellule, excepté pour la diagonale, présente un intervalle de trois valeurs. Pour chaque expert, 720 (soit 6!) structures de jugements et 14 348 907 (soit 3^{15}) matrices de jugements sont alors possibles.

Les structures de jugements sont déterminées à partir des matrices à intervalles. On attribue ainsi à chaque expert la distribution de ses structures de jugements, notée $(R_j^{(k)}; p_j^{(k)})$ avec $k = 1, \dots, 11$ et $j = 1, \dots, 720$. Où $p_j^{(k)}$ représente la probabilité du classement j pour l'expert k .

Pour effectuer ce calcul, le logiciel R a été utilisé. Le code génère un million de matrices par tirage aléatoire avec remise d'une valeur dans les intervalles des cellules de la diagonale supérieure. La réciproque des valeurs tirées est automatiquement calculée pour les cellules de la diagonale inférieure. Les matrices en doublon sont ensuite éliminées. Cette procédure permet de balayer le champ des matrices de jugements possibles et d'aborder la question de

l'incertitude d'un point de vue probabiliste. Par la suite, on applique la fonction AHP sur l'ensemble des matrices.

Nous obtenons un million de pondérations, desquelles nous extrayons les structures de jugements affublées de leur probabilité, leur ratio de cohérence et des poids relatifs à chaque critère. Des statistiques univariées (minimum, moyenne, maximum, écart-type) sont calculées sur les ratios et les poids.

Le temps de calcul est conséquent. Il varie en fonction du nombre de matrices générées (Tab. 37). Pour les matrices de dimension inférieure à 6, la totalité des matrices possibles a pu être générée, les temps de calcul sont courts. En revanche, pour les matrices du Niveau 1 (6x6) et 2 (critère « Aménagement » – 7x7), nous n'avons généré qu'un million de matrices, ne couvrant donc pas l'ensemble des possibilités. Néanmoins, nous avons effectué l'opération à 10 reprises, retombant toujours sur les mêmes résultats, et ce, pour tous les experts.

Dimension	Matrices possibles	Matrices générées	Temps de calcul
2	3	100	Quelques secondes
3	27	1 000	Quelques secondes
4	729	10 000	≈ 4-5 minutes
6	14 348 907	1 000 000	≈ 7-8 heures
7	10 460 353 203	1 000 000	≈ 7-8 heures

Tab. 37 : Nombre de matrices possibles en fonction de la dimension initiale, et temps de calcul

Les distributions des structures de jugements se présentent sous la forme d'une table (Tab. 38). Nous avons découpé la table des résultats du Niveau 1 en trois, aux critères C_1, \dots, C_6 correspondent les chiffres 1, ..., 6.

	2>1>3>4>5>6	2>1>3>5>4>6	2>3>1>4>5>6	2>3>1>5>4>6	2>3>4>5>1>6	2>3>4>5>6>1	2>3>5>1>4>6	2>3>5>1>6>4	2>5>3>1>4>6	2>5>3>1>6>4
E1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E4	0	0	0	0	0,733	0,267	0	0	0	0
E5	0,207	0,206	0,295	0,292	0	0	0	0	0	0
E6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E9	0	0	0	0,16	0	0	0,451	0,164	0,161	0,063
E10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

	3>1>4>5>2>6	3>1>4>5>6>2	3>2>4>1>5>6	3>2>4>5>6>1	3>2>4>6>5>1	3>2>5>4>6>1	3>2>5>6>4>1	3>2>6>4>5>1	3>2>6>5>4>1	3>4>1>5>2>6
E1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E2	0	0	0	0,168	0,167	0,166	0,167	0,166	0,165	0
E3	0,481	0,159	0	0	0	0	0	0	0	0,276
E4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E8	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
E9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

	3>4>1>5>6>2	3>4>5>2>1>6	3>5>2>6>1>4	4>3>5>2>1>6	5>1>3>6>2>4	5>1>6>3>2>4	5>3>1>6>2>4	5>3>6>1>2>4	5>6>1>3>2>4	6>1>3>2>5>4
E1	0	0	0	0	0,318	0,318	0,175	0,084	0,105	0
E2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E3	0,085	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
E7	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
E8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
E10	0	0,370	0	0,630	0	0	0	0	0	0
E11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tab. 38 : Distribution des probabilités de chaque structure de jugements pour les onze experts

Nous obtenons trente structures de jugements pour les onze experts. Leur nombre varie, allant de 1 pour E₆, E₇, E₈ et E₁₁ à 6 pour E₂, en passant par 4 pour E₃. Au travers des différentes distributions, nous explicitons les incertitudes ressenties par les experts lors de la formalisation de leur connaissance par le biais des comparaisons par paires de critères.

b. *Calcul des distances entre les experts*

À partir des distributions, nous calculons la distance entre les structures de jugements associées à chaque paire d'experts (Tab. 39) grâce à l'équation proposée par Altuzarra *et al.* (2005) :

$$d_{kk'} = d(E_k, E_{k'}) = \left[(p^{(k)} - p^{(k')})^T S (p^{(k)} - p^{(k')}) \right]^{1/2} \tag{Éq. 1}$$

où $p^{(k)} = (p_1^{(k)}, \dots, p_s^{(k)})^T$ et S correspond à la matrice de similarité (Tab. 40) dont les éléments s_{jl} mesurent la similitude entre deux classements par le biais de leur corrélation ordinale. Le calcul des similitudes fait appel au coefficient de corrélation des rangs de Spearman (ρ)³ :

$$s_{jl} = \rho(R_j, R_l) = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n^3 - n} \tag{Éq. 2}$$

avec $d_i = p - q$, où $r_{jp} = r_{lq} = i$, c'est à dire, d_i est la différence entre la position occupée par le critère C_i dans les deux classements. De cette manière, les interdépendances entre les critères comparés sont alors prises en compte (Escobar et Moreno-Jiménez, 2007).

$d_{kk'}$	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁
E ₁	0	1,506	1,324	1,67	1,472	1,145	0,973	1,655	1,284	1,552	1,450
E ₂	1,506	0	1,28	0,611	1,046	1,474	0,756	0,755	0,860	0,994	1,218
E ₃	1,324	1,28	0	1,255	1,167	1,523	1,318	0,907	1,299	0,814	0,231
E ₄	1,67	0,611	1,255	0	0,753	1,742	1,097	0,517	0,684	0,860	1,152
E ₅	1,472	1,046	1,167	0,753	0	1,458	1,179	0,654	0,515	1,253	1,187
E ₆	1,145	1,474	1,523	1,742	1,458	0	1,352	1,621	1,524	1,872	1,656
E ₇	0,973	0,756	1,318	1,097	1,179	1,352	0	1,171	0,809	1,261	1,352
E ₈	1,655	0,755	0,907	0,517	0,654	1,621	1,171	0	0,821	0,83	0,828
E ₉	1,284	0,86	1,299	0,684	0,515	1,524	0,809	0,821	0	0,83	1,305
E ₁₀	1,552	0,994	0,814	0,86	1,253	1,872	1,261	0,83	0,83	0	0,623
E ₁₁	1,45	1,218	0,231	1,152	1,187	1,656	1,352	0,828	1,305	0,623	0

Tab. 39 : Distances entre les experts - Niveau 1

Les résultats indiquent de forts rapprochements entre certains experts (Tab. 39). Nous avons surligné les plus fortes convergences, pour chaque expert (lecture en lignes). Les experts E₁ et E₆ se démarquent par leurs différences par rapport aux autres. Ce résultat avait

été remarqué sur le dendrogramme des experts, lors de la CAH. De même, nous retrouvons la forte convergence entre les deux Forestiers E_3 et E_{11} , mais aussi entre E_5 et E_9 .

Selon la même logique, nous ré-employons l'équation 1 pour calculer les distances entre les experts et les différents classements (Tab. 41) :

$$d(E_k, R_j) = \left[(p^{(k)} - p^{(R_j)})^T S (p^{(k)} - p^{(R_j)}) \right]^{1/2}$$

avec $p^{(R_j)} = (p_1 = 0, \dots, p_j = 1, p_{j+1} = 0, \dots, p_s = 0)$. Pour chaque classement, la moyenne de des onzes distances fournit la distance globale de chaque classement par rapport au groupe d'expert, notée $d^G(R_j)$.

S-Niv1	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10	R11	R12	R13	R14	R15	R16	R17	R18	R19	R20	R21	R22	R23	R24	R25	R26	R27	R28	R29	R30
R1	1	0.9	0.9	0.9	0.7	0.4	0.7	0.6	0.6	0.5	0.4	0.1	0.7	0.3	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	0.3	0	0.1	0	0.1	-0.1	-0.3	-0.2	-0.4	-0.5	-0.1
R2	0.9	1	0.9	0.9	0.6	0.4	0.8	0.8	0.8	0.7	0.3	0	0.6	0.3	0.1	0.3	0.3	0.1	0.1	0.1	-0.1	0.1	0.3	0	0.1	0	0.1	-0.1	-0.3	0
R3	0.9	0.9	1	0.9	0.8	0.7	0.8	0.7	0.7	0.5	0.4	0.1	0.9	0.6	0.5	0.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.1	0.4	0.3	0.3	-0.2	-0.4	-0.1	-0.3	-0.6	-0.1
R4	0.9	0.9	0.9	1	0.8	0.6	0.9	0.9	0.8	0.8	0.4	0.1	0.8	0.5	0.4	0.6	0.5	0.4	0.4	0.4	0.3	0.0	0.3	0.5	0.1	-0.1	0.1	0.0	-0.3	-0.1
R5	0.7	0.6	0.8	0.8	1	0.9	0.8	0.7	0.7	0.5	0.3	0.0	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.6	0.5	0.4	0.1	0.7	0.4	0.6	-0.4	-0.6	-0.2	-0.3	-0.7	-0.5
R6	0.4	0.4	0.7	0.6	0.9	1	0.7	0.6	0.6	0.5	0	-0.2	0.8	0.9	0.9	0.9	0.8	0.8	0.7	0.2	0	0.6	0.4	0.5	-0.5	-0.7	-0.3	-0.2	-0.6	-0.5
R7	0.7	0.8	0.8	0.9	0.8	0.7	1	0.9	0.9	0.9	0.3	0	0.7	0.7	0.5	0.8	0.7	0.4	0.5	0.2	-0.1	0.4	0.7	0.3	0.1	-0.1	0.3	0.1	-0.2	-0.3
R8	0.6	0.8	0.7	0.9	0.7	0.6	0.9	1	0.9	0.9	0.1	-0.1	0.5	0.4	0.7	0.8	0.5	0.7	0	-0.3	0.2	0.8	0	0.3	0.1	0.4	0.3	0	0	0
R9	0.6	0.8	0.7	0.8	0.7	0.6	0.9	0.9	1	0.9	0.1	-0.2	0.5	0.3	0.7	0.6	0.2	0.4	0	-0.3	0.3	0.6	0.2	0.3	0.1	0.3	0.2	0	-0.4	0
R10	0.5	0.7	0.5	0.8	0.5	0.5	0.9	0.9	0.9	1	-0.1	-0.3	0.3	0.4	0.2	0.6	0.7	0.3	0.5	-0.2	-0.4	0.1	0.7	-0.1	0.4	0.3	0.4	0.4	0.2	-0.1
R11	0.4	0.3	0.4	0.4	0.3	0	0.3	0.1	0.1	-0.1	1	0.9	0.6	0.3	0.1	0.2	0	0	-0.1	0.9	0.9	0.7	0.1	0.5	0.3	0	0.3	0.1	-0.3	-0.1
R12	0.1	0	0.1	0.1	0	-0.2	0	-0.1	-0.2	-0.3	0.9	1	0.4	0.1	0	0	-0.1	-0.1	-0.1	0.9	0.9	0.5	0.1	0.4	0.3	0.1	0.4	0.2	-0.1	0
R13	0.7	0.6	0.9	0.8	0.9	0.8	0.7	0.5	0.5	0.3	0.6	0.4	1	0.8	0.8	0.7	0.5	0.6	0.5	0.7	0.4	0.7	0.3	0.6	-0.3	-0.6	-0.1	-0.3	-0.7	-0.3
R14	0.3	0.3	0.6	0.5	0.9	0.9	0.7	0.5	0.5	0.4	0.3	0.1	0.8	1	0.9	0.9	0.8	0.8	0.8	0.4	0.3	0.8	0.5	0.7	-0.4	-0.6	-0.1	0	-0.5	-0.4
R15	0.3	0.1	0.5	0.4	0.8	0.9	0.5	0.4	0.3	0.2	0.1	0	0.8	0.9	1	0.8	0.8	0.9	0.8	0.3	0.2	0.6	0.4	0.5	-0.5	-0.7	-0.3	-0.1	-0.6	-0.2
R16	0.3	0.3	0.5	0.6	0.8	0.9	0.8	0.7	0.7	0.6	0.2	0	0.7	0.9	0.8	1	0.9	0.8	0.8	0.3	0.1	0.7	0.8	0.5	-0.1	-0.3	0.2	0.3	-0.3	-0.4
R17	0.1	0.3	0.4	0.5	0.7	0.8	0.7	0.8	0.6	0.7	0	-0.1	0.5	0.8	0.8	0.9	1	0.8	0.9	0.1	0	0.5	0.9	0.3	0	-0.1	0.3	0.4	0	-0.1
R18	0.1	0.1	0.4	0.4	0.6	0.8	0.4	0.5	0.2	0.3	0	-0.1	0.6	0.8	0.9	0.8	0.8	1	0.9	0.1	0	0.4	0.5	0.2	-0.4	-0.5	-0.1	0	-0.4	0.1
R19	0.1	0.1	0.4	0.4	0.5	0.7	0.5	0.7	0.4	0.5	-0.1	-0.1	0.5	0.8	0.8	0.8	0.9	0.9	1	-0.03	-0.1	0.3	0.8	0.1	-0.1	-0.3	0.1	0.3	-0.1	0.1
R20	0.3	0.1	0.4	0.3	0.4	0.2	0.2	0	0	-0.2	0.9	0.9	0.7	0.4	0.3	0.3	0.1	0.1	0	1	0.9	0.8	0.1	0.8	0	-0.3	0.1	0	-0.4	-0.4
R21	0.0	-0.1	0.1	0	0.1	0	-0.1	-0.3	-0.4	0.9	0.9	0.9	0.4	0.3	0.2	0.1	0	0	-0.1	0.9	1	0.7	0	0.7	0.1	-0.1	0.2	0.1	-0.3	-0.2
R22	0.1	0.1	0.4	0.3	0.7	0.6	0.4	0.2	0.3	0.1	0.7	0.5	0.7	0.8	0.6	0.7	0.5	0.4	0.3	0.8	0.7	1	0.4	0.9	-0.1	-0.4	0.1	0.1	-0.4	-0.7
R23	0	0.3	0.3	0.5	0.4	0.4	0.7	0.8	0.6	0.7	0.1	0.1	0.3	0.5	0.4	0.8	0.9	0.5	0.8	0.1	0	0.4	1	0.1	0.5	0.3	0.7	0.8	0.4	0.1
R24	0.1	0	0.3	0.1	0.6	0.5	0.3	0	0.2	-0.1	0.5	0.4	0.6	0.7	0.5	0.5	0.3	0.2	0.1	0.8	0.7	0.9	0.1	1	-0.3	-0.5	-0.1	-0.1	-0.5	-0.8
R25	-0.1	0.1	-0.2	0.1	-0.4	-0.5	0.1	0.3	0.3	0.4	0.3	0.3	-0.3	-0.4	-0.5	-0.1	0	-0.4	-0.1	0	0.1	-0.1	0.5	-0.3	1	0.9	0.9	0.8	0.3	
R26	-0.3	0	-0.4	-0.1	-0.6	-0.7	-0.1	0.1	0.1	0.3	0	0.1	-0.6	-0.6	-0.7	-0.3	-0.1	-0.5	-0.3	-0.3	-0.1	-0.4	0.3	-0.5	0.9	1	0.8	0.8	0.9	0.4
R27	-0.2	0.1	-0.1	0.1	-0.2	-0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.3	0.4	-0.1	-0.1	-0.3	0.2	0.3	-0.1	0.1	0.1	0.2	0.1	0.7	-0.1	0.9	0.8	1	0.9	0.8	0.2
R28	-0.4	-0.1	-0.3	0	-0.3	-0.2	0.1	0.3	0.2	0.4	0.1	0.2	-0.3	0	-0.1	0.3	0.4	0	0.3	0	0.1	0.1	0.8	-0.1	0.8	0.8	0.9	1	0.8	0.3
R29	-0.5	-0.3	-0.6	-0.3	-0.7	-0.6	-0.2	0	0	0.2	-0.3	-0.1	-0.7	-0.5	-0.6	-0.3	0	-0.4	-0.1	-0.4	-0.3	-0.4	0.4	-0.5	0.8	0.9	0.8	0.8	1	0.4
R30	-0.1	0	-0.1	-0.1	-0.5	-0.5	-0.3	0	-0.4	-0.1	-0.1	0	-0.3	-0.4	-0.2	-0.4	-0.1	0.1	0.1	-0.4	-0.2	-0.7	0.1	-0.8	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	1

Tab. 40 : Matrice de similarité - Niveau 1

	$d(E_1, R_j)$	$d(E_2, R_j)$	$d(E_3, R_j)$	$d(E_4, R_j)$	$d(E_5, R_j)$	$d(E_6, R_j)$	$d(E_7, R_j)$	$d(E_8, R_j)$	$d(E_9, R_j)$	$d(E_{10}, R_j)$	$d(E_{11}, R_j)$	$d^G(R_j)$
R ₁	1,568	1,219	1,196	0,886	0,26	1,474	1,394	0,756	0,749	1,327	1,219	1,095
R ₂	1,374	1,219	1,26	0,948	0,261	1,434	1,219	0,894	0,546	1,395	1,309	1,078
R ₃	1,594	0,956	1,13	0,642	0,219	1,512	1,219	0,478	0,613	1,172	1,121	0,969
R ₄	1,404	0,956	1,196	0,725	0,22	1,474	1,014	0,676	0,337	1,249	1,219	0,952
R ₅	1,668	0,675	1,223	0,09	0,696	1,757	1,121	0,478	0,657	0,855	1,121	0,94
R ₆	1,7	0,477	1,372	0,248	0,935	1,724	1,069	0,676	0,807	0,919	1,265	1,018
R ₇	1,344	0,828	1,272	0,618	0,517	1,586	0,828	0,756	0,102	1,154	1,265	0,934
R ₈	1,227	0,828	1,405	0,833	0,662	1,394	0,676	0,956	0,27	1,364	1,434	1,005
R ₉	1,248	1,014	1,401	0,781	0,711	1,656	0,894	1,014	0,303	1,22	1,394	1,058
R ₁₀	1,122	1,014	1,522	0,96	0,823	1,474	0,756	1,171	0,392	1,421	1,549	1,11
R ₁₁	1,303	1,309	0,147	1,259	1,091	1,512	1,309	0,894	1,243	0,896	0,338	1,027
R ₁₂	1,23	1,394	0,283	1,458	1,327	1,394	1,352	1,121	1,446	1,016	0,478	1,136
R ₁₃	1,655	0,755	0,907	0,517	0,654	1,621	1,171	0	0,821	0,83	0,828	0,887
R ₁₄	1,637	0,337	1,182	0,419	1,018	1,690	0,956	0,586	0,890	0,758	1,069	0,958
R ₁₅	1,718	0,338	1,264	0,611	1,099	1,549	1,069	0,676	1,056	0,958	1,171	1,046
R ₁₆	1,452	0,337	1,246	0,539	1,018	1,656	0,676	0,756	0,728	0,872	1,171	0,95
R ₁₇	1,346	0,338	1,382	0,776	1,099	1,474	0,478	0,956	0,769	1,136	1,352	1,01
R ₁₈	1,629	0,339	1,398	0,828	1,174	1,352	0,956	0,894	1,085	1,203	1,352	1,11
R ₁₉	1,443	0,339	1,453	0,895	1,175	1,309	0,676	1,014	0,957	1,278	1,434	1,089
R ₂₀	1,45	1,218	0,231	1,152	1,187	1,656	1,352	0,828	1,305	0,623	0	1
R ₂₁	1,385	1,309	0,335	1,366	1,407	1,549	1,394	1,069	1,5	0,785	0,338	1,131
R ₂₂	1,493	0,894	0,755	0,833	1,203	1,821	1,121	0,756	1,129	0,213	0,586	0,982
R ₂₃	0,973	0,756	1,318	1,097	1,179	1,352	0	1,171	0,809	1,261	1,352	1,024
R ₂₄	1,598	1,068	0,87	0,899	1,298	1,912	1,352	0,894	1,272	0,125	0,676	1,088
R ₂₅	0,185	1,549	1,255	1,668	1,418	1,219	1,014	1,621	1,253	1,537	1,394	1,283
R ₂₆	0,245	1,656	1,456	1,791	1,556	1,121	1,171	1,789	1,405	1,691	1,586	1,406
R ₂₇	0,341	1,352	1,192	1,552	1,411	1,265	0,756	1,512	1,177	1,406	1,309	1,207
R ₂₈	0,473	1,265	1,345	1,569	1,543	1,219	0,676	1,586	1,267	1,446	1,434	1,257
R ₂₉	0,409	1,586	1,583	1,806	1,677	1,069	1,121	1,852	1,482	1,725	1,69	1,455
R ₃₀	1,145	1,474	1,523	1,742	1,458	0	1,352	1,621	1,524	1,872	1,656	1,397

Tab. 41 : Distances des experts par rapport aux classements et distance globale des classements par rapport au groupe d'experts

c. *Calcul de la contribution holistique des critères*

Suite à l'agrégation des distances relatives des experts par rapport aux classements, nous calculons l'importance relative de chaque classement pour le groupe d'experts, appelée « importance holistique » (HI - *holistic importance*) (Escobar et Moreno-Jiménez, 2007). Nous utilisons l'équation suivante :

$$HI(R_j) = \prod_h^G(R_j) = \frac{1/d^G(R_j)}{\sum_j 1/d^G(R_j)}$$

Cette méthode permet de prendre en considération les interactions implicites entre les structures de jugements, de même que les interrelations entre les experts. Elle offre une alternative à la méthode de « marginalisation » (MI - *marginal importance*) traditionnellement employée (Escobar et Moreno-Jiménez, 2007), qui consiste à calculer la moyenne des distributions de probabilités, par la formule arithmétique ($MI(R_j) = \prod_a^G(R_j) = \frac{1}{r} \sum_{k=1}^r p_j^{(k)}$) et néglige alors les aspects précédents.

Nous obtenons ainsi le classement le plus pertinent pour le groupe d'expert (Tab. 30). Selon la méthode de l'importance holistique, appliquée au Niveau 1 de la hiérarchie, R_{13} ($C_3 > C_2 > C_4 > C_1 > C_5 > C_6$) est le classement sur lequel le groupe d'expert accordent le plus d'importance. Ce classement fait référence à celui de l'expert E_8 . La méthode de l'importance marginale place le classement R_{20} ($C_3 > C_4 > C_1 > C_5 > C_2 > C_6$) en tête, et R_{13} en deuxième position. Ce classement est au 9^{ème} rang d'importance holistique, il correspond au classement résultant de l'expertise de l'expert E_{11} . On constate de nettes différences entre les deux méthodes (Fig. 53). Le classement occupant le 2^{ème} rang d'importance holistique se trouve au 9^{ème} rang d'importance marginale.

Ces différences s'interprètent par la non prise en compte des interdépendances entre les classements, dans les calculs de l'importance marginale.

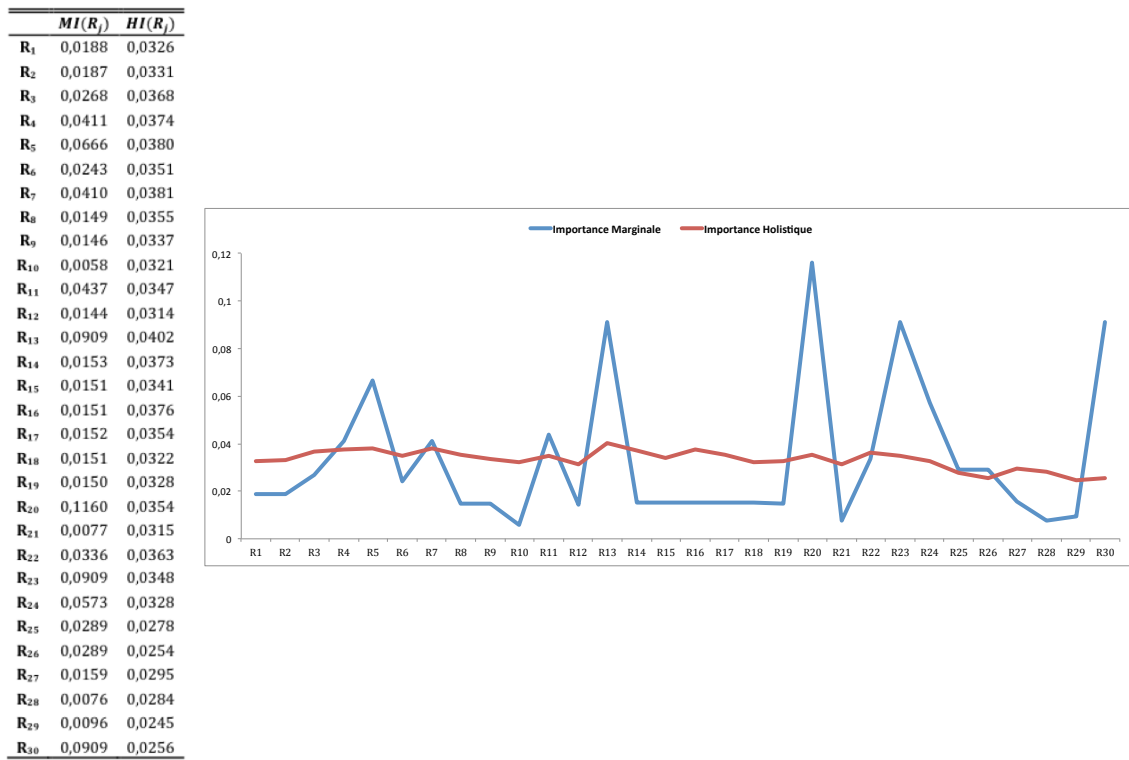


Fig. 53 : Comparaison des importances marginales et holistiques des classements sur le Niveau 1 de la hiérarchie

La procédure calculatoire AIPS nous a permis d'obtenir les distances entre chaque paire d'experts. En appliquant une méthode de positionnement multidimensionnel (Desbois, 2005) à la matrice des distances, il est possible de représenter les différentes positions des experts ainsi que des classements, sur un espace euclidien de dimension 2.

Nous avons appliqué cette méthode de manière à visualiser les positions des onze experts (Fig. 54), et de deux experts hypothétiques : MI et HI. MI représente la position du groupe d'experts calculée selon la méthode des importances marginales, HI celle du groupe d'experts calculée selon la méthode des importances holistiques. MI occupe la position centrale aux onze experts. En revanche, on observe un décalage pour HI, qui lui prend non seulement en compte les positions des onze experts mais également les positions des différentes structures de jugements possibles. La méthode AIPS basé sur les importances holistiques intègre la multiplicité des jugements et propose alors la structure de jugement la plus représentative du groupe.

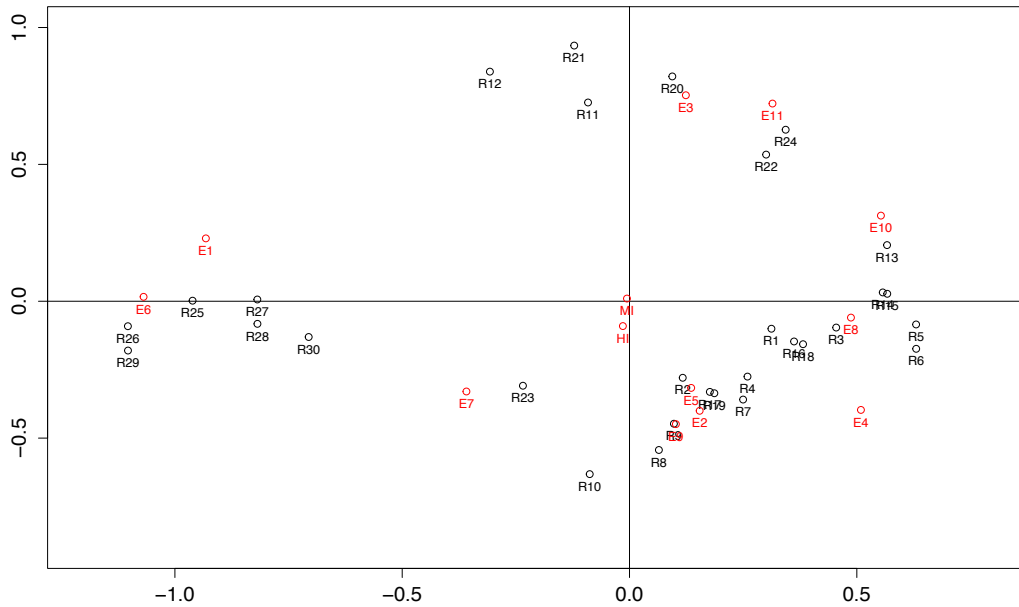


Fig. 54 : Positionnement des experts et des classements sur un espace euclidien de dimension 2

La dernière étape correspond au calcul de l'importance holistique ou contribution holistique de chaque critère à la vulnérabilité. La méthode de Borda est adaptée à la situation. Le calcul se base sur l'équation suivante (Escobar et Moreno-Jiménez, 2007) :

$$W^G(C_i) = \sum_{p=1}^n (n - p + 1) \sum_{j \in S_p(C_i)} HI(R_j)$$

où $S_p(C_i) = \{j | C_i \text{ occupe la position } p \text{ dans le classement } R_j\}$.

Chaque structure de jugements possède six positions ($n=6$). Pour un critère, la somme des importances holistiques, pondérées des scores de position sur chaque classement, renseigne alors sa contribution holistique (Tab. 42). Le critère C_3 « Structure de la Végétation » est le plus influant au regard de la vulnérabilité territoriale des interfaces habitat-forêt, selon le groupe d'expert. La structure globale des jugements donne : $C_3 > C_2 > C_5 > C_1 > C_4 > C_6$. En termes de vulnérabilité, les résultats de l'AIPS traduisent une forte contribution de la composante « exposition », principalement représentée par la topographie et la structure de la végétation du site en interface (45 %). La composante « sensibilité » contribue à 17 %, en revanche, la capacité de réponse est relayée en dernière position, induisant 10 % de la vulnérabilité globale.

Critères	AJI	AIPS	SJ
C1	0,1307	0,1422	4
C2	0,2052	0,2028	2
C3	0,3540	0,2461	1
C4	0,1170	0,1342	5
C5	0,1343	0,1725	3
C6	0,0589	0,1021	6

Tab. 42 : Bilan par méthodes des contributions relatives des critères du Niveau 1

En parallèle, nous avons calculé les contributions relatives des critères selon la méthode AJI (moyenne géométrique des jugements individuels), traditionnelle à l'AHP. Les résultats présentent les mêmes structures de jugements sur le premier niveau de la hiérarchie (Tab. 42). Cependant, l'AJI privilégie le rôle de la structure de la végétation (contribution plus

importante de l'ordre de 11 %). Cette augmentation se fait au détriment du critère « Facteurs Humains », dont la contribution est divisée de moitié.

Ces deux méthodes de calcul ont été appliquées à l'ensemble du modèle conceptuel (Tab. 43), à l'exception des modalités, en marge de l'AHP.

Code	AJI	Rang	AIPS	Rang
C ₁	0,1210	4	0,1422	4
C ₂	0,1997	2	0,2028	2
C ₃	0,3696	1	0,2461	1
C ₄	0,1030	5	0,1342	5
C ₅	0,1452	3	0,1725	3
C ₆	0,0615	6	0,1021	6
C ₁₁	0,0923	5	0,1118	5
C ₁₂	0,1832	3	0,1906	1
C ₁₃	0,1705	4	0,1344	4
C ₁₄	0,2496	1	0,1775	3
C ₁₅	0,0761	6	0,1079	6
C ₁₆	0,1872	2	0,1880	2
C ₁₇	0,0410	7	0,0898	7
C ₂₁	0,2780	3	0,2444	3
C ₂₂	0,1041	4	0,1862	4
C ₂₃	0,3247	1	0,3072	1
C ₂₄	0,2932	2	0,2622	2
C ₃₁	0,4919	2	0,4899	2
C ₃₂	0,5081	1	0,5101	1
C ₄₁	0,2906	2	0,3788	2
C ₄₂	0,7094	1	0,6212	1
C ₅₁	0,2655	2	0,2667	2
C ₅₂	0,1596	3	0,2215	3
C ₅₃	0,4674	1	0,3403	1
C ₅₄	0,1075	4	0,1716	4
C ₆₁	0,1229	3	0,2529	3
C ₆₂	0,2525	2	0,3252	2
C ₆₃	0,6245	1	0,4219	1
C ₁₁₁	0,2077	2	0,3636	2
C ₁₁₂	0,7923	1	0,6364	1
C ₁₂₁	0,1764	2	0,2715	3
C ₁₂₂	0,1406	3	0,2989	2
C ₁₂₃	0,6830	1	0,4296	1
C ₁₃₁	0,3283	2	0,4091	2
C ₁₃₂	0,6717	1	0,5909	1
C ₁₅₁	0,6670	1	0,5909	1
C ₁₅₂	0,3330	2	0,4091	2
C ₆₂₁	0,2601	2	0,3889	2
C ₆₂₂	0,7399	1	0,6111	1
C ₆₃₁	0,2437	2	0,3990	2
C ₆₃₂	0,7563	1	0,6010	1

Tab. 43 : Contributions relatives des éléments du modèle conceptuel et structures de jugements calculées pour chaque nœuds de la hiérarchie, selon les méthodes AJI et AIPS

Les deux méthodes proposent des forces de contributions différentes, à la fois au niveau des intensités mais également des rangs (famille de sous-critères d'aménagement, C_1). L'AIPS génère des résultats plus conservateurs, contrairement à l'AJI qui, plus influencée par les valeurs extrêmes et les avis majoritaires, semble plus tranchante, moins incertaine. Cette distinction est cohérente, l'AJI intègre seulement l'information sur l'intensité des jugements issus des comparaisons par paires. Elle n'explore ni n'exploite le champ des structures de jugements possibles, qui capture les interdépendances entre les critères comparés et leurs intensités. Ainsi, contrairement à l'AIPS, elle ne considère pas le caractère imprécis et incertain. Quand bien même les jugements émis selon l'échelle de comparaison par paires présentent, par essence, imprécisions et incertitude, l'AJI les assimile à des certitudes. L'AIPS autorise une remise en question individuelle pour balayer le champ des possibles et l'intégrer au jugement de groupe.

Les scénarii d'endommagement sont innombrables. L'AIPS présente de par sa souplesse une plus grande adaptabilité que la méthode AJI, qui semble privilégier un type de scénario. Cependant, ces résultats théoriques doivent être éprouvés, confrontés à des cas réels, de manière à juger leur fiabilité.

4.4.2. Agrégation des expertises individuelles sur les scores des modalités

L'agrégation des scores, évalués par les experts, pour chaque modalité du modèle conceptuel diffère de l'agrégation précédente. Les experts ont attribué des scores de vulnérabilité induite par l'occurrence d'une modalité. La vulnérabilité est définie selon une échelle de valeurs textuelles, ordinale. Les scores sont exprimés sous forme de grandeurs quantitatives, discrètes, traduisant numériquement les valeurs linguistiques des cinq catégories de vulnérabilité (très faible,..., modérée,..., très forte). Les estimateurs statistiques tels que les différentes formules de la moyenne n'ont alors aucun sens mathématique, ce qui pose le problème de l'agrégation des expertises.

Ce mode de représentation introduit un caractère vague et imprécis, qu'il s'agit de traiter mathématiquement. Dans la théorie des ensembles classiques, il n'y a que deux situations acceptables pour un élément, appartenir ou ne pas appartenir à un sous-ensemble. L. Zadeh (1965) propose une échappatoire à la logique booléenne, en introduisant la notion d'appartenance : permettre des gradations dans l'appartenance d'un élément à un sous-ensemble, c'est-à-dire autoriser un élément à appartenir plus ou moins fortement à ce sous-ensemble. La théorie des sous-ensembles flous permet alors un rapprochement entre la précision des mathématiques classiques et la subtile imprécision du monde réel. C'est une théorie mathématique dont l'objectif est de modéliser les notions vagues du langage naturel pour pallier l'inadaptation de la théorie des ensembles classiques. Ce concept permet d'éviter les passages brusques d'une classe à une autre, et autorise les éléments à n'appartenir complètement ni à l'une ni à l'autre. Elle a pour objet d'étude, la représentation des connaissances imprécises et le raisonnement approché.

Elle établit une correspondance entre grandeurs quantitatives et variables linguistiques, utilisées pour décrire une propriété de manière imprécise. La notion de flou concerne l'imprécision issue de l'appartenance partielle d'un élément donné, et bien défini, à un ensemble dont les frontières ne sont pas clairement définies (Smets, 1991).

Les sous-ensembles flous sont particulièrement adaptés à des contextes où l'information est exprimée en langage naturel se référant à un attribut numérique : on parle alors d'information linguistique graduelle (Dubois et Prade, 2006). Les variables linguistiques de ce type prennent leurs valeurs dans un ensemble fini de termes constituant le domaine de la

variable. Dans notre cas, les termes « très faible », « faible », « modérée », « forte » et « très forte » constituent le domaine de la vulnérabilité. Chaque modalité du modèle conceptuel est évaluée sur ce domaine.

Soit X l'ensemble de référence, un sous-ensemble flou A de X est défini par une fonction d'appartenance μ_A telle que :

$$\begin{cases} \mu_A: X \rightarrow [0,1] \\ x \rightarrow \mu_A(x) \end{cases}$$

$\mu_A(x)$ mesure le degré d'appartenance de l'élément x à A (Zadeh, 1965).

Le concept ensembliste d'appartenance graduelle apparaît comme un cadre idéal pour modéliser la vulnérabilité, et traiter l'agrégation des expertises, qui, à une modalité du modèle conceptuel, attribuent une valeur textuelle de vulnérabilité induite.

Nous proposons de traduire les catégories de la vulnérabilité sur la base de cinq nombres flous triangulaires. Un nombre flou triangulaire correspond à un ensemble flou particulier dans \mathbb{R} (Dubois et Prade, 1978), caractérisé par trois nombres réels t_1, t_2, t_3 tel que $t_1 < t_2 < t_3$ et défini par la fonction d'appartenance :

$$\mu_T(x) = \begin{cases} \frac{x - t_1}{t_2 - t_1}, & \text{si } t_1 \leq x \leq t_2 \\ \frac{x - t_3}{t_2 - t_3}, & \text{si } t_2 \leq x \leq t_3 \\ 0, & \text{sinon.} \end{cases}$$

Nous notons $T = (t_1, t_2, t_3)$ le nombre flou triangulaire. La transformation d'une grandeur numérique en degré d'appartenance flou correspond à la *fuzzification*. Nous assignons alors à chaque valeur linguistique un nombre flou triangulaire (Tab. 44).

Echelle sémantique	Codage numérique	Nombre flou triangulaire
Très Faible	1	$T_1 = (1,1,2)$
Faible	2	$T_2 = (1,2,3)$
Modérée	3	$T_3 = (2,3,4)$
Forte	4	$T_4 = (3,4,5)$
Très Forte	5	$T_5 = (4,5,5)$

Tab. 44 : Fuzzification de l'échelle de vulnérabilité

Les fonctions d'appartenance suivantes ont été établies (Fig. 55) selon les cinq catégories de vulnérabilité. Le principe fondamental de la logique floue repose sur la notion d'appartenance. La fonction d'appartenance μ permet de tenir compte du fait qu'une vulnérabilité de 3,2 est considérée comme « modérée » avec $\mu = 0,8$ (en bleu) et comme étant « forte » avec $\mu = 0,2$ (en rose) (Fig. 54). La fonction μ associée à une grandeur quantitative de vulnérabilité, x , comprise entre 1 et 5, une valeur entre 0 et 1 représentant son degré d'appartenance aux valeurs linguistiques.

Si $x = 3$ alors $\mu(x) = 1$ pour la valeur linguistique « modérée ». De même, si $x = 4,6$, alors $\mu(x)$ peut prendre les valeurs 0,6 pour la valeur linguistique « très forte » et 0,4 pour la valeur linguistique « forte ». De cette manière, nous pouvons procéder, et donner du sens, à l'agrégation des expertises.

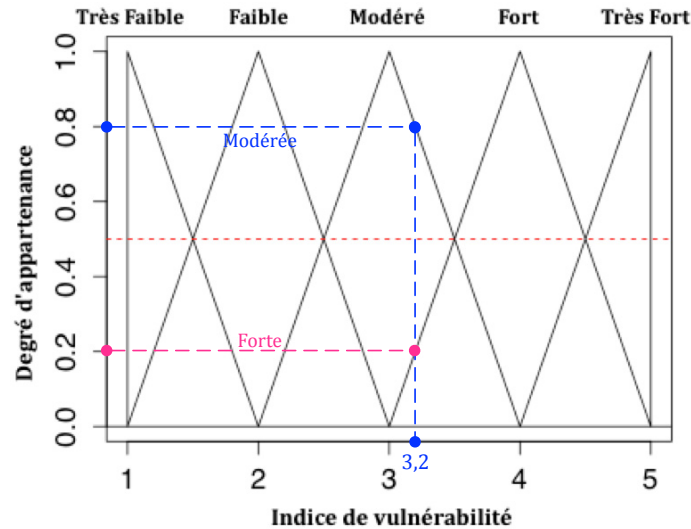


Fig. 55 : Fonctions d'appartenance des cinq sous-ensembles de la vulnérabilité

L'agrégation des nombres flous est une opération par laquelle plusieurs nombres flous sont combinés pour produire un nombre flou unique (Klir et Folger, 1988). Il existe une vaste gamme d'opérateurs d'agrégation mathématique. Une analyse exhaustive a été réalisée par M. Detyniecki (2000). L'agrégation d'informations provenant de différentes sources est au cœur de notre système de modélisation de la vulnérabilité. L'agrégation de nombres flous a été appliquée à différents domaines de recherche : l'aide multicritère à la décision (Meixner, 2011), l'évaluation subjective de la qualité ou de la satisfaction (Tsaour, 2002 ; Benitez, 2007 ; Fasangarhi et Roudsari, 2008), la fusion de données multi-capteurs (Cron et Dubuisson, 1998), etc.

Dans le cadre de cette thèse, l'objectif est d'agrégier des nombres flous triangulaires émanant des jugements de onze experts. Chaque nombre flou traduit une valeur textuelle correspondant à une classe de vulnérabilité. En ce sens, notre travail d'agrégation est similaire aux travaux menés sur les scores représentant la qualité d'un service (perceptions sur le degré de qualité) ou la satisfaction de clients (degré de satisfaction), qui utilisent les mêmes valeurs textuelles.

Certains auteurs utilisent la moyenne arithmétique (ici appelée méthode « M »), comme opérateur d'agrégation (Buckley, 1985 ; Klir et Folger, 1988 ; Tsaour *et al.*, 2002 ; Benitez *et al.*, 2007 ; Fasangarhi et Roudsari, 2008) : pour n nombres flous triangulaires $T_i = (t_1^{(i)}, t_2^{(i)}, t_3^{(i)})$ produits, le nombre flou triangulaire agrégé est $\bar{T} = (\bar{t}_1, \bar{t}_2, \bar{t}_3)$, où :

$$\bar{t}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_1^{(i)}, \quad \bar{t}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_2^{(i)}, \quad \bar{t}_3 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_3^{(i)}$$

D'autres auteurs utilisent la moyenne géométrique (Meixner, 2011), où :

$$\bar{t}_1 = \left(\prod_{i=1}^n t_1^{(i)} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad \bar{t}_2 = \left(\prod_{i=1}^n t_2^{(i)} \right)^{\frac{1}{n}}, \quad \bar{t}_3 = \left(\prod_{i=1}^n t_3^{(i)} \right)^{\frac{1}{n}}$$

La moyenne géométrique est utilisée pour agréger les jugements issus des comparaisons par paire (processus multiplicatif). Notre cas revient à associer des scores, le processus est additif, il convient alors de privilégier la moyenne arithmétique.

D'autres opérateurs ont été définis dans la littérature (Pavlacka et Talasova, 2007 ; Chang *et al.*, 2009). Certains privilégient les moyennes pondérées, distinguant alors des importances de contributions entre les différents points de vue. Nous respectons l'idée d'équivalence entre les experts. Nous avons testé deux méthodes de pondération (Fig. 57 et Fig. 58) : par la

fréquence des nombres flous sur une même modalité (méthode « MP »), et par les distances euclidiennes entre les experts (méthode « D »). La méthode utilisée par Chang *et al.* (2009) propose d'agréger les nombres flous en tenant compte du minimum des bornes gauches, de la moyenne géométrique des sommets et du maximum des bornes droites. Comme nous l'avons précisé, nous optons pour la moyenne arithmétique des sommets. Le nombre flou agrégé se calcule alors de la façon suivante (méthode « 3M ») :

$$\bar{t}_1 = \min_{i \in [1, n]} t_1^{(i)}, \quad \bar{t}_2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_2^{(i)}, \quad \bar{t}_3 = \max_{i \in [1, n]} t_3^{(i)}$$

Récemment, une méthode d'agrégation reposant sur la notion d'angle au sommet (*apex angle*) du triangle (Fig. 56) a été proposée (Pandley *et al.*, 2012).

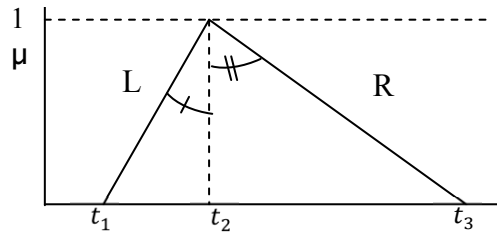


Fig. 56 : Définition des angles au sommet d'un nombre flou triangulaire (Pandley *et al.*, 2012)

Le nombre flou agrégé se calcule selon la formule :

$$\begin{aligned} \bar{t}_1 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_2^{(i)} - \tan \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tan^{-1} \left((t_2^{(i)} - t_1^{(i)}) \right) \right) \\ \bar{t}_2 &= \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_2^{(i)}, \\ \bar{t}_3 &= \bar{t}_1 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_2^{(i)} + \tan \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \tan^{-1} \left((t_3^{(i)} - t_2^{(i)}) \right) \right) \end{aligned}$$

Dans notre cas, l'écart au sommet est homogène, à gauche (L), comme à droite (R). Les résultats sont alors similaires à ceux obtenus par la moyenne arithmétique. Cette méthode plus complexe à implémenter sera donc écartée.

Les différents résultats obtenus sont présentés en **annexe 4**. Nous proposons d'illustrer les résultats pour les modalités C_{1311} (stock de bois) et C_{6224} (connaissance des mesures préventives et de la législation) (Tab. 45, Tab. 46), des sous-critère « Type d'équipement à risque » (C_{131}) et « Connaissance des personnes » (C_{622}). Deux exemples qui présentent des disparités au niveau des jugements. Pour la première modalité, les experts se divisent en cinq groupes :

- (1) Un expert (E_2) lui attribue la valeur « Très Faible », $T_{C_{1311}}^{(E_2)} = (1,1,2)$;
- (2) Deux experts (E_4 et E_5) lui attribuent la valeur « Faible », $T_{C_{1311}}^{(E_4)} = T_{C_{1311}}^{(E_5)} = (1,2,3)$;
- (3) Trois experts (E_7 , E_8 et E_9) lui attribuent la valeur « Modérée », $T_{C_{1311}}^{(E_7)} = T_{C_{1311}}^{(E_8)} = T_{C_{1311}}^{(E_9)} = (2,3,4)$.
- (4) Quatre experts (E_1 , E_3 , E_{10} et E_{11}) lui attribuent la valeur « Forte », $T_{C_{1311}}^{(E_1)} = T_{C_{1311}}^{(E_3)} = T_{C_{1311}}^{(E_{10})} = T_{C_{1311}}^{(E_{11})} = (3,4,5)$;

(5) Un expert (E_6) lui attribue la valeur « Très Forte », $T_{C_{1311}}^{(E_6)} = (4,5,5)$;

Modalité C_{1311}				
Méthode d'agrégation	Code	t_1	t_2	t_3
Moyenne arithmétique (M)	E_M	2,273	3,182	4,091
Moyenne arithmétique pondérée (MP)	E_{MP}	2,419	3,387	4,355
Minimum, moyenne, maximum (3M)	E_{3M}	1	3,182	5
Distance euclidienne (D)	E_D	2,331	3,2799	4,218

Tab. 45 : Nombres flous triangulaires, de la modalité C_{1311} , calculés selon les quatre méthodes présentées

Pour la seconde, les experts se divisent en trois groupes :

(1) Deux experts (E_1 et E_2) lui attribuent la valeur « Très Forte Vulnérabilité », $T_{C_{6324}}^{(E_1)} = T_{C_{6324}}^{(E_2)} = (4,5,5)$;

(2) Trois experts (E_3, E_6 et E_{11}) lui attribuent la valeur « Forte Vulnérabilité », $T_{C_{6324}}^{(E_3)} = T_{C_{6324}}^{(E_6)} = T_{C_{6324}}^{(E_{11})} = (3,4,5)$;

(3) Six experts (E_4, E_5, E_7, E_8, E_9 et E_{10}) lui attribuent la valeur « Vulnérabilité modérée », $T_{C_{6324}}^{(E_4)} = T_{C_{6324}}^{(E_5)} = T_{C_{6324}}^{(E_7)} = T_{C_{6324}}^{(E_8)} = T_{C_{6324}}^{(E_9)} = T_{C_{6324}}^{(E_{10})} = (2,3,4)$;

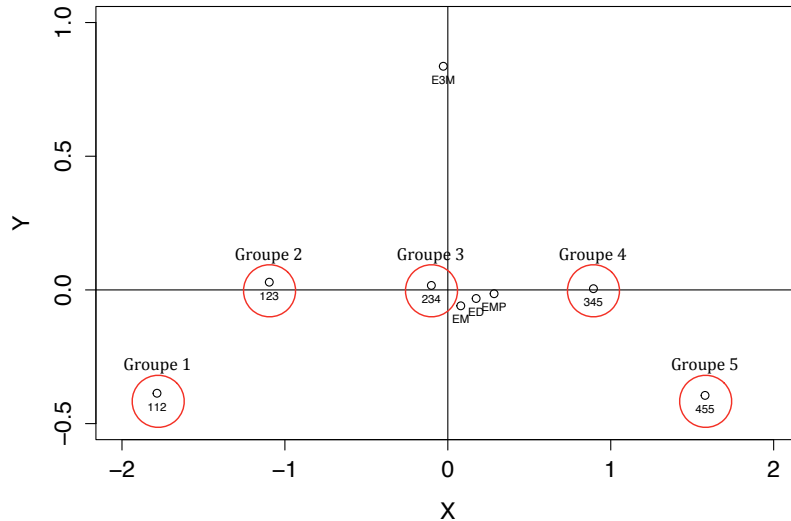
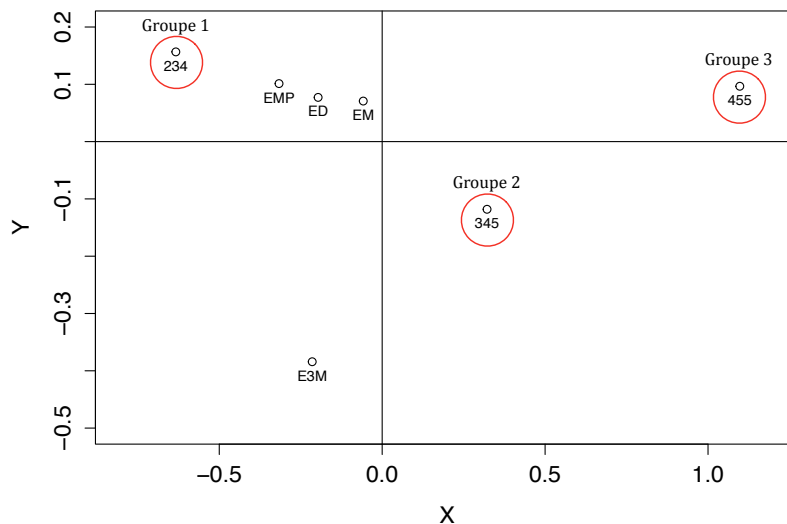
Modalité C_{6224}				
Méthode d'agrégation	Code	t_1	t_2	t_3
Moyenne arithmétique (M)	E_M	2,636	3,636	4,455
Moyenne arithmétique pondérée (MP)	E_{MP}	2,347	3,347	4,265
Minimum, moyenne, maximum (3M)	E_{3M}	2	3,636	5
Distance euclidienne (D)	E_D	2,477	3,477	4,372

Tab. 46 : Nombres flous triangulaires, de la modalité C_{6224} , calculés selon les quatre méthodes présentées

Le calcul de la distance euclidienne $D(T, T')$ entre deux nombres flous triangulaires $T = (t_1, t_2, t_3)$ et $T' = (t'_1, t'_2, t'_3)$ s'effectue grâce à l'équation suivante (Li et Yang, 2004) :

$$D(T, T') = \sqrt{\frac{1}{3} [(t_1 - t'_1)^2 + (t_2 - t'_2)^2 + (t_3 - t'_3)^2]}$$

Nous avons procédé à ce calcul sur nos résultats de manière à représenter les écarts entre les différentes agrégations, par la méthode du positionnement multidimensionnel (Desbois, 2005) (Fig. 57, Fig. 58).

Fig. 57 : Position des groupes d'experts et des résultats de l'agrégation (C_{1311})Fig. 58 : Position des groupes d'experts et des résultats de l'agrégation (C_{6324})

On observe deux tendances :

- La méthode « 3M » occupe une position extra-groupes contrairement aux autres méthodes qui elles occupent des positions intra-groupes. Cette tendance s'explique par le bornage extrême des nombres flous calculés par la méthode « 3M ».
- Parmi les méthodes intra-groupes, « D » et « MP » tendent vers les groupes d'avis majoritaires. Contrairement à la méthode « M » qui occupe une position centrale résumant les jugements et tamponnant l'effet « dictatorial » de la majorité.

Au terme de l'analyse, nous écartons les méthodes « D » et « MP », qui favorisent trop la majorité. Étant donné la subjectivité des jugements, et le manque de certitude sur les contributions réelles à la vulnérabilité, il est délicat de s'avancer sur la supériorité d'une méthode. Les deux méthodes retenues, « 3M » et « M », seront alors testées lors de la phase d'application du modèle à un cas réel de feu d'interface (Chapitre 5), afin de juger leurs capacités à retrouver les situations dommageables, révélatrices de la vulnérabilité.

Notre modèle repose sur une méthode d'aide multicritère à la décision. Nous avons, dans la section précédente, déterminé les contributions relatives des différents critères, à la

vulnérabilité. Les intensités de vulnérabilité induites par les modalités des critères relèvent des entrées du modèle. Afin de remonter au critère unique de synthèse, nous employons la somme pondérée comme opérateur d'agrégation, qui permet de traduire le caractère compensatoire entre les vulnérabilités induites par les différents critères. De ce fait, notre utilisation de la théorie des sous-ensembles flous se limite à l'obtention d'un nombre flou triangulaire représentatif du jugement du groupe d'experts.

Ainsi, afin de justifier la catégorie de vulnérabilité induite par une modalité, nous devons *déffuzzifier* les nombres triangulaires agrégés obtenus. Cette étape correspond à la transformation d'un nombre flou en un nombre réel. L'objectif est de déterminer la valeur numérique réelle, de la vulnérabilité induite, représentant au mieux l'ensemble des expertises. Il existe plusieurs méthodes. Parmi les plus utilisées, on peut citer la méthode de la moyenne des maxima et la méthode du centre de gravité. La méthode de la moyenne des maxima revient à prendre l'abscisse correspondant à la moyenne des abscisses ayant pour ordonnée la valeur maximale des fonctions d'appartenance. La méthode du centre de gravité consiste à prendre l'abscisse correspondant au centre de gravité de la fonction d'appartenance. Dans le cadre de cette thèse, nous utiliserons l'opérateur de la « valeur attendue » (EV - *expected value*) (Dubois et Prade, 1987 ; Heilpern, 1992 ; Wang et Tian, 2010) :

$$EV(T) = \frac{t_1 + 2t_2 + t_3}{4}$$

Cette méthode a été choisie en raison de sa simplicité et vitesse d'exécution. Les résultats, sur les 98 modalités, sont présentés en Annexe 4. L'exemple proposé (Tab. 47) présente les valeurs attendues calculées pour les modalités du critère « Propriétés des Habitations ». Deux nombres flous triangulaires pour le groupe sont utilisés : le premier est issu de l'agrégation des jugements selon la moyenne arithmétique (EVM), le second selon la méthode « 3M » (EV3M).

C ₅	C ₅₁		C ₅₂			C ₅₃					C ₅₄			
	C ₅₁₁	C ₅₁₂	C ₅₂₁	C ₅₂₂	C ₅₂₃	C ₅₃₁	C ₅₃₂	C ₅₃₃	C ₅₃₄	C ₅₃₅	C ₅₄₁	C ₅₄₂	C ₅₄₃	C ₅₄₄
Min	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2	1	1	1	1
Médiane	4	1	1	2	2	1	1	3	1	5	1	1	3	1
Max	5	1	1	5	4	3	5	5	4	5	3	3	5	1
EVM	3,6	1,25	1,25	2,6	2,1	1,4	2,2	3,2	2,2	4,1	1,75	1,65	2,9	1,25
EV3M	3,3	1,25	1,25	2,8	2,5	1,85	2,55	3,1	2,55	3,65	2,05	2	2,95	1,25

Tab. 47 : Bilan des valeurs attendues (EV), pour les modalités du critères « Propriétés des Habitations »

Les résultats obtenus renseignent le degré d'appartenance d'une modalité à une classe de vulnérabilité. Ainsi, lorsque la modalité C₅₃₅ prend la valeur 4,1 cela signifie qu'elle représente à 10 % une vulnérabilité très forte, et à 90 % une vulnérabilité forte.

La méthode « EVM » est plus sensible aux accumulations de valeurs extrêmes, qu'elles représentent une vulnérabilité très faible ou très forte (C₅₁₁, C₅₂₂, C₅₃₁, C₅₃₄, C₅₃₅, C₅₄₁, C₅₄₂). Pour C₅₃₅, 7 experts ont attribué une très forte vulnérabilité (5), un expert a attribué une vulnérabilité forte et 2 experts une vulnérabilité faible, il en résulte une valeur attendue plus élevée avec « EVM » qu'avec « EV3M », qui intègre les deux notes inférieures. Lorsque les jugements sont dispersés sur l'ensemble des valeurs possibles, les deux méthodes donnent des résultats similaires (C₅₄₃, C₅₃₃).

Malgré tout, on constate que la méthode « EVM » induit une plage de valeurs plus étendue, marquant plus clairement les différentes intensités sur l'échelle de la vulnérabilité. Les deux

méthodes présentent des avantages et des inconvénients qu'il s'agira de comparer lors de la modélisation de l'endommagement des habitations en interface habitat-forêt (Chapitre 5).

4.5. Conclusion du chapitre

La synthèse des critères sans unité de vulnérabilité est rendue possible par la combinaison de la méthode AHP et de l'arithmétique floue. Le modèle permet de mesurer le niveau de vulnérabilité sur une échelle verbale, rendant ainsi plus concrète cette caractéristique des interfaces habitat-forêt. Cependant le nombre réduit de participants (11) pour ce travail d'évaluation limite la représentativité des résultats.

L'objectif de l'étude est la mise au point d'une méthode d'évaluation de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt, afin de réaliser des cartes utiles aux gestionnaires de l'aménagement, aux résidents, mais également aux services de secours. L'analyse détaillée des retours d'expérience, ainsi que plusieurs entretiens avec des acteurs du risque incendie, ont montré l'intérêt d'adopter une démarche spatiale et systémique dans toute analyse de vulnérabilité. Tout particulièrement quand celle-ci est destinée aux acteurs de la gestion et de la prévention des risques liés aux incendies de forêt.

La multiplicité des facteurs de vulnérabilité induit de nombreuses déclinaisons de scénarii d'endommagement. Vouloir considérer la vulnérabilité des interfaces à travers celle des enjeux principaux (habitations résidentielles) impose une simplification importante des paramètres d'entrée. Les modalités doivent être précises mais suffisamment simples pour permettre un maniement rapide des cartes finales. Cette simplification est critiquable car elle induit une perte d'information, mais elle est en même temps obligatoire dans le cadre d'une approche globale.

La méthode proposée tente de répondre à la question de la vulnérabilité grâce à l'approche systémique. Appliquée à notre problématique, cette dernière permet d'intégrer un large spectre de facteurs construisant l'exposition, la capacité de réponse et la sensibilité à l'endommagement des habitations en interface. Six familles de sous-critères sont à considérer et sont évaluées grâce à des modalités (ou indicateurs) induisant des effets favorables ou défavorables au regard de la vulnérabilité. Les critères, les familles de sous-critères et les modalités ont été identifiées et validées en concertation étroite avec les différents experts consultés. Du fait de leur caractère difficilement quantifiable, leur grand nombre, leur nature variée, le choix d'une méthode permettant la prise en compte de situations multidimensionnelles, par la formalisation des connaissances des experts, s'est imposé.

La modélisation multicritère de la vulnérabilité permet de déconstruire celle-ci, d'appréhender à la fois son aspect global et ses spécificités. À caractère compensatoire, l'agrégation des vulnérabilités spécifiques, hiérarchisées selon leur contribution à la vulnérabilité globale, capture les interactions, révèle les critères névralgiques et produit un indice global de vulnérabilité.

Le croisement des expertises a pour but d'aboutir à une évaluation collective. La méthode AIPS a permis de traiter l'incertitude des jugements. Elle se révèle capable d'intégrer la multiplicité des avis d'experts en respectant les principes de la théorie du choix social. La comparaison avec la méthode traditionnelle d'agrégation des jugements individuels par la moyenne géométrique (AJI) révèle sa tendance à modérer les résultats. Les poids de contribution sont plus resserrés, contrairement à l'AJI, où, le jugement du groupe est plus influencé par les valeurs extrêmes et les jugements majoritaires. Il en va de même pour les méthodes d'agrégation des jugements sur les modalités. L'arithmétique floue nous a permis de transformer un jugement qualitatif, exprimé sous forme d'une valeur linguistique, en une

valeur numérique traduisant l'imprécision et l'incertitude liées au langage. Cette conversion a autorisé le calcul d'un jugement unique pour le groupe d'expert.

Les premiers résultats de cette étude correspondent à l'exploitation des jugements d'experts recueillis, dans une perspective d'évaluation de la vulnérabilité. L'analyse des résultats a fait ressortir deux méthodes de détermination des poids de contribution à la vulnérabilité globale des critères (AIPS et AJI) et deux méthodes de calcul des intensités de vulnérabilité induite par les modalités (EVM et EV3M). Le modèle multicritère basé sur les méthodes AIPS et EVM sera appliqué à un cas d'étude dans le prochain chapitre. Il servira alors de base à l'évaluation de la vulnérabilité d'une interface incendiée. La modélisation des dommages par l'indice global de vulnérabilité sera alors un moyen de tester les quatre méthodes retenues, ainsi que la capacité de l'indice global à quantifier la propension des habitations à souffrir des dommages. Il sera ainsi possible d'apprécier sa cohérence et son caractère opérationnel (prévention et prospection) en vue de son utilisation possible par les acteurs du risque.

Chapitre 5. Spatialisation de la vulnérabilité et modélisation des dommages observés sur les habitations suite à l'incendie du 21 Juillet 2012 à Cavaillon

En amont de l'aléa incendie de forêt, l'analyse des territoires à risque est réalisée par les services déconcentrés de l'État (DDT et DDTM) en relation avec des bureaux d'étude et l'ONF. La composante aléa du risque feux de forêt est de mieux en mieux connue. En revanche, la composante vulnérabilité est généralement estimée empiriquement, et le plus souvent résumée à la présence ou l'absence d'enjeux surdéterminants, en particulier les biens bâtis et les personnes résidentes ou en transit récurrent. La discrimination des espaces à enjeux en fonction de leur niveau de vulnérabilité est pourtant un élément important pour l'aide à la décision d'aménagement aux échelles locales et micro-locales.

Lorsqu'un incendie de forêt est déclaré, l'analyse du secteur exposé est réalisée par la Sécurité Civile. L'objectif est d'identifier le plus rapidement possible les points faibles de cette zone afin de hiérarchiser leurs actions en connaissance de cause. L'analyse se fait donc « au pied du mur », sur le terrain, quelques minutes après l'occurrence du phénomène. Réfléchir en amont à la vulnérabilité des zones à risque apparaît alors pertinent afin d'améliorer et d'accélérer la prise de décision.

Il est de première nécessité de définir les documents supports au processus de réflexion sur la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt, avec comme enjeux prioritaires les habitations résidentielles. On mesure l'importance d'une réponse cartographique à ce besoin. La carte permet de visualiser rapidement les forces et faibles de la zone d'intervention pour la Sécurité Civile, et fait office d'outil de concertation pour les actions de prévention et d'aménagement au niveau des secteurs à risque. Toute réflexion sur le risque et la vulnérabilité territoriale reste lettre morte si des outils ne permettent pas de rendre opérationnelles les avancées conceptuelles du monde scientifique.

Dans le chapitre précédent, nous avons élaboré un modèle caractérisant la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt, basé sur une méthode d'analyse multicritère, l'AHP, et la formalisation des connaissances de onze experts du risque incendie de forêt. Le modèle élaboré synthétise la multiplicité des jugements, tant sur les rapports de contribution entre les différents critères de vulnérabilité, que sur les scores d'intensité de vulnérabilité induite par les modalités les définissant.

Dans ce chapitre, nous appliquons le modèle multicritère d'évaluation de la vulnérabilité à un cas d'étude, dans une perspective d'analyse de sa cohérence et à terme, de validation, par la modélisation de l'endommagement généré par l'incendie sur les habitations résidentielles, en fonction de l'indice global de vulnérabilité évalué à dire d'experts. Le cas d'étude choisi est le feu d'interface de la colline St-Jacques de Juillet 2012, au cœur de la commune de Cavaillon (Vaucluse). Au cours de cette thèse, huit incendies de forêt en interface ont été analysés, et les données sur les dommages récoltées. Notre objectif était d'emmagasiner le plus d'informations possibles sur l'endommagement des enjeux afin de confronter notre modèle multicritère à la réalité du phénomène. L'incendie de Cavaillon a été retenu comme premier cas d'étude, non seulement parce qu'il est le seul à avoir induit une relative diversité de dommages, propice à une première tentative de validation empirique malgré la taille de l'échantillon, mais aussi parce qu'une coopération entre la Sécurité Civile locale (SDIS Cavaillon) et l'équipe EMAX de l'IRSTEA d'Aix-en-Provence a permis l'obtention de données sur le déroulement de l'incendie, essentielles à la réalisation de la deuxième partie de notre démarche d'évaluation de la vulnérabilité (cf. Chapitre 6).

Dans un premier temps, nous présenterons la démarche entreprise pour mener à bien l'évaluation de la vulnérabilité de l'interface cavaillonnaise. Nous décrirons les protocoles élaborés pour le recueil des données post-incendie, ainsi que l'échelle utilisée pour la caractérisation de la sévérité des dommages sur les habitations. Ensuite, à travers la présentation de la zone d'étude, nous expliciterons le déroulement de l'incendie et dresserons le bilan de l'endommagement observé au niveau des habitations.

À partir des données collectées, nous introduirons la méthode de spatialisation de la vulnérabilité, et conduirons une analyse des structures spatiales de cette dernière. L'objectif de cette analyse est de mettre en évidence le phénomène d'autocorrélation spatiale des performances des critères de vulnérabilité au niveau des habitations. Cette étape est essentielle à la modélisation de l'endommagement. En effet, la modélisation se base sur des méthodes de régression qui considèrent les observations comme indépendantes. La présence d'autocorrélation spatiale, si elle n'est pas prise en compte, entraîne des biais dans l'estimation des paramètres du modèle.

La confrontation du modèle multicritère avec à la réalité du phénomène incendie de forêt est une étape déterminante pour juger de sa validité. La dernière partie de ce chapitre y sera dédiée. Nous ferons une étude des corrélations entre l'endommagement observé et les valeurs de vulnérabilité spécifiques aux différents critères de la structure hiérarchique. Cette étape sera l'occasion de présenter l'ensemble des cartes de vulnérabilité, facilitant l'appropriation de l'interface et des enjeux étudiés. Enfin, dans le prolongement de l'analyse des corrélations nous proposerons deux modèles d'endommagement : le premier sur l'occurrence des dommages, le second sur la sévérité des dommages. La modélisation de l'occurrence et de la sévérité des dommages par l'indice global de vulnérabilité sera un moyen de tester les quatre méthodes retenues (cf. Chapitre 4), ainsi que la capacité de l'indice global à évaluer la propension des habitations à souffrir des dommages. Il sera ainsi possible de vérifier son caractère opérationnel (prévention et prospection) en vue de son utilisation possible par les acteurs du risque.

5.1. Présentation de la démarche

5.1.1. Une approche *a posteriori*

Bien que la matérialisation territoriale du phénomène incendie de forêt soit éminemment variable, le risque encouru, au niveau des interfaces habitat-forêt, est présent du fait de la vulnérabilité des peuplements humains. Nous nous positionnons en amont du sinistre : évaluer la vulnérabilité est de l'ordre de l'anticipation, afin de comprendre, de cerner et d'analyser les conditions favorables ou défavorables à l'endommagement.

Le modèle multicritère élaboré au chapitre précédent s'attache à diagnostiquer les forces et faiblesses d'un territoire donné, au regard des incendies de forêt. En effet, à travers l'indice global de vulnérabilité (IGV), il porte à connaissance la contribution de chaque critère à la vulnérabilité globale d'une interface et de ses enjeux considérés comme sur-déterminants : les habitations résidentielles. Le modèle offre à la fois une connaissance agrégée et spécifique de la vulnérabilité. Il permet de la penser comme un édifice, pour mieux la déconstruire et mettre en évidence les actions de remédiation potentielles.

Le modèle multicritère est élaboré sur la base des connaissances et de l'expérience des experts sollicités. Son fondement empirique n'est donc pas absolument bon. Il s'agit maintenant de l'appliquer à de réels cas d'étude pour juger de son utilité pratique et opérationnelle. Nous adoptons alors une démarche dite *a posteriori* (Fig. 59), qui repose sur la confrontation des résultats du modèle avec les données relevées sur le terrain, révélatrices

des dommages perpétrés par l'incendie. Tout au long de la thèse, nous avons effectué des enquêtes post-incendies afin de constituer des bases de données qui intègrent les informations relatives à l'ensemble des critères de vulnérabilité ainsi que sur l'endommagement des habitations, leurs abords et enfin la végétation.

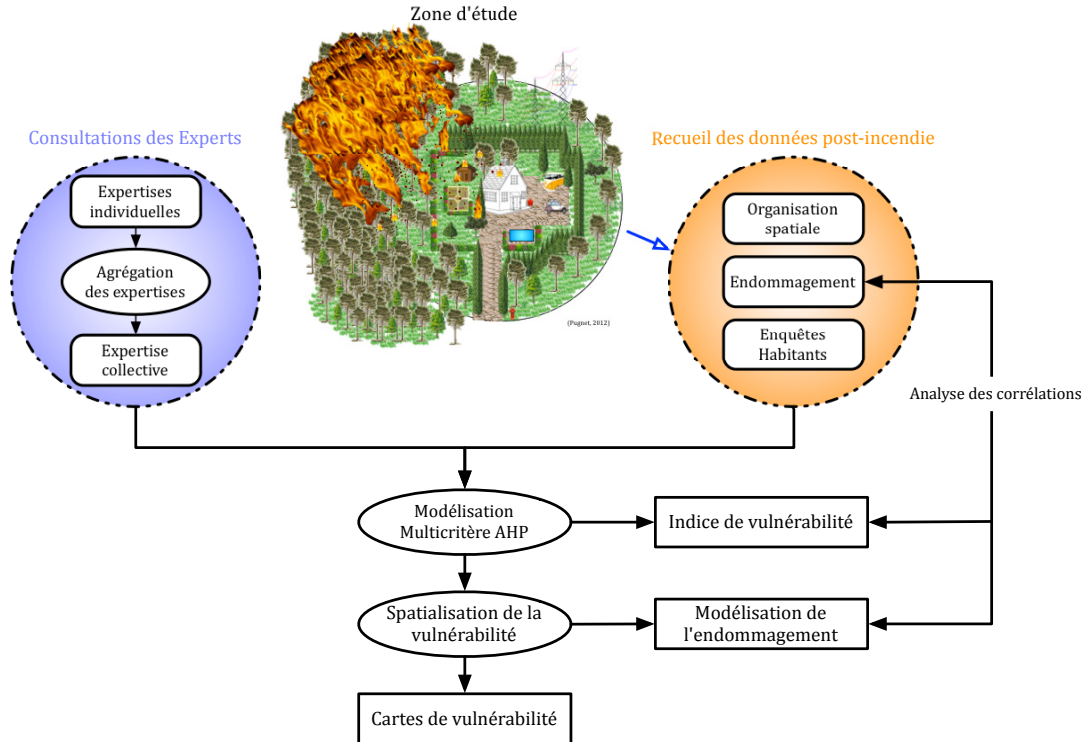


Fig. 59 : Approche *a posteriori* pour la caractérisation et la cartographie de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt

Au total, huit incendies ont été étudiés (Tab. 48), trois au cours de la saison des feux 2011 et cinq pour la saison 2012. Étant donné la relative rareté des grands incendies, aucune contrainte sur leur taille n'a été préalablement imposée. Nous avons donc traité tous les incendies ayant impacté une ou plusieurs interfaces habitat-forêt.

Code DFCI	Date	Commune	Dept.	Surface (ha)	Habitations endommagées
HE80K6	25/06/2011	Uchaux	84	23	0
GC44E2	30/07/2011	Perpignan	66	1,5	0
GC62B24	09/08/2011	Port-Vendres	66	16	1
GC22E9	25/06/2012	Corbère-les-Cabanès	66	4,5	0
GC44E4	16/07/2012	Claira - Bompas	66	13	0
KD06H5	16/07/2012	Orgon (Freiresque)	13	7,4	0
KD06K7	21/07/2012	Cavaillon	84	31	7
KD06K43	26/08/2012	Orgon	13	738	1

Tab. 48 : Présentation des incendies étudiés au cours de la thèse

5.1.2. Les données

Plusieurs bases de données sont nécessaires à l'analyse de vulnérabilité, selon la méthode multicritère développée. Il s'agit notamment de la localisation des enjeux, des sources vectrices du feu, de l'occupation du sol ainsi que des caractéristiques de la population et des

habitations. Les données requises peuvent être distinguées en deux types suivant le mode d'acquisition :

- les données disponibles directement au sein du groupe de recherche ;
- les données issues des campagnes sur le terrain.

Le premier type concerne les caractéristiques géographiques de la zone d'étude. Pour ce travail nous avons utilisé les données du RGE® (Référentiel à Grande Échelle) mises à disposition gratuitement par l'Institut Géographique National (IGN) pour l'exercice d'une mission de service public. Les données en question concernent :

- La BD ORTHO® 20 cm : mosaïque d'ortho-photographies numériques en Haute Résolution (la taille du pixel terrain est de 20 cm) pour le département du Vaucluse, utilisée pour l'extraction de la végétation en raison de l'objectif de résolution métrique.
- La BD TOPO® : composante topographique présentant une description vectorielle du territoire et de ses infrastructures de précision métrique, utilisée pour la localisation des entités bâties au sein de l'interface et la caractérisation de l'occupation du sol. De plus, cette base de données dispose d'un modèle numérique de terrain (MNT) de résolution 25 m.

Le deuxième type concerne toutes les données qui ont donc fait l'objet d'acquisitions par relevés sur le terrain et enquêtes auprès des résidents. Une méthodologie commune aux huit feux étudiés a été élaborée. Les interventions sur le terrain des incendies ont eu lieu une fois les activités de lutte terminées. Toutes les interfaces intersectant le périmètre de chaque incendie ont fait l'objet d'un diagnostic systématique, conduit sur le terrain. Toutefois, les interfaces très étendues ont été découpées de manière à privilégier comme zone d'étude, celle de toutes les propriétés bâties intersectant l'enveloppe du feu, indépendamment des dommages sur les habitations. Les protocoles pour la collecte des données sur les feux de forêts répondent à une volonté d'harmoniser le recueil d'informations sur le terrain, dans le but d'obtenir des données exhaustives et fiables, permettant d'évaluer les conséquences d'un incendie sur les habitations en interface. Les protocoles sont présentés en Annexe 5 et 6.

Les données recueillies s'articulent selon différentes catégories en rapport avec les critères du modèle conceptuel :

- Les données relatives à l'aménagement des interfaces, aux caractéristiques des habitations, à la continuité verticale de la végétation et à la topographie des interfaces.
- Les données sur les actions de lutttes et celles relatives à la préparation des personnes.
- Les données relatives aux dommages engendrés sur les habitations au sein des interfaces.

Les données ont été géoréférencées. Nous avons utilisé un ordinateur intégré d'un GPS, couplé à un SIG (ArcGIS®10 de ESRI), pour directement digitaliser l'information. Nous avons pu géo-localiser les linéaires de haies, les massifs ornementaux, etc., souvent invisibles sur les photographies aériennes, du fait de la couverture arborée en surplomb. Un travail préalable de photo-interprétation a été effectué au laboratoire de manière à faciliter la saisie des données sur le terrain.

Outre le recueil uniformisé de données pour la mise en oeuvre du modèle, notre objectif, par la spécification de ces protocoles, est aussi de fédérer les différents organismes travaillant sur la problématique des incendies de forêts autour d'un outil commun de recueil de données post-incendie. Ils intègrent toutes les entrées du modèle multicritère, qui correspondent aux principaux facteurs de vulnérabilité reconnus par les experts du risque incendie de forêt.

5.1.3. Caractérisation des dommages sur les habitations

La typologie des dommages proposée est spécifique aux incendies de forêt et diffère de celles existantes pour les séismes (Grünthal *et al.*, 2001) ou les mouvements de terrain (Leone *et al.*, 1996) par la nature des dommages décrits. Les dommages y sont hiérarchisés en 5 classes suivant une sévérité croissante (0 à 4) (Tab. 49). Un seuil de dégât déterminant pour l'intégrité de l'habitation et son éventuelle réoccupation est franchi en passant des niveaux 2 à 3. Cela correspond à la propagation du feu à l'intérieur des structures, avec dégradation des charpentes soutenant la toiture. Mis à part les destructions partielles ou totales (niveau 3 et 4) nettement identifiables par photo-interprétation, les autres classes nécessitent des observations *in situ*. Cette typologie se veut accessible, sans principale difficulté d'interprétation, elle ne requiert aucune compétence en ingénierie.

Niveau	Critères d'identification terrain
0	Aucun dommage
1	Faible : dommages négligeables à légers (gouttières en PVC fondues, volets en bois noircis et/ou partiellement brûlés, façade noircie)
2	Modéré : dommages importants mais sans affectation de l'intérieur du bâtiment (gouttières en Zinc fondues, charpente apparente brûlée, toiture endommagée, façade fissurée avec décollement du bardage, volets en bois brûlés)
3	Fort : dommages importants avec affectation de l'intérieur du bâtiment et possibilité d'effondrement partiel de la toiture
4	Extrême : Destruction totale du bâtiment

Tab. 49 : Classement des niveaux d'endommagement des habitations suivant une sévérité croissante

En France, l'endommagement des habitations n'est pas la règle, mais l'exception. Sur huit incendies d'interface habitat-forêt et 132 habitations étudiés, seulement dix ont été impactées. Parmi les maisons endommagées, celle de l'incendie d'Orgon a été totalement détruite (Tab. 50). C'est un cas extrême et particulier compte tenu du nombre impressionnant d'épaves de voitures (61) positionnées au plus proche de la maison.

Incendie	Dommages				Total
	Aucun	Matériel périphériques	Dépendance	Habitation (niveau)	
Uchoux	12	3	2	0	17
Perpignan	20	1	0	1 (1)	21
Port-Vendres	40	2	1	1 (1)	42
Corbère-les-Cabanès	11	0	0	0	11
Claira - Bompas	5	1	0	0	6
Orgon (Freiresque)	5	1	1	0	6
Cavaillon	12	7	6	4 (1) ; 3 (2)	20
Orgon	8	1	1	1 (4)	9

Tab. 50 : Correspondance entre types de dommage et nombre de propriétés sur les huit feux d'interface étudiés.

De tous les incendies d'interface étudiés, celui de Cavaillon se démarque par la diversité et la quantité des dommages occasionnés. À lui seul, il fait la synthèse de toutes les situations d'endommagement observées sur les autres feux. Sur un effectif de 20 habitations, 7 ont été endommagées. Cet incendie va servir de base à l'application de notre modèle multicritère. L'objectif visé est l'étude du comportement du modèle face à une situation réelle, dans une perspective de pré-validation, sans objectif de généralisation pour le moment.

Dans la section suivante, nous allons présenter le site à l'étude ainsi que le déroulement de l'incendie et l'analyse des dommages observés sur les habitations. Puis, dans la section 5.3, nous traiterons de la spatialisation de la vulnérabilité. Enfin, dans la dernière section du chapitre, nous étudierons la relation entre les niveaux de dommages observés, les vulnérabilités spécifiques et la vulnérabilité globale calculées par le modèle multicritère. Enfin, nous prolongerons cette analyse en modélisant l'endommagement observé en fonction de l'indice global de vulnérabilité, estimé à partir de la connaissance formalisée des experts du risque incendie.

5.2. Présentation de l'incendie de Cavaillon et des dommages occasionnés

5.2.1. Description de la zone d'étude

La colline Saint-Jacques accueille un important lotissement de plus de 160 maisons en milieu fortement boisé. L'interface habitat-forêt est caractérisée par une structure d'habitat groupé dense. Unique relief de la plaine cavaillonnaise, elle servait jadis de refuge contre les violentes crues de la Durance. Elle conserve en son sein, un patrimoine culturel d'une grande richesse : oppidum gaulois, traces d'occupation ligure, ruines de l'ancienne ville, escalier du XVI^{ème} siècle permettant d'accéder à la chapelle Saint-Jacques d'époque romane.

Le secteur incendié comprend les flancs de la colline Saint-Jacques qui s'élève à l'ouest de la ville de Cavaillon avec des parois rocheuses souvent très pentues. Composé de calcaires compacts à faciès urgonien, le site possède une topographie particulièrement accidentée où se succède une série de vallons ponctuée de crêtes difficiles d'accès. Il comporte des formations végétales très proches de celles que l'on peut rencontrer sur les versants sud-ouest et le sommet du petit Luberon : taillis de chênes verts, pinède de pins d'Alep dans les vallons abrités, garrigues à chêne kermès et romarin, pelouses à brachypodes rameux.

5.2.2. Scénario de l'incendie

L'incendie de forêt du 21 Juillet 2012 à Cavaillon est survenu au pied de la colline Saint-Jacques, face ouest, aux environs de 13h30. Le site, en ce début d'après-midi, est soumis à des conditions météorologiques propices au développement de l'incendie :

- Température : 24 °C ;
- Humidité relative : 31 % ;
- Vitesse du vent : 44 km/h en moyenne ;
- Direction du vent : 310°.

Le 5 août 2006, un incendie d'origine criminelle avait parcouru le même site, brûlant 23 ha de futaie résineuse (Fig. 60). Le point de départ des deux incendies est similaire, situé en bordure du massif le long d'une piste, à proximité immédiate de la déchetterie.

Au cours de notre enquête sur le terrain, nous avons procédé à l'interview du responsable du poste de commandement ayant coordonné les différents groupes d'intervention engagés sur le terrain, lors de l'incendie. Ainsi, le scénario de l'incendie a pu être reconstitué selon son récit. Le contour du feu a été réalisé à l'aide d'un GPS intégré à un ordinateur muni d'un logiciel SIG (ArcGIS 10®). De plus, les informations collectées nous ont permis de tracer les contours du feu selon différents pas de temps (Fig. 61).

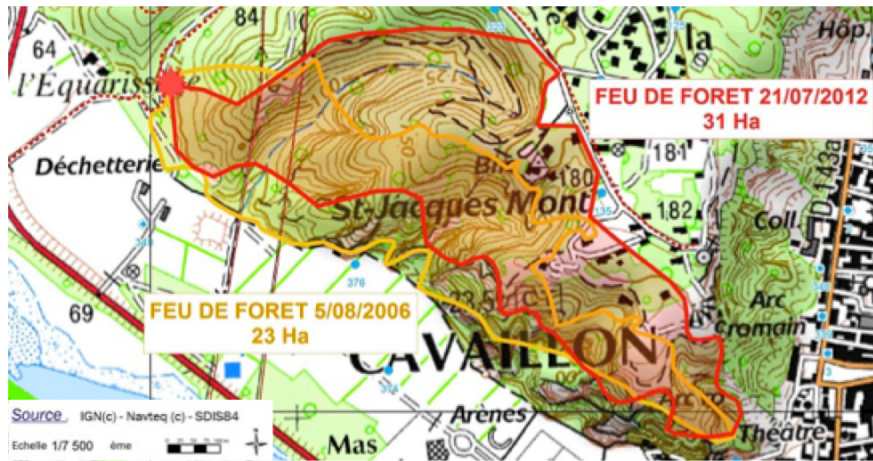


Fig. 60 : Comparaison des contours des incendies de forêt survenus en 2006 et en 2012 sur la colline Saint-Jacques à Cavaillon (Source : SDIS Cavaillon)



Fig. 61 : Cartographie de l'incendie de Cavaillon, illustrant le déroulement de l'incendie du départ jusqu'à l'extinction. Les axes de propagation sont représentés par les flèches noires. (Sources : SDIS Cavaillon, BD ORTHO 2010 IGN®)

Le feu démarre en bordure de chemin (Fig. 61 – Photo 1), puis s'étend sous le vent, conduit par la pente, sur environ 1 ha avant d'être stoppé dans sa progression par les services de secours au sol, appuyés par des largages de retardant provenant de deux Tracker (avion bombardier de produits retardant, déployés en général en première intervention lors des départs de feu). Le vent soufflant par rafales transporte des particules incandescentes responsables d'un départ secondaire derrière la première crête. Sous l'action combinée du vent et de la pente, le feu progresse de manière brutale dans une végétation plus rase. Les largages d'avion ne permettront pas d'enrayer la propagation. Le feu dégage alors un deuxième axe de propagation dans le premier vallon et remonte vers le lotissement. C'est dans ce vallon qu'il va s'intensifier considérablement et « littéralement explosé » en partie haute (Fig. 61 – Photo 2 et 3). Au même moment, il s'écarte vers le sud-est et entame une « propagation fulgurante, de crête en crête, tout en remontant les différents vallons en direction des habitations ». Les observations des sapeurs-pompiers sur le terrain indiquent une propagation par sautes de feu régulières allant jusqu'à 50 m en avant du front de flammes.

Finalement, « *au prix d'une lutte acharnée* », l'incendie a pu être contenu aux alentours de 19h30.

Au total, 9 GIFF (Groupe d'Intervention Feux de Forêt, composé d'un véhicule léger tout-terrain, de trois camions citernes feux de forêt de classe M et d'un camion citerne feux de forêt de classe S) ont été engagés ainsi que deux groupes urbains. L'usage des avions bombardiers d'eau a également été nécessaire : plus de 50 largages ont été comptabilisés. L'incendie a parcouru environ 31 ha. Contrairement à l'incendie de 2006, le feu est entré dans la zone urbanisée et provoqué de multiples dommages sans pour autant détruire les habitations.

5.2.3. Description et analyse des dommages observés

Nous limitons la zone d'étude aux vingt habitations dont la parcelle a été exposée à l'incendie, indépendamment des dommages occasionnés. Elles sont marquées d'un point jaune sur la carte d'occupation du sol, réalisée par digitalisation directe *in situ* et exploitation de la BD TOPO® de l'IGN (Fig. 62).

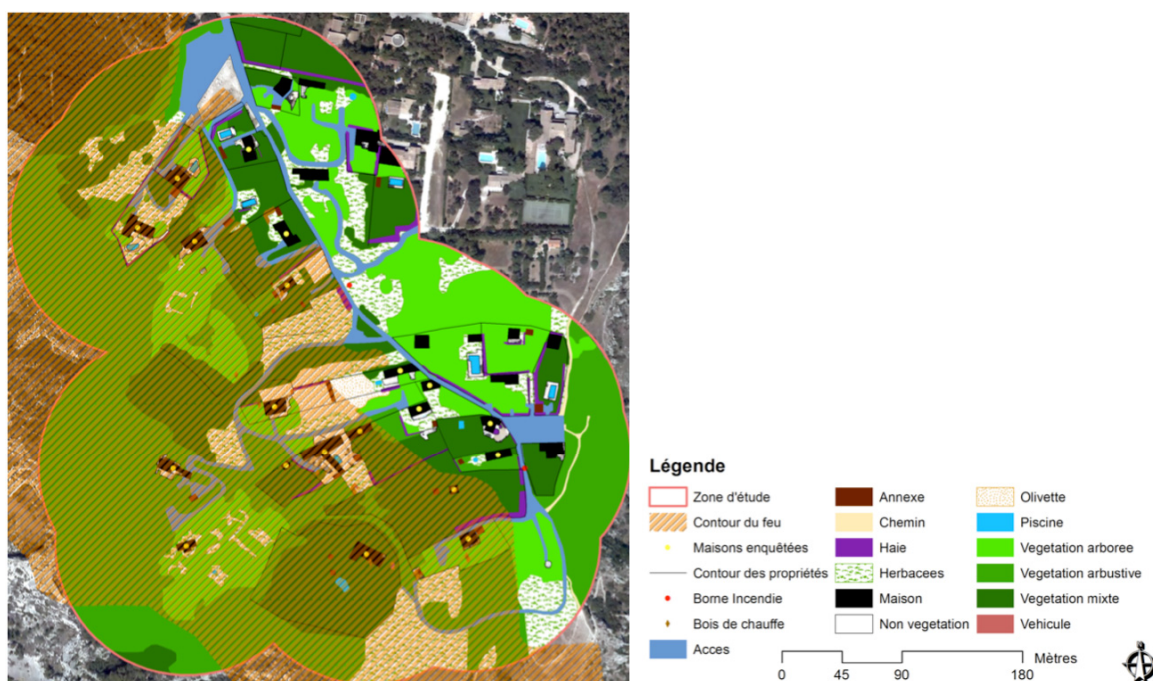


Fig. 62 : Cartographie de l'occupation du sol de la zone d'étude

La cartographie thématique des dommages est représentée Figure 63. Elle renseigne sur la géolocalisation des habitations impactées ainsi que des dommages sur les matériels périphériques et les dépendances.

Il résulte de cet incendie une grande diversité de dommages, qui trouvent leurs sources dans des situations soulignées par les retours d'expérience étudiés au chapitre 4. Nous avons cherché, à partir des informations recueillies auprès des résidents et des traces du feu sur le terrain, à expliciter les différents scénarii d'endommagement des habitations.

En termes d'aménagement, l'interface incendiée se caractérise par une forte concentration d'équipements (haies, stock de bois, véhicules permanents, annexes en bois) au plus proche des habitations, aggravant leur vulnérabilité. Cette caractéristique se vérifie lorsque l'on considère les dommages imputables aux équipements.

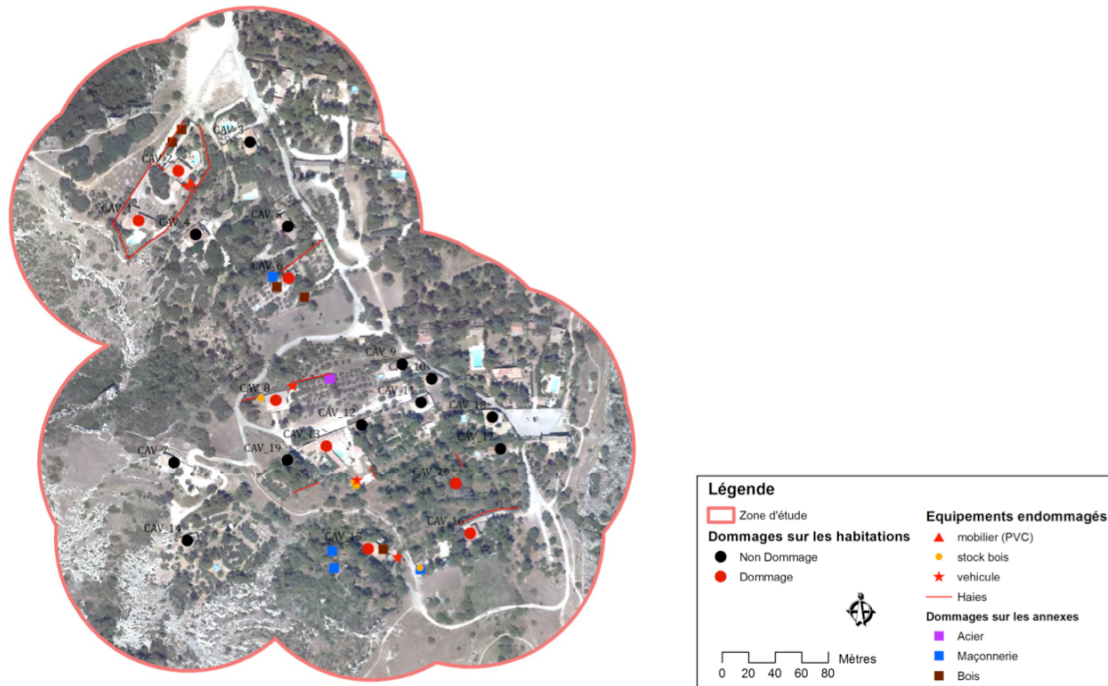


Fig. 63 : Carte thématique des dommages observés (BD ORTHO® IGN)

Six des sept maisons endommagées, on souffert de la présence de certains équipements (véhicule, annexe en bois...) localisés à leur proximité :

- **Habitation 2 (CAV_2)** : les projections de brandons en provenance du vallon (secteur nord-ouest à l'habitation) ont atteint deux annexes en bois, qui se sont enflammées, projetant à leur tour des particules incandescentes aux pieds de l'habitation où se trouvait du matériel en bois entreposé. De ce mécanisme résulte l'endommagement de la façade exposée nord-ouest (Fig. 64a). Le feu s'est propagé à l'arrière de la maison (face sud-est), où il a parcouru une haie de cyprès responsable de la détérioration de la gouttière en PVC (Fig. 64b).



Fig. 64 : Dommages observés sur l'habitation CAV_2 : (a) façade endommagée par la combustion du matériel en bois entreposé ; (b) endommagement de la gouttière en PVC suite à l'incendie de la haie de cyprès vert.

- **Habitation 6 (CAV_6)** : le jardin de cette habitation n'a subi que des impacts localisés sur deux annexes en bois et un banc en bois, atteints par des projections de brandons. Le banc situé sous une fenêtre exposée sud-est a provoqué l'endommagement du volet en bois et le noircissement de la façade (Fig. 65), malgré la participation du propriétaire à la lutte, préalablement à l'arrivée des services de secours.



Fig. 65 : Dommages observés sur l'habitation CAV_6 : façade et volet endommagés par la combustion d'un banc en bois accolé à la maison

- **Habitation 8 (CAV_8)** : un vieux camion de collection était garé dans le jardin de cette habitation. Atteint par un feu courant au sol, le camion a été détruit, entraînant la combustion des oliviers aux abords de la maison. S'en suivirent la dégradation et la chute de la gouttière située au niveau de la façade exposée nord (Fig. 66).



Fig. 66 : Dommages observés sur l'habitation CAV_8 : gouttière endommagée suite à l'incendie d'un camion et de son effet sur la végétation environnante

- **Habitation 13 (CAV_13)** : la façade orientée sud-ouest de cette habitation a été légèrement détériorée, une vitre non occultée a été brisée suite à l'action du rayonnement thermique provenant de l'incendie d'un camion, lui même déclenché par celui d'un stock de bois de chauffe (Fig. 67).



Fig. 67 : Dommages observés sur l'habitation CAV_13 : (a) un stock de bois entre en contact avec le feu, sa combustion entraîne celle du camion ; (b) l'incendie du camion impacte par rayonnement le matériel stocké au pieds de la maison et brise la vitre (c)

- **Habitation 15 (CAV_15)** : c'est l'habitation la plus lourdement touchée. Située en haut de vallon, sous la crête, elle possède une forte couverture arborée en surplomb de sa toiture. Durant l'incendie, la végétation morte accumulée sur la toiture a subi les assauts de brandons et enflammé cette dernière (Fig. 68d). Le feu a encerclé la maison. Au niveau de la façade sud-est, c'est l'effet du rayonnement thermique qui est responsable des dommages sur les volets (Fig. 68b), et des projections de brandons qui ont enflammé un banc en bois au pieds du volet de la terrasse (Fig. 68a). Enfin, une portion de la façade nord-ouest a été fortement endommagée par la combustion d'un établi en bois qui lui était accolé (Fig. 68c).



Fig. 68 : Dommages observés sur l'habitation CAV_8 : (a) volet en bois (façade sud-est) dégradé par la combustion d'un banc en bois accolé atteint par des brandons ; (b) volets façade sud-est partiellement détruit par l'exposition au rayonnement thermique (auto-inflammation) ; (c) façade nord-ouest endommagée par la combustion d'un établi en bois accolé ; (d) toiture endommagée par les brandons

- **Habitation 16 (CAV_16)** : cette maison possède également un végétation de pin d'Alep en surplomb de sa toiture. C'est une résidence secondaire, essentiellement entourée d'une végétation haute, bien élaguée. La haie de cyprès, servant de séparation avec la parcelle voisine, par ailleurs non entretenue, a projeté des particules incandescentes, lors de sa combustion, et occasionné de sérieux dommages à la toiture de la maison 16 (Fig. 69a). Séparée d'une distance de 4 m, elle n'a pour autant que très légèrement noirci le volet en bois de la façade en exposition directe (Fig. 69b).

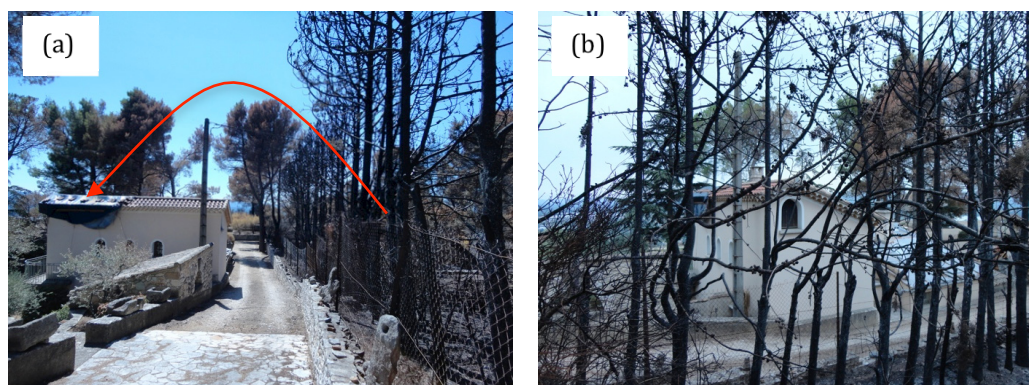


Fig. 69 : Dommages observés sur l'habitation CAV_16 : (a) toiture endommagée par les particules incandescentes de la haie de cyprès en combustion (b) volet en bois (façade nord-ouest) légèrement noirci

La dernière habitation endommagée est la n° 20, située sur un terrain non entretenu, elle-même à l'abandon. Sa parcelle est contiguë à celle de la maison 16. Cette zone non débroussaillée a permis à l'incendie de se propager dans la zone centrale au groupe de bâtiments du secteur est de l'interface. Les volets ont été partiellement brûlés et les vitres brisées. L'habitation a perdu sa toiture, mais le feu ne s'est pas propagé à l'intérieur. Du fait de sa configuration dangereuse, cette parcelle a bénéficié de l'intervention des avions bombardiers d'eau.

5.3. Spatialisation de la vulnérabilité

L'application concrète du modèle de vulnérabilité repose sur la construction de cartes de vulnérabilité, au format raster et de résolution métrique. Les conséquences de l'incendie de forêt révèlent *a posteriori* les différentes situations de vulnérabilité favorables à l'endommagement. Ce site sert de base à la réflexion et à l'application de la méthodologie proposée. L'objectif consiste à fournir une représentation spatiale de la vulnérabilité à des fins opérationnelles. Ce travail ne possède aucune valeur réglementaire. Il ne prétend pas non plus être exhaustif ou absolument exact dans les données et les limites spatiales adoptées pour la cartographie à l'échelle considérée.

Si cartographier la vulnérabilité permet d'anticiper les sinistres, cet exercice comporte plusieurs difficultés. Selon l'approche proposée, l'appréciation de l'indice de vulnérabilité face à l'aléa incendie de forêt dépend de la connaissance des intensités de contribution spécifiques aux six critères agrégés formant le premier niveau hiérarchique du modèle conceptuel. Lesquels dépendent également des intensités de leur famille respective de sous-critères. L'évaluation commence alors par la base de la hiérarchie. Chaque sous-critère d'entrée doit être spatialisé afin de pouvoir passer aux niveaux supérieurs de la hiérarchie selon la méthode d'agrégation de l'AHP.

5.3.1. Méthodes et outils de spatialisation

L'obtention d'un champ continu de vulnérabilité à partir du modèle calculé (cf. Chapitre 4) nécessite l'estimation en chaque point de l'espace des valeurs de chacun des critères. Les critères sont soit des variables spatiales, soit des attributs d'objets géographiques géo-référencés (en particulier le bâti). Les méthodes de spatialisation diffèrent selon la nature des variables-critères (Tab. 51).

Code	Critères d'entrée Désignation	Niveau	Type de variable	Méthode
C ₁₁₁	Type accès	4	Attribut (bâti)	Interpolation IDW
C ₁₁₂	Largeur accès	4	Attribut (bâti)	Interpolation IDW
C ₁₂₁	Présence d'une piste DFCI	4	Attribut (interface)	Affectation du score à l'interface
C ₁₂₂	Distance aux hydrants	4	Spatiale	Fonction <i>Euclidean Distance</i>
C ₁₂₃	Débroussaillage réalisé	4	Attribut (bâti)	Interpolation IDW
C ₁₃₁	Type d'équipement	4	Attribut (équipement)	Affectation du score à l'équipement
C ₁₃₂	Distance à l'équipement	4	Spatiale	Fonction <i>Euclidean Distance</i>
C ₁₄	Distance à la végétation	3	Spatiale	Fonction <i>Euclidean Distance</i>
C ₁₅₁	Type de séparation	4	Attribut (bâti)	Interpolation IDW
C ₁₅₂	Distance à la séparation	4	Attribut (bâti)	Interpolation IDW
C ₁₆	Végétation en surplomb	3	Attribut (bâti)	Interpolation IDW
C ₁₇	Réseau EDF	3	Attribut (bâti)	Interpolation IDW
C ₂₁	Pente	3	Spatiale	Fonction <i>Slope (Spatial Analyst)</i>
C ₂₂	Exposition soleil	3	Spatiale	Fonction <i>Aspect (Spatial Analyst)</i>
C ₂₃	Exposition vent	3	Spatiale	Fonction <i>Aspect (Spatial Analyst)</i>
C ₂₄	Position topographique	3	Spatiale	Fonction <i>TPI (Land Facet Corridors)</i>

Code	Critères d'entrée Désignation	Niveau	Type de variable	Méthode
C ₃₁	Continuité horizontale	3	Spatiale	Fonction <i>Aggregation Index</i>
C ₃₂	Continuité verticale	3	Attribut (végétation)	Affectation du score au peuplement
C ₄₁	Type de structure	3	Spatiale	Structure de l'habitat WUImap [©]
C ₄₂	Position dans l'interface	3	Spatiale	Fonction <i>Minimum Bounding Geometry</i>
C ₅₁	Jonction mur-toiture	3	Attribut (bâti)	Interpolation IDW
C ₅₂	Matériaux Façade	3	Attribut (bâti)	Interpolation IDW
C ₅₃	Propriétés Ouverture	3	Attribut (bâti)	Interpolation IDW
C ₅₄	Matériaux Gouttière	3	Attribut (bâti)	Interpolation IDW
C ₆₁	Type de résidence	3	Attribut (bâti)	Interpolation IDW
C ₆₂₁	Plan d'urgence	4	Attribut (interface)	Affectation du score à l'interface
C ₆₂₂	Connaissance sur le risque	4	Attribut (bâti)	Interpolation IDW
C ₆₃₁	Entretien habitat	4	Attribut (bâti)	Interpolation IDW
C ₆₃₂	Entretien végétation	4	Attribut (bâti)	Interpolation IDW

Tab. 51 : Inventaire des types de variables associées aux critères du modèle, et de leur méthode de spatialisation

a. Les critères relatifs aux variables continues dans l'espace

Ces critères (Topographie, Structure de la Végétation, Structure de l'Habitat, Distance) symbolisent la composante « exposition » de la vulnérabilité. Ils traduisent la diffusion spatiale de la vulnérabilité qui s'exerce de l'environnement vers les habitations.

→ La topographie

Afin de calculer les critères topographiques à partir du MNT, le logiciel ArcGIS[©]10, développé par ESRI (Environmental Systems Research Institute), a été utilisé :

- **La pente** est calculée en tout point de l'interface en utilisant la fonction *Slope* du menu *Surface* de l'extension *Spatial Analyst*. Le résultat exprimé en % se traduit par une carte au format raster avec un pixel d'une taille de 25 m sur 25 m imposée par la résolution du MNT de la BD TOPO[©]. Les valeurs de pente sont réparties selon les quatre modalités du sous-critère.
- **L'exposition au soleil** est calculée en tout point de l'espace en utilisant la fonction *Aspect* du menu *Surface* de l'extension *Spatial Analyst*. Le résultat exprimé en degré. Le raster est ensuite reclassifié selon les quatre modalités du sous-critère.
- **L'exposition au vent dominant**, le mistral, est calculée en tout point de l'espace en utilisant la même méthode que pour l'exposition au soleil. Le raster est reclassifié selon les valeurs d'exposition entre 90° et 180° (sous le vent), les valeurs d'exposition comprises entre 0° et 90° et entre 180° et 270° (intermédiaire) et les valeurs d'exposition entre 270° et 360° (au vent).
- **L'indice de position topographique (TPI)** est calculé à l'aide de l'extension *Land Facet Corridor Designer v. 1.2.884* développée par Jenness Entreprises, en libre téléchargement depuis leur site internet⁷. Le TPI permet de classer le MNT selon les trois modalités (crêtes, versants, talwegs) sur la base de la différence d'élévation entre les mailles. La classification est effectuée par la méthode des seuils naturels de Jenks, et validation terrain.

→ La végétation

⁷ http://www.jennessent.com/arcgis/land_facets.htm

La méthode de cartographie des interface habitat-forêt (Lampin-Maillet *et al.*, 2008) est utilisée pour le calcul de la continuité horizontale de la végétation. Notre objectif de modélisation se concentre sur la contribution de la végétation à la vulnérabilité des enjeux, et nécessite une précision métrique. En effet, la végétation linéaire (haies) et la végétation ponctuelle d'agrément (cyprès isolés, végétation arbustive des jardins) jouent un rôle primordial au regard de la vulnérabilité. Le choix de l'extraction à partir d'images de télédétection aéroportée orthogonales (BD ORTHO[®]) s'est imposé pour cela. La carte de végétation, au format raster de résolution 1 m, présente deux classes : « Végétation » et « non Végétation ». Elle est réalisée par classification non supervisée sous ArcGIS[®]10 (fonction *Iso Cluster Unsupervised Classification* du module *Image Classification*).

De la carte de végétation, nous traitons deux sous-critères :

- « Distance à la Végétation » : calcul du raster de distance euclidienne (fonction *Euclidean Distance* de l'extension *Spatial Analyst*), reclassifié selon les quatre modalités ;
- « Continuité Horizontale » : le logiciel FRAGSTATS[®]v.3.3 a été utilisé pour calculer l'indice d'agrégation (*Aggregation Index* – AI) de la végétation sur la totalité de l'image grâce à une fenêtre glissante qui parcourt l'image de l'extrémité gauche vers l'extrémité droite et de haut en bas. Le rayon de calcul a été fixé à 3 m de manière à traduire précisément la continuité de la végétation. Les valeurs de l'indice d'agrégation varient de 0 à 100 %. Pour mettre en évidence les trois types de continuité de la végétation (nulle, faible, forte), nous avons discrétisé les valeurs de l'indice en trois classes. Les seuils sont basés sur les travaux de C. Lampin (2009).
 - AI = 0 pour la modalité « nulle » ;
 - $0 < AI < 95$ % pour la modalité « faible » ;
 - AI > 95 % pour la modalité « forte ».

La carte produite permet la détection de zones d'intervention prioritaires en ce qui concerne le débroussaillage réglementaire. En effet, en France, les arrêtés préfectoraux relatifs aux Obligations Légales de Débroussaillage demandent un espacement minimum de 3 m entre les houppiers de la végétation arborée, et entre la végétation et toute habitation résidentielle. Ces opérations de mise à distance sont également préconisées à l'étranger pour les habitations en interfaces habitat-forêt (Cohen, 2000 ; Kamp et Sampson, 2002). La carte revêt alors un caractère opérationnel.

La dernière étape du processus est le calcul de la moyenne de l'indice d'agrégation dans un rayon de 30 m autour de toute construction (habitation résidentielle, annexe). Le résultat est ensuite attribué à l'emprise de chaque construction, et représente la vulnérabilité d'exposition aux continuités horizontales de la végétation environnante. Toute structure bâtie est vulnérable au phénomène de radiation provenant des flammes. Le choix du rayon de 30 m se base sur les résultats des recherches qui indiquent que la zone délimitée par une maison et son environnement situés dans les 30 m d'un front de flamme détermine cette zone d'inflammation potentielle lors d'un feu sévère (Cohen, 2002 ; Southern Forest alliance, 2003). Kaval (2009) souligne l'importance de connaître l'état de la végétation dans un rayon de 100 m autour des habitations et rappelle que les 30 premiers mètres doivent être nettoyés de tout combustible.

La spatialisation de la continuité verticale de la végétation s'effectue de manière différente. Elle se base sur l'interprétation des orthophotographies aérienne de très haute résolution, à partir desquelles sont digitalisées des polygones de végétation homogène. Puis

l'enquête sur le terrain permet d'attribuer à chaque polygone une classe de continuité verticale, en fonction des strates en présence. Enfin, nous calculons dans un rayon de 30 m autour de toute construction, la moyenne des contributions pondérée par la surface d'occupation des différentes classes. Le résultat est ensuite attribué à l'emprise de chaque construction, et représente la vulnérabilité d'exposition aux continuités verticales de la végétation environnante.

→ L'habitat résidentiel

Les deux derniers sous-critères, appartenant à cette famille, caractérisent la structure de l'habitat résidentiel.

Le calcul du type de structure fait référence à la première composante des interfaces habitat-forêt. L'outil WUImap® développé par l'IRSTEA permet de cartographier automatiquement les types de structures (Lampin-Maillet *et al.*, 2010). Le logiciel ArcGIS®9.3 est utilisé comme plateforme de fonctionnement de l'outil. Pour la mise en œuvre de la méthode, trois couches de données sont nécessaires :

- L'emprise de la zone d'étude (format vecteur, polygone) ;
- L'emprise sur laquelle s'appliquent les obligations légales de débroussaillage (format vecteur, polygone) ;
- Les données de bâtis résidentiels (format vecteur, polygone).

Dans un souci de respecter la cohérence territoriale, nous avons effectué le calcul sur l'ensemble de la commune de Cavaillon (Fig. 70). Nous avons par la suite extrait la zone correspondant à notre terrain d'étude.

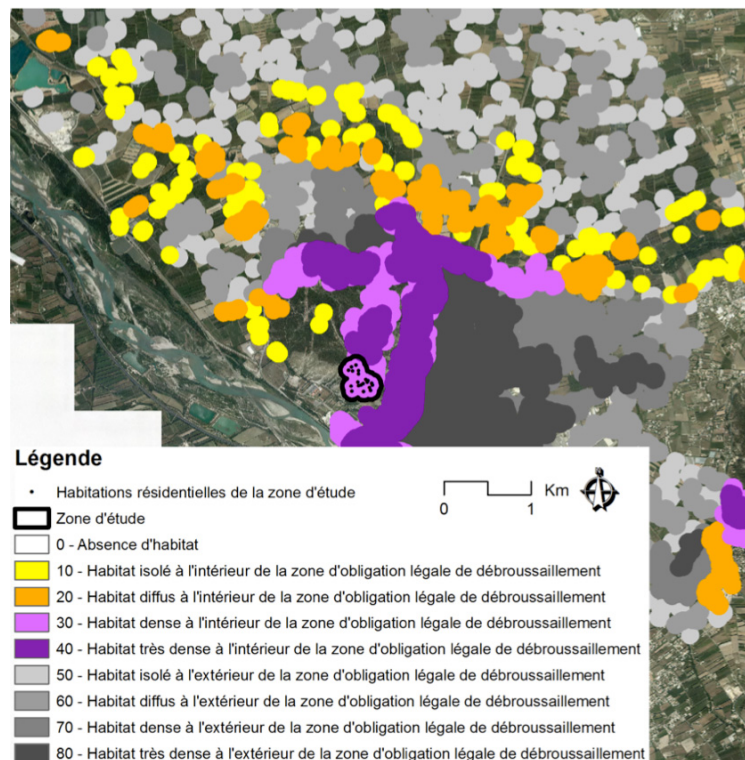


Fig. 70 : Cartographie de la structure de l'habitat résidentiel de la commune de Cavaillon

Le deuxième sous-critère concerne les différentes positions au sein des interfaces habitat-forêt. Nous définissons ces positions par rapport aux groupes de maisons. Un groupe est au

minimum constitué de deux maisons. Des zones tampons ou buffers de rayon 30 m sont tracés autour de l'enveloppe de chaque habitation résidentielle. Les maisons, dont les buffers s'intersectent, forment alors un groupe (Fig. 71). L'emprise spatiale du groupe est calculée à l'aide la fonction *Minimum Bounding Geometry* du menu *Features* de l'outil *Data Management* (ArcGIS®10). De cette manière, nous définissons un polygone convexe, d'emprise minimale, comprenant l'intégralité des habitations du groupe. La zone périphérique est limitée par le double buffer (interne et externe) de 30 m autour de l'enveloppe minimale du groupe de maisons, soit la première ligne prioritairement menacée par l'arrivée du feu. L'intérieur du groupe, passé la première ligne, constitue la position centrale.

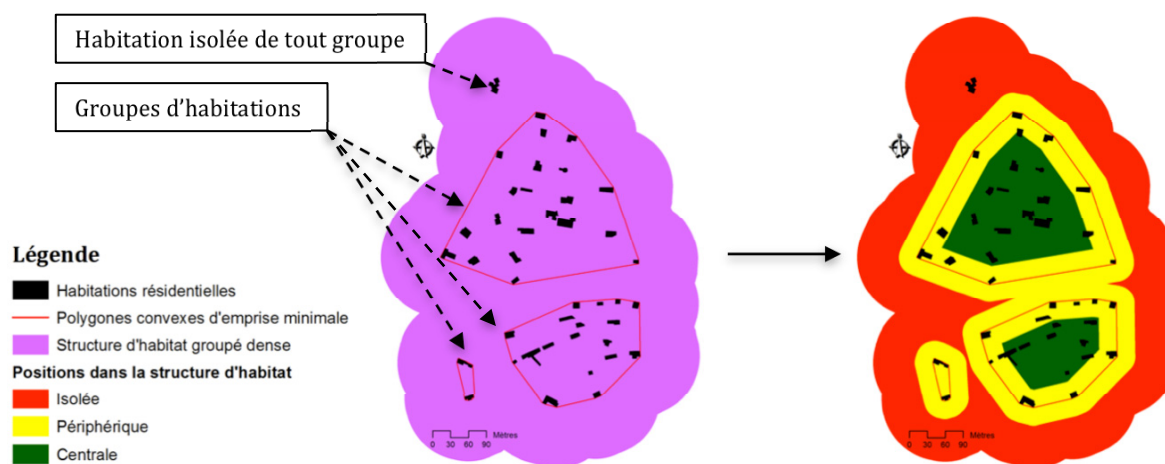


Fig. 71 : Cartographie des modalités du sous-critère « Position » (source : BD TOPO® de l'IGN)

b. Les critères relatifs aux variables discontinues dans l'espace

Ces critères (Propriétés des Habitations, Facteurs Humains, etc.) correspondent aux attributs des enjeux (habitations), contributifs à la vulnérabilité du site. Au chapitre précédent, nous avons obtenu les scores d'intensité de contribution de chaque modalité du modèle à l'indice global de vulnérabilité. Nous procédons à l'interpolation des intensités (score des modalités) attribuées aux points d'habitation, de manière à représenter le champ de vulnérabilité induit par l'enjeu sur son environnement (diffusion). Cette approche se fonde sur deux hypothèses :

- l'hypothèse de la diffusion spatiale de la vulnérabilité : cette hypothèse est fondée sur le phénomène de propagation de l'incendie, via les objets vulnérables. La vulnérabilité d'un objet géographique contribue à la vulnérabilité de son voisinage. Concrètement, cette idée est notamment à l'origine, des dispositifs règlementaires instaurant un devoir de débroussaillage des résidents, y compris hors de leur propriété ;
- la seconde est l'autocorrélation spatiale des principaux critères de vulnérabilité anthropique, notamment dans les zones d'interface habitat-forêt. Cette hypothèse est à relier à divers mécanismes sociaux, tels que le mimétisme de voisinage, la ségrégation sociale par quartiers et son impact sur les pratiques d'aménagement micro-locaux, la géo-localisation des réseaux sociaux, la réglementation (zonage des règles d'urbanisme), etc.

La diffusion spatiale de la vulnérabilité des enjeux est obtenue par interpolation déterministe (inverse de la distance au carré, fonction IDW de l'extension *Spatial Analyst*) avec une résolution métrique. L'information étant exhaustive, sur la zone d'étude, nous utilisons l'ensemble des points bâtis pour calculer la valeur de la vulnérabilité induite en tout

point de l'interface. Ce choix est basé sur l'hypothèse que l'effet de la vulnérabilité induite par une habitation se transmet à l'ensemble du territoire et interagit avec les vulnérabilités induites par les enjeux voisins. L'influence d'un enjeu est alors considérée comme décroissante à mesure que l'on s'en éloigne.

Une fois les critères d'entrée cartographiés, le SIG est utilisé pour effectuer leur agrégation complète, selon la méthode AHP (somme pondérée), de laquelle résulte la carte de l'indice global de vulnérabilité. La carte de la distribution spatiale de la vulnérabilité produite par le modèle permet la définition des zones prioritaires d'intervention, ainsi que le ciblage des actions à entreprendre, en identifiant les critères névralgiques.

5.3.2. Analyse des structures spatiales de la vulnérabilité.

L'idée sous-jacente à notre entreprise est la capture, par les statistiques spatiales, de la structure visible sur les cartes de vulnérabilités (spécifiques et globale). Elle repose donc sur l'hypothèse que les valeurs en un lieu sont fonction des valeurs dans son voisinage, autrement dit que l'on est en présence d'autocorrélation spatiale. L'autocorrélation spatiale a pour point de départ la constatation selon laquelle les observations spatialisées en coupes transversales ne sont pas indépendantes. On définit l'autocorrélation spatiale comme la corrélation, positive ou négative, d'une variable avec elle-même provenant de la disposition géographique des données.

La première étape concerne le choix de l'indice utilisé (parmi les plus connus : l'indice de Moran, le coefficient de Geary) et la définition du voisinage pour le calcul (contiguïté, distance, plus proches voisins). Notre choix s'est porté sur l'indice de Moran (I de Moran), qui, dans la littérature, est souvent préféré à celui de Geary en raison d'une stabilité générale plus grande (Upton et Fingleton, 1985). Il mesure le degré d'autocorrélation spatiale sous forme d'autocovariance relative des observations pour une variable x . La covariance relative n'est autre que le produit moyen des valeurs observées (et centrées sur la moyenne) rapporté à la variance de l'échantillon.

La définition classique de l'indice de Moran, appliqué à des observations i et j , dépend d'une matrice de proximité notée W_{ij} , prenant la valeur 0 partout sauf pour les i et j voisins. Il s'écrit formellement de la façon suivante :

$$I = \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S_0} \bigg/ \frac{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}{N}$$

avec : $S_0 = \sum_i \sum_j w_{ij}$ et $\bar{x} = (1/N) \sum_i x_i$, x_i est la valeur de la variable au point i et de moyenne \bar{x} ; i correspond à l'unité de référence et j aux unités voisines du point i définies par la matrice de pondération w_{ij} ; n est le nombre total d'individus dans l'échantillon et S_0 le nombre total de paires de voisins. Le numérateur s'interprète comme la covariance entre unités contiguës, chaque contiguïté étant pondérée par w_{ij}/S_0 . Elle est normalisée par le dénominateur qui est la variance totale observée.

Le résultat du calcul du I de Moran s'interprète comme un coefficient de corrélation classique. Il varie entre -1 (autocorrélation spatiale négative : les voisins ont des valeurs opposées) et +1 (autocorrélation spatiale positive : les voisins ont des valeurs semblables). Une valeur de l'indice se rapprochant de 0 marque l'absence d'autocorrélation spatiale : la répartition spatiale des observations est aléatoire.

Après avoir choisi un indice de mesure de l'autocorrélation spatiale, il faut définir une matrice de voisinage. Nous avons utilisé une matrice de voisinage basée sur les couples de

plus proches voisins d'ordre 1 (Fig. 72). La raison de ce choix est en rapport avec le phénomène d'incendie de forêt. Ce processus physique se propage et change d'état au gré du milieu dans lequel il évolue. Ainsi les habitations constituent un réseau de sites et de liens qui peuvent, selon leur état de vulnérabilité relayer ou non l'incendie au site directement voisin. Cette vision converge vers la notion de diffusion de la vulnérabilité des enjeux.

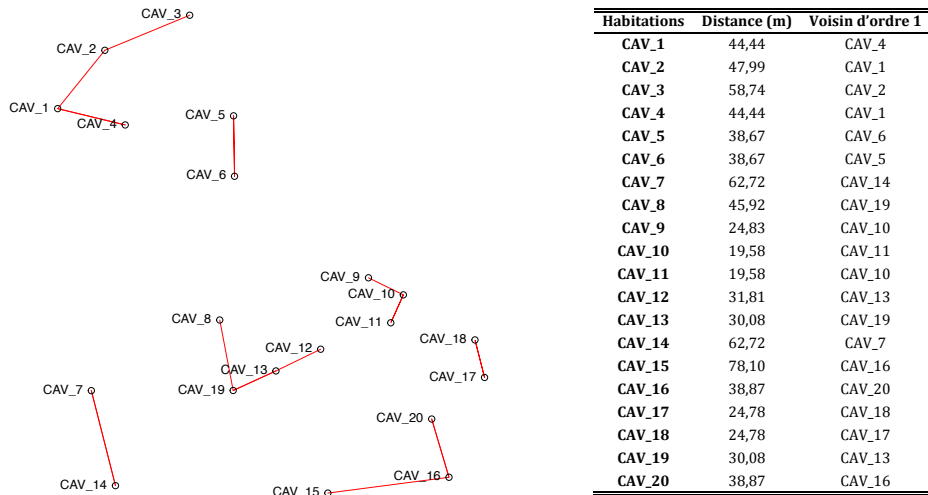


Fig. 72 : Graphe des plus proches voisins d'ordre 1 et table des distances associées

Les analyses sont réalisées sous le logiciel R (package *spdep*) (Bivand *et al.*, 2014). Les résultats du test de Moran sont pour l'ensemble des cartes de vulnérabilité récapitulés dans le tableau 52. Lorsque la probabilité critique est inférieure à 0,05, nous rejetons l'hypothèse nulle d'absence d'autocorrélation spatiale.

Critère	Statistique I de Moran	p.value	Autocorrélation
IGV	0,237	0,15	absence
C1	0,675	0,01	positive
C2	0,152	0,24	absence
C3	0,548	0,01	positive
C4	0,208	0,19	absence
C5	0,098	0,28	absence
C6	0,403	0,04	positive
C11	0,921	0,0005	positive
C112	0,921	0,0005	positive
C12	-0,136	0,38	absence
C122	0,541	0,007	positive
C123	0,028	0,39	absence
C13	0,67	0,005	positive
C14	-0,73	0,02	négative
C15	0,74	0,003	positive
C151	-0,085	0,45	absence
C152	0,74	0,003	positive
C16	0,544	0,02	positive
C21	0,183	0,2	absence
C22	0,208	0,15	absence
C23	0,364	0,069	positive
C24	-0,225	0,22	absence
C31	0,833	0,0003	positive
C32	0,366	0,059	positive
C42	0,21	0,19	absence
C51	-0,052	0,5	absence
C52	0,023	0,03	positive
C53	0,195	0,2	absence
C54	0,461	0,04	positive
C61	0,562	0,01	positive
C62	0,492	0,03	positive
C622	0,243	0,15	absence
C63	0,2	0,17	absence
C631	0,214	0,18	absence
C632	-0,12	0,18	absence

Tab. 52 : Résultats des tests de Moran pour les critères du modèle

Sur l'ensemble des 35 variables testées, on obtient trois groupes :

- Autocorrélation spatiale positive : 17 variables composent ce groupe, les couples de plus proches voisins ont tendance à se ressembler. Les couples de fortes vulnérabilités spécifiques génèrent une synergie favorable à l'endommagement, tandis que les couples de faibles vulnérabilités spécifiques créent des îlots défavorables à ce dernier ;
- Autocorrélation spatiale négative : 1 variable (distance à la végétation) forme ce groupe, les couples de plus proches voisins ont tendance à s'opposer. Cette caractéristique révèle les liaisons directes entre une action de protection « d'autrui » (venant de l'habitation à faible vulnérabilité spécifique) et d'aggravation de la susceptibilité « d'autrui » (venant de l'habitation à forte vulnérabilité spécifique) ;
- Absence d'autocorrélation spatiale : 17 variables ne présentent aucune structure spatiale générale.

Une deuxième forme de visualisation des données statistiques spatiales, le nuage de points de Moran (Anselin, 1996), permet une lecture détaillée des associations spatiales locales. Le principe de ce nuage de points consiste à mettre en opposition la valeur d'une variable pour une habitation et sa valeur pour l'habitation la plus proche (variable décalée ou *spatially lagged*), après avoir normalisé et standardisé les variables. En répétant l'opération pour toutes les habitations et leur plus proche voisine, on obtient un nuage de points qui nous permet de visualiser à la fois l'autocorrélation spatiale de la variable (pente de la droite de régression) et son hétérogénéité (poches où l'autocorrélation spatiale est plus forte ou plus faible que dans l'ensemble de l'échantillon).

On crée ainsi quatre catégories, soit quatre types d'associations qui correspondent aux quatre quadrants d'un nuage de points (Fig. 73) :

- Les valeurs positives (indice supérieur à la moyenne) au sein d'un environnement de points à valeur positive (autocorrélation spatiale positive). Association qualifiée de high-high.
- Les valeurs négatives (indice inférieur à la moyenne) au sein d'un environnement de points à valeur négative (autocorrélation spatiale positive). Association qualifiée de low-low.
- Les valeurs positives au sein d'un environnement de points à valeur négative (autocorrélation spatiale négative). Association qualifiée de high-low.
- Les valeurs négatives au sein d'un environnement de points à valeur positive (autocorrélation spatiale négative). Association qualifiée de low-high.

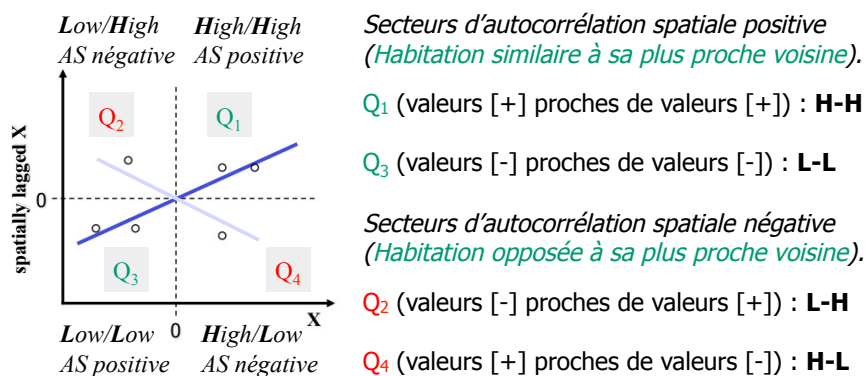


Fig. 73 : Explication des quatre quadrants du nuage de points de Moran

Les nuages de points de Moran (Fig. 74) sont représentés pour les critères agrégés ayant une autocorrélation spatiale positive. Les habitations en gras sont celles qui participent le plus fortement à l'autocorrélation spatiale.

- **C₁ - Aménagement** : les habitations endommagées (CAV_13, 15, 16 et 20) sont positionnées dans le quadrant 1, elles se caractérisent par les plus fortes valeurs de vulnérabilités spécifiques, et forment une zone de concentration de vulnérabilité spécifique élevée (valeur moyenne de 3) avec CAV_19 et CAV_12. L'habitation endommagée CAV_2 présente une vulnérabilité spécifique légèrement plus élevée que sa plus proche voisine (CAV_3). Elle appartient à une zone de vulnérabilité spécifique plus faible. Elle se démarque néanmoins des autres par son accumulation des équipements aggravants (stock de bois, annexe en bois et haies). Les deux dernières habitations endommagées CAV_6 et CAV_8 participent à l'autocorrélation spatiale négative, leur valeur de vulnérabilité spécifique est nettement inférieure à celle de leur plus proche voisine.
- **C₃ - Structure de la Végétation** : on retrouve la majorité des habitations endommagées (CAV_6, 15, 16 et 20) dans des secteurs de concentration de fortes vulnérabilités spécifiques. CAV_8 et CAV_13 présentent quant à elles des vulnérabilités spécifiques inférieures à leur proche voisine. La végétation étant le principal vecteur du feu, ces deux habitations ont souffert des plus fortes continuités alentours. CAV_2 conserve les mêmes caractéristiques que pour le critère « Aménagement ».
- **C₆ - Facteurs Humains** : les habitations CAV_15, 16 et 20 présentent une nouvelle fois une synergie aggravante. Tout comme les habitations CAV_8 et 13 qui sont soumises aux vulnérabilités spécifiques plus élevées au niveau de leur voisinage. Les habitations CAV_6 et CAV_1 se fondent dans un environnement de moindre vulnérabilité spécifique.

Le nuage de points de Moran est très utile pour la distinction des différentes situations locales. Ainsi, nous avons mis en valeur des zones où le niveau de ressemblance ou dissemblance local est important. Selon la règle de voisinage définie, nous ne décelons pas de structure spatiale en ce qui concerne l'IGV. Cependant, à la lecture du nuage de points, nous remarquons des caractéristiques locales, similaires à celles présentées pour les trois critères précédents.

Afin d'accéder à une mesure locale de la structure spatiale de l'IGV variables étudiées, nous avons calculé l'indice de Moran local (Anselin, 1995). L. Anselin propose la notion de *Local Indicators of Spatial Association* (LISA), terme générique regroupant différents indices qui permettent de mesurer l'autocorrélation spatiale locale. Selon l'auteur, « *un indicateur local d'association spatiale est n'importe quelle statistique répondant à deux critères :*

- *Le LISA de chaque observation donne une indication sur l'étendue d'un regroupement spatial significatif de valeurs similaires autour de cette observation.*
- *La somme des LISA pour toutes les observations est proportionnelle à un indicateur global d'association spatiale. »*

Un LISA permet la mise en évidence des regroupements locaux de valeurs similaires (*spatial clustering*), particulièrement dans les cas où l'autocorrélation spatiale globale est nulle.

L'indicateur de Moran local est donné par la formule (Anselin, 1995) :

$$I_i = \frac{\sum_j w_{ij}(x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}$$

Conformément à la règle, la somme des indices de Moran locaux est proportionnelle à l'indice de Moran global : $\sum_i I_i = \gamma \cdot I$, avec $\gamma = N$.

Les résultats démontrent qu'il existe des associations spatiales localement fortes pour l'Indice Global de Vulnérabilité (Tab. 53). Malgré l'absence d'autocorrélation spatiale globale, on distingue une association significative entre les habitations CAV_10 et CAV_11. Ces maisons présentent toutes deux de faibles valeurs d'indice. C'est également le cas pour le trio d'habitations les plus fortement endommagées (CAV_15, 16 et 20) qui définissent un secteur de forte vulnérabilité, comme le laissait présager leur position au sein du quadrant 1 dans le nuage de points de Moran.

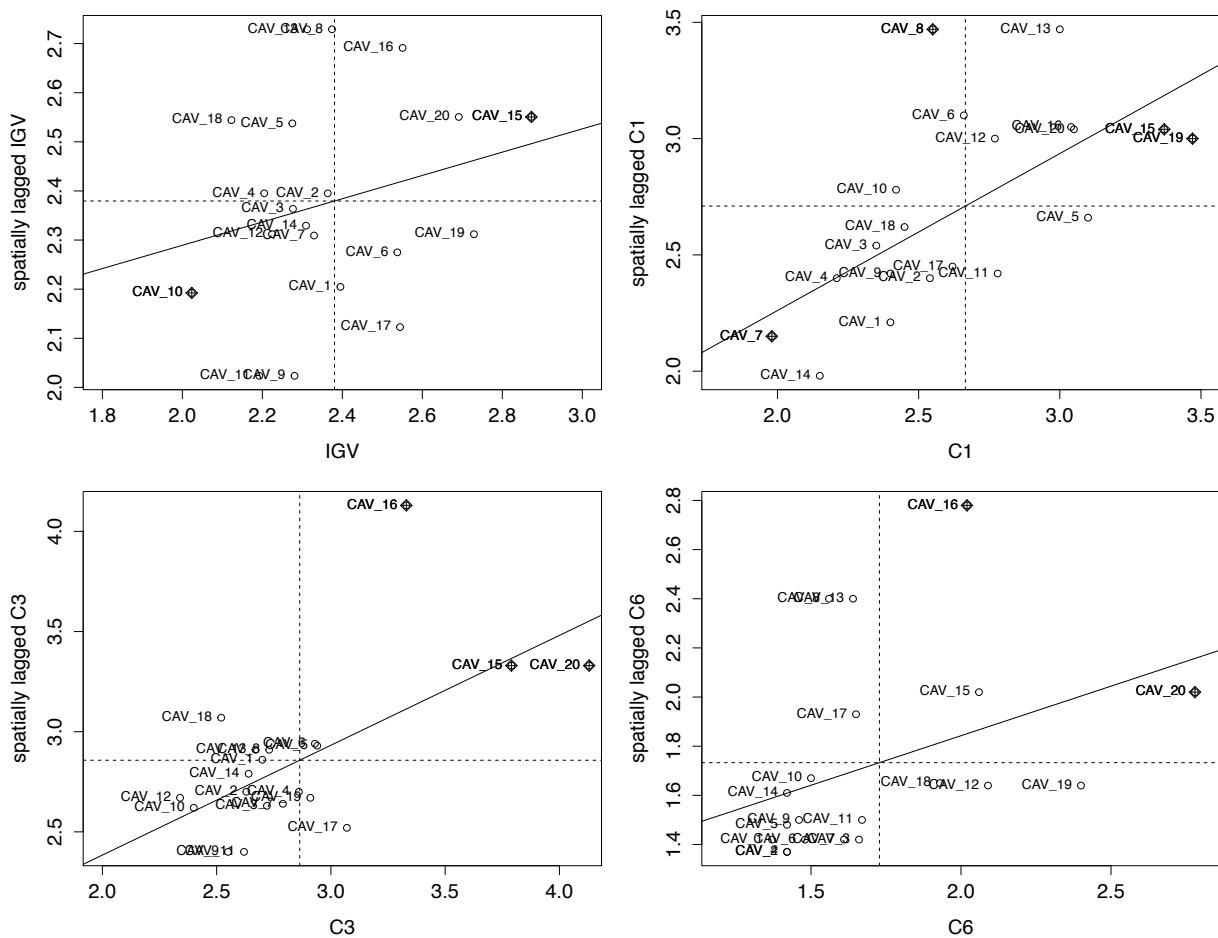


Fig. 74 : Nuage de points de Moran pour l'indice global de vulnérabilité et les critères relatifs à l'aménagement (C1), à la structure de la végétation (C3) et aux facteurs humains (C6)

Habitations	li	E.li	Var.li	Z.li	p.value
CAV_10	1,542	-0,053	0,899	1,683	0,046
CAV_18	-0,970	-0,053	0,899	-0,968	0,834
CAV_11	1,542	-0,053	0,899	1,683	0,046
CAV_4	-0,060	-0,053	0,899	-0,008	0,503
CAV_12	0,246	-0,053	0,899	0,315	0,376
CAV_5	-0,381	-0,053	0,899	-0,346	0,635
CAV_3	0,040	-0,053	0,899	0,098	0,461
CAV_9	0,819	-0,053	0,899	0,920	0,179
CAV_14	0,084	-0,053	0,899	0,144	0,443
CAV_13	-0,549	-0,053	0,899	-0,523	0,700
CAV_7	0,084	-0,053	0,899	0,144	0,443
CAV_2	-0,006	-0,053	0,899	0,049	0,480
CAV_8	-0,050	-0,053	0,899	0,002	0,499
CAV_1	-0,060	-0,053	0,899	-0,008	0,503
CAV_6	-0,381	-0,053	0,899	-0,346	0,635
CAV_17	-0,970	-0,053	0,899	-0,968	0,834
CAV_16	1,216	-0,053	0,899	1,338	0,090
CAV_20	1,216	-0,053	0,899	1,338	0,090
CAV_19	-0,549	-0,053	0,899	-0,523	0,700
CAV_15	1,926	-0,053	0,899	2,088	0,018

Tab. 53 : Contributions locales à la structure spatiale de l'IGV

5.4. Modélisation de l'endommagement des habitations en fonction de l'indice global de vulnérabilité

Dans la section précédente, la spatialisation du modèle multicritère d'évaluation de la vulnérabilité (à dire d'experts) a révélé l'autocorrélation spatiale de certains critères construisant l'indice global de vulnérabilité (IGV). L'indicateur local d'association spatiale a permis de déceler des associations spatiales localement fortes pour l'IGV, et ce, malgré l'absence d'autocorrélation spatiale globale.

Dans cette section, nous allons étudier les relations entre les vulnérabilités spécifiques aux critères, la vulnérabilité globale (somme pondérée des vulnérabilités spécifiques) et les dommages observés. Les résultats cartographiques seront également présentés. Une nouvelle variable est introduite : l'indice global de vulnérabilité spatialement décalé ($IGV^{(D)}$). Cette variable est construite à partir de la matrice de voisinage basée sur les couples de plus proches voisins d'ordre 1 (cf. §5.3.2). Pour une habitation donnée, la valeur de $IGV^{(D)}$ est égale à la valeur de l'IGV de sa plus proche voisine.

La population des 20 maisons étudiées est distribuée dans deux classes de dommage (endommagée ou non) et trois classes de sévérité. L'ensemble des membres de chacune des classes est considéré comme un échantillon de la population des habitations, et est doté du caractère de la classe :

- « DOM » : différenciant les habitations endommagées (« dommage »), au nombre de sept, de celles non endommagées (« non dommage »), au nombre de treize.
- « SEV » : dissociant les maisons dont la sévérité du dommage est de niveau 0 (13 maisons), de celles de niveau 1 (4 maisons), et de niveau 2 (3 maisons).

Dans le prolongement direct de l'analyse des corrélations, un travail de modélisation est réalisé. Pour aller au bout de notre démarche *a posteriori*, deux approches sont proposées :

- (1) Modélisation de la variable binaire « DOM » (y_0 = "non dommage" = 0 ou y_1 = "dommage" = 1) par régression logistique ;

(2) Modélisation de la variable ordinale « SEV » ($y_0 = \text{"Niveau 0"} = 0$ ou $y_1 = \text{"Niveau 1"} = 1$ ou $y_2 = \text{"Niveau 2"} = 2$) par régression logistique polytomique ordinale.

Ces deux formes de régression considèrent que les variables explicatives sont stationnaires : chaque observation est supposée indépendante. Or nous souhaitons tester la capacité de l'indice global de vulnérabilité l'IGV à déterminer la propension à l'endommagement des habitations étudiées (occurrence et sévérité), et ce dernier présente localement des associations spatiales fortes. Afin de prendre en considération l'autocorrélation spatiale locale, nous introduirons la variable spatialement décalées, $IGV^{(D)}$, dans les équations des régressions.

Notre jeu de données présente un faible effectif de maisons. Nous ne disposons pas de suffisamment d'observations pour diviser notre population en un *échantillon d'apprentissage* et un *échantillon test*. Les modèles seront élaborés à partir de la totalité des données, de manière à assurer leur consistance. Les modèles élaborés ne revêtent donc pas un caractère prédictif. L'objectif est alors d'évaluer la cohérence des modèles et leur capacité à retrouver les dommages observés. Le deuxième objectif de la modélisation sera de comparer les méthodes associées à l'analyse multicritère. Pour rappel, lors de l'élaboration du modèle multicritère, la méthode d'agrégation des jugements retenue fût l'AIPS (cf. Chapitre 4). Afin de juger si celle-ci se distingue de la méthode AJI, traditionnelle à l'AHP, nous comparerons les performances des modèles logistiques établis. Il en ira de même pour les méthodes d'agrégation de scores des modalités (EVM et EV3M). Ainsi, quatre modélisations par approches seront comparées afin de déterminer quel couple de méthodes présente la plus grande cohérence avec les observations terrains.

5.4.1. Corrélation des dommages aux valeurs de vulnérabilité

a. Relation entre l'endommagement et la vulnérabilité spécifique au critère « Aménagement »

Le critère relatif à l'aménagement des interfaces est construit autour de variables spatiales (distance à la végétation, distance aux équipements, distance aux hydrants) et de variables « attributs des habitations » (largeur et type d'accès, OLD, type et distance de séparation, végétation en surplomb des toitures, réseau EDF). L'agrégation des sept couches d'information, de laquelle résulte l'intensité brute de contribution spécifique du critère « Aménagement » à l'indice global de vulnérabilité (Fig. 76), suit l'équation :

$$V_s(C_1) = 0,1118 \cdot V_s(C_{11}) + 0,1906 \cdot V_s(C_{12}) + 0,1344 \cdot V_s(C_{13}) + 0,1775 \cdot V_s(C_{14}) + 0,1079 \cdot V_s(C_{15}) + 0,1880 \cdot V_s(C_{16}) + 0,0898 \cdot V_s(C_{17})$$

Selon l'analyse des dires d'experts, trois sous-critères se démarquent par leur potentiel discriminatoire à savoir les aménagements défensifs (C_{12}), la distance à la végétation (C_{14}) et la présence de végétation en surplomb des toitures (C_{16}).

Les statistiques descriptives pour chaque variable au sein des échantillons « DOM » et « SEV » sont résumées dans les tableaux 54 et 55. L'échantillon « non dommage » est hétérogène sur les variables C_{122} , C_{123} , C_{13} et C_{16} ($CV > 30\%$) et relativement homogène pour le reste. En revanche, l'échantillon « dommage » présente une hétérogénéité seulement sur les variables C_{123} et C_{16} .

Les valeurs médianes et moyennes de la vulnérabilité spécifique du sous-critère « Séparations des propriétés » (C_{15}) diminuent de l'échantillon « non dommage » à « dommage », conduite par la variable « Distance à la séparation ». Les faibles distances jugées plus favorables à la vulnérabilité des habitations, par les experts, semblent jouer le rôle

contraire. Il en est de même pour le sous-critère « Distance à la végétation » (C₁₄). Cependant, l'intérêt de notre démarche est de ne pas contraindre la vulnérabilité à un unique critère, les différentes contributions génèrent des synergies positives ou négatives, révélées lors de leur agrégation. En effet, les valeurs moyennes et médianes de la vulnérabilité spécifique au critère « Aménagement » (C₁), synthétisant les performances de l'ensemble des sous-critères, augmentent des maisons non endommagées à celles endommagées (Fig. 75). De la même manière, on observe une augmentation de la vulnérabilité spécifique à l'aménagement avec la sévérité des dommages. Le niveau 1 de sévérité est caractérisé par une valeur médiane de vulnérabilité spécifique à 40% Faible et 60 % Modérée, contre 95 % Modérée et 5 % Forte pour le niveau 2.

« non dommage »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)	« dommage »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
C ₁₁	2,33	2,50	2,34	2,39	0,08	3,39	C ₁₁	2,33	2,50	2,50	2,43	0,09	3,68
C ₁₁₁	2,95	2,95	2,95	2,95	0,00	0,00	C ₁₁₁	2,95	2,95	2,95	2,95	0,00	0,00
C ₁₁₂	1,25	1,73	1,26	1,40	0,22	15,88	C ₁₁₂	1,25	1,72	1,71	1,52	0,25	16,17
C ₁₂	1,97	3,49	2,24	2,42	0,45	18,73	C ₁₂	2,12	3,45	2,26	2,56	0,54	21,13
C ₁₂₁	3,48	3,48	3,48	3,48	0,00	0,00	C ₁₂₁	3,48	3,48	3,48	3,48	0,00	0,00
C ₁₂₂	1,25	3,95	1,25	1,79	0,78	43,37	C ₁₂₂	1,25	2,10	1,95	1,71	0,43	25,39
C ₁₂₃	1,36	4,46	2,13	2,19	1,03	46,82	C ₁₂₃	1,35	4,47	2,15	2,57	1,30	50,41
C ₁₃	0,00	5,00	2,98	2,80	1,54	54,93	C ₁₃	2,61	5,00	4,97	4,59	0,89	19,30
C ₁₄	2,97	3,78	3,25	3,35	0,25	7,42	C ₁₄	2,72	3,76	2,96	3,16	0,38	12,02
C ₁₅	1,55	2,26	2,17	2,09	0,21	10,02	C ₁₅	1,54	2,23	1,91	1,83	0,23	12,84
C ₁₅₁	1,53	1,72	1,64	1,63	0,08	5,12	C ₁₅₁	1,26	1,72	1,71	1,58	0,21	13,57
C ₁₅₂	1,31	3,10	3,09	2,74	0,58	21,25	C ₁₅₂	1,28	3,05	2,19	2,19	0,51	23,33
C ₁₆	1,27	3,96	1,36	2,10	1,21	57,63	C ₁₆	1,27	3,95	3,80	2,79	1,39	49,76
C ₁₇	2,53	2,53	2,53	2,53	0,00	0,00	C ₁₇	2,53	2,53	2,53	2,53	0,00	0,00
C ₁	1,98	3,47	2,42	2,55	0,41	15,94	C ₁	2,54	3,37	3,00	2,89	0,31	10,79

Tab. 54 : Statistiques descriptives résumées pour les échantillons du groupe « DOM » – Aménagement

« sévérité 1 »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)	« sévérité 2 »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
C ₁₁	2,33	2,50	2,34	2,38	0,08	3,53	C ₁₁	2,50	2,50	2,50	2,50	0,00	0,11
C ₁₁₁	2,95	2,95	2,95	2,95	0	0,00	C ₁₁₁	2,95	2,95	2,95	2,95	0,00	0,00
C ₁₁₂	1,25	1,72	1,26	1,37	0,23	16,79	C ₁₁₂	1,71	1,72	1,72	1,72	0,01	0,44
C ₁₂	2,12	2,40	2,24	2,25	0,11	5,01	C ₁₂	2,26	3,45	3,24	2,98	0,63	21,27
C ₁₂₁	3,48	3,48	3,48	3,48	0	0	C ₁₂₁	3,48	3,48	3,48	3,48	0,00	0,00
C ₁₂₂	1,25	2,10	2,01	1,84	0,40	21,80	C ₁₂₂	1,25	2,10	1,25	1,53	0,49	32,01
C ₁₂₃	1,35	2,15	1,74	1,74	0,36	20,48	C ₁₂₃	2,20	4,47	4,37	3,68	1,28	34,82
C ₁₃	4,59	5,00	4,99	4,90	0,20	4,12	C ₁₃	2,61	4,97	4,95	4,18	1,36	32,56
C ₁₄	2,72	3,49	2,93	3,02	0,33	10,93	C ₁₄	2,91	3,76	3,35	3,34	0,42	12,69
C ₁₅	1,66	2,23	1,91	1,93	0,23	12,11	C ₁₅	1,54	1,92	1,64	1,70	0,20	11,60
C ₁₅₁	1,27	1,72	1,69	1,59	0,22	13,56	C ₁₅₁	1,26	1,72	1,71	1,56	0,26	16,74
C ₁₅₂	2,18	3,05	2,21	2,41	0,42	17,57	C ₁₅₂	1,28	2,22	2,19	1,90	0,53	28,19
C ₁₆	1,27	3,80	1,33	1,93	1,24	64,52	C ₁₆	3,91	3,95	3,95	3,94	0,02	0,58
C ₁₇	2,53	2,53	2,53	2,53	0	0	C ₁₇	2,53	2,53	2,53	2,53	0,00	0,00
C ₁	2,54	3,00	2,60	2,69	0,22	8,03	C ₁	3,04	3,37	3,05	3,15	0,19	5,90

Tab. 55 : Statistiques descriptives résumées pour les échantillons du groupe « SEV » – Aménagement

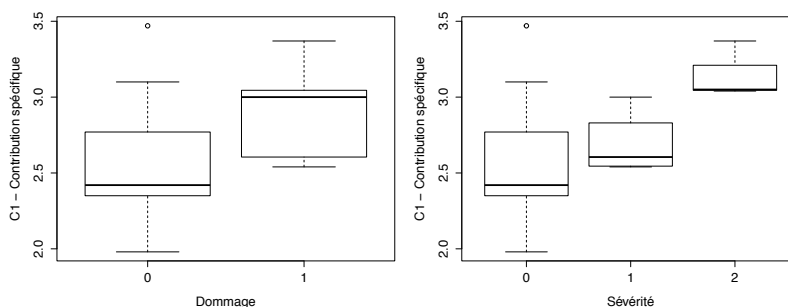


Fig. 75 : Boîtes à moustaches pour le critère « Aménagement » (groupes d'échantillons « DOM » et « SEV »)

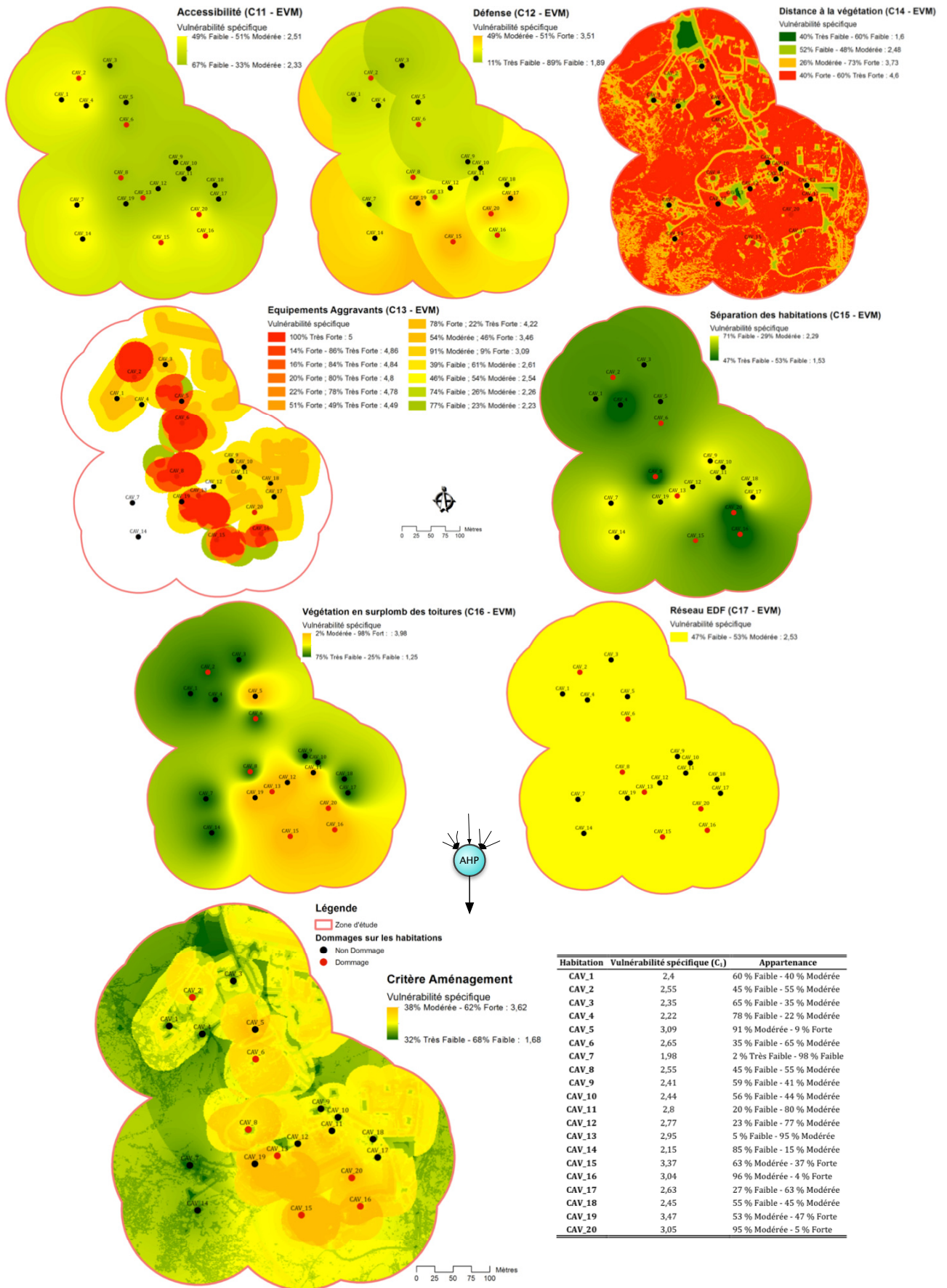


Fig. 76 : Planche cartographique du critère « Aménagement » et vulnérabilité spécifique des habitations

Afin de comparer les différents échantillons, du fait de leur taille, nous optons pour le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis (Tab. 56). Celui-ci teste l'hypothèse nulle selon laquelle les différents échantillons suivent la même distribution ou qu'ils ont des distributions avec la même médiane. Il se base sur des rangs et non des moyennes. Une valeur de la probabilité critique inférieure à 0,05 indique qu'il existe une différence statistiquement significative entre les médianes avec un niveau de confiance de 95 %. Le niveau de confiance est de 90 % lorsque celle-ci est comprise en 0,05 et 0,10.

Pour le groupe « DOM », C₁₃ et C₁₅₂ présentent une différence significative au seuil de 5 %, et C₁₅ une différence significative au seuil de 10 %. Pour le groupe « SEV », nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle sur les sous-critères C₁₃ et C₁₆ avec un niveau de confiance de 95 %, et un niveau de confiance de 90 % pour le sous-critère C₁₂₃. La présence de végétation en surplomb des toitures et le manque de débroussaillage augmentent la sévérité des dommages.

Critère	p.value (DOM)	p.value (SEV)
C ₁₁	0,3069	0,121
C ₁₁₁	NA	NA
C ₁₁₂	0,3012	0,2096
C ₁₂	0,4499	0,1654
C ₁₂₁	NA	NA
C ₁₂₂	0,7965	0,8449
C ₁₂₃	0,4993	0,0549 (.)
C ₁₃	0,0155 (*)	0,0288 (*)
C ₁₄	0,1647	0,1791
C ₁₅	0,0551 (.)	0,1023
C ₁₅₁	0,7759	0,9272
C ₁₅₂	0,0414 (*)	0,1086
C ₁₆	0,3607	0,0495 (*)
C ₁₇	NA	NA
C ₁	0,0521 (.)	0,0659 (.)

Tab. 56 : Test de Kruskal-Wallis pour la comparaison des échantillons « DOM » et « SEV » - Aménagement

Le critère « Aménagement » offre un résultat très proche du seuil de significativité à 5% pour les deux groupes. Les échantillons peuvent être considérés comme statistiquement différents au regard des caractéristiques de l'aménagement, avec un niveau de confiance de 90 %.

b. Relation entre l'endommagement et la vulnérabilité spécifique au critère « Topographie »

Le critère relatif à la topographie des interfaces est construit autour de quatre variables spatiales. L'agrégation des quatre couches d'information, résultant sur l'intensité brute de contribution spécifique du critère « Topographie » à l'indice global de vulnérabilité (Fig. 77), suit l'équation :

$$V_s(C_2) = 0,2444 \cdot V_s(C_{21}) + 0,1862 \cdot V_s(C_{22}) + 0,3072 \cdot V_s(C_{23}) + 0,2622 \cdot V_s(C_{24})$$

Selon l'analyse des dires d'experts, l'exposition au vent dominant est le sous-critère le plus influent. Viennent ensuite la position topographique, la pente puis l'exposition au soleil.

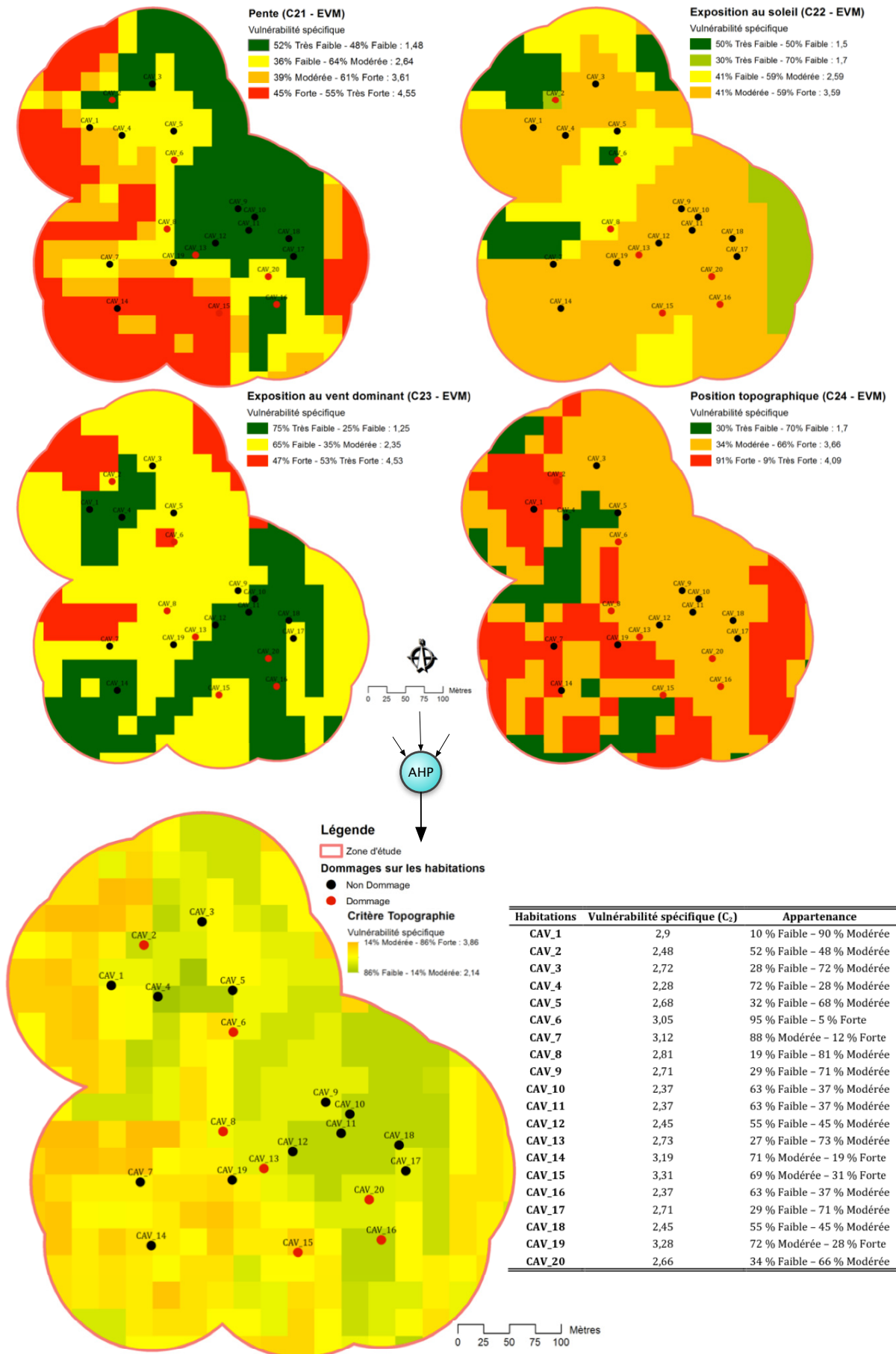


Fig. 77 : Planche cartographique du critère « Topographie » et vulnérabilité spécifique des habitations

Les statistiques calculées pour chaque variable au sein des échantillons « DOM » et « SEV » sont résumées au tableau 57. Les habitations endommagées possèdent des valeurs médianes de vulnérabilité spécifique légèrement supérieures pour le critère « Topographie » et sa famille de sous-critères. En ce qui concerne les échantillons de sévérité des dommages, le niveau 1 présente des valeurs médianes de vulnérabilité spécifique supérieures au niveau 2, pour le sous-critère « Exposition au vent dominant » (C₂₃) et le critère « Topographie ».

« non dommage »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)	« sévérité 1 »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
C ₂₁	1,48	4,55	1,52	2,28	1,00	43,96	C ₂₁	1,50	2,64	2,17	2,12	0,61	28,59
C ₂₂	2,84	3,59	3,59	3,53	0,21	5,89	C ₂₂	1,74	3,59	2,31	2,48	0,82	32,94
C ₂₃	1,25	2,36	1,50	1,80	0,54	29,99	C ₂₃	2,15	3,49	2,34	2,58	0,61	23,69
C ₂₄	2,04	4,09	3,66	3,60	0,55	15,22	C ₂₄	3,66	4,08	3,70	3,79	0,20	5,31
C ₂	2,28	3,28	2,71	2,71	0,33	12,20	C ₂	2,48	3,05	2,77	2,77	0,24	8,49
« dommage »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)	« sévérité 2 »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
C ₂₁	1,48	4,55	2,64	2,45	1,07	43,85	C ₂₁	1,48	4,55	2,64	2,89	1,55	53,64
C ₂₂	1,74	3,59	3,59	2,96	0,83	27,96	C ₂₂	3,59	3,59	3,59	3,59	0,00	0,00
C ₂₃	1,25	3,49	2,29	2,16	0,76	35,38	C ₂₃	1,25	2,29	1,25	1,60	0,60	37,48
C ₂₄	3,16	4,08	3,66	3,66	0,27	7,33	C ₂₄	3,16	3,66	3,66	3,49	0,29	8,23
C ₂	2,37	3,31	2,73	2,77	0,32	11,68	C ₂	2,37	3,31	2,66	2,78	0,48	17,31

Tab. 57 : Statistiques résumées pour les échantillons du groupe « DOM » et « SEV » – Topographie

Pour ce cas d'étude, les caractéristiques de la topographie ne permettent pas de dissocier les différents échantillons. Le test de Kruskal-Wallis sur l'ensemble des variables le confirme (Tab. 58), exception faite du sous-critère « Exposition au soleil » qui discrimine les niveaux de sévérité avec un niveau de confiance de 5 %.

Critère	p.value (DOM)	p.value (SEV)
C ₂₁	0,5514	0,8691
C ₂₂	0,1065	0,0153 (*)
C ₂₃	0,808	0,1447
C ₂₄	0,8964	0,3755
C ₂	0,5514	0,7461

Tab. 58 : Test de Kruskal-Wallis pour la comparaison des échantillons « DOM » et « SEV » – Topographie

c. Relation entre l'endommagement et la vulnérabilité spécifique au critère « Structure de la végétation »

Le critère « Structure de la Végétation » est construit autour d'une variable spatiale (Continuité Horizontale – C₃₁) et d'une variable « attribut des polygones » de végétation (Continuité Verticale – C₃₂). L'agrégation des deux couches d'information, résultant sur l'intensité brute de contribution spécifique du critère « Structure de la Végétation » à l'indice global de vulnérabilité (Fig. 78), suit l'équation :

$$V_s(C_3) = 0,4899 \cdot V_s(C_{31}) + 0,5101 \cdot V_s(C_{32})$$

Selon l'analyse des dires d'experts, l'influence de la continuité verticale est légèrement supérieure à celle de la continuité horizontale.

Les statistiques calculées pour chaque variable au sein des échantillons « DOM » et « SEV » sont résumées dans les tableaux 12 (Tab. 59). Les distributions sont homogènes pour tous les échantillons, sur les deux sous-critères et le critère parent. De plus, on constate une augmentation substantielle des vulnérabilités spécifiques entre l'échantillon « non dommage » et « dommage », puis au sein du groupe « SEV ». La sévérité des dommages augmente avec les différentes vulnérabilités spécifiques. La structure de la végétation a donc un effet discriminant à la fois sur l'occurrence des dommages et sur leurs sévérités (Fig. 79).

« non dommage »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
C ₃₁	2,39	2,88	2,70	2,68	0,16	6,02
C ₃₂	2,08	3,22	2,76	2,72	0,36	13,31
C ₃	2,34	3,07	2,70	2,70	0,22	7,99

« sévérité 1 »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
C ₃₁	2,52	2,91	2,73	2,72	0,16	5,91
C ₃₂	2,60	3,15	2,70	2,79	0,25	9,03
C ₃	2,63	2,93	2,70	2,74	0,13	4,86

« dommage »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
C ₃₁	2,52	3,95	2,91	3,10	0,52	16,66
C ₃₂	2,60	4,30	3,15	3,27	0,72	21,91
C ₃	2,63	4,13	2,93	3,17	0,60	18,75

« sévérité 2 »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
C ₃₁	3,34	3,95	3,52	3,60	0,31	8,71
C ₃₂	3,25	4,30	4,22	3,92	0,58	14,89
C ₃	3,33	4,13	3,79	3,75	0,40	10,71

Tab. 59 : Statistiques résumées pour les échantillons du groupe « DOM » et « SEV » - Structure de la Végétation

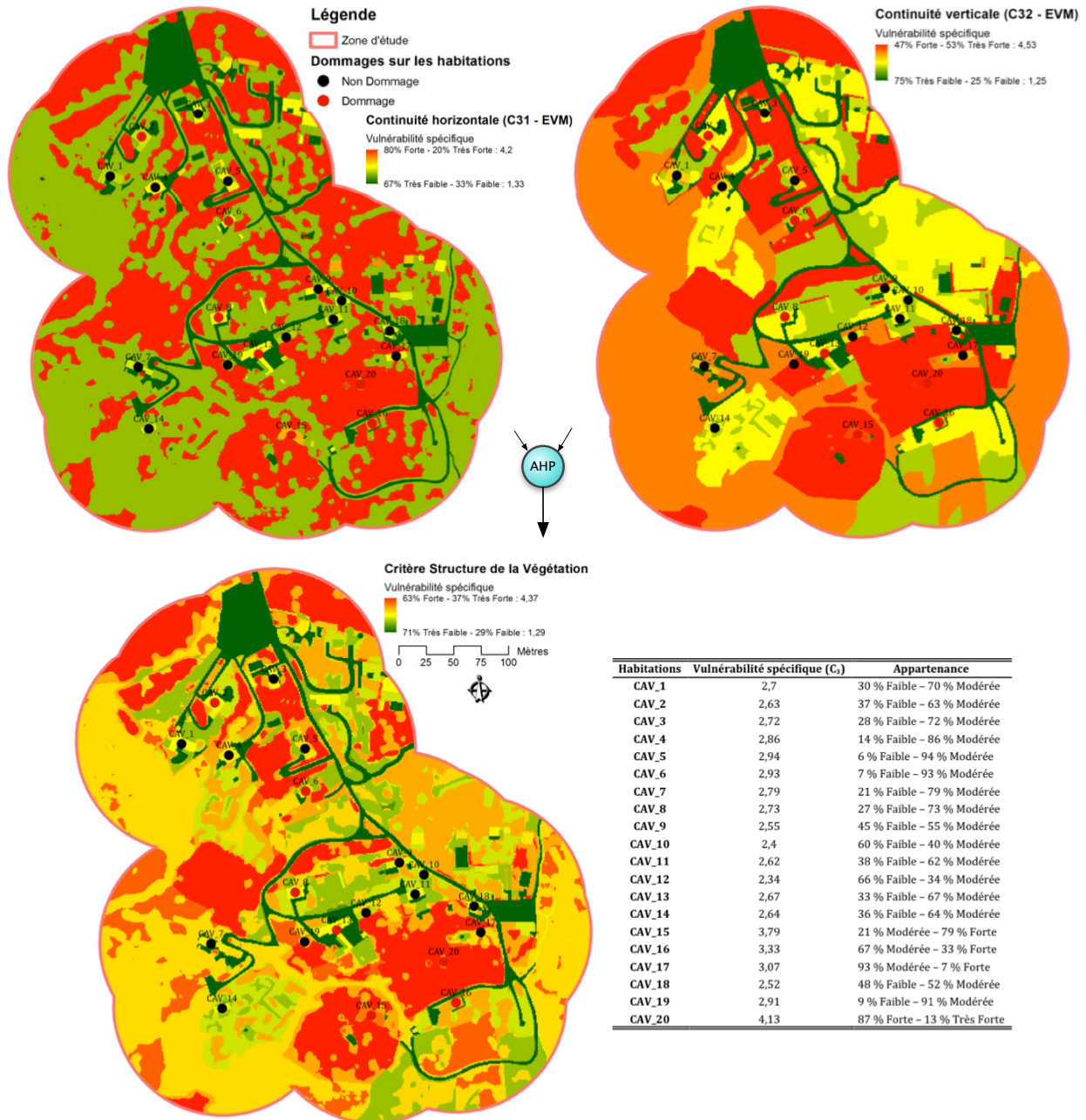


Fig. 78 : Planche cartographique du critère « Structure de la Végétation » et vulnérabilité spécifique des habitations

Les résultats du test de Kruskal-Wallis (Tab. 60) permettent de rejeter l'hypothèse nulle au niveau de confiance de 5 % pour le groupe « SEV », sur l'ensemble des critères. En revanche, nous rejetons l'hypothèse nulle avec 90 % de confiance seulement sur C₃₁ et C₃, pour le groupe « DOM ».

Critère	p.value (DOM)	p.value (SEV)
C ₃₁	0,0621 (.)	0,024 (*)
C ₃₂	0,1127	0,026 (*)
C ₃	0,0626 (.)	0,0243 (*)

Tab. 60 : Test de Kruskal-Wallis pour la comparaison des échantillons « DOM » et « SEV » - Structure de la Végétation

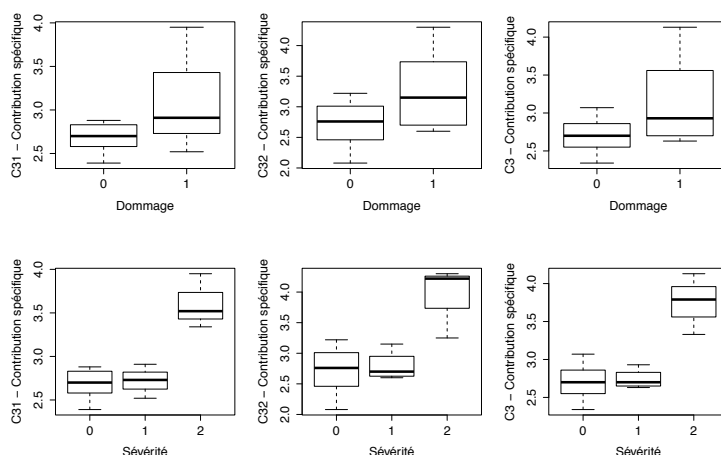


Fig. 79 : Boîtes à moustaches pour le critère « Structure de la Végétation » et ses sous-critères (groupes d'échantillons « DOM » et « SEV »)

d. Relation entre l'endommagement et la vulnérabilité spécifique au critère « Structure de l'habitat »

Le critère relatif à la structure de l'habitat est construit autour des variables spatiales « Type de Structure » (C₄₁) et « Position » (C₄₂). De leur agrégation résulte l'intensité brute de contribution spécifique du critère à l'indice global de vulnérabilité (Fig. 80), suivant l'équation :

$$V_s(C_4) = 0,3788 \cdot V_s(C_{11}) + 0,6212 \cdot V_s(C_{42})$$

Selon l'analyse des dires d'experts, la position des habitations dans leurs regroupements exerce une action plus importante que le type de structure, au regard de la vulnérabilité.

Les distributions sont hétérogènes en ce qui concerne le sous-critère « Position » pour les échantillons « non dommage » et « sévérité 2 » (Tab. 61). Ce caractère se retrouve également au niveau du critère parent.

Nous ne pouvons pas rejeter l'hypothèse nulle des médianes équivalentes pour les variables à l'étude (Tab. 62), et ce sur les deux groupes « DOM » et « SEV ».

« non dommage »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
C ₄₁	1,25	1,25	1,25	1,25	0	0
C ₄₂	1,34	3,25	1,48	2,23	0,98	43,95
C ₄	1,31	2,49	1,39	1,86	0,61	32,61
« dommage »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
C ₄₁	1,25	1,25	1,25	1,25	0	0
C ₄₂	1,34	3,25	3,25	2,78	0,81	29,16
C ₄	1,31	2,49	2,49	2,20	0,50	22,83
« sévérité 1 »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
C ₄₁	1,25	1,25	1,25	1,25	0,00	0,00
C ₄₂	1,90	3,25	3,25	2,91	0,68	23,21
C ₄	1,65	2,49	2,49	2,28	0,42	18,42
« sévérité 2 »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
C ₄₁	1,25	1,25	1,25	1,25	0,00	0,00
C ₄₂	1,34	3,25	3,25	2,61	1,10	42,20
C ₄	1,31	2,49	2,49	2,10	0,68	32,49

Tab. 61 : Statistiques résumées pour les échantillons du groupe « DOM » et « SEV » - Structure de l'Habitat

Critère	p.value (DOM)	p.value (SEV)
C ₄₁	NA	NA
C ₄₂	0,197	0,376
C ₄	0,197	0,376

Tab. 62 : Test de Kruskal-Wallis pour la comparaison des échantillons « DOM » et « SEV » – Structure de l'Habitat

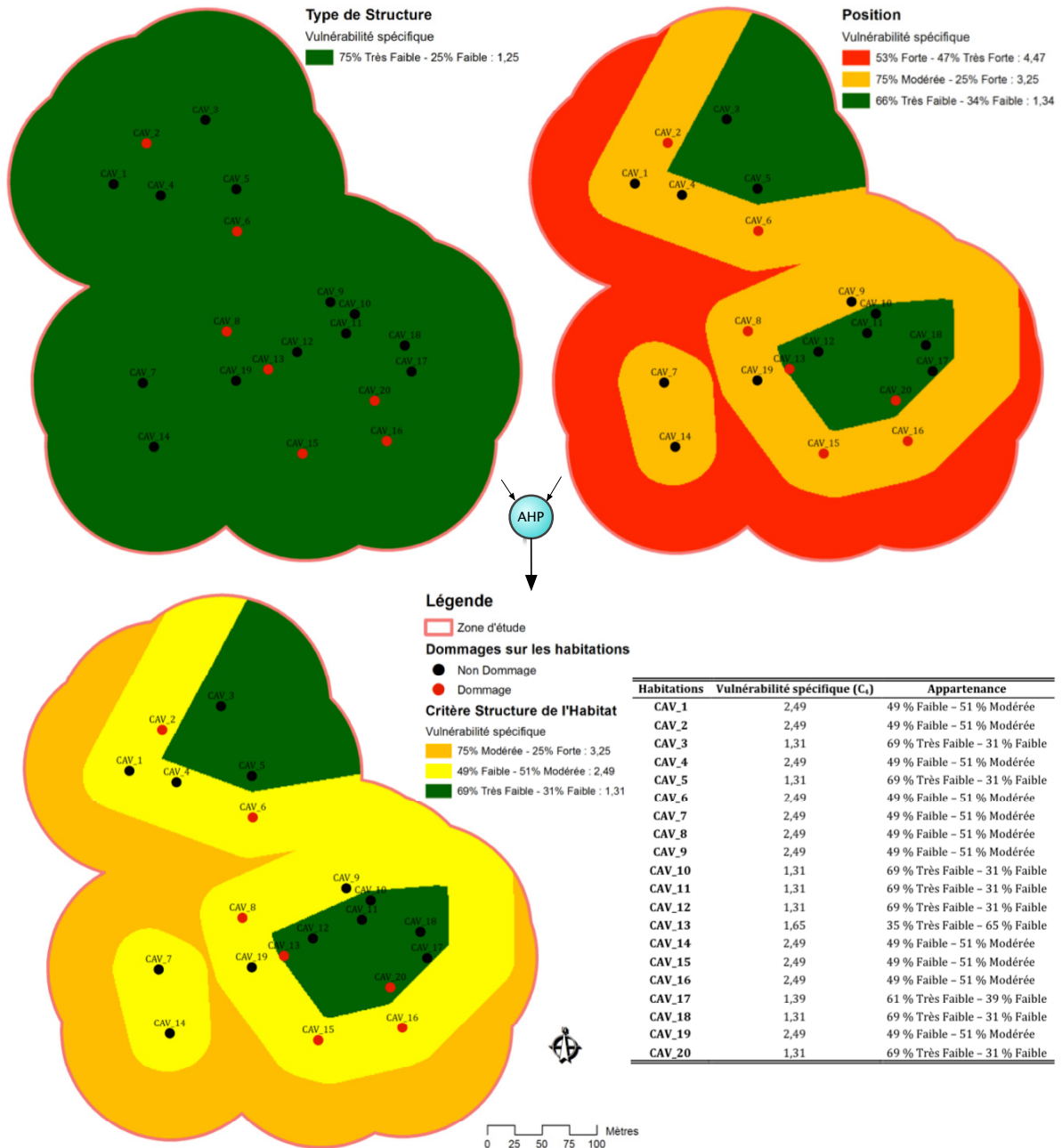


Fig. 80 : Planche cartographique du critère « Structure de l'Habitat » et vulnérabilité spécifique des habitations

e. Relation entre l'endommagement et la vulnérabilité spécifique au critère « Propriétés des habitations »

Le critère relatif aux propriétés des habitations est construit autour de quatre variables « attributs des habitations ». De leur agrégation résulte l'intensité brute de contribution

spécifique du critère « Propriétés des Habitations » à l'indice global de vulnérabilité (Fig. 81), qui se calcule suivant l'équation :

$$V_s(C_5) = 0,2667 \cdot V_s(C_{51}) + 0,2215 \cdot V_s(C_{52}) + 0,3403 \cdot V_s(C_{53}) + 0,1716 \cdot V_s(C_{54})$$

Le sous-critère « Propriétés des ouvertures » (C_{53}) se distingue des autres. Il contribue à 34 % de la vulnérabilité spécifique $V_s(C_5)$. L'ensemble des échantillons propose des distributions hétérogènes pour ce sous-critère (Tab. 63). Les habitations sont soit équipées d'occultations en bois plein, soit en PVC. Le sous-critère « Matériaux de façade » est homogène pour l'échantillon des maisons endommagées qui sont toutes construites en maçonnerie. Seule l'habitation CAV_17 est construite en bois.

Sur la carte de vulnérabilité spécifique à ce critère, on observe donc une « poche » de contribution plus élevée, qui vient contraindre les plus proches habitations de son voisinage.

Le critère « Propriétés des Habitations » ne permet pas de dissocier les échantillons (Tab. 64). Dans l'ensemble, les maisons présentent des vulnérabilités spécifiques faibles ou modérées et viennent tempérer les mauvaises performances des autres critères du modèle. Seule l'habitation 17 contribue à amplifier sa vulnérabilité globale ainsi que la vulnérabilité de son environnement.

« non dommage »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)	« sévérité 1 »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
C ₅₁	1,25	3,37	1,26	1,43	0,58	40,70	C ₅₁	1,26	3,54	1,26	1,83	1,14	62,16
C ₅₂	1,25	2,50	1,25	1,35	0,34	25,49	C ₅₂	1,25	1,26	1,25	1,25	0,00	0,19
C ₅₃	1,43	3,14	1,52	2,09	0,80	38,35	C ₅₃	1,44	3,14	1,53	1,91	0,82	43,04
C ₅₄	1,26	2,89	2,82	2,22	0,73	32,96	C ₅₄	1,28	2,87	2,84	2,46	0,79	32,02
C ₅	1,32	2,97	1,62	1,77	0,46	25,68	C ₅	1,60	2,17	1,79	1,84	0,27	14,42
« dommage »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)	« sévérité 2 »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
C ₅₁	1,26	3,54	1,26	1,59	0,86	54,23	C ₅₁	1,26	1,26	1,26	1,26	0,00	0,06
C ₅₂	1,25	1,26	1,25	1,25	0,00	0,20	C ₅₂	1,25	1,26	1,26	1,26	0,00	0,04
C ₅₃	1,44	3,14	1,45	1,71	0,63	36,88	C ₅₃	1,44	1,46	1,44	1,45	0,01	0,57
C ₅₄	1,28	2,88	2,83	2,33	0,69	29,50	C ₅₄	1,77	2,88	1,80	2,15	0,63	29,39
C ₅	1,41	2,17	1,60	1,68	0,28	16,40	C ₅	1,41	1,60	1,42	1,48	0,11	7,24

Tab. 63 : Statistiques résumées pour les échantillons du groupe « DOM » et « SEV » – Propriétés des Habitations

Critère	p.value (DOM)	p.value (SEV)
C ₅₁	0,687	0,4725
C ₅₂	0,8143	0,5994
C ₅₃	0,2834	0,2552
C ₅₄	0,6914	0,9101
C ₅	0,7809	0,1653

Tab. 64 : Test de Kruskal-Wallis pour la comparaison des échantillons « DOM » et « SEV » – Propriétés des Habitations

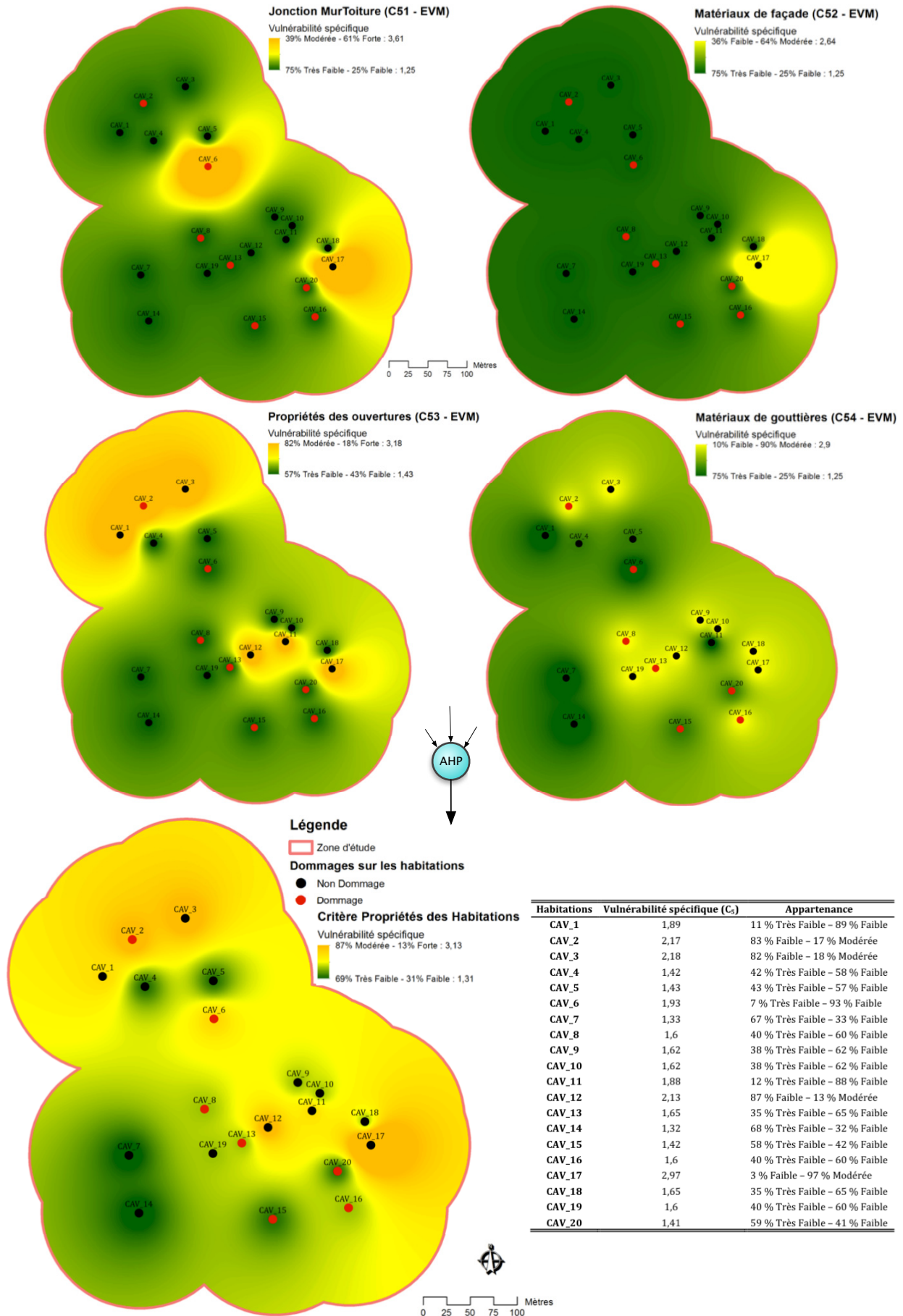


Fig. 81 : Planche cartographique du critère « Propriétés des Habitations » et vulnérabilité spécifique des habitations

f. Relation entre l'endommagement et la vulnérabilité spécifique au critère « Facteurs humains »

Le dernier critère correspond aux facteurs humains. Il contribue à la composante « Capacité de réponse » de la vulnérabilité. Sa construction se fonde sur trois variables « attributs des habitations ». L'agrégation des trois couches d'information, de laquelle résulte l'intensité brute de contribution spécifique du critère « Facteurs Humains » à l'indice global de vulnérabilité (Fig. 82), suit l'équation :

$$V_s(C_6) = 0,2529 \cdot V_s(C_{61}) + 0,3252 \cdot V_s(C_{62}) + 0,4219 \cdot V_s(C_{63})$$

Les habitations les plus vulnérables présentent un manque d'entretien, et leurs occupants manquent de préparation à la survenue d'un incendie de forêt. Au niveau de l'interface étudiées, deux maisons sont des résidences secondaires, et une troisième se retrouve dans cette classe (CAV_20) car abandonnée. Il n'existe pas de Plan Communal de Sauvegarde sur la commune de Cavillon. Malgré l'incendie de 2006, aucun plan d'urgence n'a été élaboré. Ce sous-critère d'ordre 2 (C_{621}) est donc uniforme sur la zone. Cependant, sa contribution à la vulnérabilité spécifique du critère C_{62} reste faible. En effet, elle ne représente que 39 % contre 61 % pour le sous-critère « Connaissance sur le risque » (C_{622}). Les réponses des résidents au questionnaire ont été traitées par une analyse des correspondances multiples (ACM) sous le logiciel R. Les résultats sont présentés en Annexe 7. L'ACM a permis d'attribuer une modalité de connaissance des comportements à adopter pour chaque habitation. Les statistiques résumées (Tab. 65) montrent que les habitations endommagées sont occupées par des personnes moins bien préparées du fait de leur manque de connaissance sur le risque. La sévérité des dommages augmente avec le score du sous-critère.

« non dommage »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)	« sévérité 1 »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
C_{61}	1,33	2,41	1,34	1,42	0,30	20,97	C_{61}	1,33	1,44	1,34	1,36	0,05	3,98
C_{62}	1,62	3,02	1,65	2,00	0,59	29,38	C_{62}	1,62	2,32	1,77	1,87	0,33	17,62
C_{621}	1,95	1,95	1,95	1,95	0	0	C_{621}	1,95	1,95	1,95	1,95	0,00	0,00
C_{622}	1,26	3,56	1,29	1,84	0,95	51,70	C_{622}	1,26	1,93	1,50	1,54	0,34	22,02
C_{63}	1,28	2,27	1,93	1,86	0,33	17,87	C_{63}	1,54	1,98	1,74	1,75	0,23	13,25
C_{631}	1,29	2,72	1,64	2,00	0,56	28,21	C_{631}	1,59	1,83	1,60	1,65	0,11	6,94
C_{632}	1,25	1,52	1,49	1,39	0,12	8,98	C_{632}	1,25	1,49	1,38	1,38	0,14	9,90
C_6	1,37	2,40	1,61	1,66	0,31	18,47	C_6	1,42	1,64	1,52	1,53	0,10	6,28
« dommage »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)	« sévérité 2 »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
C_{61}	1,33	2,41	1,36	1,66	0,51	30,88	C_{61}	1,36	2,41	2,41	2,06	0,61	29,55
C_{62}	1,62	3,02	2,32	2,26	0,58	25,77	C_{62}	2,34	3,02	2,99	2,78	0,39	13,85
C_{621}	1,95	1,95	1,95	1,95	0	0	C_{621}	1,95	1,95	1,95	1,95	0,00	0,00
C_{622}	1,26	3,56	1,93	2,17	0,97	44,82	C_{622}	1,94	3,56	3,50	3,00	0,92	30,61
C_{63}	1,54	2,92	1,90	1,96	0,46	23,53	C_{63}	1,90	2,92	1,90	2,24	0,59	26,25
C_{631}	1,59	2,72	1,83	2,11	0,57	27,05	C_{631}	2,69	2,72	2,72	2,71	0,01	0,48
C_{632}	1,25	3,00	1,28	1,58	0,63	40,19	C_{632}	1,27	3,00	1,28	1,85	0,99	53,78
C_6	1,42	2,78	1,64	1,85	0,48	25,98	C_6	2,02	2,78	2,06	2,29	0,43	18,70

Tab. 65 : Statistiques résumées pour les échantillons du groupe « DOM » et « SEV » – Facteurs Humains

Dans l'ensemble, les facteurs humains n'offrent pas la possibilité de discriminer les maisons endommagées de celles non endommagées (Tab. 66). En revanche, en ce qui concerne la sévérité des dommages, nous pouvons rejeter l'hypothèse nulle avec un niveau de confiance de 90 % pour le critère « Facteurs Humains » et les sous-critères « Préparation des personnes » (C_{62}), « Connaissance » des comportements à adopter (C_{622}) et « Type de résidence » (C_{61}) : la sévérité des dommages augmente avec les vulnérabilités spécifiques aux facteurs humains. L'entretien de l'habitat (C_{631}) possède le plus fort potentiel discriminant : il est significatif au seuil de 5 %.

Critère	p.value (DOM)	p.value (SEV)
C ₆₁	0,1302	0,0548 (.)
C ₆₂	0,4478	0,0873 (.)
C ₆₂₁	NA	NA
C ₆₂₂	0,3728	0,0878 (.)
C ₆₃	0,9367	0,6563
C ₆₃₁	0,5236	0,0323 (*)
C ₆₃₂	0,7487	0,61
C ₆	0,4264	0,0605 (.)

Tab. 66 : Test de Kruskal-Wallis pour la comparaison des échantillons « DOM » (D) et « SEV » (S) – Facteurs Humains

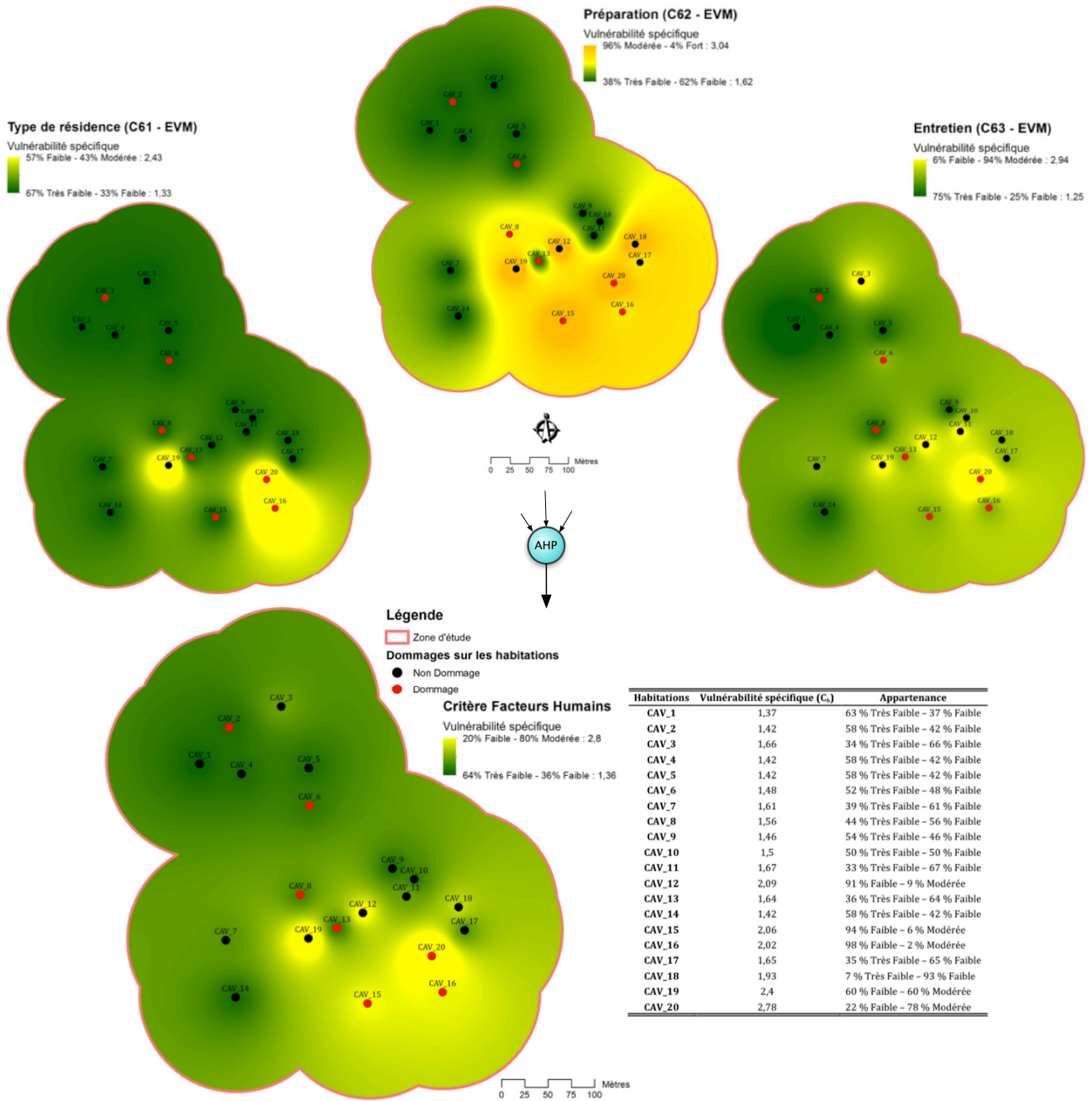


Fig. 82 : Planche cartographique du critère « Facteurs Humains » et vulnérabilité spécifique des habitations

g. Relation entre l'endommagement et l'indice global de vulnérabilité

La finalité de la méthode développée réside dans le calcul et la cartographie de l'indice global de vulnérabilité (Fig. 83). La démarche est ascendante : nous sommes partis de la base de la hiérarchie pour atteindre le sommet en agrégeant l'ensemble des familles de sous-critères puis des critères. La combinaison linéaire des six critères composant le niveau 2 de la hiérarchie agrège les différentes vulnérabilités spécifiques selon l'équation :

$$IGV = 0,1422 \cdot V_s(C_1) + 0,2028 \cdot V_s(C_2) + 0,2461 \cdot V_s(C_3) + 0,1342 \cdot V_s(C_4) + 0,1725 \cdot V_s(C_5) + 0,1021 \cdot V_s(C_6)$$

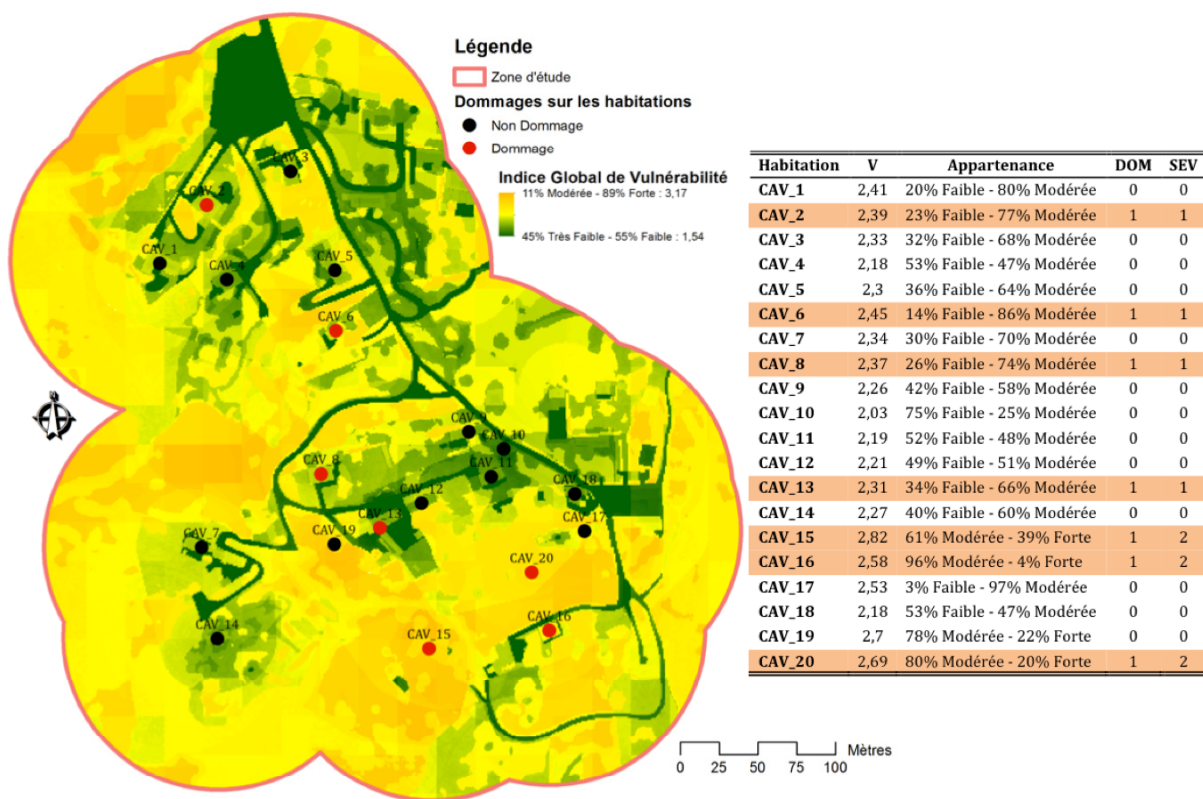


Fig. 83 : Planche cartographique de l'indice global de vulnérabilité et vulnérabilité globale des habitations

Sur la zone d'étude, l'indice de vulnérabilité s'échelonne de très faible (IGV = 1,54) à fort (IGV = 3,17). Les valeurs réelles de l'indice sont ramenées aux valeurs textuelles (floues) de l'échelle de vulnérabilité normalisée (cf. Chapitre 4) par le calcul de leur degré d'appartenance. La valeur maximale de l'indice possède un degré d'appartenance de 11 % à la classe modérée et de 89 % à la classe forte. Il en est de même pour la minimale : 45 % d'appartenance à la classe très faible et 55% à la classe faible. En accord avec les poids de contribution de chaque critère, les zones de forte vulnérabilité sont principalement concentrées dans les secteurs présentant de fortes continuités de la végétation au niveau des critères et versants exposés au mistral. La composante « exposition » de la vulnérabilité se révèle déterminante. L'implantation d'habitations résidentielles dans de telles zones est alors problématique.

La table des statistiques descriptives (Tab. 67) associée aux graphiques en boîtes à moustaches (Fig. 84) démontre la nette séparation des échantillons « DOM » et « SEV ». Le test de Kruskal-Wallis confirme le potentiel discriminatoire de l'indice (Tab. 68), au niveau de confiance 95 %. L'hypothèse nulle des médianes équivalentes est donc rejetée. Les maisons

endommagées possèdent une vulnérabilité globale plus fortes que celles non endommagées. La sévérité des dommages augmente également avec la valeur de l'indice.

« non dommage »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
IGV	2,03	2,70	2,27	2,30	0,17	7,44
« dommage »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
IGV	2,31	2,82	2,45	2,52	0,19	7,45
« sévérité 1 »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
IGV	2,31	2,45	2,38	2,38	0,06	2,43
« sévérité 2 »	Min	Max	Médiane	Moyenne	Écart-type	CV (%)
IGV	2,58	2,82	2,69	2,70	0,12	4,46

Tab. 67 : Statistiques descriptives pour les échantillons « DOM » et « SEV » - IGV

Critère de synthèse	p.value (DOM)	p.value (SEV)
IGV	0,0156 (*)	0,0217 (*)

Tab. 68 : Test de Kruskal-Wallis pour la comparaison des échantillons « DOM » (D) et « SEV » (S) - IGV

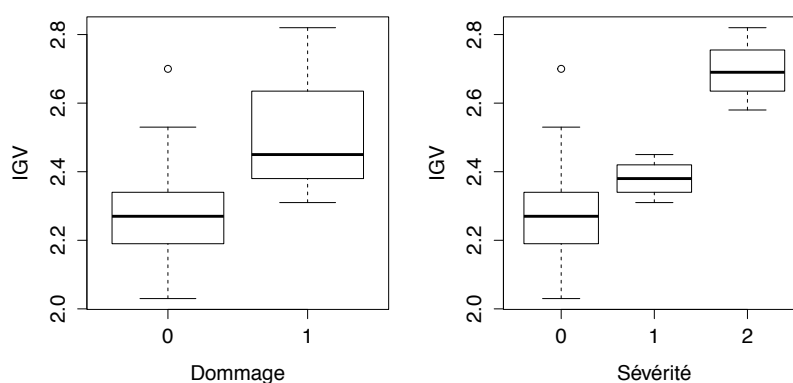


Fig. 84 : Comparaison de la distribution de l'IGV selon les groupes « DOM » et « SEV »

La figure 26 montre un point atypique pour l'échantillon « non dommage ». Il correspond à l'habitation CAV_19, deuxième maison la plus vulnérable (IVG = 2,7). Implantée sur une parcelle non débroussaillée, cette maison n'a pas subi « l'assaut » des flammes du fait des murs de séparation en pierre, hauts de 2 m, protégeant la propriété. Seule une haie de cyprès, située à plus de 10 m de la maison, à l'extrême sud-est de la parcelle a été brûlée en partie haute. Le sous-critère d'aménagement « Séparation de propriété » ne parvient pas à tempérer l'indice global de vulnérabilité du fait de la faible considération des experts à son égard.

Suite à l'analyse spatiale de la vulnérabilité (cf. § 5.3.2), nous avons construit la variable spatialement décalée de l'IGV, $IGV^{(D)}$, selon le voisinage du plus proche voisin. Chaque habitation se voit donc attribuer la valeur de l'IGV de sa plus proche voisine. Cette nouvelle variable permet de dissocier nettement les groupes d'échantillons « DOM » et « SEV » (Fig. 85). L'hypothèse nulle du test de Kruskal-Wallis est rejetée ($p.value(DOM)=0,005 (**)$ et $p.value(SEV)=0,017 (*)$) au seuil de significativité de 1 % pour la distinction « dommage/non dommage » et au seuil de 5 % pour les échantillons de sévérité des dommages.

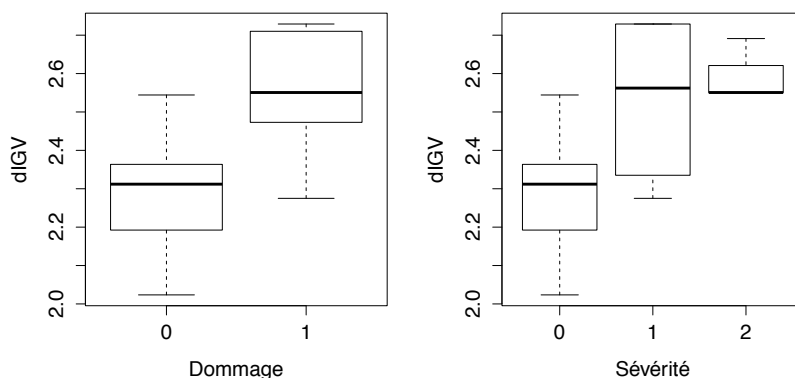


Fig. 85 : Boîtes à moustaches pour la variable $IGV^{(D)}$ (groupes d'échantillons « DOM » et « SEV »)

L'exploration des données sur la base de test statistique de comparaison d'échantillons a permis de mettre en évidence le potentiel discriminant de certains critères vis-à-vis de l'endommagement observé et de son niveau de sévérité. Individuellement, la structure de la végétation, la présence d'équipements aggravants et celle de la végétation en surplomb des habitations ont été déterminantes. L'indice global de vulnérabilité (IGV) et l'indice global de vulnérabilité spatialement décalé ($IGV^{(D)}$), qui agrègent les différentes vulnérabilités spécifiques, répondent au besoin de la prise en compte des multiples facettes de la vulnérabilité. Ces deux indices ont révélé leur efficacité à séparer la population des habitations étudiées en classes distinctes, différenciant celles endommagées ou non et dissociant les habitations par niveaux de sévérité des dommages.

5.4.2. Modélisation de l'occurrence des dommages par régression logistique binaire

L'étape exploratoire précédente se prolonge naturellement par une première approche : la modélisation de la variable binaire « DOM » (y_0 = "non dommage" = 0 ou y_1 = "dommage" = 1) par régression logistique binaire.

a. Présentation de la méthode

Il est couramment fait appel à la régression logistique lorsque la variable à expliquer (variable dépendante Y) est qualitative, le plus souvent binaire. Les variables explicatives (variables indépendantes X_i) peuvent, en revanche, être qualitatives et/ou quantitatives. La variable dépendante représente habituellement la survenue ou non d'un événement, l'endommagement d'une habitation dans notre cas, et les variables indépendantes sont celles susceptibles d'influencer la survenue de cet événement.

L'intérêt majeur de cette technique est de quantifier la force de l'association entre chaque variable indépendante et la variable dépendante, en tenant compte de l'effet des autres variables intégrées dans le modèle (« mesure ajustée »). Les coefficients estimés par le modèle sont liés mathématiquement à l'odds ratio (rapport des chances), mesure statistique qui exprime le degré de dépendance entre une variable explicative et la variable à expliquer. Ainsi, pour notre problématique, il permet de quantifier le rapport éventuel entre l'indice global de vulnérabilité et le dommage ou sa sévérité. La méthode de régression logistique est donc parfaitement adaptée à la recherche des facteurs d'endommagement.

Notre objectif est de « prédire » la variable catégorielle Y (dommage, non dommage) à partir d'une collection de descripteurs $X = (X_1, X_2, \dots, X_n)$, représentés par les variables IVG et $IGV^{(D)}$. Il s'agit alors de mettre en évidence l'existence d'une liaison fonctionnelle sous-jacente, entre ces variables, sous la forme :

$$Y = f(X, \alpha)$$

La fonction $f(\cdot)$ correspond au modèle de prédiction, avec α , le vecteur des paramètres de la fonction, dont il faut estimer les valeurs à partir des données.

Dans le cadre de la régression logistique binaire, nous considérons que la variable dépendante Y ne prend que deux modalités : $y_1 = \text{"dommage"}$ ou $y_0 = \text{"non dommage"}$, respectivement codées $y_1 = 1$ et $y_0 = 0$.

La pratique de la régression logistique est très proche de celle de la régression linéaire. Cette dernière permet de caractériser les liens entre une variable à expliquer (Y) quantitative et des variables explicatives (X_1, X_2, \dots, X_n), au moyen du modèle suivant :

$$Y = \beta_0 + \beta_1 * X_1 + \beta_2 * X_2 + \dots + \beta_n * X_n + \varepsilon$$

où β_0 correspond à l'ordonnée à l'origine, β_i sont les coefficients rattachés aux variables explicatives X_i et ε les résidus de la régression.

Ce modèle ne s'applique pas aux variables qualitatives, où Y s'exprime en termes de oui/non. Pour une habitation ω , il s'agit de calculer les probabilités conditionnelles (ou *a posteriori*) $P(Y = y_k|X)$ pour chaque modalité y_k de Y . Par l'emploi du classifieur bayésien, qui prend en considération la probabilité *a priori* d'attribution d'une modalité aux habitations, il est alors possible d'affecter à l'habitation, la classe la plus probable compte tenu de ses caractéristiques $X(\omega)$. La formule de Bayes prend la forme suivante :

$$P(Y = y_k|X) = \frac{P(Y = y_k) \times P(X|Y = y_k)}{\sum_k P(Y = y_k) \times P(X|Y = y_k)}$$

avec $P(Y = y_k|X)$ la probabilité *a posteriori* que l'habitation de coordonnées X appartienne à la modalité y_k ; $P(Y = y_k)$ la probabilité *a priori* que l'habitation appartienne à la classe y_k ; $P(X|Y = y_k)$ la densité de probabilité de X si la modalité est y_k , c'est-à-dire la probabilité pour qu'une habitation de la modalité y_k soit décrit par un descripteur dont la valeur est comprise entre X et dX .

Dans notre cas, la variable Y est dichotomique, nous devons comparer $P(Y = 1|X)$ et $P(Y = 0|X)$. Le rapport des deux donne :

$$\frac{P(Y = 1|X)}{P(Y = 0|X)} = \frac{P(Y = 1)}{P(Y = 0)} \times \frac{P(X|Y = 1)}{P(X|Y = 0)}$$

La règle de décision est alors la suivante :

$$\text{si } \frac{P(Y = 1|X)}{P(Y = 0|X)} > 1 \text{ alors } Y = 1$$

Afin d'estimer ce rapport, la régression logistique introduit l'hypothèse fondamentale suivante :

$$\ln \left[\frac{P(X|Y = 1)}{P(X|Y = 0)} \right] = b_0 + b_1 X_1 + \dots + b_n X_n$$

Cette approche consiste non pas à modéliser la variable qualitative Y mais la probabilité que celle-ci se réalise. Le modèle logistique permet une expression non linéaire, variant de façon monotone entre 0 et 1, de cette probabilité en fonction des variables explicatives (X_i). On parle alors de méthode semi-paramétrique, car l'hypothèse est formulée sur le rapport de distribution, non pas directement sur la distribution. Moins discriminante, cette dernière couvre une large classe de distributions (Normale, Exponentielle, Gamma, Beta, Poisson, Discrètes).

Dans le cadre de cette thèse, nous utilisons le lien LOGIT pour les régressions logistiques. Soit $\pi(X) = P(Y = 1|X)$, la probabilité que Y prenne la valeur 1 sachant X , on définit le LOGIT de $P(Y = 1|X)$ de la manière suivante :

$$Y(X) = \ln \left[\frac{\pi(X)}{1 - \pi(X)} \right] = a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_n X_n$$

La quantité $\frac{\pi(X)}{1 - \pi(X)} = \frac{P(Y=1|X)}{P(Y=0|X)}$ exprime un odds ratio (OR) c'est-à-dire un rapport de chances. À titre d'exemple, si une habitation présente un OR de 2, cela signifie qu'elle a 2 fois plus de chances d'être classée selon la modalité $y_1 = 1$ que selon la modalité $y_0 = 0$. L'OR lié à la variable X_1 correspond à l'exponentielle du coefficient a_1 , mesurant l'association entre la variable explicative X_1 et la variable dépendante Y , c'est à dire l'occurrence du dommage.

On obtient alors la fonction de répartition de la loi logistique :

$$\pi(X) = \frac{e^{a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_n X_n}}{1 + e^{a_0 + a_1 X_1 + \dots + a_n X_n}}$$

avec la règle d'affectation suivante : si $\pi(X) > 0,5$ alors $Y = 1$.

Dans le cas d'une régression logistique univariée : $\text{logit}(\pi) = a_0 + a * X$, la fonction logistique prend la forme d'une sigmoïde (Fig. 86). L'exemple proposé est arbitraire ($a_0 = 0,01$ et $a = 0,1$), il correspond à la probabilité de réalisation d'un événement (π) en fonction des valeurs prises par une variable (X) variant de -100 à 100 selon la fonction logistique.

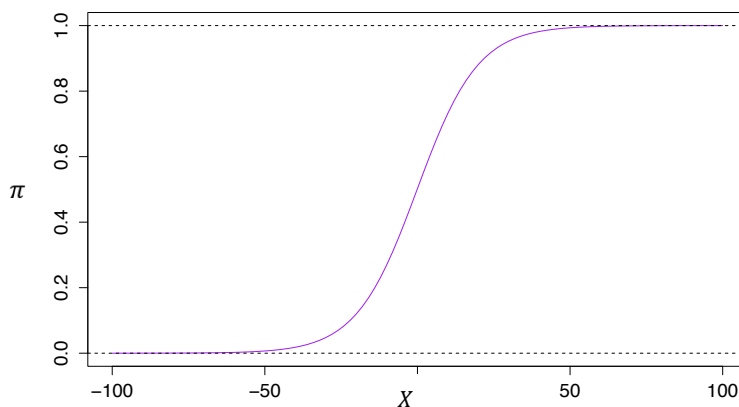


Fig. 86 : Exemple de fonction logistique

b. Estimation des paramètres et tests de significativité des coefficients de la régression

La première étape consiste à l'étude univariée par régression logistique, sous R (fonction *glm*), de chaque variable explicative retenue, à savoir l'indice global de vulnérabilité et l'indice global de vulnérabilité décalé. Les odds-ratio (OR) calculés, lors d'une telle analyse, sont dits « bruts » ou « non ajustés ». L'OR est calculé pour une augmentation de 0,2 de la valeur de l'IGV ou de l'IGV^(D), ainsi, il représente le rapport de chances pour une habitation d'être endommagée, quand son IGV augmente de 0,2 ou que l'IGV de son plus proche voisin augmente de 0,2.

Afin de juger la significativité statistique des résultats, nous réalisons un test de significativité sur les coefficients de la régression. L'objectif de ce test est d'éprouver le rôle des deux variables explicatives, individuellement. Formellement, l'hypothèse nulle s'énonce comme suit :

- Évaluation de la contribution individuelle de la variable IGV : $H_0 : a_{IGV} = 0$
- Évaluation de la contribution individuelle de la variable $IGV^{(D)}$: $H_0 : a_{IGV^{(D)}} = 0$

Nous avons utilisé deux procédures pour tester les deux hypothèses nulles : le test du rapport de vraisemblance, noté RV (Neyman et Pearson, 1928), et le test de Wald (Wald, 1943). Les deux tests suivent asymptotiquement une loi du khi-deux sous H_0 . Le seuil de signification asymptotique est généralement fixé à 0,05. Cela signifie que sous H_0 , la probabilité de rejeter à tort l'hypothèse nulle est inférieure à 5 %. Ainsi, l'hypothèse nulle est rejetée, si le test est significatif à 5 % ($p.value < 0,05$). Si l'hypothèse nulle est compatible avec les données, alors aucun des descripteurs ne contribue à l'explication de la variable dépendante. Le modèle est rejeté.

Les deux variables sur les quatre régressions sont significatives au seuil de 5% (Tab. 69, Tab. 70). Les hypothèses nulles sont donc rejetées.

Modèle 1 : AIPS-EVM				
Variable	Coefficient	OR (0,2)	Test de Wald	RV
IGV	6,37	3,6	0,0437 (*)	0,02 (*)
$IGV^{(D)}$	9,87	7,2	0,0212 (*)	0,002 (**)
Modèle 2 : AIPS-EV3M				
Variable	Coefficient	OR (0,2)	Test de Wald	RV
IGV	8,47	5,4	0,0298 (*)	0,008 (**)
$IGV^{(D)}$	12,76	12,8	0,0145 (*)	0,0007 (***)

Tab. 69 : Résultats de l'analyse univariée pour les variables significatives des modèles AIPS-EVM et AIPS-EV3M

Modèle 3 : AJI-EVM				
Variable	Coefficient	OR (0,2)	Significativité	RV
IGV	5,96	3,3	0,0333 (*)	0,01 (*)
$IGV^{(D)}$	9,19	6,3	0,0245 (*)	0,0018 (**)
Modèle 4 : AJI-EV3M				
Variable	Coefficient	OR (0,2)	Significativité	RV
IGV	7,72	4,7	0,0379 (*)	0,008 (**)
$IGV^{(D)}$	13,72	15,5	0,0173 (**)	0,0004 (***)

Tab. 70 : Résultats de l'analyse univariée pour les variables significatives des modèles AJI-EVM et AJI-EV3M

Les résultats des deux tests diffèrent cependant. Le test de Wald s'avère plus conservateur. Il a tendance à réduire la significativité des variables. Cette caractéristique a été remarquée dans la littérature. Le test de Wald y apparaît moins fiable et moins puissant que le test du rapport de vraisemblance, qui détecte mieux l'hypothèse alternative lorsque cela est justifié. C'est particulièrement le cas lorsque l'on travaille sur de petits échantillons (cas présent), où le test du rapport de vraisemblance est à privilégier (Hosmer et Lemeshow, 1989 ; Agresti, 2002). Pour l'analyse univariée, les plus fortes significativités sont obtenues pour les variables calculées suivant la méthode d'agrégation des modalités EV3M. Les méthodes d'agrégation des jugements d'experts, AIPS et AJI, présentent globalement des résultats similaires.

Les odds-ratio sont calculés à partir des coefficients de la régression, et nous renseignent sur la tendance à l'endommagement :

- Pour une augmentation de 0,2 de son indice global de vulnérabilité, une habitation a 3,6 fois plus de chance de subir des dommages, selon le modèle 1 ;
- Pour une augmentation de 0,2 de l'indice global de vulnérabilité de sa plus proche voisine, une habitation a 7,2 fois plus de chance de subir des dommages, toujours selon le modèle 1 ;

Nous avons effectué un test de Moran sur les résidus de la régression linéaire de IGV sur $IGV^{(D)}$ (*lm.morantest*, package *spdep*) (Bivand *et al.*, 2014). Celui-ci s'avère concluant du fait que nous n'y retrouvons aucune forme d'autocorrélation spatiale. L'introduction de la variable $IGV^{(D)}$ permet alors de prendre en compte la dépendance spatiale de l'indice global de vulnérabilité. Afin de vérifier que les deux variables n'amènent pas d'information redondante, c'est-à-dire qu'elles ne sont pas colinéaires, nous avons calculé le facteur d'inflation de la variance (VIF – *Variance Inflation Factor*) à partir des résultats de la régression linéaire de IGV sur $IGV^{(D)}$. Ce facteur est défini par :

$$VIF = \frac{1}{1 - R^2}$$

où R^2 est le coefficient de détermination de la régression de la variable IGV sur $IGV^{(D)}$. Sa racine carrée R est le coefficient de corrélation multiple entre IGV et $IGV^{(D)}$. Plus IGV est linéairement proche de $IGV^{(D)}$, plus R est proche de 1 et le VIF grand. Un problème de colinéarité est relevé dès lors qu'un VIF présente une valeur supérieure ou égale à 10 (Chatterie *et al.*, 2000). Si il est inférieur à 10, l'impact de la colinéarité n'est, selon ces auteurs, pas inquiétant et les variables explicatives peuvent donc être conservées pour l'analyse, cette dernière n'étant alors pas « faussée » de manière rédhibitoire par le niveau de colinéarité existant. Dans notre cas, le VIF obtient une valeur de 1 (< 10), écartant l'hypothèse de colinéarité entre les deux prédictrices.

De fait, les deux variables sont donc retenues pour construire le modèle logistique avec effets principaux (MLEP), dont nous voulons tester la capacité à retrouver les dommages observés. Il se présente sous la forme suivante :

$$Y(\omega_i) = \ln \left[\frac{\pi_{MLEP}}{1 - \pi_{MLEP}} \right] = a + b * IGV(\omega_i) + c * IGV^{(D)}(\omega_i)$$

où, $Y(\omega_i)$ est la modalité de Y prise par l'habitation observée ω_i , selon la règle d'affectation suivante : si $\pi_{MLEP} > 0,5$ alors $Y(\omega_i) = 1$. $IGV(\omega_i)$ est la valeur de l'indice pour l'habitation ω_i et $IGV^{(D)}(\omega_i)$ la valeur de l'indice décalé ; a, b sont les coefficients ou paramètres du modèle.

Les quatre modèles logistiques à effets principaux ne présentent pas les mêmes performances, en termes de significativité des variables ajustées (Tab. 71). Le caractère conservateur du test de Wald est exacerbé. Contrairement à l'étude univariée, la méthode EVM est la seule à relativement vérifier les deux tests, avec de meilleurs résultats pour l'AIPS en ce qui concerne la statistique de Wald. Cependant, comme évoqué précédemment, le faible nombre d'habitations observées nous pousse à privilégier le test du rapport de vraisemblance. Celui-ci atteste de la significativité des quatre modèles.

MLEP.1 : DOM ~ IGV + IGV ^(D) sur modèle 1 : AIPS-EVM					
Variable	Coefficient	OR (0,2)	Test de Wald	Test RV	Test RV (DOM~1)
IGV	8,06	5	0,0788 (.)	0,02 (*)	
IGV^(D)	11,13	9,3	0,0408 (*)	0,003 (**)	0,0006 (***)

MLEP.2 : DOM ~ IGV + IGV ^(D) sur modèle 2 : AIPS-EV3M					
Variable	Coefficient	OR (0,2)	Test de Wald	Test RV	Test RV (DOM~1)
<i>IGV</i>	8,68	5,7	0,1182	0,008 (**)	
<i>IGV^(D)</i>	12,94	13,3	0,0506 (.)	0,005 (**)	0,0006 (***)
MLEP.3 : DOM~IGV + IGV ^(D) sur modèle 3 : AJI-EVM					
Variable	Coefficient	OR (0,2)	Test de Wald	Test RV	Test RV (DOM~1)
<i>IGV</i>	10,37	8	0,0848 (.)	0,01 (*)	
<i>IGV^(D)</i>	13,27	14,2	0,0516 (.)	0,002 (**)	0,0003 (***)
MLEP.4 : DOM~IGV + IGV ^(D) sur modèle 4 : AJI-EV3M					
Variable	Coefficient	OR (0,2)	Test de Wald	Test RV	Test RV (DOM~1)
<i>IGV</i>	10,13	7,6	0,1704	0,008 (**)	
<i>IGV^(D)</i>	15,58	22,6	0,0617 (.)	0,003 (**)	0,0004 (***)

Tab. 71 : Résultats des quatre modèles logistiques avec effets principaux

Les quatre modèles (Fig. 87) sont donc retenus pour la suite de l'analyse. Les équations sont les suivantes :

$$Y^{MLEP.1}(\omega_i) = -46,89 + 8,06 * IGV_{AIPS-EVM}(\omega_i) + 11,13 * IGV^{(D)}_{AIPS-EVM}(\omega_i)$$

$$Y^{MLEP.2}(\omega_i) = -53,44 + 8,68 * IGV_{AIPS-EV3M}(\omega_i) + 12,94 * IGV^{(D)}_{AIPS-EV3M}(\omega_i)$$

$$Y^{MLEP.3}(\omega_i) = -60,56 + 10,37 * IGV_{AJI-EVM}(\omega_i) + 13,27 * IGV^{(D)}_{AJI-EVM}(\omega_i)$$

$$Y^{MLEP.4}(\omega_i) = -66,37 + 10,13 * IGV_{AJI-EV3M}(\omega_i) + 15,58 * IGV^{(D)}_{AJI-EV3M}(\omega_i)$$

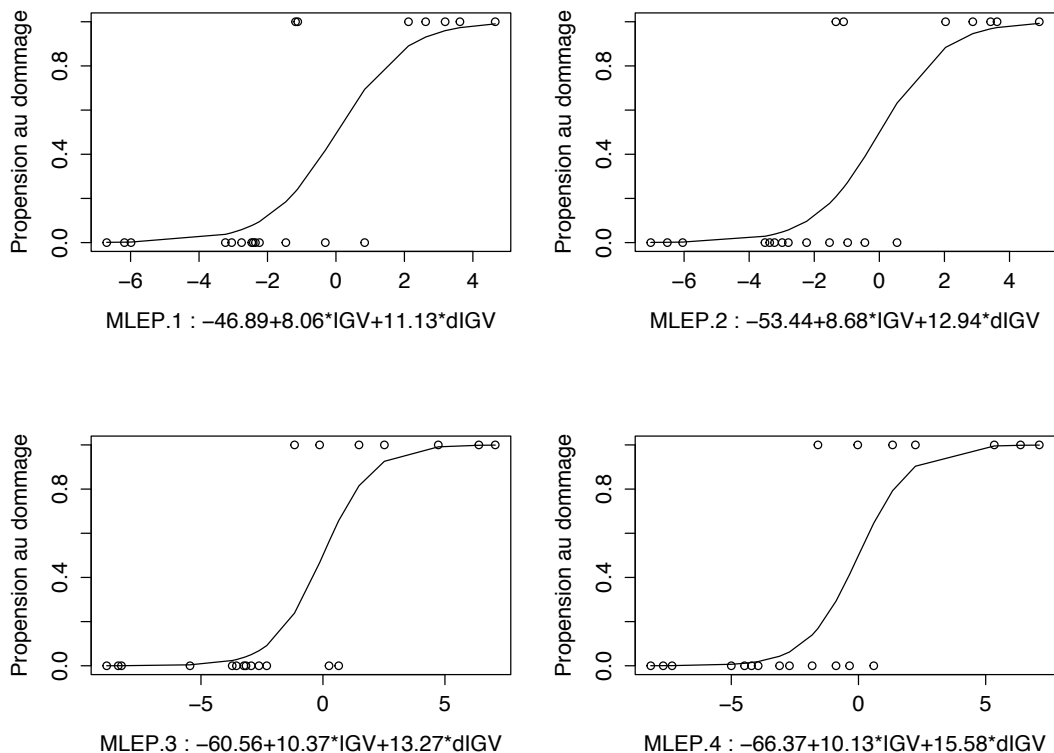


Fig. 87 : Sigmoïdes des quatre modèles logistiques avec effets principaux

Si la valeur de *IGV* augmente de 0,2 pour une habitation, celle de *IGV^(D)* étant fixée, alors la maison a 5 fois plus de chance d'être endommagée, selon MLEP.1, et 8 fois plus selon MLEP.3. Pour une même augmentation de la valeur de *IGV^(D)*, avec *IGV* fixe, l'habitation a

14,2 fois plus de chance d'être endommagée, selon MLEP.3, et 9,3 fois plus selon MLEP.1. On observe une nette augmentation des influences entre les modèles basés sur l'AJI et ceux basés sur l'AIPS. De plus, l'occurrence d'un dommage sur une habitation semble plus influencée par l'augmentation de l'indice global de vulnérabilité de sa plus proche voisine que de son indice global de vulnérabilité.

La comparaison des déviances nous permet de calculer un pseudo- R^2 , qui quantifie la contribution des prédictrices dans l'explication de la variable dépendante. Plusieurs formes de pseudo- R^2 sont proposées dans la littérature : McFadden, Cox et Snell, Nagelkerke. Lorsque la régression est inutile, $R^2 = 0$, lorsqu'elle est parfaite, $R^2 = 1$. Le R^2 de McFadden (R_{MF}^2) est considéré comme étant le plus adapté à la régression logistique (Menard, 2002), car conceptuellement similaire au coefficient de détermination de la régression linéaire multiple. Il se calcule par la formule suivante :

$$R_{MF}^2 = 1 - \frac{LL_M}{LL_0}$$

où, LL_M correspond à la log-vraisemblance du modèle logistique analysé et LL_0 à celle du *null model*.

MLEP.3 est celui qui se démarque le plus du modèle trivial, de plus, il possède la plus faible valeur pour le critère *AIC* ou *Akaike Information Criterion* (Tab. 72), qui évalue la bonne adéquation d'un modèle (Akaike, 1974). Plus il est faible, meilleur est le modèle. Cependant, les différences de qualité restent très resserrées.

Indicateurs	MLEP.1	MLEP.2	MLEP.3	MLEP.4
R_{MF}^2	0,57	0,57	0,63	0,61
<i>AIC</i>	17,2	17,1	15,5	16,1

Tab. 72 : Pseudo- R^2 de McFadden et *AIC* des quatre modèles logistiques avec effets principaux

c. Évaluation de la régression

Les modèles élaborés ne revêtent pas un caractère prédictif, du fait que nous utilisons les mêmes données pour leur spécification et leur vérification. La dernière étape de l'analyse repose alors sur l'évaluation de la cohérence des modèles et leur comparaison. Nous allons donc confronter les valeurs observées de la variable dépendante (Y), avec celles « prédites » (\hat{Y}) (Tab. 73). La règle d'affectation est la suivante : si $\pi > 0,5$ alors $\hat{Y} = 1$, sinon $\hat{Y} = 0$. Suivants cette règle, nous remarquons deux particularités :

- Les quatre modèles « prédisent » des faux non dommages (vrais dommages non retrouvés) : tous se trompent pour les habitations CAV_2 et CAV_6. Néanmoins, la propension de CAV_6 à être endommagée frôle le seuil d'affectation pour MLEP.3, et plus encore pour MLEP.4.
- Les quatre modèles « prédisent » des faux dommages : les modèles basés sur l'AIPS se trompent d'affectation pour une seule habitation (CAV_19), comme le modèle MLEP.4 qui se trompe sur CAV_5, tandis que MLEP.3 se trompent sur CAV_5 et CAV_19.

Habitation	$\pi_{MLEP.1}$	Rang	Prédits	Observés	Habitation	$\pi_{MLEP.2}$	Rang	Prédits	Observés
CAV_1	0,045	16	0	0	CAV_1	0,033	16	0	0
CAV_2	0,231	9	0	1	CAV_2	0,208	10	0	1
CAV_3	0,095	11	0	0	CAV_3	0,177	11	0	0
CAV_4	0,077	14	0	0	CAV_4	0,057	13	0	0
CAV_5	0,418	7	0	0	CAV_5	0,390	7	0	0
CAV_6	0,243	8	0	1	CAV_6	0,249	9	0	1
CAV_7	0,081	13	0	0	CAV_7	0,038	15	0	0
CAV_8	0,931	4	1	1	CAV_8	0,946	4	1	1
CAV_9	0,002	18	0	0	CAV_9	0,002	18	0	0
CAV_10	0,002	19	0	0	CAV_10	0,001	19	0	0
CAV_11	0,001	20	0	0	CAV_11	0,001	20	0	0
CAV_12	0,037	17	0	0	CAV_12	0,029	17	0	0
CAV_13	0,891	5	1	1	CAV_13	0,884	5	1	1
CAV_14	0,085	12	0	0	CAV_14	0,048	14	0	0
CAV_15	0,990	1	1	1	CAV_15	0,993	1	1	1
CAV_16	0,973	2	1	1	CAV_16	0,974	2	1	1
CAV_17	0,059	15	0	0	CAV_17	0,096	12	0	0
CAV_18	0,185	10	0	0	CAV_18	0,273	8	0	0
CAV_19	0,694	6	1	0	CAV_19	0,632	6	1	0
CAV_20	0,960	3	1	1	CAV_20	0,968	3	1	1

Habitation	$\pi_{MLEP.3}$	Rang	Prédits	Observés	Habitation	$\pi_{MLEP.4}$	Rang	Prédits	Observés
CAV_1	0,028	15	0	0	CAV_1	0,019	14	0	0
CAV_2	0,239	9	0	1	CAV_2	0,169	10	0	1
CAV_3	0,068	11	0	0	CAV_3	0,139	11	0	0
CAV_4	0,050	12	0	0	CAV_4	0,043	13	0	0
CAV_5	0,657	6	1	0	CAV_5	0,646	6	1	0
CAV_6	0,466	8	0	1	CAV_6	0,493	7	0	1
CAV_7	0,038	14	0	0	CAV_7	0,011	16	0	0
CAV_8	0,926	4	1	1	CAV_8	0,904	4	1	1
CAV_9	0,000	19	0	0	CAV_9	0,000	19	0	0
CAV_10	0,000	18	0	0	CAV_10	0,001	18	0	0
CAV_11	0,000	20	0	0	CAV_11	0,000	20	0	0
CAV_12	0,004	17	0	0	CAV_12	0,007	17	0	0
CAV_13	0,815	5	1	1	CAV_13	0,793	5	1	1
CAV_14	0,041	13	0	0	CAV_14	0,015	15	0	0
CAV_15	0,999	1	1	1	CAV_15	0,998	2	1	1
CAV_16	0,998	2	1	1	CAV_16	0,999	1	1	1
CAV_17	0,024	16	0	0	CAV_17	0,062	12	0	0
CAV_18	0,091	10	0	0	CAV_18	0,293	9	0	0
CAV_19	0,563	7	1	0	CAV_19	0,413	8	0	0
CAV_20	0,991	3	1	1	CAV_20	0,995	3	1	1

Tab. 73 : Prédictions des dommages sur les habitations calculées par les quatre modèles et confrontation avec les dommages observés

À partir de ces résultats, nous construisons les matrices de confusion, qui confrontent les observations Y aux « prédictions » \hat{Y} de chaque modèle (Fig. 88). Elles permettent à la fois d'appréhender le taux d'erreur et de rendre compte de la structure de l'erreur. Les modèles MLEP.1, MLEP.2 et MLEP.4 possèdent les mêmes matrices de confusion.

MLEP.1, 2 et 4				MLEP.3			
$Y \times \hat{Y}$	1	0	Total	$Y \times \hat{Y}$	1	0	Total
1	5	1	7	1	5	2	7
0	2	11	13	0	2	11	13
Total	7	13	20	Total	7	13	20

Fig. 88 : Matrices de confusion des quatre modèles logistiques avec effets principaux

Le taux d'erreur est égal au nombre de mauvais classement rapporté à l'effectif total :

$$\epsilon = 1 - \frac{\text{faux dommages} + \text{faux non dommages}}{n}$$

Les modèles MLEP.1 et MLEP.2 possèdent donc 15 % de chance de se tromper d'affectation, contre 20 % pour les modèles MLEP.3 et MLEP.4. Il existe plusieurs indicateurs traduisant la qualité d'un modèle. Les plus couramment employés sont :

- La sensibilité (S_e) ou la capacité du modèle à retrouver les habitations endommagées :

$$S_e = \frac{\text{vrais dommages}}{\text{vrais dommages} + \text{faux non dommages}}$$

- La spécificité (S_p) ou la capacité du modèle à retrouver les habitations non endommagées :

$$S_p = \frac{\text{vrais non dommages}}{\text{faux dommages} + \text{faux non dommages}}$$

- La précision (P) ou la probabilité qu'une maison soit réellement endommagée, lorsque le modèle la classe comme telle :

$$P = \frac{\text{vrais dommages}}{\text{vrai dommages} + \text{faux dommages}}$$

- Le rapport de vraisemblance (RV) qui décrit le surcroît de chance des positifs (par rapport aux négatifs) d'être classés positifs :

$$RV = \frac{S_e}{1 - S_p}$$

Les quatre modèles possèdent la même capacité à retrouver les maisons endommagées (Tab. 74). Les modèles MLEP.1, MLEP.2 et MLEP.4 obtiennent sans surprise les mêmes performances et se distinguent du modèle MLEP.3, qui présente des performances moindres sur les autres indicateurs.

Indicateurs	MLEP.1	MLEP.2	MLEP.3	MLEP.4
S_e	0,71	0,71	0,71	0,71
S_p	0,92	0,92	0,85	0,92
ϵ	0,15	0,15	0,2	0,15
P	0,83	0,83	0,71	0,83
RV	9,29	9,29	4,64	9,29

Tab. 74 : Comparaisons des performances relatives aux quatre modèles MLEP

Nous pouvons visualiser leurs performances respectives à l'aide d'un outil graphique, la courbe ROC (*Receiver Operating Characteristics*) (Fig. 89). Elle met en relation le taux de vrais dommages (sensibilité) et le taux de faux dommages (le complément de la spécificité). Deux situations extrêmes peuvent survenir. La discrimination est parfaite : toutes les maisons endommagées sont situées devant les maisons non endommagées, la courbe ROC est collée aux extrémités Ouest et Nord du repère. Les scores sont totalement inopérants, le classifieur attribue des valeurs au hasard, dans ce cas les maisons endommagées et non endommagées sont mélangées : la courbe ROC se confond avec la première bissectrice.

Visuellement, les courbes s'écartent sensiblement de la première bissectrice : aucun modèle n'attribue de valeurs au hasard.

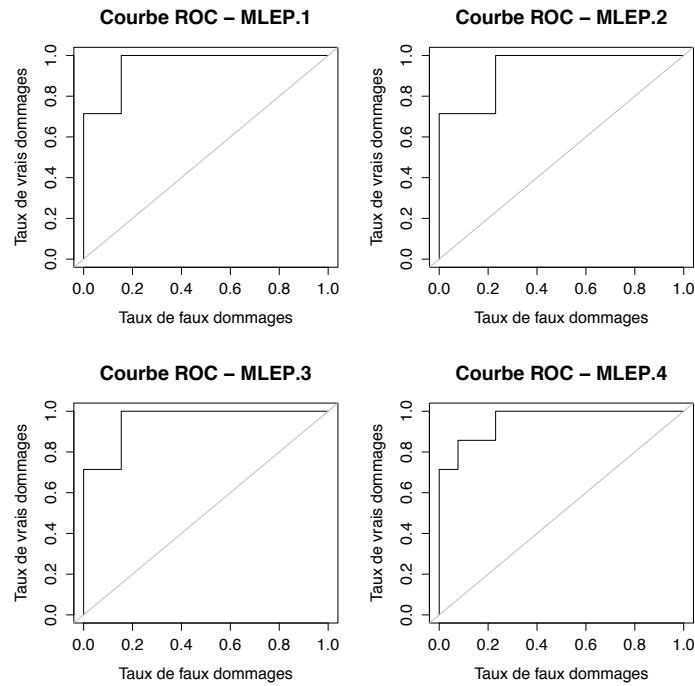


Fig. 89 : Courbes ROC des quatre modèles MLEP

L'aire sous la courbe, couramment abrégée *AUC* (*Area Under Curve*) permet de calculer la probabilité de classer une maison endommagée devant une maison non endommagée. Dans le cas d'une discrimination parfaite, le critère prend la valeur 1. *A contrario*, si le modèle attribue les scores au hasard, la courbe ROC se confond avec la première bissectrice, et $AUC = 0,5$. Différents paliers ont été proposés dans la littérature (Hosmer et Lemeshow, 2000), pour estimer la qualité d'un diagnostic (Tab. 75).

Valeur de l'AUC	Commentaire
$AUC = 0,5$	Pas de discrimination
$0,6 \leq AUC \leq 0,7$	Discrimination faible
$0,7 \leq AUC \leq 0,8$	Discrimination acceptable
$0,8 \leq AUC \leq 0,9$	Discrimination excellente
$AUC \geq 0,9$	Discrimination exceptionnelle

Tab. 75 : Interprétation des valeurs du critère AUC

Les quatre modèles ont un potentiel de discrimination exceptionnel, avec une supériorité pour MLEP.1, MLEP.3 et MLEP.4 dont l' $AUC = 0,96$ contre un $AUC = 0,93$ pour MLEP.2. Ainsi, les premiers possèdent 96 % de chance de placer une maison endommagée devant une maison non endommagée, à comparer avec les 50 % de la situation de référence, contre 93 % pour MLEP.2. Avec les réserves toujours de mise tant que nous évaluons nos modèles avec les données d'apprentissage, et étant donné la taille de notre échantillon, les modèles sont cohérents et présentent de très bonnes capacités à retrouver les dommages observés. L'indice de vulnérabilité se révèle être un bon témoin de la propension des habitations à souffrir des dommages, en cas d'incendie de forêt. Et ce, indépendamment de la méthode de calcul lors de l'analyse multicritère.

Toutefois, diagnostiquer un dommage pour une habitation non impactée (risque de faux positif ou risque de première espèce) ne produit pas les mêmes conséquences que de prédire l'absence de dommage pour une habitation endommagée (risque de faux négatif ou risque de deuxième espèce). Ces deux types d'erreur sont souvent sources de débats, particulièrement

lors des enquêtes publiques précédant l'approbation des Plans de Prévention du Risque incendie de forêt. Suite à la loi n° 95-101 du 2 février 1995, dite « loi Barnier », le droit français a introduit le principe de précaution qui encadre l'exercice des pouvoirs de l'administration. Par exemple, ce principe doit être pris en compte en vue de l'attribution d'un permis de construire en interface habitat-forêt. Ces deux risques interviennent alors dans le débat sur le principe de précaution, où les acteurs cherchent à trouver un compromis.

Le modèle multicritère développé s'insère alors dans le débat sur le principe de précaution, en revêtant le rôle d'un outil d'évaluation de la vulnérabilité et, à travers elle, du risque d'endommagement des habitations en interface habitat-forêt. À ce stade, la modélisation de l'endommagement est cohérente, mais nécessite d'être appliquée à d'autres sinistres afin d'apporter la preuve de la capacité prédictive de l'indice global de vulnérabilité.

5.4.3. Modélisation de la sévérité des dommages par régression polytomique ordinale

Dans cette section, la variable dépendante à l'étude concerne la sévérité des dommages observés. Elle est également catégorielle, mais présente trois modalités ordonnées ($K = 3$) : $y_0 = 0$; $y_1 = 1$; $y_2 = 2$.

a. Principe

La régression polytomique ordinale se présente comme la généralisation de la régression logistique binaire. On distingue trois types de modèle pour l'étude spécifique d'une variable dépendante ordinale (Agresti, 2002) : les logits séquentiels, les logits des catégories adjacentes et les logits cumulés. Nous avons choisi de nous concentrer sur la méthode des logits cumulés, qui permet de comparer une catégorie avec toutes les catégories qui lui sont inférieures.

Ce type de modèle est appelé modèle des côtes proportionnelles (*proportional odds model*). Popularisé par McCullagh (1980), il postule l'existence d'une variable continue Y^* , définie par :

$$Y^* = X\beta + \varepsilon$$

avec β le vecteur des coefficients et ε les résidus de la régression. Cette variable ne peut être observée directement ; on observe plutôt :

$$\begin{aligned} Y &= 1 \text{ si } Y^* \leq \alpha_1 \\ Y &= 2 \text{ si } \alpha_1 \leq Y^* \leq \alpha_2 \\ Y &= 3 \text{ si } \alpha_2 \leq Y^* \leq \alpha_3 \\ &\vdots \\ Y &= K \text{ si } Y^* \geq \alpha_{K-1} \end{aligned}$$

Dans ces expressions, les α_k , correspondent à des bornes qui divisent le continuum sous-jacent (Y^*) en catégories adjacentes et mutuellement exclusives (avec $\alpha_0 = -\infty$ et $\alpha_K = +\infty$). Les résidus suivent une distribution logistique avec $E(\varepsilon) = 0$ (Liao, 1994). Le modèle des côtes proportionnelles propose alors :

$$\text{Logit}_i = \log \left[\frac{P(Y \leq k|X)}{1 - P(Y \leq k|X)} \right] = \alpha_k - X\beta, k = 1, 2, \dots, K - 1$$

La combinaison linéaire des variables indépendantes quantifie le surcroît de probabilité d'être en dessous, plutôt qu'au-dessus, du niveau k . Seules les bornes (ou origines) α_k de ce

modèle sont variables. Les coefficients de régression (β) sont les mêmes pour chacun des logits de la distribution cumulative, ce qui a pour effet de produire des hyperplans de régression parallèles (Clogg et Shihadeh, 1994). Les rapports de chances (odds ratio) sont indépendants de la modalité k de la variable dépendante.

Il bénéficie des propriétés d'invariance suivantes :

- Il ne change pas suite à la recodification de la variable dépendante (McCullagh, 1980). C'est le cas notamment lorsque l'on décide d'assigner les valeurs $k = 0, 1, 2, \dots, K - 1$ aux catégories de la variable dépendante plutôt que $k = 1, 2, \dots, K - 1$;
- Il ne varie pas suite à un regroupement de catégories voisines de la variable dépendante (McCullagh, 1980).
- Les estimations des coefficients de régression du modèle des côtes proportionnelles étant calculées en fonction de la valeur moyenne des prédictives (X), si une variable explicative X donnée n'a pas le même effet sur chacune des catégories de Y alors les résultats obtenus sont en général inexacts (Concato *et al.*, 1993).

Il présente également certains avantages pratiques. On constate en effet que ce modèle semble être le modèle ordinal de régression logistique le plus populaire parmi les chercheurs (Hébert, 1998).

b. Estimation des paramètres et significativité des coefficients de la régression

Nous poursuivons la comparaison des quatre méthodes multicritères avec comme objectif : la modélisation de la probabilité d'appartenance d'une habitation à une catégorie de sévérité de dommage. Le travail de régression est effectué sous le logiciel R, à l'aide de la fonction *clm* du package *ordinal* (Christensen, 2013).

Nous appellerons MLPO.1, le modèle logistique issu de la régression polytomique ordinaire sur les résultats de l'AIPS-EVM, MLPO.2, celui issu des résultats de l'AIPS-EV3M, MLPO.3, celui issu des résultats de l'AJI-EVM, et enfin MLPO.4, celui issu des résultats de l'AJI-EV3M. Les quatre modèles sont significatifs (Tab. 76). Les modèles basés sur l'AJI offre de meilleures performances en termes de pseudo- R^2 et de vraisemblance par rapport au modèle trivial ($SEV \sim 1$). MLPO.1 est celui qui présente les meilleures significativités pour les variables explicatives.

Les coefficients sont positifs, ce qui indique qu'une plus forte valeur de IGV ou $IGV^{(D)}$ augmente la sévérité des dommages. MLPO.1 est le seul modèle qui accorde un effet plus important à l'indice global de vulnérabilité. Selon ce modèle, lorsque la valeur de l'IGV augmente de 0,2, alors la sévérité des dommages a 11,9 fois plus de chance d'être augmentée d'une classe, quelle que soit la classe de départ ; lorsque la valeur de l' $IGV^{(D)}$ augmente de 0,2, alors la sévérité des dommages a 10,8 fois plus de chance d'être augmentée d'une classe quelle que soit la classe de départ. MLPO.4 est celui qui présente le plus d'écart entre les effets des deux variables, favorisant $IGV^{(D)}$ à IGV.

MLPO.1 : SEV~IGV + IGV ^(D) sur AIPS-EVM						
Variable	Coefficient	OR (0,2)	Significativité	RV (SEV~1)	AIC	R _{MF} ²
IGV	12,4	11,9	0,0145 (*)	0,00003 (***)	22,6	0,59
IGV ^(D)	12,35	10,8	0,0228 (*)			
0/1	60,19					
1/2	63,94					
MLPO.2 : SEV~IGV + IGV ^(D) sur AIPS-EV3M						
Variable	Coefficient	OR (0,2)	Significativité	RV (SEV~1)	AIC	R _{MF} ²
IGV	13,7	15,5	0,0224 (*)	0,00003 (***)	22,5	0,59
IGV ^(D)	14,4	17,6	0,0350 (*)			
0/1	69,1					
1/2	72,97					
MLPO.3 : SEV~IGV + IGV ^(D) sur AJI-EVM						
Variable	Coefficient	OR (0,2)	Significativité	RV (SEV~1)	AIC	R _{MF} ²
IGV	14,13	16,9	0,0175 (*)	0,000004 (***)	18,7	0,7
IGV ^(D)	15,76	23,4	0,0266 (*)			
0/1	76,47					
1/2	81,27					
MLPO.4 : SEV~IGV + IGV ^(D) sur AJI-EV3M						
Variable	Coefficient	OR (0,2)	Significativité	RV (SEV~1)	AIC	R _{MF} ²
IGV	14,2	17,1	0,0316 (*)	0,000005 (***)	19	0,69
IGV ^(D)	18,84	43,3	0,0291 (*)			
0/1	85,15					
1/2	90,23					

Tab. 76 : Résultats des régressions logistiques polytomiques ordonnées pour les quatre méthodes multicritères

La fonction *clm* spécifie un cadre régressif où les coefficients des variables explicatives ne varient pas avec les catégories de sévérité. Afin de vérifier la validité de cette hypothèse (odds-ratio proportionnels), nous introduisons la possibilité pour chacun des coefficients de varier successivement (*nominal effect*). Le modèle nouvellement créé est alors comparé à l'initial par un test du rapport de vraisemblance. Au terme de cette analyse, nous pouvons conclure que l'hypothèse des côtes proportionnelles est valide pour les deux variables sur l'ensemble des modèles : le seuil des 5% est dépassé.

c. Évaluation de la régression

Les restrictions émises au sujet du caractère prédictif des modèles élaborés sont toujours de mise. Nous allons confronter les valeurs de sévérité observées avec les valeurs attribuées par les différents modèles afin de juger de leur cohérence, mais également comparer leur efficacité.

Les quatre modèles sont cohérents et présentent une bonne capacité à retrouver la sévérité observée (Tab. 77). On retrouve des caractéristiques similaires aux résultats sur l'occurrence du dommage (cf. §5.4.2.c) :

- Les quatre modèles se trompent sur la sévérité des dommages occasionnés à l'habitation CAV_2. Seuls les modèles basés sur l'AJI prédisent une sévérité de niveau 1 pour l'habitation CAV_6. En revanche, les quatre modèles attribuent les bons niveaux de sévérité pour les autres habitations endommagées.
- Les quatre modèles se trompent sur le niveau de sévérité de l'habitation CAV_19, qui n'a pas subi de dommages. Seuls les modèles basés sur l'AJI prédisent une sévérité de

niveau 1 pour l'habitation CAV_5, qui n'a subi aucun dommage. En revanche, les quatre modèles retrouvent toutes les autres maisons non endommagées (niveau 0).

MLPO.1	π_0	π_1	π_2	Sévérité prédite	Sévérité observée
CAV_1	0,963	0,036	0,001	0	0
CAV_2	0,784	0,209	0,006	0	1
CAV_3	0,941	0,058	0,001	0	0
CAV_4	0,963	0,036	0,001	0	0
CAV_5	0,653	0,335	0,012	0	0
CAV_6	0,65	0,338	0,013	0	1
CAV_7	0,942	0,057	0,001	0	0
CAV_8	0,049	0,638	0,313	1	1
CAV_9	0,999	0,001	0	0	0
CAV_10	1	0	0	0	0
CAV_11	1	0	0	0	0
CAV_12	0,983	0,017	0	0	0
CAV_13	0,1	0,726	0,174	1	1
CAV_14	0,942	0,057	0,001	0	0
CAV_15	0,001	0,038	0,961	2	2
CAV_16	0,009	0,273	0,718	2	2
CAV_17	0,918	0,08	0,002	0	0
CAV_18	0,92	0,078	0,002	0	0
CAV_19	0,099	0,724	0,177	1	0
CAV_20	0,009	0,271	0,719	2	2

MLPO.2	π_0	π_1	π_2	Sévérité prédite	Sévérité observée
CAV_1	0,978	0,022	0	0	0
CAV_2	0,799	0,196	0,005	0	1
CAV_3	0,869	0,128	0,003	0	0
CAV_4	0,976	0,024	0,001	0	0
CAV_5	0,664	0,326	0,01	0	0
CAV_6	0,686	0,305	0,009	0	1
CAV_7	0,978	0,022	0	0	0
CAV_8	0,033	0,596	0,371	1	1
CAV_9	0,999	0,001	0	0	0
CAV_10	1	0	0	0	0
CAV_11	1	0	0	0	0
CAV_12	0,99	0,01	0	0	0
CAV_13	0,113	0,751	0,136	1	1
CAV_14	0,977	0,023	0	0	0
CAV_15	0,001	0,036	0,964	2	2
CAV_16	0,008	0,272	0,72	2	2
CAV_17	0,871	0,126	0,003	0	0
CAV_18	0,848	0,149	0,004	0	0
CAV_19	0,138	0,75	0,111	1	0
CAV_20	0,008	0,278	0,714	2	2

MLPO.3	π_0	π_1	π_2	Sévérité prédite	Sévérité observée
CAV_1	0,985	0,015	0	0	0
CAV_2	0,804	0,194	0,002	0	1
CAV_3	0,965	0,035	0	0	0
CAV_4	0,979	0,021	0	0	0
CAV_5	0,346	0,639	0,015	1	0
CAV_6	0,451	0,54	0,01	1	1
CAV_7	0,981	0,018	0	0	0
CAV_8	0,05	0,814	0,136	1	1
CAV_9	1	0	0	0	0
CAV_10	1	0	0	0	0
CAV_11	1	0	0	0	0
CAV_12	0,999	0,001	0	0	0
CAV_13	0,178	0,786	0,037	1	1
CAV_14	0,981	0,019	0	0	0
CAV_15	0	0,009	0,991	2	2
CAV_16	0	0,043	0,957	2	2
CAV_17	0,984	0,016	0	0	0
CAV_18	0,965	0,035	0	0	0
CAV_19	0,301	0,681	0,019	1	0
CAV_20	0,002	0,163	0,835	2	2

MLPO.4	π_0	π_1	π_2	Sévérité prédite	Sévérité observée
CAV_1	0,991	0,009	0	0	0
CAV_2	0,872	0,127	0,001	0	1
CAV_3	0,902	0,098	0,001	0	0
CAV_4	0,983	0,017	0	0	0
CAV_5	0,316	0,671	0,013	1	0
CAV_6	0,441	0,551	0,008	1	1
CAV_7	0,996	0,004	0	0	0
CAV_8	0,06	0,851	0,089	1	1
CAV_9	1	0	0	0	0
CAV_10	1	0	0	0	0
CAV_11	1	0	0	0	0
CAV_12	0,998	0,002	0	0	0
CAV_13	0,183	0,79	0,027	1	1
CAV_14	0,995	0,005	0	0	0
CAV_15	0	0,026	0,974	2	2
CAV_16	0	0,02	0,98	2	2
CAV_17	0,95	0,049	0	0	0
CAV_18	0,801	0,198	0,002	0	0
CAV_19	0,487	0,507	0,007	1	0
CAV_20	0,001	0,103	0,897	2	2

Tab. 77 : Comparaisons des prédictions et des observations de la sévérité des dommages pour les quatre modèles

Deux éléments clés de l'évaluation de la performance d'un modèle de régression logistique ajusté sont l'évaluation de la calibration et de la discrimination du modèle. La calibration se réfère à l'accord entre les résultats observés (ici, la sévérité des dommages) et les « prévisions » du modèle :

- Sévérité = 0 : 92 % retrouvés (AIPS) contre 85 % (AJI) ;
- Sévérité = 1 : 50 % retrouvés (AIPS) contre 75 % (AJI) ;
- Sévérité = 2 : 100 % retrouvés (AIPS et AJI).

En revanche, la discrimination fait référence à la capacité du modèle à distinguer la sévérité des dommages subis par les habitations (Steyerberg *et al.*, 2010). La capacité de discrimination du modèle est évaluée à l'aide de l'indice C de concordance. Cet indice est sans unité. Il indique la probabilité pour une habitation choisie au hasard et qui a subi un dommage d'une sévérité donnée, de se voir affecter le même niveau de sévérité par rapport à une habitation choisie au hasard et qui n'a pas subi le même niveau de sévérité des dommages. L'indice C est équivalent à l'aire sous la courbe ROC (AUC) (Hanley et McNeil, 1982). Les quatre modèles ajustés présentent une valeur de l'indice C égale à 0,96. Ainsi, ils possèdent une très bonne capacité de discrimination (cf. § 5.4.2.c).

Les modèles basés sur l'AIPS retrouvent 5 vrais niveaux de sévérités sur 7 pour les maisons endommagées, contre 6 sur 7 pour ceux basés sur l'AJI. Les modèles basés sur l'AIPS retrouvent 12 vrais niveaux de sévérité sur 13 pour les maisons non endommagées, contre 11 sur 13 pour ceux basés sur l'AJI. En conclusion, les résultats issus de l'analyse multicritère AIPS détectent mieux les maisons non endommagées (sévérité de niveau 0), alors que ceux issus de l'AJI discriminent mieux la sévérité des dommages pour les maisons endommagées.

5.5. Conclusions du chapitre

L'application de la méthode d'évaluation de la vulnérabilité sur la zone d'étude fournit des cartes spécifiques à l'ensemble des critères de la structure hiérarchique. Leur analyse montre que l'objectif d'identification des zones les plus vulnérables est atteint. Chaque critère constitue un levier potentiel d'action de réduction de la vulnérabilité. À la lecture des différentes cartes, on associe rapidement la nature et l'intensité des contributions à la vulnérabilité globale. Ainsi, elles offrent une lecture détaillée, appropriable par tous, à la fois spécifique (propre à un critère) et globale de la construction de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt. La carte de l'indice global de vulnérabilité revêt alors un intérêt opérationnel pour l'intégration de la vulnérabilité à l'aménagement du territoire.

Le modèle multicritère se focalise sur les habitations résidentielles, enjeux principaux des interfaces habitat-forêt. Les méthodes de cartographie employées s'intéressent aux différentes formes supposées de la vulnérabilité : la diffusion des contributions de l'environnement aux enjeux, et celle des enjeux à l'environnement. La deuxième a été traitée grâce à l'interpolation par la pondération inverse à la distance séparant les habitations, qui présente alors le gradient de la moyenne des vulnérabilités sur l'interface. Ce choix est critiquable du fait du caractère « exact » de la méthode. Celle-ci attribue aux habitations leurs intensités brutes de contribution, contrairement à la méthode d'interpolation de type *krigeage* qui prend en compte la structure spatiale des données et affecte un score pouvant être inférieur ou supérieur aux valeurs brutes. Il permettrait alors de mieux refléter les synergies existantes entre les contributions. Cependant, le *krigeage* requiert un grand nombre d'échantillons, au moins 100, afin de produire une estimation fiable du variogramme (Webster et Oliver, 1992). La méthode nécessite donc d'être répétée sur des territoires de plus grande envergure, où de nombreuses maisons seraient étudiées.

Malgré cette limite d'effectif, nous avons construit deux modèles logistiques : l'un basé sur la variable binaire d'endommagement, l'autre sur la variable ordinale de sévérité des dommages. Les résultats sont significatifs. Le modèle multicritère, à travers l'indice de vulnérabilité et sa variante spatialement décalée, est cohérent avec les observations post-incendie, et ce, quelles que soient les méthodes de calcul. Cependant, nous ne pouvons pas nous livrer à des conclusions hâtives. Les modèles sont ajustés sur une faible quantité de maisons, et seulement sur l'incendie de Cavaillon. De plus, il a été démontré que l'endommagement avait été principalement influencé par les caractéristiques des structures de la végétation, la présence d'équipements aggravants (haies, véhicules, annexes en bois) et leur distance aux habitations. Au chapitre 4, nous avons soulevé le fait que, pour l'AJI, la structure de la végétation contribue davantage à l'IGV que pour l'AIPS. Ainsi, ses bons résultats prédictifs semblent moins facilement adaptables, que ceux de l'AIPS, à des situations différentes. Contrairement à l'AJI, l'AIPS reflète mieux la disparité des jugements, ainsi, elle intègre davantage de connaissance et d'expérience. L'AIPS balaye alors un plus large spectre de situations dommageables et de scénarii d'incendies. Couplée à la méthode EVM, elle offre de meilleurs résultats que la méthode EV3M. Les différences d'intensités entre les modalités d'un même critère sont plus marquées. La méthode EVM permet de mieux cerner les

alternatives favorables à la réduction de la vulnérabilité. Ainsi, elle s'adapte aux besoins d'amélioration de la capacité de réponse de la société face aux incendies de forêt. Au final, l'objectif de quantification de la propension des habitations à souffrir des dommages est partiellement réalisé. Pour aller plus loin dans la validation du potentiel prédictif du modèle, il est nécessaire de répéter l'opération sur des jeux de données n'ayant pas servi à la spécification du modèle.

Les conditions d'applicabilité de la méthode à un autre incendie dépendent de plusieurs éléments. Tout d'abord, l'analyse post-incendie doit pouvoir se faire à travers le filtre défini par les critères du modèle conceptuel et la typologie des dommages. Si la typologie des dommages possède un caractère généralisable, certains éléments du modèle multicritère sont spécifiques au territoire français. C'est le cas du sous-critère relatif à la préparation des personnes, qui repose en partie sur la législation française. Même si le modèle a été conçu de manière à être facilement transposable, son adaptation à des cultures du feu différentes (australiennes ou américaines) nécessite des modifications dans le choix de certaines modalités, propres au cas français, et une révision des pondérations doit être effectuée par la communauté d'experts des pays intéressés. Néanmoins, le modèle est adapté à la problématique des interfaces habitat-forêt du pourtour méditerranéen.

La démarche de la thèse se veut *a posteriori*, dans un but de validation par le réel d'un modèle théorique. Cependant, l'intérêt du modèle ne s'arrête pas à l'analyse post-incendie, nécessaire à sa validation. L'indice global de vulnérabilité créé, ouvre la voie à une approche prospective, et vient soutenir les actions de prévention des risques menées par les gestionnaires de l'aménagement et les services déconcentrés de l'État. Au cours de la thèse deux missions ont été réalisées au sein de deux municipalités gardoises. Bien qu'en cours de développement, le modèle a bénéficié aux communes en leur fournissant un diagnostic de vulnérabilité aux incendies de forêt. Les résultats cartographiques ont permis d'alimenter la concertation autour d'un débat constructif. Cet engouement révèle le besoin des communes de se voir doter d'un outil adapté pour l'évaluation de la vulnérabilité à fine échelle, de manière à prendre en considération les multiples spécificités du territoire des interfaces habitat-forêt.

La discrimination des espaces à enjeux en fonction de leur niveau de vulnérabilité est un élément important pour l'aide à la décision d'aménagement aux échelles locales et micro-locales. Le modèle créé diagnostique la vulnérabilité latente des interfaces habitat-forêt. L'approche multicritère sur laquelle il se fonde souffre cependant de plusieurs limites. D'une part, un ensemble de limites contingentes, à savoir le nombre d'experts et leur représentativité statistique. Le nombre d'experts consulté reste limité, néanmoins leur expérience d'analyse des dommages et de gestion du risque incendie de forêt s'avère significative pour la majorité d'entre eux. Un nombre supérieur de participants aurait garanti une meilleure représentativité des résultats. Les onze experts ayant participé à l'étude de la vulnérabilité viennent d'horizons différents, et forment alors une équipe pluridisciplinaire. À cet égard, P. Lagadec soulignait que les expertises doivent être menées « *par des équipes riches de cultures et de pratiques très diverses, ouvertes sur de nombreux acteurs, proches de la décision et des réalités de la crise* » (Lagadec, 1991). Même si l'exhaustivité s'avère impossible dans le domaine de l'évaluation de la vulnérabilité, pour que cette dernière soit représentative de la réalité, elle devrait être menée par une équipe pluridisciplinaire comme le préconisaient déjà certains auteurs (Lagadec, 1991 ; Léone, 1996 ; Grzegorzulka *et al.*, 1998 ; Dauphiné, 2001). D'autre part, un ensemble de limites de fonds, à savoir les fondements non rigoureusement scientifiques des dires d'experts (issus principalement des retours d'expériences et non d'expérimentations planifiées et contrôlées) et leur possible subjectivité. Alors, l'approche à dires d'experts doit être confrontée à une approche qui aborde la

dimension physique du phénomène d'incendie de forêt. Cette confrontation s'inscrit dans une perspective d'étude de la cohérence de l'indice global de vulnérabilité à dires d'experts, en vue d'une validation future.

Les modèles d'endommagement, en affectant aux habitations une probabilité de dommage, révèlent deux types d'erreur possible au niveau du diagnostic prédictif : prédire un dommage qui n'aura pas lieu ou prédire son absence à tort. Ce dilemme, couplé au limites de l'approche à dires d'experts, soulève le besoin d'introduire le phénomène incendie de forêt dans le diagnostic. Or, la relative rareté des évènements feux induisant des dommages aux biens et les difficultés d'expérimentation en vraie grandeur limitent l'opérationnalité de l'approche expérimentale directe pour l'étude de la vulnérabilité. Il nous paraît alors nécessaire de s'en remettre à un laboratoire virtuel, capable de simuler un incendie en interface habitat-forêt et d'en fournir les caractéristiques physiques. Cette approche vient compléter la première, afin d'analyser, détailler et vérifier la cohérence du triptyque « Intensité simulée – Vulnérabilité à dires d'experts – Sévérité des dommages observés ». Elle sera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 6. Modélisation de la vulnérabilité d'exposition par la simulation d'un incendie de forêt en interface et analyse tridimensionnelle.

À la fin du chapitre 5, nous avons montré le potentiel discriminant de l'indice global de vulnérabilité évalué à dire d'experts, en ce qui concerne l'occurrence et la sévérité des dommages perpétrés sur les habitations. L'évaluation de la vulnérabilité, sur la base de la connaissance formalisée des experts du risque incendie de forêt, permet alors de mesurer la propension, ou susceptibilité à l'endommagement des enjeux surdéterminants que sont les habitations résidentielles en interface habitat-forêt. À travers les valeurs de l'indice, trois composantes de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt sont considérées : la sensibilité intrinsèque des habitations (la capacité de résistance des habitations) évaluable à partir des caractéristiques des constructions (matériaux, conception) ; l'exposition des habitations, ou la susceptibilité du milieu naturel environnant les habitations (topographie, structure de la végétation) et du milieu anthropique (aménagement) à laisser prise aux attaques et à amplifier l'intensité du feu ; la capacité de réponse de la population, ou les facteurs humains influençant la capacité à réprimer le phénomène (préparation des personnes, entretien de l'habitation et de la végétation). Cependant, l'approche à dire d'experts souffre du caractère subjectif et parfois non scientifique des expertises. Dans le présent chapitre, nous proposons une démarche d'objectivation de l'évaluation de la vulnérabilité en croisant l'approche multicritères de dire d'experts à un modèle de simulation physique d'exposition.

Traditionnellement, la recherche sur les incendies de forêt se concentre davantage sur la dynamique du feu que sur la compréhension des impacts causés par les incendies lorsqu'ils s'attaquent aux interfaces habitat-forêt (Murnane, 2006 ; Chuvieco *et al.*, 2010). Les relations entre le phénomène physique et l'anthroposystème sont moins souvent étudiées. Dans ce chapitre, la réflexion est portée sur le triptyque « Intensité – Vulnérabilité – Sévérité des dommages observés », ou, dans quelle mesure l'indice global de vulnérabilité à dire d'experts autorise un pont entre l'intensité du feu et la sévérité des dommages observés sur les habitations. L'intensité potentielle d'un feu déclaré, est-elle reliée à l'indice de vulnérabilité, formulé par l'analyse multicritère des dire d'experts ? La sévérité des dommages est-elle reliée aux caractéristiques physiques de l'incendie ?

Pour répondre à ces questions, nous faisons appel à la théorie de la physique du feu et de sa propagation. Le feu d'interface de Cavaillon (21 juillet 2012) sert de cas d'étude. Dans un premier temps, nous ferons un rappel sur la physique du phénomène. Après avoir présenté les principaux modèles de propagation des incendies de forêt, nous exposerons notre choix et présenterons son application à la reconstruction de l'incendie de Cavaillon du 21 Juillet 2012. La première étape consiste alors à reconstruire l'incendie étudié par simulation en laboratoire virtuel, afin d'approcher son comportement et ses caractéristiques physiques. La qualité de la simulation sera ensuite évaluée par comparaison des surfaces simulées et réelles de l'incendie.

De cette simulation, nous exploiterons les résultats afin d'analyser la cohérence entre les deux approches et d'évaluer la pertinence des dire d'experts. Notre étude se focalise sur la composante anthropique de la sévérité des dommages. L'objectif est alors de mettre en relation, la sévérité des dommages observés sur les habitations avec les niveaux de l'échelle d'intensité (NEI) pour les incendies de forêt développée par Lampin *et al.* (2002), et enfin, de modéliser le niveau d'intensité du feu, dans l'environnement de 30 mètres autour des habitations, en fonction de leur indice global de vulnérabilité.

La zone tampon de 30 m autour des habitations correspond à la zone critique d'exposition au rayonnement thermique (Cohen, 2000). Par ailleurs, grâce à l'analyse des dommages menée sur le site incendié, nous savons que l'endommagement des habitations n'est pas dû au contact direct avec les flammes. Ainsi, à partir de l'intensité simulée, nous proposerons une méthode de modélisation en trois dimensions de l'exposition des habitations au rayonnement thermique produit par le feu. L'objectif est de mettre en évidence les mécanismes ayant piloté l'endommagement des habitations et, ainsi, d'explicitier comment l'intensité du feu peut se traduire en terme de mécanisme d'endommagement. Les profils de contraintes thermiques reçues par habitation permettront, à l'intérieur de ce laboratoire virtuel, d'extraire les conséquences théoriques qui seront comparées aux conséquences réelles observées sur les habitations.

6.1. L'incendie de forêt appréhendé sous l'angle de la physique

D'un point de vue physique, l'incendie résulte d'une réaction chimique, la combustion, qui « *se développe sans contrôle, dans le temps et dans l'espace* » (Trabaud, 1989). On rappelle que cette réaction vive et fortement exothermique nécessite la présence des trois éléments du triangle du feu (cf. § 1.5.1).

Dans cette section, nous allons dégager les principaux mécanismes élémentaires de la propagation du feu. Puis, nous présenterons les principales caractéristiques physiques du feu.

6.1.1. Transfert de chaleur et propagation des incendies

La propagation des incendies dans les écosystèmes est un phénomène biophysique complexe largement étudié depuis une soixantaine d'années. L'intérêt porté aux feux s'explique par leur implication profonde dans la dynamique des écosystèmes et des anthroposystèmes.

Sur le plan physique, le transfert d'une quantité de chaleur δq (en Joule) pendant un intervalle de temps δt (en seconde) correspond à un flux de chaleur ϕ , qui se mesure en $J \cdot s^{-1}$, soit en Watts :

$$\phi = \frac{\delta q}{\delta t}$$

La chaleur s'écoule sous l'influence d'un gradient de température des hautes vers les basses températures. Lorsqu'un flux thermique traverse une surface S , résulte alors une densité de flux de chaleur φ ($W \cdot m^{-2}$) :

$$\varphi = \frac{\phi}{S}$$

Le transfert de chaleur est à la base de la propagation de l'incendie. La « source chaude » est constituée par la zone en feu, où des combustibles végétaux sont consommés, qui transfère sa chaleur au combustible environnant. Ce dernier constitue la « source froide » qui fait office de puits de chaleur, car elle absorbe l'énergie en provenance de la source chaude jusqu'à ce qu'à son tour elle s'enflamme, assurant la propagation de l'incendie. Le processus de transmission de la chaleur n'est pas régi par une relation unique, mais résulte d'une combinaison de mécanismes physiques. Le transfert de chaleur en avant du front du feu est assuré par la conduction, par la convection et par le rayonnement. Ces trois modes de transfert de chaleur agissent simultanément au cours des feux de forêt. Un quatrième vient s'y greffer : les projections de particules incandescentes (Fig. 90).

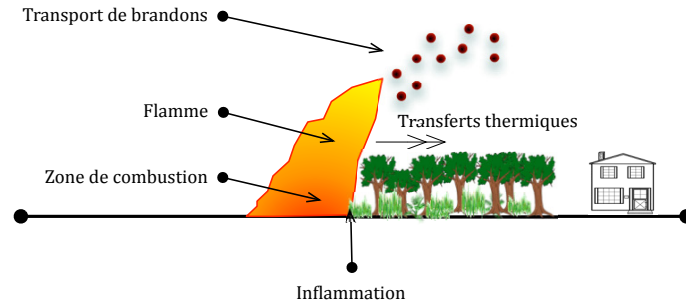


Fig. 90 : Mécanismes de la propagation d'un feu de forêt

a. La conduction

La conduction est un processus physique de transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. La propagation de la chaleur par conduction à l'intérieur d'un corps s'effectue selon deux mécanismes distincts : une transmission par les vibrations des atomes ou molécules et une transmission par les électrons libres.

La théorie de la conduction repose sur l'hypothèse de Fourier : la densité de flux est proportionnelle au gradient de température :

$$\vec{\varphi} = -\lambda \overrightarrow{grad}(T)$$

Ou sous forme algébrique :

$$\varphi = -\lambda \frac{\partial T}{\partial x}$$

Avec :	φ	Densité de flux de chaleur transmis par conduction	(W. m ⁻²)
	T	Température	(K)
	λ	Conductivité thermique du milieu	(W. m ⁻¹ . K ⁻¹)
	x	Variable d'espace dans la direction du flux	(m)

Les végétaux sont de mauvais conducteurs de chaleur. Ce mode de transfert est donc de faible importance lors d'un feu de végétation, et reste négligeable devant les échanges par convection et rayonnement.

b. La convection

La convection est un processus physique par lequel la chaleur est transmise par des fluides en mouvement. Les masses d'air chaud, qui proviennent des gaz de combustion de la zone en feu, contribuent à l'augmentation de la température des végétaux. Cette augmentation est due à un échange local de chaleur entre l'air chaud et le végétal : les gaz chauds sont plus légers et montent rapidement. Ils apportent une grande quantité de chaleur aux combustibles situés au-dessus (houppiers des arbres), les dessèchent et élèvent leur température jusqu'au point d'inflammation.

Le phénomène est régi par la loi de Newton :

$$\varphi = h(T_s - T_g) \quad \text{avec } \varphi \text{ en W. m}^{-2}$$

Avec :	φ	Densité de flux de chaleur transmis par convection	(W. m ⁻²)
	T_s	Température de surface du solide (le végétal)	(K)
	T_g	Température du gaz	(K)

h Coefficient d'échange par convection (W. m⁻². K⁻¹)

Le vent, en poussant les gaz chauds en avant du front de flammes, au sein des strates basses de la végétation, accélère la propagation du feu. Les variations du relief participent aussi au déplacement des gaz chauds. Pour un feu montant, la convection vers l'avant du front de feu est d'autant plus marquée que la pente est importante. C'est l'inverse pour un feu descendant. Par ailleurs, les gaz en mouvement transportent souvent des particules incandescentes, appelées « brandons », qui peuvent retomber à plusieurs centaines de mètres en avant du feu et être à l'origine de nouveaux foyers. On parle alors de propagation par sautes de feux.

La convection est le processus de transfert de chaleur prépondérant dans la propagation des incendies de forêt.

c. Le rayonnement thermique

Les corps émettent de l'énergie par leur surface, sous forme d'un rayonnement d'ondes électromagnétiques, et ce d'autant plus que leur température est élevée. Le rayonnement se propage en ligne droite, à la vitesse de la lumière, sans support matériel. Lorsque ce rayonnement atteint un élément, une partie est réfléchi, tandis que l'autre est absorbée et se transforme en chaleur au sein de l'élément récepteur.

L'émetteur ou l'absorbeur idéal est un cas limite appelé corps noir. Il a la propriété d'absorber tout le rayonnement qui lui parvient quelle que soit sa longueur d'onde. À température constante, il émet le maximum de rayonnement thermique possible. Le concept de corps noir sert de référence à l'étude du rayonnement des corps réels. Les propriétés d'émission des corps réels sont donc définies par rapport à celles du corps noir. On définit l'émissivité ε d'un corps comme le rapport de son émittance à celle du corps noir. Elle dépend de la direction et de la longueur d'onde. Un corps réel est donc défini par son émissivité ε et son coefficient d'absorption α .

En pratique, est admise l'hypothèse selon laquelle les corps réels se comportent comme des corps gris à émission diffuse (émissivité constante quelle que soit la longueur d'onde). Par conséquent, l'émissivité et le coefficient d'absorption ne dépendent ni de la direction ni de la longueur d'onde. Un corps réel est alors caractérisé par sa seule émissivité. La loi de Stefan-Boltzmann établit la relation entre la température d'un corps et son émittance :

$$E = \varepsilon \sigma T^4$$

Avec :	E	L'émittance totale par unité de surface de la source	(W. m ⁻²)
	ε	L'émissivité de la source	
	σ	Constante de Stefan-Boltzman	(W. m ⁻² . K ⁻⁴)
	T	Température de la source	(K)

Le rayonnement thermique mis en jeu lors des incendies de forêt est principalement un rayonnement électromagnétique infrarouge. Un front de feu constitue un panneau radiant émettant des flux de chaleur radiative dans toutes les directions du demi-espace qu'il « voit ». Le flux rayonné est donc hémisphérique. Le rayonnement reçu par un objet varie comme l'inverse de la distance de cet objet au front de flammes.

En pratique, c'est surtout le rayonnement à courte distance qui est à l'origine de l'élévation de la température et du dessèchement du combustible en avant du front de flammes assurant ainsi la propagation de l'incendie.

d. Sautes de feu

Les sautes de feu sont des projections de particules enflammées ou incandescentes (brandons) en avant du front de flamme, donnant naissance à des foyers secondaires. Ces particules entraînées dans la colonne de convection et transportées par le vent peuvent se produire sur de courtes ou de longues distances selon les conditions du milieu (Colin *et al.*, 2002). La saute de feu moyenne pour les pays méditerranéens européens est de 228 m et 8 % des sautes atteignent des distances de plus de 500 m (Collectif Saltus, 2001 ; Colin *et al.*, 2002).

Ce phénomène dépend de différents facteurs : la vitesse du vent, la pente, le degré d'humidité de l'air, la nature de la végétation au point de départ de la saute, les caractéristiques du combustible récepteur (pourcentage de recouvrement, nature, degré d'humidité, compacité, structure). Sans rentrer dans les détails, voici quelques exemples de brandons : aiguilles de pin, morceaux d'écorce, brindilles, feuilles, écailles de cônes...

6.1.2. Mesure des caractéristiques physiques d'un incendie

La mesure des paramètres de comportement du feu s'effectue généralement en laboratoire, sur des bancs d'essais lourdement instrumentés (thermocouples, caméra infrarouge, système de pesée, milieu homogène...), voire même sur des feux contrôlés de petites surfaces. Les mesures directes sont rarement possibles, les caractéristiques d'un feu ne sont pas actuellement quantifiables lors de son passage.

Les paramètres permettant de caractériser les incendies sont nombreux. La mesure des températures de flamme utilise des sondes à thermocouples et des matériaux thermosensibles. Certains auteurs (Dupuy, 1997) émettent des réserves sur la qualité des mesures obtenues à partir des thermocouples, et leur capacité à caractériser le gradient vertical de température au sein d'une flamme. L'usage des éléments thermosensibles est aussi controversé en raison des disparités parfois observées, sur un même banc d'essai, entre les températures mesurées sur thermocouples et sur les éléments thermosensibles.

De plus, il y a dissensus sur l'efficacité de la température à caractériser un feu. Quelques auteurs (Floyd, 1966; Van Wagner, 1970 ; Alexander, 1982) contestent l'approche consistant à caractériser un feu seulement à partir des températures. Ils reprochent aux courbes de températures d'être difficiles à interpréter sous forme de dimensions physiques. À l'inverse, (Hobbs *et al.*, 1984) affirment la parfaite représentativité des températures. En outre, la mesure des températures sur des feux réels pose problèmes (recherche d'instrumentation résistant au feu, possibilité de s'approcher des flammes...).

La recherche dans le domaine s'accorde sur la nécessité d'appréhender le feu par sa géométrie (Fig. 91) : hauteur, longueur et profondeur de la flamme. La longueur de la flamme est la distance entre la base de la flamme et le point le plus haut (Dupuy, 1997). La hauteur de la flamme est la distance séparant le point le plus haut de son support. La profondeur de flamme est identifiée par la distance qui sépare l'avant de l'arrière du front (Dupuy, 1997). Elle est liée au temps de résidence de la flamme.

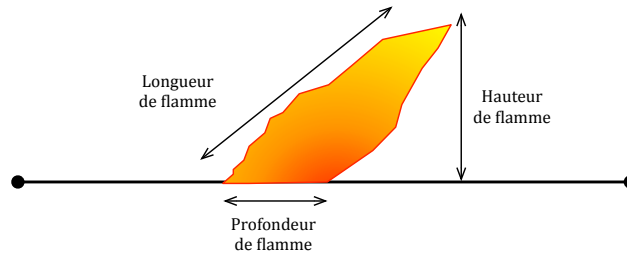


Fig. 91 : Géométrie d'une flamme

Il n'est pas souvent aisé de mesurer ces paramètres. La recherche s'est alors concentrée sur la mesure de la puissance du front de feu définie comme la quantité d'énergie émise par unité de temps et par unité de longueur du front de feu (Byram, 1959, Tangren, 1976). Cette puissance linéique du front de flammes est évaluée à partir de la mesure de la vitesse de propagation du front et la quantité de combustible consommé (Van Wagner, 1970 ; Alexander, 1982). La formule de Byram (1959), largement utilisée par les gestionnaires, permet de calculer la puissance linéique d'un front de flammes (*fireline intensity* - *FLI* en kW/m) :

$$FLI = H_c \cdot W \cdot ROS$$

où, H_c est la chaleur de combustion, de 18 000 à 22 000 $kJ \cdot kg^{-1}$, W la charge de combustible consommé lors du passage du feu, en $kg \cdot m^{-2}$, et ROS la vitesse de propagation en $m \cdot s^{-1}$ (*rate of spread*).

Plusieurs équations existent pour obtenir la longueur de flamme à partir de la puissance du feu (Thomas, 1963 ; Brown et Davis, 1973 ; Albin, 1984 ; Nelson et Adkins, 1986). Certaines sont adaptées aux feux de cimes (Thomas, 1963), d'autres intègrent la force du vent (Albin, 1984). La plus communément utilisée est celle de Byram (1989) :

$$L_f = 0,0775 \cdot (FLI)^{0,46}$$

avec L_f représentant la longueur de flamme (en m) et FLI la puissance linéique du front de flamme (en $kW \cdot m^{-1}$).

La profondeur de la flamme, le temps de résidence de la flamme et la vitesse de propagation sont liés selon la relation suivante (McArthur, 1967) :

$$P = t_r \cdot ROS$$

où P correspond à la profondeur de la flamme (en m), t_r le temps mis pour qu'une zone donnée de combustible brûle totalement (en s) et ROS la vitesse de propagation (en $m \cdot s^{-1}$).

Le rayonnement thermique reçu par une cible peut se calculer à partir de l'équation déterminée expérimentalement par Leicester (1987) :

$$Q = 60 \left(1 - \exp\left(\frac{-FLI}{3000 \cdot d}\right) \right)$$

où Q représente le flux radiatif reçu par une cible (en $kW \cdot m^{-2}$), d la distance à la source de chaleur et FLI la puissance linéique de la source de chaleur (en $kW \cdot m^{-1}$).

Il est extrêmement difficile d'appréhender directement la plupart de ces paramètres pendant le feu, voire après le feu, car la majorité des mesures incluent à la fois la perte due à la combustion par contact direct avec la flamme et celle due à la combustion incandescente qui continue après le passage du feu (Alexander, 1982). Ils sont interdépendants et aucun d'eux ne suffit à lui seul pour caractériser complètement un feu. La parfaite compréhension du

comportement d'un incendie nécessite de connaître la puissance du front de feu et les températures (Trabaud, 1989).

6.1.3. Intensité du feu et sévérité des dommages

En écologie du feu, les dégâts immédiats générés par le passage du feu sur les écosystèmes sont réunis sous le terme *sévérité*, de l'anglais *fire severity* (Keeney, 2009).

Cette notion répond au besoin de décrire la façon dont l'intensité du feu affecte l'environnement. Il existe des confusions entre sévérité et intensité, les mesures de sévérité sont généralement prises après incendie, et servent à la postdiction de l'intensité du feu. De fait, la terminologie s'est élargie, les termes « *continuum de changements post-incendie* » (Jain *et al.*, 2004), « *caractéristiques actives du feu* » ou « *effets post-incendie* » (Lentile *et al.*, 2006), ont été introduits. La quantité de combustible consommé, les dégâts à l'écorce, le roussissement foliaire ou la mortalité des arbres font partie de la sévérité du feu. Définir une échelle de sévérité revient à définir une échelle d'endommagement, « indépendante » de la magnitude (intensité du phénomène), puisqu'elle se base uniquement sur l'observation des dégâts.

La plupart des études sur la sévérité du feu se basent sur la combustion de la matière organique au-dessus du sol ou dans le sol (perte en litière, humus, couleur des cendres) (Wells *et al.*, 1979 ; Stronach et McNaughton, 1989 ; Neary *et al.*, 1999 ; Ice *et al.*, 2004). L'idée est de mesurer la quantité de combustible consommé par le feu, afin d'estimer la chaleur émise par unité de surface (Riggan *et al.*, 1994). Les indicateurs utilisés sont divers : la hauteur de roussissement de la canopée, la hauteur de carbonisation de l'écorce, la taille et la composition de la végétation non brûlée, l'épaisseur de l'écorce perdue, la hauteur des feuilles carbonisées, le diamètre minimum des branches restantes (Tolhurst, 1995 ; Keeley, 1998 ; Waldrop et Brose, 1999 ; Morrison, 2002 ; Schwilk *et al.*, 2006).

Ces différentes caractéristiques varient en fonction des types de feu. Une fois éclos, un feu peut prendre différentes formes, se produisant séparément ou simultanément sur une même zone :

- **Les feux de sol** : ils brûlent la matière organique contenue dans la litière, l'humus ou les tourbières. Leur vitesse de propagation est faible ;
- **Les feux de surface** : ils brûlent les strates basses de la végétation, c'est-à-dire la partie supérieure de la litière, la strate herbacée et les ligneux bas. Ils se propagent en général par rayonnement et affectent la garrigue ou les landes ;
- **Les feux de cimes** : ils brûlent la partie supérieure des arbres et forment une couronne de feu. Ils libèrent en général de grandes quantités d'énergie et leur vitesse de propagation est très élevée. Ils sont d'autant plus intenses et difficiles à contrôler que le vent est fort et le combustible sec.

Néanmoins, pour les forêts, l'estimation post-incendie de l'intensité du feu a rarement été étudiée. La plupart des études sont réalisées en laboratoire (Santoni *et al.*, 2010) ou lors de brûlages dirigés (Keeley et Mc Ginnis, 2007 ; Brose, 2010). À l'occasion de brûlages dirigés, des expérimentations ont été réalisées et permettent de mettre en relation certains paramètres d'intensité du feu tels que la vitesse de propagation et les endommagements mesurés sur la végétation (Trabaud, 1989). Les effets d'une intensité définie selon quatre niveaux ont été mesurés sur des peuplements de *Pinus pungens* aux USA (Waldrop et Brose, 1999). Des mises en relation entre vitesse de propagation et pourcentage du couvert végétal

mort (Carrega et Napoli, 1998), entre puissance et endommagement des peuplements (Trabaud, 1989) en Europe sub-méditerranéenne, ont également été réalisées.

En 2002, Lampin *et al.* (2002) constataient qu'aucune échelle de mesure d'intensité des incendies de forêt n'avait été élaborée. Les auteurs dressent un panorama des rares échelles s'en rapprochant : les échelles de risque d'incendie, opérationnelles pour la prévention et la lutte contre les feux de forêts (Brown et Davis, 1973 ; Bovio, 1993). Ce type d'échelle est destiné à améliorer l'adéquation entre l'intensité du phénomène et les moyens d'intervention (Brown et Davis, 1973 ; Bovio, 1993). Des seuils y sont définis pour une intensité, exprimée en kW/m, assimilée à la puissance linéique du front de flamme calculée de façon théorique. Les classifications existantes, en matière d'intensité, ont donc été établies en fonction de la capacité à mener les actions de lutte (Hough et Albini, 1978 ; Hirsh et Martell, 1996). Elles distinguent six niveaux d'intensité (NEI) associés au critère d'efficacité de la lutte (Tab. 78).

Niveaux	Intensité du front de feu (FLI)	Capacité de lutte
Très Faible	< 350 kW/m	Extinction du feu
Faible	350 – 1700 kW/m	Lutte au sol facile
Moyen	1 700 – 3 500 kW/m	Mobilisation importante en hommes et équipements
Fort	3 500 – 7 000 kW/m	Seuil des actions terrestres
Très Fort	> 7 000 kW/m	Feu de cimes – lutte au sol impossible
Extrême	> 10 000 kW/m	

Tab. 78 : Niveaux d'intensité du feu selon la classification générale associée à la capacité de lutte (Hough et Albini, 1978 ; Hirsh et Martell, 1996)

Sur la base de ce bilan, Lampin *et al.* (2002) ont élaboré un prototype d'échelle d'intensité pour les incendies de forêt (Tab. 79). Cette échelle est conçue de manière à qualifier *a posteriori* l'intensité de tout événement en croisant des paramètres physiques du feu avec la nature des dommages causés.

La classification *a posteriori* de tout phénomène incendie de forêt survenant sur le territoire passe ainsi par la mesure physique intrinsèque du phénomène et/ou de l'évaluation de son impact endommageant sur des types d'enjeux standards (espace naturel, population, habitations résidentielles et infrastructures humaines). Cette échelle d'intensité à une vocation de constat *a posteriori*, et à ce titre ne présente aucun caractère prévisionnel.

En ce qui concerne les traces laissées par le feu au niveau des habitations résidentielles, ce que nous appelons la sévérité anthropique des dommages, il n'existe à notre connaissance aucune étude qui tente de les relier à l'intensité de l'incendie. Dans la suite de ce chapitre, nous approcherons l'intensité du feu par le biais de la modélisation du phénomène. Les outils de simulation de la propagation du feu seront présentés dans la section suivante. Ils utilisent des modèles de combustibles pouvant fournir par simulation les paramètres physiques servant à quantifier l'intensité d'un incendie.

À partir de l'intensité simulée, nous analyserons les caractéristiques physiques de l'incendie la traduisant et nous étudierons le lien que ces dernières entretiennent avec la sévérité des dommages perpétrés aux habitations. De cette manière, nous proposons une première tentative de validation de l'échelle d'intensité. Enfin, en orientant le curseur sur l'indice global de vulnérabilité, évalué à dire d'experts, nous souhaitons vérifier la cohérence du triptyque formé : « Intensité simulée – Vulnérabilité à dire d'expert – Sévérité des dommages observés ».

Niveau (NEI)	Intensité de l'incendie	Sévérité de l'incendie	
1	Très Faible	<p>$V < 400 \text{ m.h}^{-1}$ $I < 350 \text{ kW.m}^{-1}$ Fumées : blanche Pas de sautes de feu significatives Surfaces menacées <10 ha</p>	<p>Population : calme Bâtiments : dégâts minorés Espaces naturels : pierres calcaires blanches, animaux indemnes, subsistance de branches vertes et sous-bois partiellement endommagé</p>
2	Faible	<p>$400 < V < 800 \text{ m.h}^{-1}$ $350 < I < 1\,700 \text{ kW.m}^{-1}$ Fumées : blanche et grise Sautes de feu possibles : 20 m Surface menacée : 10-100 ha</p>	<p>Population : calme Bâtiments : dégâts minorés Espaces naturels : pierres calcaires légèrement noircies, animaux indemnes, houppiers endommagés, la plupart des buissons détruits, branches basses endommagées, blessures aux troncs</p>
3	Moyen	<p>$800 < V < 1\,200 \text{ m.h}^{-1}$ $1\,700 < I < 3\,500 \text{ kW.m}^{-1}$ Fumées : grise à base foncée Sautes de feu possibles : 100 m Surfaces menacées : 100-500 ha</p>	<p>Population : inquiétude Bâtiments : dégâts minorés, volets en bois brûlés, gouttières en PVC fondues Infrastructures : poteaux électriques en bois endommagés, visibilité réduite sur les voies de circulation Espaces naturels : pierres calcaires noircies, animaux indemnes, troncs et cimes des arbres endommagés, bois d'œuvre dégradé</p>
4	Fort	<p>$1\,200 < V < 1\,800 \text{ m.h}^{-1}$ $3\,500 < I < 7\,000 \text{ kW.m}^{-1}$ Fumées : rousse et noire Sautes de feu possibles : 300-500 m Surface menacée : 500-1 000 ha</p>	<p>Population : panique, non respect des consignes de sécurité Bâtiments : auto-inflammation des volets, gouttières en PVC fondues, propagation du feu dans les bâtiments Infrastructures : poteaux électriques en bois endommagés (métal fondu), visibilité réduite sur les voies de circulation Espaces naturels : pierres calcaires fendues, cadavres d'animaux, cimes toutes brûlées, tiges des buissons consommées, sol minéral exposé</p>
5	Très Fort	<p>$V > 1\,800 \text{ m.h}^{-1}$ $I > 7\,000 \text{ kW.m}^{-1}$ Fumées : noire et moutonnante Sautes de feu possibles : > 500 m Surface menacée : 1 000-10 000 ha</p>	<p>Population : panique, évacuations « sauvages » Bâtiments : auto-inflammation des volets, gouttières en PVC fondues, propagation du feu dans les bâtiments Infrastructures : poteaux électriques en bois calcinés (métal fondu), toute circulation au sol est impossible Espaces naturels : pierres calcaires éclatées, cadavres d'animaux, arbres totalement calcinés, destruction des peuplements, terrains érodables, tous les feuillages sont brûlés</p>
6	Exceptionnel	<p>$I > 10\,000 \text{ kW.m}^{-1}$ Surface menacée : > 10 000 ha</p>	<p>Population : panique, évacuations « sauvages » Bâtiments : dégâts, auto-inflammation des volets, gouttières en PVC fondues, propagation du feu dans les bâtiments Infrastructures : poteaux électriques en bois calcinés (métal fondu), toute circulation au sol est impossible Espaces naturels : pierres calcaires éclatées, cadavres d'animaux, arbres totalement calcinés, destruction des peuplements, terrains érodables, tous les feuillages sont brûlés</p>

Tab. 79 : Échelle d'intensité pour les incendies de forêt (Lampin *et al.*, 2002)

6.2. La modélisation du phénomène feu de forêt

Comprendre et quantifier les processus d'éclosion et de propagation des incendies est essentiel à une bonne gestion des socio-écosystèmes tels que les interfaces habitat-forêt. Les principaux paramètres (l'intensité du front de flammes et sa vitesse de propagation) doivent être estimés avec précision. L'intensité du feu est importante, elle conditionne la sévérité des dommages engendrés sur la végétation et les installations humaines, et, est elle-même conditionnée par la susceptibilité du milieu. La vitesse de propagation renseigne sur le temps de résidence des flammes, donc sur la durée d'exposition aux températures extrêmes (Whelan, 1995). De nombreux facteurs influencent le comportement d'un incendie, tels que la teneur en eau de la végétation, la charge en combustible, la vitesse du vent, l'humidité relative, la pente, etc. W.T. Fons a été le premier à tenter de décrire la propagation du feu à l'aide d'un modèle mathématique (Fons, 1946). La recherche sur le phénomène incendie de forêt ne s'articule pas seulement autour des approches mathématiques, mais aussi dans la mise en œuvre de modèles pour la simulation des feux.

6.2.1. Typologie des modèles de feu

La démarche de modélisation se décompose en trois étapes (Pavé, 1994, 1997) : l'expérimentation, la modélisation et la validation. L'expérimentation consiste à provoquer un phénomène pour l'étudier (en laboratoire ou en milieu naturel). Il existe trois grandes démarches pour l'élaboration d'un modèle de propagation de feu (Dupuy, 1997). Elles ont été décrites notamment par Van Wagner (1985), Catchpole et De Mestre (1986) et Weber (1991) :

- **La modélisation empirique** : elle repose à la fois sur l'observation du phénomène et sur les mécanismes qui le composent (Van Wagner, 1985). Les modèles empiriques s'appuient uniquement sur les résultats de feux expérimentaux ou d'observations d'incendies et établissent des corrélations entre les caractéristiques de la propagation du feu et les variables environnementales (McArthur, 1966 ; Trabaud, 1979 ; Noble *et al.*, 1980 ; Cheney *et al.*, 1998). La qualité de la modélisation dépend étroitement des paramètres et du nombre d'expérimentations réalisées. Les modèles sont évolutifs et sont utilisés afin de prédire partiellement le phénomène. Cependant, ce type de modèle n'explique pas la relation entre les paramètres et le comportement du feu, et ne sont pas forcément reproductibles, en dehors des conditions sur lesquelles ils sont établis.
- **La modélisation physique** : elle est principalement basée sur les expérimentations effectuées en laboratoire. Son objectif est d'expliquer le phénomène par certains paramètres (Catchpole et De Mestre, 1986). Les paramètres sont alors contrôlés en laboratoire, de manière à déterminer les lois physiques régissant le phénomène. Ce type de modélisation fait appel à deux disciplines : la chimie et la physique, pour expliquer les relations entre les paramètres. Le feu est alors considéré exclusivement sous l'angle physico-chimique, faisant abstraction de sa composante géographique. Ces modèles sont difficilement exploitables dans le cadre de la prévision des incendies et, qui plus est, très consommateurs de ressources. Le modèle FIRETEC en est un représentant (Linn, 1997 ; Pimont, 2008).
- **La modélisation semi-empirique** : cette approche se situe à l'interface des précédentes. 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 intervenants. Les modèles ainsi construits sont aptes à prédire certains aspects du phénomène ou à défaut, à en

interpréter certaines observations. L'un des principaux représentants des modèles semi-empiriques est BEHAVE, le modèle de propagation de Rothermel (1972).

6.2.2. Les simulateurs de feu

La propagation du feu est un phénomène spatial qui dépend de nombreux paramètres. Ces derniers incluent non seulement les conditions météorologiques, mais aussi la morphologie du territoire et la structure de la végétation (composition et arrangement spatial). Au cours des dernières décennies, une large gamme de simulateurs de feu ont vu le jour. Notre propos, dans la présente thèse, n'est pas d'en faire un inventaire complet, mais d'en présenter les principaux, en particulier les simulateurs fondés sur la modélisation empirique et semi-empirique, particulièrement adaptés dans un cadre opérationnel de gestion des incendies de forêt (Johnston *et al.*, 2005).

Il existe deux méthodes pour modéliser la propagation du périmètre d'un incendie de forêt : le périmètre peut être vu comme une courbe continue, ou comme un nombre discret de points (Knight et Coleman, 1993). La deuxième approche est privilégiée par la majorité des simulateurs. Chaque point se développe telle une petite ellipse. Chaque point du périmètre est alors supposé être une source ponctuelle, il possède ses propres caractéristiques (végétation, pente, conditions météorologiques) qui contribuent au développement de l'ellipse. Selon le principe de Huygens, l'enveloppe de ces ellipses décrit le nouveau périmètre (Knight et Coleman, 1993). Un modèle déterministe basé sur le principe de Huygens a été proposé (Anderson *et al.*, 1982).

La plupart des modèles existants sont déterministes, ils sont basés sur les équations de Rothermel (1972) et le principe de Huygens pour simuler la croissance du feu. Ils nécessitent une grande quantité de données spatiales et temporelles pour prédire avec précision la propagation du feu.

Le premier, FARSITE (Finney, 1995), est le simulateur le plus utilisé pour la prédiction de la propagation des feux (Papadopoulos et Pavlidou, 2011). Il est basé sur le modèle de prédiction du comportement de feu BEHAVE (Andrews, 1986), lui-même basé sur le modèle de propagation de Rothermel. FARSITE comprend cinq sous-modèles : feu de surface (Rothermel, 1972), transition en feu de cimes (Van Wagner, 1977), accélération du feu, teneur en eau de la végétation et propagation par sautes de feu. Tous ces calculs de comportement du feu s'appliquent sur chaque point formant le périmètre et conditionnent la propagation locale selon le principe de Huygens (Anderson *et al.*, 1982 ; Finney, 1995). La forme des ellipses est déterminée localement par la combinaison additive de la vitesse du vent et de la pente. Les données spatiales sur la végétation et la topographie, nécessaires pour ces calculs, sont obtenues à partir des SIG. Les données météo sont implémentées par pas de temps et concernent la vitesse du vent, sa direction, la température, l'humidité relative et la couverture nuageuse.

Le front de flammes se propage sous la forme d'un polygone par pas de temps successifs (Anderson *et al.*, 1982). Afin d'obtenir des prévisions réalistes, FARSITE nécessite des couches de données cohérentes et précises. La complexité du phénomène induit certaines limites de validité. Les simulations de FARSITE sont de moins en moins précises, à mesure que le feu s'étend. Il y a un effet cumulatif des erreurs (Papadopoulos et Pavlidou, 2011). La précision augmente quand des données à haute résolution spatiale et temporelle sont utilisées. La variabilité des phénomènes climatiques (vitesse et direction du vent) est une cause fréquente d'imprécisions et d'erreurs. Dans ces conditions, de nombreux simulateurs produisent des résultats ne correspondant pas à la propagation du feu observé. Le modèle de Rothermel est

capable de reproduire seulement un feu de surface, la végétation est alors supposée uniforme et aléatoirement distribuée sur chaque maille du territoire. Les sorties du modèle renseignent sur la vitesse de propagation, l'intensité par mètre linéaire de front de flammes, la géométrie des flammes, la transition en feu de cimes et la direction de propagation.

Le second, PHOENIX Rapidfire (Tolhurst *et al.*, 2008), est plus récent, mais son utilisation commence à s'intensifier en Australie. PHOENIX Rapidfire est principalement utilisé pour l'aide à la prévision de l'évolution des incendies, la gestion du risque et les études d'impact sur les habitations.

PHOENIX est un simulateur dynamique et empirique de caractérisation du comportement des incendies. Contrairement à FARSITE, où la cinétique du feu est calculée sous l'hypothèse de stationnarité des conditions, PHOENIX fonctionne dans un environnement dynamique où il peut répondre aux changements des conditions de l'incendie (Tolhurst *et al.*, 2008), en plus des changements de la végétation, des conditions météorologiques et topographiques pour tous les stades de développement du feu sur un territoire. Les auteurs donnent deux exemples illustrant la nature dynamique du simulateur :

- la prise en compte des sautes de feu en avant du front de flamme augmente la vitesse de propagation de l'incendie ;
- les différentes strates de végétation sont incluses ou exclues des calculs de comportement du feu, à mesure que l'intensité du feu varie aux abords du périmètre du feu et dans le temps.

Le comportement du feu dans PHOENIX est basé sur une généralisation du modèle empirique de propagation développée par le CSIRO (Cheney et Sullivan, 1997 ; Cheney *et al.*, 1998) et une version modifiée du modèle empirique McArthur Mk5 (McArthur, 1967 ; Noble *et al.*, 1980). Les modifications ont été apportées dans le but de traduire la nature dynamique des interactions entre le feu et son environnement (Tolhurst *et al.*, 2008). Ces deux modèles sont utilisés pour calculer la vitesse de propagation, la géométrie des flammes et l'intensité du front de feu. L'algorithme de propagation implémenté dans PHOENIX, repose sur le principe de Huygens (Knight et Coleman, 1993).

PHOENIX simule les feux sur un ensemble de mailles carrées de taille uniforme. Chaque cellule possède de nombreux attributs (31) qui sont utilisés comme entrées, mais restent visualisables et disponibles en sortie de la simulation (Fig. 92). Ces attributs sont stockés dans une base de données géoréférencée (MS-Access). La taille de chaque cellule est spécifiée par l'utilisateur lors de la création de la grille, allant jusqu'à 5 m pour les analyses très détaillées sur une zone de faible emprise spatiale. Toutefois, ce genre d'analyse est rare. La taille généralement utilisée à des fins opérationnelles est de 180 m, mais une taille de grille de 100 m ou 200 m est généralement jugée suffisante pour la plupart des fins opérationnelles.

Parallèlement, PHOENIX intègre un modèle simulant l'accumulation du combustible en fonction du temps écoulé depuis le dernier feu, un modèle traduisant les effets de la topographie et de la végétation sur l'écoulement du vent, sur la base du programme *Wind Ninja* (Forthofer, 2007), et un modèle simulant le transport des brandons et leur distribution spatiale (Saeedian *et al.*, 2010).

Les sorties de PHOENIX caractérisent le feu dans chaque cellule et renseignent sur l'intensité par mètre linéaire de front de flammes, la géométrie de flamme, la densité de brandons, la direction d'impact. La particularité de PHOENIX est de proposer l'estimation de la puissance du cône de convection pilotant le transport des brandons. Il tient compte de la synergie entre les différents fronts de feu (profondeur, puissance), qui contribuent à

augmenter localement les vents générés par le feu (le feu s'auto-alimente), c'est-à-dire la force convective. Des études menées sur les feux de Kilmore, Churchill et Murrindindi (*Black Saturday*), de 2009, démontrent une forte corrélation entre la force convective et la perte des maisons (Tolhurst *et al.*, 2012).

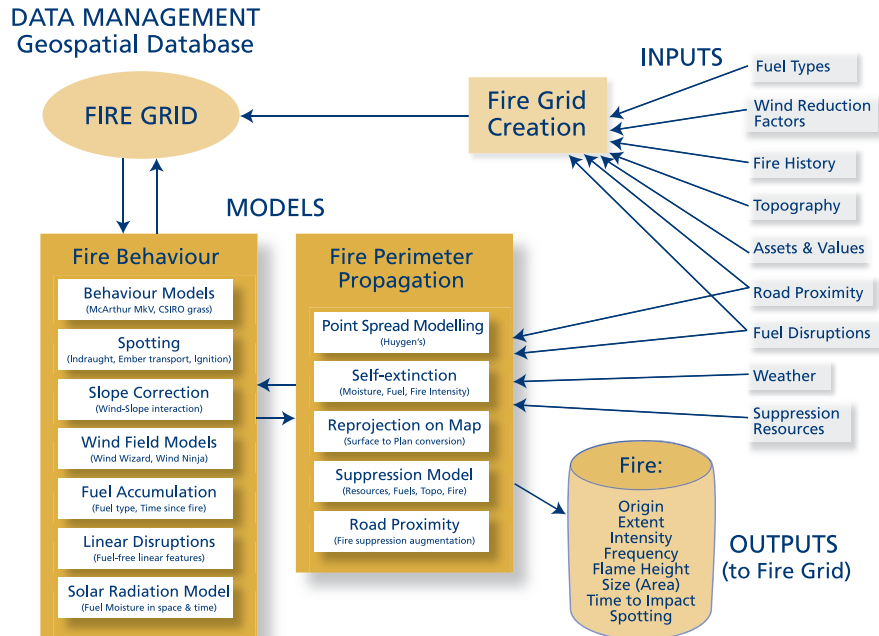


Fig. 92 : Schéma représentant les entrées, les procédures de traitements et les sorties du simulateur PHOENIX Rapidfire (Tolhurst *et al.*, 2008)

Dans cette thèse, nous avons privilégié l'aspect dynamique de PHOENIX qui améliore le réalisme de la simulation du comportement de l'incendie. De plus, les connaissances sur les densités de brandons par mailles et la force convective qu'il amène nous semblent pertinentes pour l'étude de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt. Les projections de brandons permettent à l'incendie de franchir les obstacles (crêtes, murs de protection...), et leur accumulation au plus proche des habitations est une source d'endommagement significative (Cohen, 1995 ; Leonard et Blanchi, 2006 ; Blanchi et Leonard, 2008 ; Maranghides et Mell, 2009).

Bien entendu, un travail de calibration a été nécessaire pour transposer son utilisation à la problématique française. En effet, le simulateur est adapté aux écosystèmes et aux feux australiens, qui diffèrent grandement des cas français. Dans la prochaine section, nous allons présenter et évaluer le travail effectué pour la reconstruction de l'incendie de Cavaillon à l'aide du simulateur PHOENIX.

6.3. Reconstruction de l'incendie de Cavaillon à l'aide du simulateur PHOENIX

La complexité des interfaces habitat-forêt, avec leur végétation hétérogène et discontinue, a limité le développement des modèles de feu capables de prédire le comportement des incendies dans les secteurs où se mêlent habitations résidentielles, végétation ornementale et végétation forestière. Les modèles de feu opérationnels, aux temps de calcul rapides, considèrent généralement le paysage à petite échelle (typiquement supérieure à 100 m² de résolution des données). La faible résolution des données n'est donc pas adaptée à la problématique des interfaces habitat-forêt, qui nécessite des résolutions beaucoup plus

hautes pour capturer l'hétérogénéité du milieu. Des modèles sont en cours de validation, afin d'être implémentés au simulateur WFDS⁸ (*Wildland-urban Fire Dynamics Simulator*) (Mell *et al.*, 2007 ; Mell *et al.*, 2009 ; Menage *et al.*, 2012 ; Castle *et al.*, 2013). Cependant, ces modèles sont très complexes. Ils nécessitent des détails importants pour les données d'entrée, et sont très consommateurs en puissance de calcul et en temps (Mell *et al.*, 2010). La demande est aux modèles en mesure de fournir des prévisions sur la propagation du feu et son comportement dans les interfaces habitat-forêt, à des échelles de temps et aux besoins en ressources adaptés sur le plan opérationnel (Rehm et Mell, 2009). Toutefois, nous sommes face à une impasse : les modèles conçus pour la simulation d'incendie à haute résolution, appropriée pour la problématique des interfaces nécessitent des temps de calcul très longs, et les modèles aux temps de calcul courts sont généralement orientés vers la problématique des incendies de grandes surfaces, à faible résolution.

Dans une perspective d'explication des dommages potentiels (nature et sévérité) engendrés par un incendie de forêt en interface habitat-forêt, nous proposons de modéliser l'incendie de Cavaillon du 21 Juillet 2012 grâce au simulateur australien PHOENIX Rapidfire. Notre objectif est de relier les dommages observés à des différences d'exposition aux mécanismes d'endommagement que sont le rayonnement thermique et les projections de brandons.

Dans cette section, nous évaluerons le potentiel du modèle à caractériser le comportement du feu. Nos entretiens avec le personnel ayant lutté contre cet incendie indiquent que le transport de particules incandescentes était un mécanisme de propagation important, qui a facilité sa progression à travers la végétation discontinue (cf. Chapitre 5). PHOENIX intègre un module déterministe de sautes de feu, cependant, il est calibré pour la propagation d'un incendie à faible résolution. Par conséquent, le travail de calibration s'est déroulé en trois étapes :

- l'harmonisation des types de combustible (*fuel types*) méditerranéens avec la classification australienne équivalente ;
- l'ajustement du module de sautes de feu aux observations ;
- l'ajustement du modèle pour traiter les entrées de haute résolution.

6.3.1. Les intrants du modèle PHOENIX

Afin de reconstituer l'incendie de Cavaillon, PHOENIX requiert les données sur les types de combustibles, la topographie et les conditions météorologiques.

a. Typologie de la végétation

La végétation de l'interface de Cavaillon est typique de la Provence calcaire du sud-est français. L'interface étudiée comprend des peuplements très proches de ceux rencontrés dans le Luberon : taillis de chêne verts (*Quercus ilex*), forêt de pins d'Alep (*Pinus halepensis*) dans les vallées abritées, garrigues hautes à chênes verts, garrigues basses à chêne kermès mélangées au romarin (*Rosmarinus officinalis*), au ciste cotonneux (*Cistus albidus*) et à des pelouses de brachypodes (*Brachypodium retusum*).

⁸ Ce simulateur est développé par le *U.S. Forest Service* (USFS) et le *National Institute for Standards and Technology* (NIST). De plus amples renseignements sont disponibles sur le site internet suivant : <http://www.fs.fed.us/pnw/fera/research/wfds/>

PHOENIX traite le combustible comme des classes spatialisées provenant des types de peuplements. Chaque type possède une table associée qui renseigne leurs caractéristiques selon la charge en combustible des différentes strates, tel que cela a été défini dans la typologie australienne (Hines *et al.*, 2010). En France, la classification employée est différente. Il a donc été nécessaire de mettre au point un système de conversion.

L'interprétation de orthophotographies aériennes à très haute résolution (20 cm, BD ORTHO® de l'IGN) antérieures à l'incendie (2010), couplées à des enquêtes de terrain post-incendie, ont été utilisées pour cartographier les caractéristiques de la végétation (taux de recouvrement, hauteur par strates, espèces principales). La cartographie a été réalisée *in situ*, par le biais d'un ordinateur portable équipé d'un GPS et du logiciel ArcGIS®10. Le milieu végétal a été découpé en polygones, chacun représentant un type de peuplement. La typologie de la végétation combustible est basée sur les neuf types de peuplements forestiers de la Provence calcaire (cf. § 2.1.1.c) déterminée lors de travaux antérieurs (Lampin *et al.*, 2004 ; Jappiot *et al.*, 2009). La carte au format *vecteur* a par la suite été convertie au format *raster*. Afin de tenir compte du débroussaillage, un peuplement nouveau, « haut et fermé sans sous-étage » (Ad), a été dérivé à partir du type « haut et fermé » (A). Deux types supplémentaires, caractérisant les haies ornementales (K) et la strate des herbacées (J), ont été ajoutées à partir des données de l'enquête. Au total, douze types de végétation ont été utilisés pour décrire la zone affectée (Annexe 8).

La végétation combustible a été stratifiée en trois classes de hauteur (Tab. 80) : inférieure à 1 m, comprise entre 1 m et 3 m, et supérieure à 3 m. Pour chaque espèce, les valeurs de densité apparente (BD, *bulk density*) sont issues de la littérature (Lampin *et al.*, 2004 ; Ganteaume *et al.*, 2007 ; Jappiot *et al.*, 2009 ; Ganteaume *et al.*, 2013) et ont servi au calcul de la charge en combustible (*Fuel Load*, FL en t/ha) de chaque strate, suivant l'équation :

$$FL = \frac{CF * (H - CBH) * BD}{10}$$

où CF correspond au taux de recouvrement de la végétation, H à la hauteur (m), CBH à la hauteur de la base des couronnes (m), et BD la densité apparente (kg/m³).

Code	Type de peuplement	Charge < 1m	Charge 1-3m	Charge > 3m	Charge totale
A	Haut et fermé	5,5	0-4	[7,3-8,4]	[13,9-17,9]
Ad	Haut et fermé sans sous étage	[0-0,6]	0-3	[9-9,6]	[9,6-12,6]
B	Bas et fermé	4,7	8,6	1,3	14,6
C	Garrigues hautes	[0,4-1]	[2,3-11,3]	0	[3-12]
D	Garrigues basses	8,7	4	0	12,7
E	Ouvert sans sous étage	1,4	2,3	4,5	8,2
F	Très bas et fermé	7,5	13,9	4,5	29,5
G	Dense de hauteur moyenne	3,8	7,8	1,4	13
H	Haut et clairsemé	0,3	4,6	3,1	8
I	Haut et clairsemé à sous étage dense	9,1	6,3	6,1	21,4
J	Herbacées	1,1	0	0	1,1
K	Haies	[7,1-132,9]	[0-664,7]	[0-398,8]	[7,6-797,6]

Tab. 80 : Charge en combustible en t/ha des différents types de peuplement. Les intervalles présentent les charges minimales et maximales.

PHOENIX incorpore dynamiquement le combustible en se basant sur les hauteurs de flammes simulées. En raison de la hauteur de la végétation basse et des hauteurs de flammes observées (> 2 m), il a été supposé que les deux premières strates (1 m et 1-3 m) seraient disponibles à la combustion. Bien que le feu se soit conduit en feu de cimes à la remontée du premier vallon (zone hors interface habitat-forêt) en direction des habitations CAV_1 et CAV_2, le comportement majoritaire au sein de l'interface habitat-forêt a été celui d'un feu de

surface. Pour cette raison, la strate supérieure à 3 m, considérée par PHOENIX comme un combustible de cimes, n'a pas été incluse dans les calculs de propagation.

La modélisation des sautes de feu se base sur des estimations de la masse d'écorce d'eucalyptus (t/ha) disponible au transport. Typiquement australienne, cette approche a dû être adaptée à la situation cavaillonnaise. En effet, même si en France ce phénomène est sans commune mesure avec son homologue australien, il a joué un rôle majeur lors de l'incendie de Cavaillon. Trois phases le régissent : la production de brandons provenant de la végétation en combustion, puis leur transport dans le cône de convection, et enfin, l'éclosion potentielle d'un nouveau foyer suite à leur accumulation. La première phase a rarement été étudiée (Manzello *et al.*, 2007). En outre, peu de données quantitatives existent en ce qui concerne la taille des brandons ou leur masse produite lors d'un incendie (Manzello, 2007). Des études récentes (Ganteaume *et al.*, 2011 ; Manzello *et al.*, 2007) identifient les cônes des pins, les écailles de l'écorce, les glands, les cônes globuleux, les feuilles et aiguilles des arbres comme autant de sources potentielles favorables aux sautes de courtes distances. Celles-ci sont de tailles compatibles avec la classe 10hr⁹ (Anderson, 1982) qui représente la masse du combustible léger, mort, ayant un diamètre compris entre 0,64 et 2,54 cm. À partir des travaux de C. Lampin *et al.* (2004), où la proportion moyenne de la masse combustible 10hr pour des types de peuplements similaires a été mesurée, nous avons calibré proportionnellement les nôtres, de manière à déterminer la masse de brandons disponible au transport. Cependant, cette conversion n'a pas été vérifiée de façon indépendante par des mesures sur le terrain.

b. Conditions météorologiques

Les données relatives aux conditions météorologiques (Tab. 81) proviennent de la station située à environ 2,5 km à l'est du point d'éclosion (43°50'N, 5°03'E), à une altitude de 75 m. Compte tenu de la faible différence d'altitude entre la station, l'emplacement du point d'éclosion (69 m) et l'altitude maximale atteinte par le feu (182 m), il a été supposé que les différences de température et d'humidité n'étaient pas significatives. Ainsi aucun ajustement n'a été réalisé. Le simulateur gère les conditions météorologiques par pas de temps horaire.

Heure	Température(°C)	Vitesse du vent (km/h)	Direction du vent (°)	Humidité relative (%)
08:00	21,1	39,6	310	49
09:00	22,1	46,8	310	46
10:00	23,4	39,24	310	41
11:00	24	40,68	310	34
12:00	25	42,48	310	30
13:00	25,5	44,28	310	30
14:00	25,6	45,36	310	28
15:00	25,6	46,8	310	28
16:00	25,3	33,48	310	29
17:00	24,9	43,56	310	31
18:00	23,8	45,72	310	32
19:00	22,6	45,72	310	34
20:00	21,9	43,56	310	37

Tab. 81 : Conditions météorologiques du jour de l'incendie par pas de temps horaire

⁹ La classe 10hr est un paramètre d'entrée du module de construction des modèles de combustible (*fuel models*) de BEHAVE (Anderson, 1982). Il correspond à la biomasse (t/ha) de combustible mort de 0,64 à 2,54 cm de diamètre. Le temps de réponse (*timelag*) est de 10 heures. Le temps de réponse fait référence au temps de réaction de la végétation aux variations de l'humidité de l'air, soit le temps pris par une particule de combustible mort, pour perdre 63 % de son excédent d'humidité par rapport à l'air.

c. Topographie

La topographie du site affecté par l'incendie est issue du MNT de la BD TOPO® IGN qui possède une résolution de 25 m. À partir du MNT, la carte d'écoulement du vent affecté par la topographie du terrain a été ajustée (vitesse et direction) en utilisant le modèle de conservation de la masse Wind Ninja (Forthofer, 2007) (Fig. 93). Différents paramètres, tels que la pente et l'exposition, sont calculés à la volée par PHOENIX (interpolation bilinéaire).

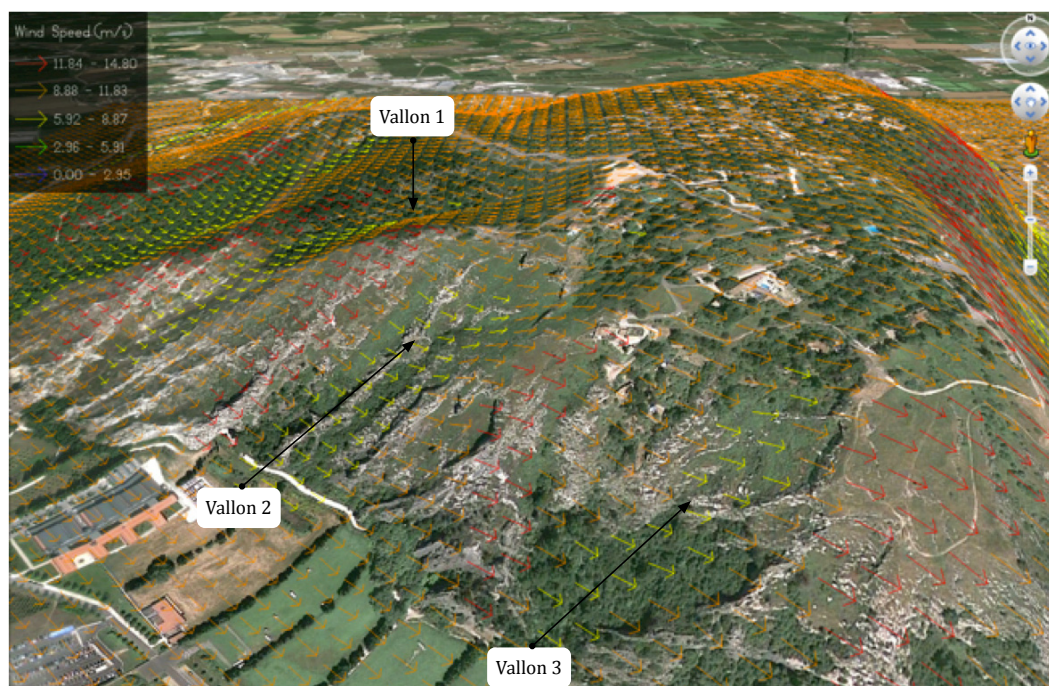


Fig. 93 : Carte des vents locaux présentée sous l'interface graphique Google Earth (version 7.1.2.2041)

6.3.2. *Évaluation de la reconstruction de l'incendie*

Le sous-modèle *Spotfire* de PHOENIX est conçu pour simuler les sautes de feu australiennes parcourant de longues distances, de 200 m à 25 km. Cependant, les distances observées pour le cas à l'étude étaient de l'ordre de 10 à 50 m. Les paramètres du sous-modèle ont donc été calibrés manuellement pour fournir des sautes comparables à celles observées. L'algorithme dépend de l'échelle, les modifications ont donc nécessité un ajustement de la résolution de la grille d'allumage de 200 m à 5 m et du seuil d'ignition 1 à 0,01 brandons/m². Cette calibration a permis de reproduire les sautes observées lors de l'incendie.

Les données PHOENIX sont généralement standardisées à des résolutions de plus de 100 m, chaque cellule contenant la moyenne pondérée de l'ensemble des données d'entrée, indépendamment de l'échelle. Pour analyser précisément l'exposition des habitations résidentielles en interface, il est nécessaire de travailler à des résolutions plus élevées. Les calculs de propagation sont indépendants de l'échelle, cependant le module interne est basé sur le modèle McArthur (McArthur, 1967), qui n'a pas été validé à fines échelles. Pour évaluer l'influence de la résolution des données sur les performances prédictives, PHOENIX a été utilisé pour simuler l'incendie à des résolutions de 5, 10, 15 et 20 m.

La comparaison des périmètres de feu fait appel à l'analyse morphométrique, et doit être spatialement explicite. La recherche sur le sujet reste limitée. La méthode couramment

employée est la comparaison graphique des limites simulées aux limites correspondantes au feu observé (Feunekes, 1991 ; Berjak et Hearne, 2002 ; Trunfio, 2004 ; Opperman *et al.*, 2006). Cette approche est visuelle, rarement objective, et ne prend en compte que la superficie recouverte par les deux emprises, sans évaluation quantitative des erreurs de modélisation.

F.M. Fujioka (2002) fût le premier à élaborer une méthode d'analyse des erreurs de simulation. À partir d'un système de coordonnées polaires, il propose de mesurer l'erreur par la différence entre les radiales des incendies réels et simulés. Cette mesure est spatialement explicite mais ne quantifie pas l'erreur constatée en termes de différence des surfaces brûlées. Certains auteurs privilégient la mesure des erreurs par la superficie et étudient la variation de l'erreur en fonction d'un facteur donné (Cui et Perera, 2008). Ces chercheurs proposent un nouvel indice, *SDI* (*Shape Deviation Index*), capable de mesurer les erreurs de modélisation lors des simulations de propagation du feu (Cui et Perrera, 2010). Le *SDI* mesure la différence entre l'aire du périmètre simulé (*S*) et celle du périmètre de référence (*R*), à un temps *t*, suivant l'équation :

$$SDI(t) = \frac{OE(t) + UE(t)}{R(t)}$$

où, *OE* représente la surface surestimée (l'aire de *S* en dehors de *R*), *UE* la surface sous-estimée (l'aire de *R* en dehors de *S*), et *R* la surface totale de référence (Fig. 94).

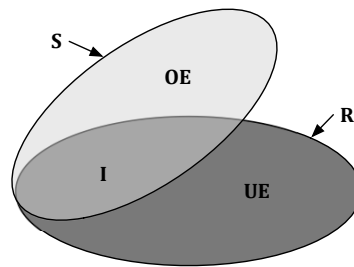


Fig. 94 : Comparaison de l'incendie simulé (*S*) avec celui observé (*R*) par la méthode *SDI* (*I* représente la surface de l'intersection, ou la surface de bonne prédiction) (d'après Cui et Perrera, 2010)

L'inclusion de la surface de référence (*R*), comme dénominateur dans le calcul du *SDI*, le rend asymétrique. Dans l'exemple graphique, comparer *S* à *R* donnera un résultat différent de la comparaison de *R* et *S*. Pourtant, la somme des erreurs de prédiction est la même dans les deux cas, tout comme la surface de bonne prédiction (*I*). Il semble alors préférable de quantifier l'erreur de modélisation par le rapport entre l'aire des erreurs et l'aire des bonnes appréciations. L'indice *ADI* (*Area Difference Index*), dérivé du *SDI* est alors symétrique et proportionnel aux prédictions correctes :

$$ADI(t) = \frac{OE(t) + UE(t)}{I(t)}$$

Tout comme le *SDI*, ce nouvel indice ne possède pas de borne haute, la prédiction se dégrade à mesure que l'*ADI* s'élève. Un *ADI* de 1 signifie que la simulation se trompe autant qu'elle voit juste. Un *ADI* de 0 représente la simulation parfaite. Ainsi, plus la valeur de l'indice est proche de 0, meilleure sera la prédiction.

À partir des documents fournis par le SDIS de Cavillon, nous avons reconstitué les contours de l'incendie, depuis l'heure d'éclosion (13h30) jusqu'à son extinction (19h30), à six instants. L'*ADI* a été calculé à chaque instant *t* donné pour quatre simulations à différentes

résolutions (Tab. 82, Fig. 95). Les cinq premiers périmètres présentent un ADI supérieur à 1 pour l'ensemble des simulations. Les deux plus hautes résolutions (5m et 10m) obtiennent des résultats moins médiocres que les résolutions 20 m et 15 m. Ces erreurs de prédiction sont imputables aux manques de précision des données (périmètres non vérifiables, lutte non prise en compte). Il est à noter que les services de lutte se sont efforcés d'enrayer la propagation du feu jusqu'aux alentours de 18 heures, où les hommes au sol ont commencé à défendre les habitations, le feu ayant été stoppé dans sa progression. Au cours des premières heures, PHOENIX est en avance sur l'incendie, cependant il est en retard sur l'enveloppe observée à 18 h (Fig. 96). On observe une sous-estimation au niveau du flanc gauche de l'incendie, et une surestimation pour le flanc droit.

Heure	ADI (5m)	ADI (10m)	ADI (15m)	ADI (20m)
14:18	1,61	1,62	1,90	1,45
15:00	2,62	2,70	2,62	2,72
15:23	3,79	3,28	3,34	3,53
16:20	1,63	1,53	1,94	1,83
16:53	1,98	1,73	2,78	2,53
18:00	0,74	0,68	0,81	0,84
19:30	0,44	0,38	0,40	0,37

Tab. 82 : Résultats des ADI successifs en fonction de la résolution des simulations

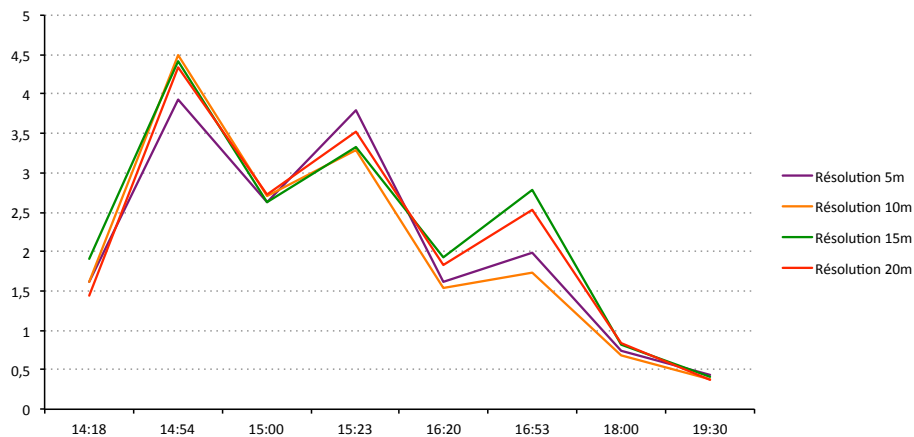


Fig. 95 : Graphe des ADI comparant les emprises spatiales successives des feux simulés à différentes résolutions

L'enveloppe de 18 heures nous sert de référence. Elle présente le même périmètre que l'enveloppe finale, moins 4% d'extension en surface dans le secteur sud-est. La précision des prédictions est raisonnable sur l'ensemble des quatre simulations, avec un ADI moyen de 0,77 pour un écart-type de 0,07. La moins bonne est obtenue par la simulation de résolution 20 m, avec un ADI de 0,84. La meilleure obtient un ADI de 0,68 et correspond à la simulation de résolution 10 m. Toutefois, la variation de la résolution n'entraîne pas d'erreur significative au niveau des prédictions. Par ailleurs, l'ADI sur le périmètre final montre la qualité satisfaisante de l'ensemble des simulations.

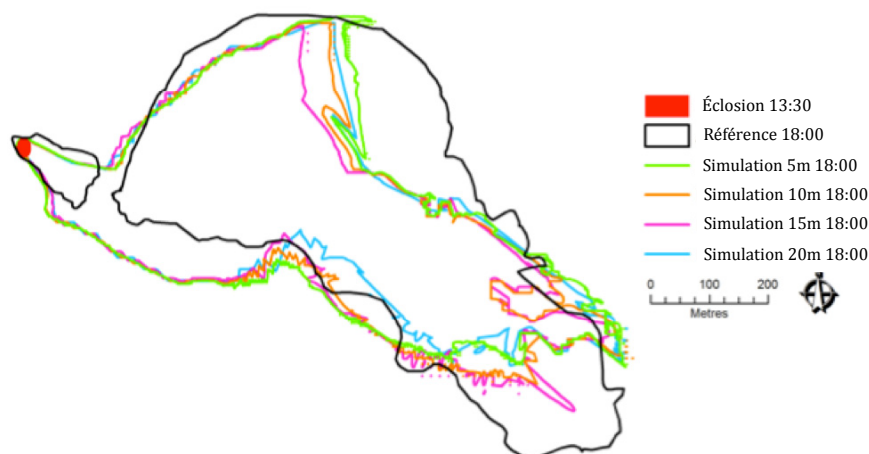


Fig. 96 : Cartographie du périmètre observé à 18 heures et des périmètres simulés (Pugnet *et al.*, 2013)

Suite à la conversion des types de peuplement à des formats adaptés, Phoenix a été en mesure de réaliser des prévisions fiables de la propagation du feu à Cavaillon, validées par l'expertise du chef des opérations de lutte. Cependant la forme du feu n'a pas été parfaitement caractérisée. L'imprécision des entrées du modèle peuvent l'expliquer : la station météorologique a systématiquement enregistré des vents de direction 310° , de 8 heures à 20 heures. Cette constance est certes une caractéristique du mistral, mais peut résulter d'une défaillance de l'équipement d'enregistrement. L'incendie s'est produit sur le versant sud de la colline Saint-Jacques, cependant le vent soufflait du nord-ouest. Par conséquent, le feu, à l'abri de la montagne, était fortement soumis aux interactions du vent avec la topographie. Ces dernières peuvent entraîner des conditions de vent différentes à celles enregistrées. Bien que PHOENIX explique en partie les effets locaux, les calculs sont basés sur la conservation de la masse et ne sont pas en mesure de rendre compte de la turbulence, des déviations ou des phénomènes de canalisation complexes. Les simulations sous-estiment le processus de canalisation au niveau des vallons (Fig. 93), il semble qu'une meilleure prise en compte des effets locaux pourrait améliorer la qualité de l'ajustement.

Alors que de nombreux modèles d'incendie, européens et américains, n'intègrent pas explicitement la progression de l'incendie par sautes, les observations pendant la lutte indiquent qu'elles correspondent à un mécanisme important de propagation. Une fois calibré, PHOENIX a été capable de simuler les projections des brandons permettant au feu de franchir les crêtes, et d'accéder aux vallons où lors de remontées rapides l'incendie générerait de nouvelles sautes. Si ce processus n'avait pas été inclus, la simulation se serait arrêtée à la première ravine que le feu a rencontré après éclosion.

Malgré le fait que PHOENIX génère une prévision raisonnable de l'incendie de Cavaillon, il faut souligner que les fonctions de propagation sous-jacentes utilisées dans le modèle sont basées sur un ajustement empirique de feux expérimentaux qui présentaient une largeur minimale de 50 m et qui étaient supposés brûler à un taux d'équilibre (McArthur, 1967 ; Noble *et al.*, 1980). De plus, les fonctions qui sous-tendent la propagation de l'incendie ont été calibrées pour des forêts d'eucalyptus, les caractéristiques différentes de la végétation méditerranéenne française (structure, teneur en eau et pouvoir calorifique) peuvent être une source d'erreur supplémentaire.

Néanmoins, la simulation réussie de l'incendie de Cavaillon avec PHOENIX Rapidfire, indique que ce modèle possède un potentiel non négligeable pour caractériser le comportement du feu en interface habitat-forêt. Par conséquent, nous baserons le

développement de notre modèle d'exposition sur la sortie de la simulation PHOENIX de résolution 5 m, la plus adaptée à la problématique des feux d'interface.

6.4. Étude de la cohérence entre la vulnérabilité à dires d'experts, la simulation de l'incendie et l'endommagement observé

Au chapitre précédent, deux modèles d'endommagement ont été ajustés à partir de l'analyse multicritère. L'approche multicritère développée repose sur une méthodologie rigoureuse de confrontation des expertises, et permet ainsi d'inscrire les connaissances des experts dans un cadre formel. Cette étape a permis de mettre en évidence la cohérence entre l'indice global de vulnérabilité, estimé à dires d'experts, et l'endommagement observé sur les habitations (occurrence et sévérité) lors de l'incendie de Cavaillon.

L'indice global de vulnérabilité à dires d'experts intègre deux processus de diffusion de la vulnérabilité (cf. §5.3.2) : celle qui s'exerce de l'environnement vers les enjeux (habitation résidentielles), et celle qui s'exerce des enjeux vers l'environnement. Selon les experts du risque incendie de forêt, la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt en général, et des habitations résidentielles en particulier, semble fortement conditionnée par les effets de site (topographie, structure de la végétation), soit la composante « exposition » de la vulnérabilité. Néanmoins, l'indice global de vulnérabilité intègre également les composantes « sensibilité » et « capacité de réponse » dans ses valeurs.

Dans une perspective de spécification du domaine de validité du modèle à dires d'experts, celui-ci est confronté à une deuxième approche fondée sur l'étude du phénomène physique par la simulation en laboratoire virtuel (Fig. 97). Après avoir montré la cohérence entre les éléments « Vulnérabilité à dires d'experts » et « Sévérité des dommages observés » du triptyque à l'étude, il s'agit maintenant d'étudier la pertinence de l'indice global de vulnérabilité par analyse croisée des éléments restants.

Dans un premier temps (§6.4.1), nous nous intéresserons à l'environnement des habitations résidentielles, c'est-à-dire la zone tampon de 100 m autour des habitations. Nous étudierons alors dans quelle mesure la vulnérabilité territoriale, estimée à dires d'expert, est en adéquation avec les caractéristiques physiques de l'incendie, desquelles découle son niveau d'intensité simulé.

Dans un deuxième temps (§6.4.2), la focale sera resserrée sur la zone critique des 30 m autour des habitations, où plusieurs variables calculées à partir de la simulation viendront soutenir la première analyse. L'objectif est alors d'analyser la cohérence entre l'intensité simulée de l'incendie dans la zone critique des habitations, et la sévérité des dommages observés sur les habitations (§6.4.2.a). Puis, nous étudierons la corrélation entre l'indice global de vulnérabilité des habitations et la puissance linéique moyenne du front de flammes dans la zone critique des habitations (§6.4.2.b). Nous proposerons alors une modélisation du niveau d'intensité du feu, dérivé de la puissance linéique moyenne, en fonction de l'indice global de vulnérabilité des habitations.

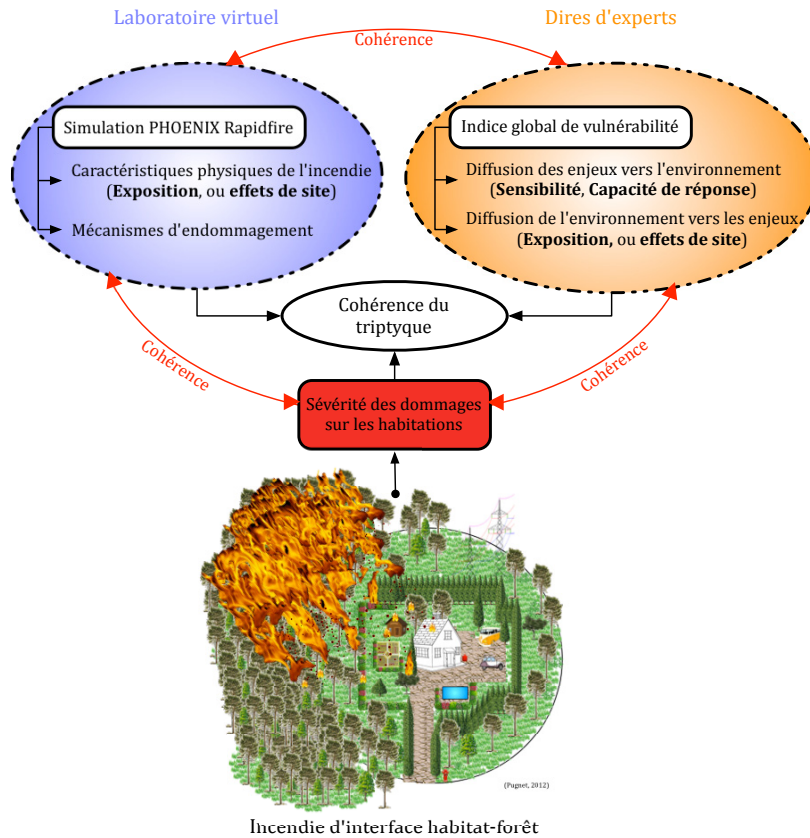


Fig. 97 : Démarche d'objectivation de l'évaluation de la vulnérabilité croisant l'approche multicritère à dire d'experts et l'approche par la simulation en laboratoire virtuel

6.4.1. Analyse de la relation Intensité-Vulnérabilité sur l'ensemble du territoire en interface

a. Caractérisation de l'intensité par la simulation

L'incendie de Cavaillon a été reconstruit à l'aide du simulateur PHOENIX Rapidfire, de manière à reproduire le plus fidèlement possible le comportement du feu. Les résultats de la simulation permettent d'étudier le feu selon son niveau d'intensité, à travers divers paramètres physiques. En accord avec l'échelle d'intensité pour les incendies de forêt (Lampin *et al.*, 2002), la puissance linéique de l'incendie (FLI), ainsi que sa vitesse de propagation (ROS) servent à classer l'intensité d'un incendie selon six niveaux, appelés NEI (niveaux de l'échelle d'intensité) (§6.1.3).

L'incendie présente une vitesse de propagation moyenne de 870 m/h, ce qui correspond au niveau 3 de l'échelle d'intensité. La vitesse maximale simulée atteint 1 290 m/h (NEI=4). En termes d'intensité du front de flammes (*fireline intensity, FLI*), l'incendie est de niveau 4 sur l'échelle d'intensité, avec une intensité simulée moyenne de 4 786,3 kW/m. L'intensité maximale est de 31 275,9 kW/m (NEI=6). La carte proposée (Fig. 98) présente la distribution spatiale du *FLI* brut simulé sur la totalité de l'incendie.

On constate des surestimations de la propagation de l'incendie au niveau du flanc droit et du flanc gauche. Cette tendance est notamment due à l'absence de prise en compte de la lutte menée par les services de sécurité. Cependant, les imprécisions liées aux données d'entrée du modèle (caractéristiques de la végétation, conditions météorologiques et non prise en compte des murs de protection...) peuvent également affecter la qualité de la modélisation.

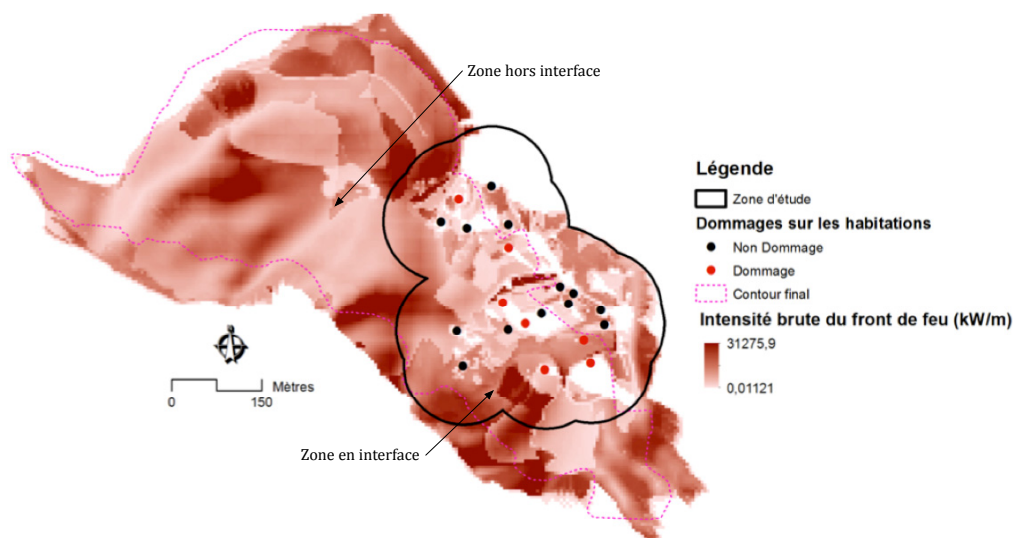


Fig. 98 : Distribution spatiale du FLI brut simulé

La distribution spatiale de l'intensité de feu (FLI) « révèle » la susceptibilité de l'environnement des habitations à influencer les caractéristiques de l'incendie. Cet effet de site correspond à la composante « exposition » de la vulnérabilité. Au niveau de la zone brûlée hors interface habitat-forêt, on observe une intensité moyenne de 6 752 kW/m et une vitesse de propagation moyenne de 1 219 m/h. Hors interface (hors du buffer de 100 m autour des habitations, délimitant l'interface habitat-forêt), l'incendie est de niveau 4 sur l'échelle d'intensité pour les deux paramètres physiques. En revanche, au sein du buffer, on note une diminution de l'intensité moyenne, 4 402,5 kW/m, et de la vitesse de propagation, 958 m/h. En interface, l'incendie reste de niveau 4 en termes d'intensité du front de flamme, et de niveau 3 si l'on s'intéresse à sa vitesse de propagation.

b. Cohérence de la simulation avec le modèle multicritère

En confrontant les résultats de la simulation avec ceux de l'analyse multicritère, on remarque une concordance entre les niveaux d'intensité du phénomène et la vulnérabilité de l'interface habitat-forêt (Tab. 83). À travers l'indice global de vulnérabilité, les trois composantes de la vulnérabilité, « exposition », « sensibilité » et « capacité de réponse », sont considérées. En ce qui concerne l'exposition, les critères relatifs à la topographie (C_2) et à la structure de la végétation (C_3) sont les principaux déterminants des effets de site (susceptibilité à amplifier ou amoindrir le phénomène). Les valeurs du FLI ont été reclassifiées selon les six niveaux d'intensité de l'échelle (NEI) (Lampin *et al.*, 2002). Six échantillons ont donc été formés. Les individus contenus dans chaque échantillon correspondent aux pixels présentant les mêmes valeurs de NEI. Puis les statistiques zonales ont été calculées afin d'extraire l'information sur la vulnérabilité spécifique au critère « Topographie », $V_s(C_2)$, la vulnérabilité spécifique au critère « Structure de la végétation », $V_s(C_3)$, ainsi que sur l'indice global de vulnérabilité (IGV), pour chaque échantillon.

Les valeurs moyennes et médianes des trois variables augmentent avec l'intensité de l'incendie. Ainsi, les résultats de la simulation sont en accord avec l'évaluation de la vulnérabilité à dire d'experts. Afin de tester si les échantillons présentent des différences statistiquement significatives, deux types de tests s'offrent à nous : les tests paramétriques (Anova en particulier) ou non-paramétriques (notamment Kruskal-Wallis). L'utilisation d'un test paramétrique nécessite préalablement de vérifier deux conditions : tous les échantillons

doivent avoir une distribution normale, et leur variance doit être égale (condition d'homoscédasticité, par opposition à l'hétéroscédasticité, inégalité des variances).

NEI	Effectif	$V_s(C_2)$			$V_s(C_3)$			IVG		
		MOY	MED	VAR	MOY	MED	VAR	MOY	MED	VAR
1	253	2,77	2,73	0,1	2,21	2,13	0,72	2,27	2,25	0,06
2	222	2,82	2,77	0,12	2,77	2,7	0,49	2,43	2,42	0,05
3	202	2,83	2,71	0,14	3,08	3,01	0,42	2,51	2,52	0,04
4	99	2,9	2,89	0,14	3,25	3,2	0,34	2,56	2,58	0,05
5	59	3,11	3,04	0,12	3,52	3,36	0,35	2,70	2,68	0,03
6	27	3,12	3,12	0,13	3,71	3,9	0,23	2,77	2,78	0,02

Tab. 83 : Résumé statistique des variables contributives aux effets de site (C_2 - Topographie, et C_3 - Structure de la végétation) et de l'indice global de vulnérabilité en fonction du niveau d'intensité de l'incendie

Afin de vérifier ces conditions, nous formulons deux hypothèses nulles : la première, $H_0^{(1)}$, « les échantillons ont une distribution normale », et la seconde, $H_0^{(2)}$, « les variances sont homogènes entre les échantillons ». Les tests sont réalisés sous R, grâce aux fonctions *shapiro.test* (Royston, 1982), pour la normalité, et *leveneTest* (Fox, 2008), pour l'homoscédasticité. Les deux hypothèses nulles sont rejetées si le seuil de la probabilité d'erreur est inférieur à 0,05 (p-value < 0,05). Les tests de Levene ont été conduits sous deux modalités : (1) centrés sur les moyennes conditionnelles, (2) centrés sur les médianes conditionnelles.

Les résultats sont sans appel (Tab. 84), les deux hypothèses nulles peuvent donc être rejetées. Les conditions de normalité et d'homoscédasticité ne sont pas remplies. Il est donc plus prudent de se tourner vers le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis.

NEI	Effectif	$V_s(C_2)$		$V_s(C_3)$		IGV	
		shapiro.test p-value	leveneTest p-value	shapiro.test p-value	leveneTest p-value	shapiro.test p-value	leveneTest p-value
1	253	1,6e-05 (***)		1,2e-05 (***)		0,003 (**)	
2	222	1,1e-05 (***)	(1)	2,5e-06 (***)	(1)	0,343	(1)
3	202	1,6e-07 (***)	0,006 (**)	1,9e-05 (***)	7,8e-08 (***)	0,008 (**)	0,002 (**)
4	99	0,016 (*)	(2)	0,028 (*)	(2)	0,151	(2)
5	59	0,018 (*)	0,028 (*)	0,0003 (***)	2,1e-07 (***)	0,752	0,002 (**)
6	27	0,074 (.)		0,097 (.)		0,784	

Tab. 84 : Test de la normalité et de l'homoscédasticité des distributions de C_2 , C_3 et de l'IGV selon les 6 niveaux d'intensité

L'hypothèse nulle du test de Kruskal-Wallis est : H_0 « les distributions sont toutes identiques ». Les résultats montrent une très nette significativité (Tab. 85).

krukal.test	$V_s(C_2)$	$V_s(C_3)$	IGV
χ^2	53	240,4	245,34
Degrés de liberté	5	5	5
p-value	3,35e-10	< 2,2e-16	< 2,2e-16

Tab. 85 : Résultats du test de Kruskal-Wallis sur les niveaux d'intensité en fonction des variables de vulnérabilité

L'hypothèse nulle est donc rejetée. Il existe bien un lien entre les valeurs de vulnérabilité et l'appartenance aux niveaux de l'échelle d'intensité pour les incendies de forêt. Pour les trois variables, la probabilité d'erreur est négligeable. Les zones présentant les plus fortes vulnérabilités ont tendance à brûler plus intensément que celles de moindres vulnérabilités.

Les graphiques (Fig. 99) permettent d'apprécier les distributions des différentes variables en fonction des six niveaux de l'échelle d'intensité.

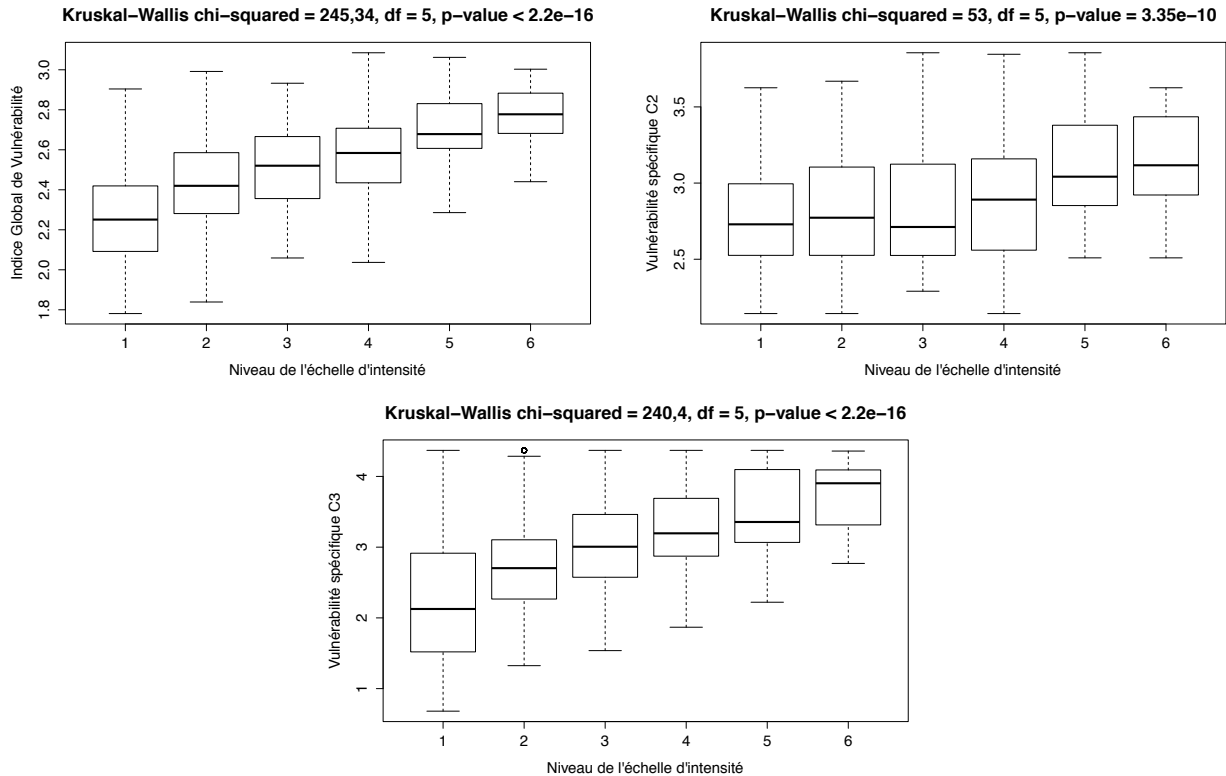


Fig. 99 : Distributions des variables C2, C3 et de l'IGV en fonction des six niveaux de l'échelle d'intensité

On constate cependant que tous les échantillons ne sont pas statistiquement différents. Le test *post-hoc* des comparaisons multiples (fonction *kruskalmc*, package *pgirtmess*, Siegel et Castellan, 1988) le confirme en renseignant les niveaux d'intensité présentant des distributions statistiquement différentes, au seuil de significativité p-value < 0,05. Seules les comparaisons 3-4 et 5-6 ne présentent pas de différences significatives pour l'IGV (Tab. 86).

On observe ainsi de fortes différences entre les distributions de la vulnérabilité sur les trois premiers niveaux de l'échelle d'intensité. Le passage du niveau 3 au niveau 4 ne s'explique pas par une hausse significative des valeurs de l'indice. Puis la différence s'accroît entre les niveaux 4 et 5, et redevient non significative entre les niveaux 5 et 6. Les variables $V_s(C_2)$ et $V_s(C_3)$ présentent également des différences non significatives pour les comparaisons 3-4 et 5-6. Il n'y a pas de différence significative de la valeur de la vulnérabilité spécifique à la topographie, estimée à dire d'experts, entre les pixels de classe d'intensité 1, 2, 3 et 4 estimée par simulation. Ce constat se répète entre les pixels de classe d'intensité 4 et 6, et 5 et 6. Cependant une démarcation significative existe entre les niveaux de faible intensité (1,2 et 3) et les niveaux de très forte intensité (5 et 6). On identifie des différences significatives entre les valeurs de la vulnérabilité spécifique à la structure de la végétation des trois premiers niveaux, et non significatives entre les trois derniers niveaux.

Comparaisons	$V_s(C_2)$	$V_s(C_3)$	IGV
1-2	non significatif	significatif	significatif
1-3	non significatif	significatif	significatif
1-4	non significatif	significatif	significatif
1-5	significatif	significatif	significatif
1-6	significatif	significatif	significatif
2-3	non significatif	significatif	significatif
2-4	non significatif	significatif	significatif
2-5	significatif	significatif	significatif
2-6	significatif	significatif	significatif
3-4	non significatif	non significatif	non significatif
3-5	significatif	significatif	significatif
3-6	significatif	significatif	significatif
4-5	significatif	non significatif	significatif
4-6	non significatif	non significatif	significatif
5-6	non significatif	non significatif	non significatif

Tab. 86 : Résultats du test des comparaisons multiples pour les trois variables étudiées

Au chapitre précédent, nous avons montré que l'indice global de vulnérabilité variait de 1,54 à 3,17 au niveau de la zone d'étude, ce qui correspond (selon la logique floue, cf. § 4.4.2) à une vulnérabilité maximale appartenant à 89 % à la classe « Forte », et une vulnérabilité minimale appartenant à 45 % à la classe « Très Faible ». La classe « Très Forte » n'est donc pas représentée. En agrégeant la classe « Très Faible » à la classe « Faible », nous avons reclassifié la carte de l'indice global de vulnérabilité en trois modalités : « Faible », « Moyenne » et « Forte » (Tab. 87). Le tableau résume les caractéristiques physiques moyennes de l'incendie que l'on retrouve par niveaux de vulnérabilité.

Vulnérabilité	IGV_{moyen}	Classe d'appartenance	ROS (m/h)	FLI (kW/m)	Hauteur de flamme (m)	NEI
Faible	1,77	12 % Très Faible – 88 % Faible	106 (69)	221 (62)	1 (0,2)	1
Modérée	2,32	33 % Faible – 67 % Modérée	1023 (618)	2590 (1823)	5 (4)	3
Forte	2,74	72 % Modérée – 28 % Forte	939 (737)	5606 (4615)	11 (10)	4

Tab. 87 : Caractéristiques moyennes (médianes) de l'incendie par niveau de vulnérabilité

Le lien entre la vulnérabilité estimée à dire d'experts et l'intensité simulée est cohérent et significatif (Fig. 100) : en moyenne, les zones de forte vulnérabilité ont subi des puissances du front de flammes estimées de niveau 4 sur l'échelle d'intensité (Fort) ; les zones de faible vulnérabilité accueillent une intensité très faible (niveau 1) ; quant aux zones où les valeurs de vulnérabilité sont évaluées modérées, elles ont subi un incendie d'intensité simulée moyenne (Niveau 3).

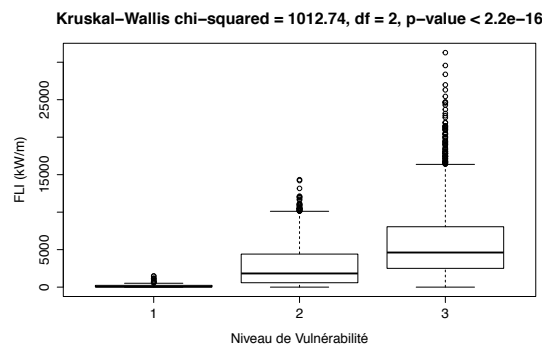


Fig. 100 : Distribution du FLI simulé (kW/m) en fonction des niveaux de vulnérabilité calculés

6.4.2. Relation intensité simulée dommages observés : analyse du triptyque Intensité-Vulnérabilité-Sévérité

a. Cohérence entre les caractéristiques physiques de l'incendie et l'endommagement observé

À travers ses trois composantes (sensibilité, exposition et capacité de réponse), la vulnérabilité exerce son influence à la fois sur la sévérité des dommages occasionnés et sur l'intensité du phénomène. La vulnérabilité peut ainsi être considérée comme le trait d'union de l'intensité et de la sévérité. Ces trois notions forment alors un triptyque où la vulnérabilité occupe la place centrale.

Au cours de ce travail de thèse, nous avons abordé la question de la sévérité des incendies de forêt sous l'angle principal des habitations résidentielles en interface habitat-forêt. L'analyse de leur endommagement permet de mieux cerner la composante anthropique de la sévérité au sein de l'échelle d'intensité pour les incendies de forêt (Lampin *et al.*, 2002).

Afin de vérifier la cohérence entre la simulation et les dommages observés, nous avons calculé plusieurs variables à l'intérieur de la zone tampon de 30 mètres autour de chaque habitation : la puissance linéique moyenne du feu (FLI moyen en kW/m) et la densité de brandons (EMBd en brandons/m²). Puis, le niveau d'intensité de l'incendie, déduit du FLI moyen, a été associé à ces deux variables. Cette zone tampon correspond à la zone critique d'exposition des habitations (Cohen, 2000).

Le test de Shapiro-Wilk a été mené afin de déterminer si les échantillons relatifs aux classes de sévérité des dommages suivent ou non une loi normale. Le seuil de rejet de l'hypothèse nulle (les échantillons suivent tous une loi normale) a été fixé à $\alpha = 0,05$. L'hypothèse nulle est rejetée pour la variable EMBd ($p - value < 0,05$). Nous avons donc conduit le test non-paramétrique de Kruskal-Wallis afin de juger si elle offre une bonne séparabilité des trois groupes de sévérité (0,1,2). L'hypothèse de normalité est en revanche acceptée pour la variable FLI moyen ($p - value > 0,05$). Le test paramétrique de Student a donc été privilégié ($t.test$ sous R). Les résultats indiquent que les trois variables testées permettent de différencier la sévérité des dommages subis par les habitations, avec un risque d'erreur inférieur à 5 % (Tab. 88).

Sévérité	Effectif	FLI moyen (kW/m)	EMBd (brandons/m ²)	NEI
0	13	1730,2 (1505,9)	3,27 (1,12)	NEI = 1 : 21 %
				NEI = 2 : 36 %
				NEI = 3 : 29 %
				NEI = 4 : 7 %
1	4	2189,5 (2246,65)	9 (10,2)	NEI = 3 : 100 %
2	3	4069,3 (4043,3)	9,83 (9,8)	NEI = 4 : 100 %
K-W p-value		0,02 (*)	0,01 (*)	0,01 (*)
S p-value		0-1 : 0,3		
		0-2 : 0,02 (*)		
		1-2 : 0,001 (**)		

Tab. 88 : Statistiques descriptives (moyennes, médianes entre parenthèses) des variables calculées par classes de sévérité des dommages, et probabilité d'indépendance des échantillons selon le test de Kruskal-Wallis et de Student

Le degré de sévérité des dommages est positivement corrélé aux différentes variables (Fig. 101). La variable FLI moyen présente des valeurs significativement différentes entre les classes 0 et 2, et 1 et 2, avec un risque d'erreur inférieur ou égal à 5 %. Les différences ne sont pas significatives entre les classes 0 et 1. Pour la variable densité de brandons à l'intérieur des

zones tampons, on observe une différence significative entre les échantillons de sévérité 0 et les échantillons de sévérité 1 et 2. Les classes 1 et 2 présentent cependant de différences non significatives.

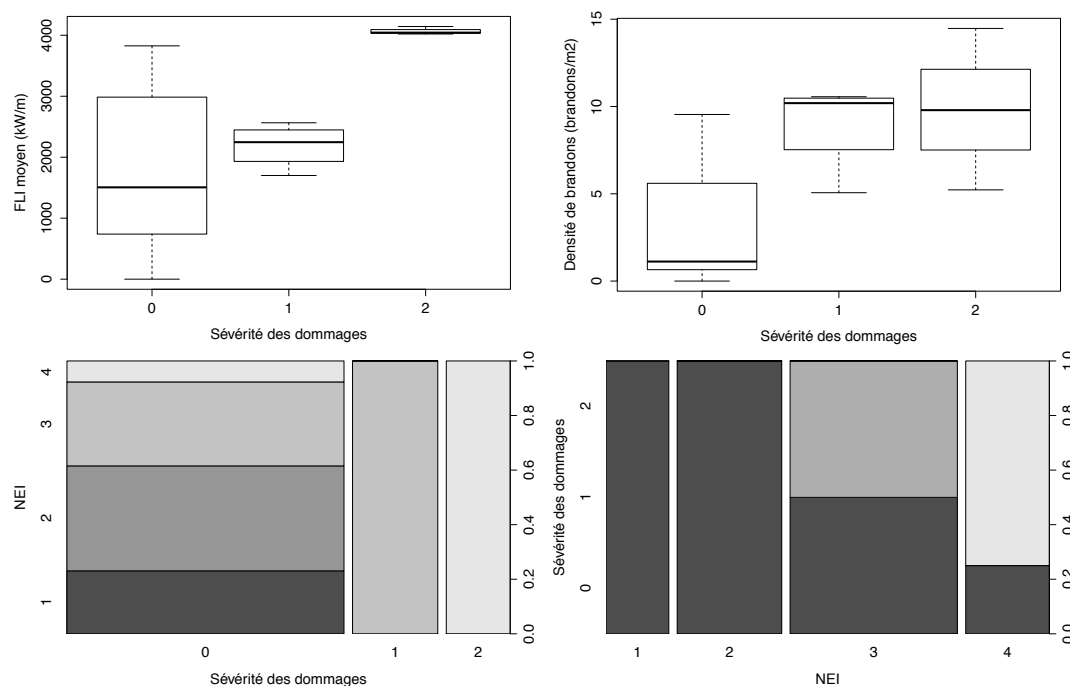


Fig. 101 : Distributions des variables FLI moyen, NEI et EMBd en fonction des classes de sévérité des dommages sur les habitations, et distribution des classes de sévérité des dommages en fonction des niveaux de l'échelle d'intensité

Les deux derniers graphiques présentent les distributions des NEI à l'intérieur des classes de sévérité des dommages sur les habitations et inversement. Sur l'ensemble des 20 habitations étudiées, nous constatons que :

- 100 % des habitations exposées à un feu de niveau 1 ou 2 n'ont subi aucun dommage (sévérité 0) ;
- 50 % des habitations exposées à un feu de niveau 3 ont subi des dommages de sévérité 1 ;
- 75 % des habitations exposées à un feu de niveau 4 ont subi des dommages de sévérité 2.

Selon l'échelle d'intensité pour les incendies de forêt (Lampin *et al.*, 2002), aux niveaux 1 et 2 d'intensité correspondent des dommages minorés aux habitations, dans la situation la plus défavorable. Les résultats de notre étude indiquent que les maisons exposées à ces niveaux d'intensité n'ont subi aucun dommage (sévérité 0). Au niveau 3, correspondent également des dommages minorés, mais il est précisé que les volets en bois sont susceptibles d'être endommagés, tout comme les gouttières en PVC. Les résultats de notre étude indiquent que 50 % des habitations ont subi des dommages de sévérité 1, qui correspondent aux effets mentionnés (cf. § 5.1.3). Enfin, les habitations ayant subi des dommages de sévérité 2 étaient exposées à un incendie de niveau 4 sur l'échelle d'intensité. La classe de sévérité 2 correspond aux dommages importants, mais sans affectation de l'intérieur des habitations. Les toitures ont été endommagées, sans l'intervention des pompiers, le feu aurait pu se propager à l'intérieur des maisons. Nous observons donc une cohérence entre les niveaux de l'échelle d'intensité, calculés à partir de la simulation PHOENIX, et la sévérité des dommages observés.

b. Modélisation des niveaux d'intensité simulés en fonction de l'indice global de vulnérabilité à dire d'experts

Dans la sous-section précédente, nous avons souligné la cohérence entre les caractéristiques physiques de l'incendie simulé et la sévérité des dommages observés sur les habitations. La dernière analyse porte donc sur la cohérence entre les niveaux d'intensité de l'incendie simulé, dans la zone critique des habitations, et l'indice global de vulnérabilité de ces dernières.

Préalablement à la modélisation, il est important de souligner la corrélation existant entre l'IGV des habitations et la puissance linéique moyenne simulée du feu (FLI moyen), calculée dans la zone critique d'exposition des habitations. Ramenées aux habitations, les valeurs de l'IGV synthétisent les contributions de l'ensemble des critères de vulnérabilité. Pour une habitation, la valeur de l'indice prend en compte la diffusion de la vulnérabilité qui s'exerce depuis la zone critique de 30 m, et la diffusion contraire. Ainsi, à l'intérieur de la zone critique, la vulnérabilité à dire d'experts est également conditionnée par les performances des critères « attributs » des habitations (propriétés des habitations, facteurs humains).

Les deux variables sont gaussiennes. Le test de corrélation linéaire de Bravais-Pearson (fonction *cor.test* sous R) valide l'existence d'une corrélation linéaire positive entre l'IGV et le FLI moyen (Fig. 102). L'intensité de la corrélation est égale à 0,694 avec une probabilité critique très significative (p-value < 0,001 ***).

```
> cor.test(IGV,FLI)

Pearson's product-moment correlation

data: IGV and FLI
t = 4.0913, df = 18, p-value = 0.0006854
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.3631911 0.8695616
sample estimates:
cor
0.6941486
```

Fig. 102 : Résultats du test de corrélation de Bravais-Pearson

L'étude de la corrélation se poursuit par l'ajustement d'un modèle de régression linéaire (fonction *lm* sous R) (Fig. 103). Le modèle construit est très significatif, comme l'indique la statistique de Fisher (*F-statistic*, p-value < 0,001 ***).

Avant d'aller plus loin, nous devons vérifier les hypothèses énoncées sur les résidus de la régression, que ce type de modélisation implique : normalité, absence de corrélation et homoscedasticité. Le test de Shapiro-Wilk sur les résidus de la régression confirme leur normalité (p-value = 0,85). De même, le test de Moran sur les résidus de la régression (*lm.morantest* sous R) valide l'absence d'autocorrélation spatiale, selon le plus proche voisin. Les résidus sont spatialement décorrélés. Enfin, le test de White (*white.test* sous R) obtient une probabilité critique de 0,58. L'hypothèse nulle selon laquelle les résidus possèdent des variances égales est donc acceptée. L'hypothèse d'homoscedasticité est ainsi vérifiée.

```

Call:
lm(formula = IGV ~ FLI)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.20806 -0.07639 -0.02517  0.01148  0.40983

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.145e+00  6.763e-02  31.712 < 2e-16 ***
FLI          1.085e-04  2.652e-05   4.091 0.000685 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1583 on 18 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4818,    Adjusted R-squared:  0.4531
F-statistic: 16.74 on 1 and 18 DF, p-value: 0.0006854

```

Fig. 103 : Résultats de la régression linéaire IGV~ FLI moyen

Le modèle est bien spécifié, nous pouvons conclure qu'il existe une relation entre la puissance linéique moyenne d'un incendie dans les 30 m autour d'une habitation et l'indice global de vulnérabilité de l'habitation. La relation est définie par l'équation suivante (Fig. 104) :

$$IGV = 2,145 + 0,00001 * FLI_{moyen}$$

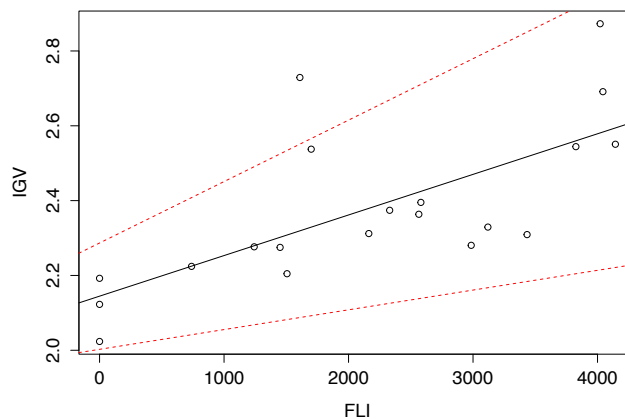


Fig. 104 : Modèle linéaire caractérisant l'indice global de vulnérabilité des habitations en fonction de la puissance linéique moyenne d'un incendie, simulée dans les 30 m autour d'une habitation (l'intervalle de confiance à 95 % est représenté en rouge)

Le FLI moyen calculé dans la zone critique d'exposition des habitations permet d'expliquer 48 % de la vulnérabilité exprimée par l'IGV. Ce résultat souligne la forte contribution de la vulnérabilité d'exposition à la vulnérabilité globale. Les résultats de la simulation sont donc en adéquation avec les dires d'experts, pour lesquels la composante « exposition » de la vulnérabilité est déterminée à travers les critères relatifs à la structure de la végétation et à la topographie. Néanmoins, la richesse de l'indice global de vulnérabilité à dires d'experts est de prendre en compte les performances des critères « attributs » des habitations (propriétés de habitations, facteurs humains, etc.) dans ses valeurs. Ainsi, l'explication des 52 % restants réside dans les composantes « sensibilité » et « capacité de réponse » de la vulnérabilité.

Si l'indice global de vulnérabilité ne peut se résumer à la puissance linéique moyenne du feu, générée dans la zone critique des habitations, nous souhaitons tout de même vérifier sa capacité à retrouver le niveau d'intensité de l'incendie.

Nous rappelons que les niveaux de l'échelle d'intensité (NEI, Lampin *et al.*, 2002) ont été déterminés à partir des puissances linéiques moyennes simulées du feu (FLI moyen) dans la zone critique de 30 mètres autour des habitations. La vocation première de l'échelle d'intensité pour les incendies de forêt est l'estimation *a posteriori* de l'intensité du feu, fondée sur l'analyse des traces d'endommagement. Les niveaux sont différenciés soit par les effets du feu sur les enjeux (espace naturel, habitation, population et infrastructures humaines) soit par la puissance linéique du front de flammes. Par l'intermédiaire de l'IGV, nous proposons alors de déterminer *a priori* le niveau d'intensité auquel les habitations seraient potentiellement exposées (dimension prospectiviste).

La population des 20 maisons étudiées est distribuée dans les quatre premiers niveaux de l'échelle d'intensité (Fig. 16). Les habitations ayant été exposées à un même niveau d'intensité sont considérées comme un échantillon de la population des habitations. Ainsi quatre échantillons ont été formés :

- NEI=1 : 3 habitations ;
- NEI=2 : 5 habitations ;
- NEI=3 : 8 habitations ;
- NEI=4 : 4 habitations.

L'indice global de vulnérabilité des habitations ne suit pas une loi normale pour tous les échantillons de niveaux d'intensité. Le test de Kruskal-Wallis valide l'hypothèse selon laquelle les valeurs de l'indice sont significativement différentes entre les échantillons, au seuil de 1 % ($p - value = 0,004$) (Fig. 105).

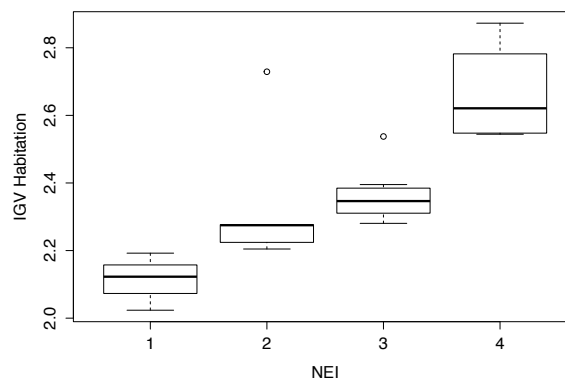


Fig. 105 : Distributions de la variable IGV_H en relation avec les niveaux de l'échelle d'intensité

La variable NEI prend alors quatre modalités ordonnées. La modélisation du niveau d'intensité en fonction de l'indice global de vulnérabilité est effectuée par régression logistique ordinaire, sous l'hypothèse des rapports de côtes proportionnels (cf. Chapitre 5). Le travail de régression est effectué sous le logiciel R, à l'aide de la fonction *clm* du package *ordinal* (Christensen, 2013).

Le modèle est significatif au seuil d'erreur de première espèce de 5 % (Tab. 89). Selon le pseudo- R^2 de McFadden (R_{MF}^2), l'IGV des habitations explique 35 % de la variance de la variable dépendante. En comparaison au modèle trivial (test du rapport de vraisemblance, RV), le modèle ajusté présente un gain très significatif ($p - value < 0,001$).

Variable	Coefficient	Intervalle de confiance (2,5 % - 97,5 %)	OR (0,2)	Significativité	RV (NEI~1)	AIC	R ² _{MF}
IGV	14,5	6,6 - 26,2	18,3	0,0027 (**)			
1/2	31,11			0,0039 (**)	< 0,001 (***)	42,52	0,35
2/3	33,43			0,0027 (**)			
3/4	37			0,002 (**)			

Tab. 89 : Résultats de la régression logistique ordinale

Le coefficient de la variable explicative est positif, ce qui indique qu'une plus forte valeur de IGV augmente l'intensité du feu. Selon le modèle, lorsque la valeur de l'IGV augmente de 0,2 alors le niveau d'intensité de l'incendie dans les 30 mètres autour de l'habitation a 18,3 fois plus de chance d'être augmenté d'une classe, quelle que soit la classe de départ.

La fonction *clm* spécifie un cadre régressif où le coefficient de la variable explicative ne varie pas avec les niveaux d'intensité. Afin de vérifier la validité de cette hypothèse (odds-ratio proportionnels), nous introduisons la possibilité pour le coefficient de la variable IGV de varier successivement (*nominal effect*). Le modèle nouvellement créé est alors comparé à l'initial par un test du rapport de vraisemblance. Au terme de cette analyse, nous pouvons conclure que l'hypothèse des côtes proportionnelles est vérifiée (p-value > 0,05).

Le modèle possède une bonne capacité à retrouver les niveaux d'intensité calculés grâce au simulateur PHOENIX (Tab. 90). Le tableau 90 présente les probabilités d'appartenance à chaque niveau d'intensité pour l'ensemble des habitations, et offre une comparaison directe avec le niveau d'intensité moyen calculé. Les probabilités maximales sont surlignées en jaune, et les erreurs sont marquées en rouge dans la colonne du NEI calculé. Le modèle se trompe sur le niveau d'intensité auquel les maisons CAV_9, CAV_11 et CAV_19 ont été exposées, et attribue les bons niveaux d'intensité calculés à l'intérieur des zones tampons des autres habitations.

Habitation	NEI=1	NEI=2	NEI=3	NEI=4	NEI modélisé	NEI calculé
CAV_1	0,02	0,17	0,70	0,10	3	3
CAV_3	0,12	0,46	0,40	0,02	2	2
CAV_4	0,28	0,52	0,20	0,01	2	2
CAV_5	0,12	0,46	0,40	0,02	2	2
CAV_7	0,06	0,33	0,57	0,04	3	3
CAV_9	0,11	0,45	0,42	0,02	2	3
CAV_10	0,84	0,14	0,02	0	1	1
CAV_11	0,31	0,51	0,17	0,01	2	1
CAV_12	0,22	0,52	0,25	0,01	2	2
CAV_14	0,08	0,38	0,51	0,03	3	3
CAV_17	0	0,02	0,47	0,5	4	4
CAV_18	0,56	0,37	0,07	0,002	1	1
CAV_19	0	0	0,06	0,94	4	2
CAV_2	0,04	0,24	0,65	0,07	3	3
CAV_6	0	0,03	0,49	0,48	3	3
CAV_8	0,03	0,22	0,67	0,08	3	3
CAV_13	0,07	0,38	0,52	0,03	3	3
CAV_15	0	0	0,01	0,99	4	4
CAV_16	0	0,02	0,45	0,53	4	4
CAV_20	0	0	0,10	0,90	4	4

Tab. 90 : Comparaisons des NEI modélisés avec les NEI calculés par le simulateur PHOENIX

Deux éléments clés de l'évaluation de la performance d'un modèle de régression logistique ajusté sont l'évaluation de la calibration et de la discrimination du modèle. La calibration fait référence à l'accord entre les résultats observés (ici, le NEI dérivé des résultats de la simulation PHOENIX) et les « prévisions » du modèle :

- NEI=1 : 67 % retrouvés ;
- NEI=2 : 80 % retrouvés ;
- NEI=3 : 87,5 % retrouvés
- NEI=4 : 100 % retrouvés.

En revanche, la discrimination fait référence à la capacité du modèle à distinguer les habitations exposées à un certain niveau d'intensité de celles qui ne l'ont pas été (Steyerberg *et al.*, 2010). La capacité de discrimination du modèle est évaluée à l'aide de l'indice C de concordance. Cet indice est sans unité. Il indique la probabilité pour une habitation choisie au hasard et qui a été exposée à un niveau d'intensité donné, de se voir affecter le même niveau d'intensité par rapport à une habitation choisie au hasard et qui n'a pas été exposée au même niveau d'intensité. L'indice C est équivalent à l'aire sous la courbe ROC (AUC) (Hanley et McNeil, 1982). Le modèle logistique ajusté présente une valeur de l'indice C égale à 0,92. Ainsi, il possède une très bonne capacité de discrimination (cf. § 5.4.2.c).

Les différentes analyses menées autour de l'Indice Global de Vulnérabilité ont permis de dégager plusieurs de ses avantages : il permet de retrouver les habitations susceptibles d'être endommagées de celles qui ne le sont pas avec une grande qualité (AUC = 0,96) (cf. §5.4.1) ; il permet de retrouver le niveau de sévérité des dommages subis par les habitations avec une grande précision (indice C = 0,96) (cf. §5.4.2) ; et enfin, il fait le lien entre la sévérité des dommages sur les habitations et le niveau d'intensité moyen auquel chacune était exposée, dans leur environnement de 30 mètres, en retrouvant les niveaux d'intensité calculés par la simulation PHOENIX, avec la même qualité (indice C = 0,92). Ainsi, l'indice global de vulnérabilité élaboré dans cette thèse est un indicateur pertinent de la propension des habitations à subir des dommages, de la sévérité de ces dommages et du niveau d'intensité moyen de l'incendie, dans les 30 mètres autour des habitations, ayant provoqué ces dommages. On observe donc une bonne cohérence entre les trois éléments du triptyque étudié.

Afin d'aller plus loin dans l'analyse des résultats de la simulation de l'incendie de Cavaillon, nous proposerons, dans la section suivante, de caractériser le mécanisme d'endommagement du feu, que représente le rayonnement thermique généré par les flammes, auquel les habitations ont été exposées. Nous développerons une méthode d'estimation des contraintes thermiques reçues par les habitations, à partir des caractéristiques physiques de l'incendie dans la zone critique d'exposition des habitations, puis nous comparerons les résultats aux dommages observés.

6.5. Modélisation tridimensionnelle des contraintes thermiques reçues par les habitations

L'élaboration du modèle d'exposition au rayonnement thermique se fonde sur les résultats de la simulation PHOENIX de résolution 5 m, présentés à la section précédente. Les sorties du modèle se présentent sous la forme de trois fichiers vecteurs (points, lignes et

polygones). Les données contenues dans les entités ponctuelles et polygones sont identiques. Les entités ponctuelles représentent l'information sous forme de points espacés de 5 m, les polygones représentent l'information sous forme d'un carroyage de 5 m de côté, les points étant leur centroïde (Fig. 106). Ils renseignent l'intégralité des caractéristiques d'entrée du modèle en chaque point, ainsi que des caractéristiques de l'incendie (hauteur et profondeur de flamme, vitesse de propagation, intensité, etc.). Les entités lignes présentent les enveloppes isochrones successives.

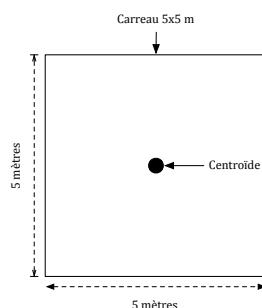


Fig. 106 : Schématisation des fichiers vecteurs points et polygones en sortie du simulateur

L'objectif est de modéliser le flux thermique reçu par les habitations en interface habitat-forêt, à partir des géométries de flammes obtenues par le modèle de propagation du feu. De cette manière, la simulation en laboratoire virtuel doit permettre d'apprécier l'énergie potentielle accumulée par les habitations en fonction de leur exposition. Elle offre ainsi la possibilité de représenter comment une certaine intensité de feu peut se traduire en termes de mécanisme d'endommagement, et par la même occasion d'appréhender différents scénarii d'endommagement.

6.5.1. Méthodologie

Le modèle d'exposition est spécifié à partir de travaux australiens (Leicester, 1987 ; Blanche *et al.*, 2011). L'algorithme 3D est développé sous ArcGIS®10 et utilise les fonctions (outils) de l'extension *3D Analyst*.

a. Construction de la scène 3D

La scène 3D est construite sur la base du MNT converti en un réseau triangulé irrégulier (TIN, outil *Raster to TIN*), surface vectorielle représentant la morphologie du terrain (Fig. 107). Les habitations forment la couche des cibles au format *Multipatch* (outil *Interpolate Polygon to Multipatch*) extrudées selon leur hauteur (outil *Extrude Between*). Les hauteurs sont tirées de la BD TOPO® de l'IGN. La couche des sources de danger correspond aux données ponctuelles issues de la simulation PHOENIX, qui viennent épouser la morphologie du terrain (Fig. 108). Cette figure renseigne la hauteur des flammes et l'intensité de l'incendie selon les intervalles de valeurs définissant les cinq premiers niveaux de l'échelle d'intensité pour les incendies de forêt (Lampin *et al.*, 2002).

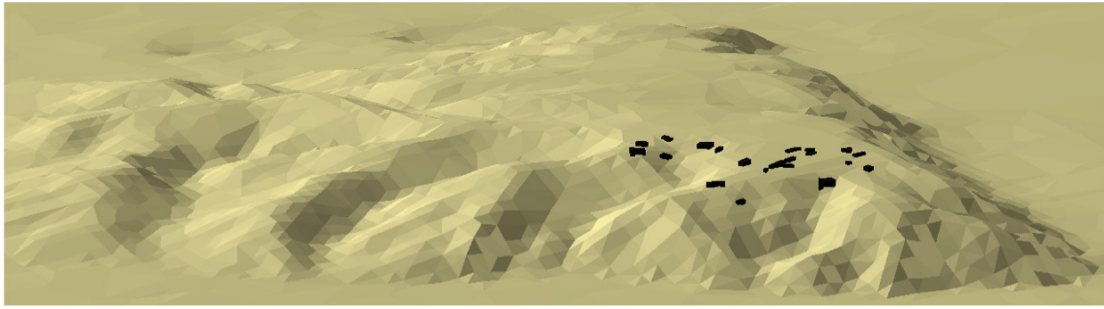


Fig. 107 : TIN représentant la morphologie de la Colline St Jacques. Les habitations sont représentées en noir par des entités 3D multipatch

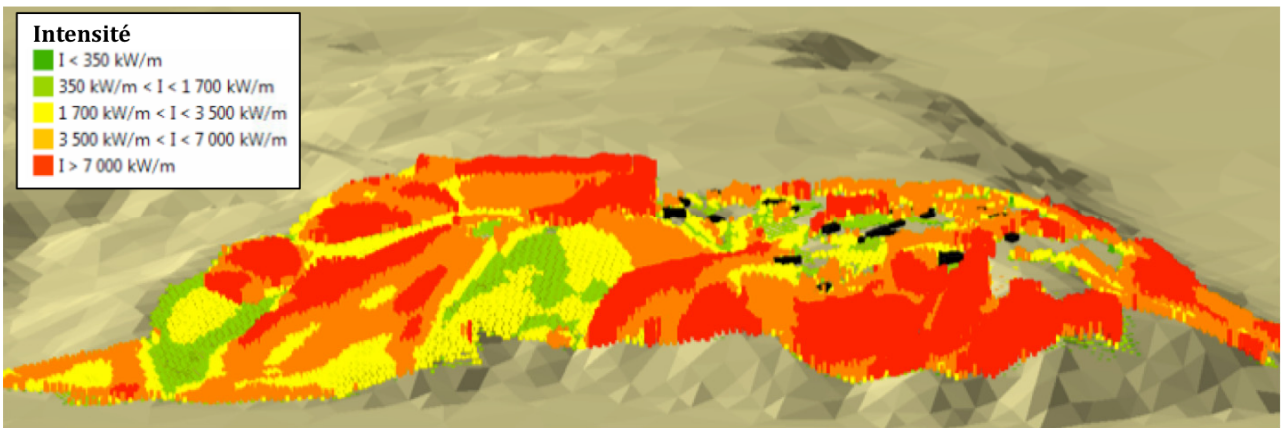


Fig. 108 : Couche cartographique des sources de dangers extrudées selon leur hauteur. Les classes couleurs correspondent aux cinq premiers niveaux de l'échelle d'intensité pour les incendies de forêt

Entre les habitations cibles et la source de danger, il existe bon nombre d'entités susceptibles d'atténuer l'exposition des cibles au rayonnement thermique. Elles correspondent aux polygones de végétation encore intacte, aux dépendances des habitations, aux séparations de propriétés, à la topographie... Ces entités sont regroupées dans la couche d'occultation (Fig. 109).

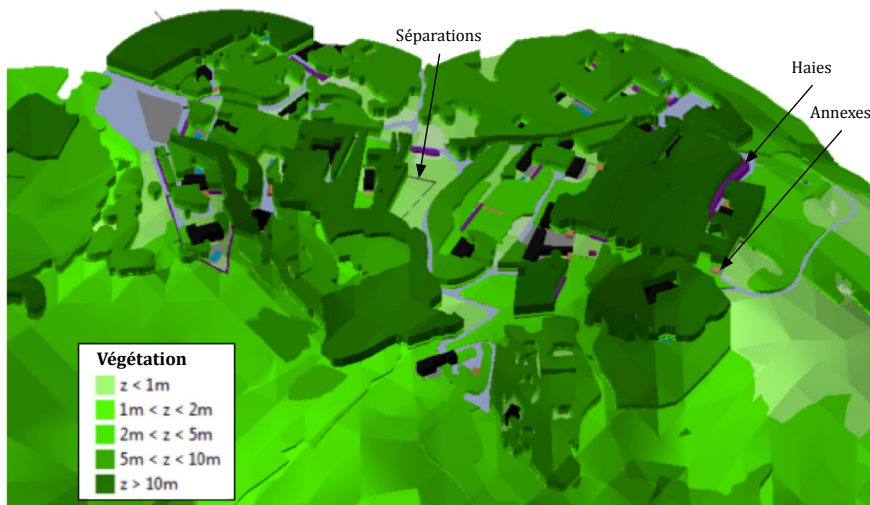


Fig. 109 : Couche cartographique regroupant les entités d'occultation

b. Calcul des flux thermiques reçus par les habitations et du temps d'exposition

Lors d'un incendie en interface habitat-forêt, les mécanismes d'endommagement considérés sont généralement : le contact direct avec les flammes, les projections de brandons et le rayonnement thermique. D'après les retours d'expérience (Chapitre 4), le contact direct est rarement observé. La convection n'est habituellement pas prise en compte concernant les effets sur les bâtis. Comme indiqué par G. Gettle et C.L. Rice (2002), les références de la littérature suggèrent que la participation du transfert convectif de chaleur aux infrastructures est négligeable devant le transfert de chaleur par rayonnement des flammes. Le transfert convectif joue un rôle important pour transférer la chaleur à la canopée, mais pas du point de vue du transfert de chaleur à des habitations situées à une certaine distance du feu. Dans cette étude nous concentrons notre attention sur le phénomène de rayonnement thermique.

Plusieurs méthodes ont été proposées pour le calcul de la radiation thermique émise par les feux (Gettle et Rice, 2002 ; Sullivan *et al.*, 2003 ; Knight et Sullivan, 2004). Le modèle de flamme adopté est basé sur l'approche de la surface rayonnante (Knight et Sullivan, 2004 ; Zarate *et al.*, 2008 ; Rossi *et al.*, 2011). Ce modèle considère la flamme visible comme un corps géométrique qui émet de l'énergie radiative uniformément à travers toute sa surface. Le rayonnement thermique atteignant une cible située à une distance d de la flamme est estimé au moyen de l'expression suivante (Zarate *et al.*, 2008) :

$$Q_r = E_p \tau F$$

où E_p correspond à la puissance d'émission de la flamme (quantité de chaleur émise par la surface de la flamme), τ est la fraction du rayonnement thermique transmise à travers l'atmosphère et F représente le facteur de vue. Le facteur de vue est un paramètre géométrique. Il détermine la fraction de l'énergie émise par une surface qui atteint la surface réceptrice. Sa valeur dépend de la position relative des deux surfaces. Le calcul du facteur de vue nécessite une forme supposée pour le front de flammes. Des approximations ont été proposées (Zarate *et al.*, 2008) : le front de flamme est considéré comme une surface plane (correspondant à un parallélépipède), ou comme une flamme cylindrique (ex. combustion d'un arbre).

Un inconvénient de cette approche est qu'elle ne prend pas en compte la dynamique du feu. Un front de flammes est rarement uniforme. De géométrie et d'intensité variables, il se caractérise également par son temps de résidence, lui même variable. La simulation PHOENIX nous permet d'appréhender cette dynamique. D'après J.D. Cohen (2000), une maison est en sécurité tant que le front de flammes se trouve à une distance supérieure à 30 m. Nous utilisons donc cette distance pour sélectionner les fronts de flammes successifs, approchant les habitations. La figure suivante (Fig. 110) propose un exemple pour l'habitation CAV_15.

Au temps T_1 , l'incendie pénètre la zone tampon de 30m autour de l'habitation CAV_15. Sur cet exemple, l'avancée du feu est découpée en neuf intervalles de temps, jusqu'à ce que l'incendie sorte de la zone tampon. Le nombre d'intervalles n'est pas fixe, il varie selon le comportement du feu à l'approche des habitations. Les intervalles sont construits de manière à former des fronts de flammes, à l'intérieur desquels chaque point représente une flamme solide, brûle simultanément et possède des caractéristiques propres (temps de résidence, hauteur, intensité). Pour le calcul du rayonnement thermique reçu par une cible, nous utilisons l'équation déterminée expérimentalement par R.H. Leicester (1987) :

$$Q = 60 \left(1 - \exp\left(\frac{-FLI}{3000 \cdot d}\right) \right)$$

où Q représente le flux radiatif reçu par une cible (en kW/m^2), d la distance à la source de chaleur (flamme solide) et FLI la puissance linéique de la source de chaleur (en kW/m).

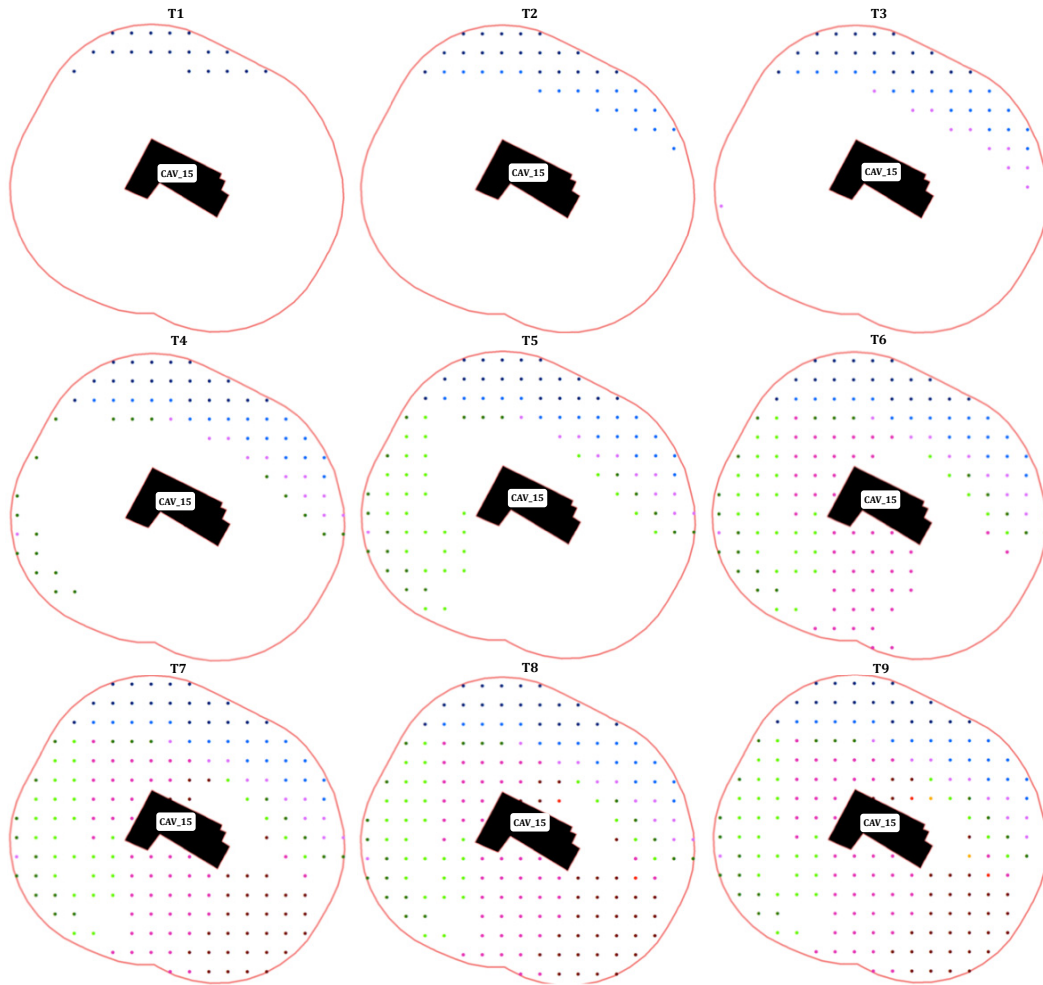


Fig. 110 : Prise en compte de la dynamique de l'incendie dans la zone critique de 30 m autour d'une habitation

À partir de chaque front, un algorithme de calcul en trois dimensions a été élaboré. Ce dernier utilise des fonctions classiques disponibles avec l'extension 3D Analyst d'ArcGIS®10. Chaque flamme est échantillonnée en trois sections (Fig. 111). Trois lignes de vue (outil *Construct Sight Lines*) sont tracées des flammes (à partir du milieu de chaque section) vers les cibles. Chaque ligne de vue comptant pour un tiers de l'énergie rayonnée totale de la flamme. Les points d'impact sont également échantillonnés au niveau des habitations : pas vertical de 1 mètre vertical, et pas horizontal de un quart de la longueur totale de chaque façade.

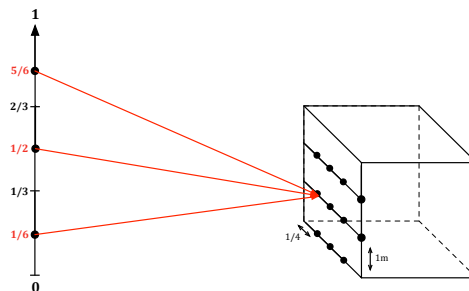


Fig. 111 : Schématisation des différentes sections d'une flamme

La prise en compte des entités atténuant ou bloquant le rayonnement thermique s'effectue grâce à l'outil *Intersect 3D Line With Multipatch*. Un coefficient d'atténuation β est calculé pour chaque entité. β est une grandeur sans dimension, variant de 0 à 1, caractérisant la porosité du milieu. Il indique la proportion du flux de chaleur radiative capturée par le polygone 3D. De la même manière, son complément $(1 - \beta)$ représente la proportion transmise. La valeur 0 correspond aux milieux vides de tout élément occultant. La valeur 1 représente une occultation totale du rayonnement thermique : le relief, les annexes, les véhicules et les murs en pierre bloquent intégralement les rayons les intersectant ($\beta = 1$). Dans les cas où une ligne de visée rencontre un polygone 3D de végétation, nous nous baserons sur l'hypothèse simplificatrice suivante : chaque strate de végétation appartenant à un type de peuplement est représentée par un polygone 3D, considéré comme un milieu turbide où les particules de végétation sont aléatoirement distribuées et orientées. P. Oker-Blom et H. Smolander (1988) proposent d'utiliser le paramètre *STAR* (*shoot silhouette total area ratio*) comme élément de base du feuillage pour traiter l'interception du rayonnement. *STAR* correspond au rapport entre la surface projetée moyenne d'une pousse et la surface totale de ses particules fines. Il peut être évalué à partir de photographies numériques (Smolander et Stenberg, 2003) ou suite à une modélisation de l'architecture des pousses (Stenberg, 1996). Selon l'hypothèse simplificatrice adoptée (les particules de végétation occupent des positions aléatoires et sont aléatoirement orientées) le coefficient de projection est égal à $1/4$ (Stenberg, 1996). Sous cette hypothèse, le coefficient d'absorption (a en m^{-1}) du rayonnement est :

$$a = STAR \cdot \alpha \cdot \sigma = \frac{\alpha \sigma}{4}$$

où, α le rapport du volume occupé par la végétation sur le volume total du polygone 3D, et σ le ratio surface/volume (m^{-1}) des particules végétales. Ce coefficient est par la suite intégré, selon l'épaisseur des particules fines de la végétation considérée. On obtient ainsi un coefficient d'atténuation moyen adimensionnel pour chaque polygone : $\beta = a \cdot e$, avec e l'épaisseur des particules de la végétation composant le milieu.

Lorsque les lignes de vue traversent un nombre i de milieux différents, la proportion de rayonnement transmis est calculée par le produit des compléments de l'atténuation de chaque milieu rencontré (Fig. 112). Le schéma présente la méthode de calcul du rayonnement thermique reçu par une cible, provenant d'une flamme unique.

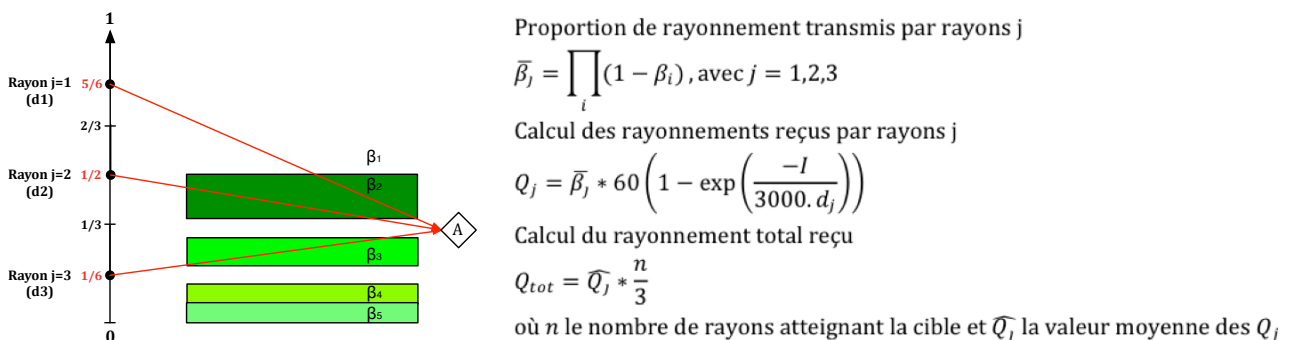


Fig. 112 : Illustration du calcul du rayonnement thermique reçu par la cible A, prenant en compte l'atténuation de la végétation environnante

Le modèle d'exposition élaboré intègre temporellement et spatialement les paramètres produits par la simulation de feu pour évaluer l'énergie reçue par les diverses faces des habitations étudiées, en fonction des facteurs de vue (distance, angle d'exposition,

occultation), du temps d'exposition et de l'énergie de la flamme. Un exemple illustratif est proposé (Fig. 113), où les lignes de vue sont tracées à partir des fronts de flammes par intervalles successifs (T_1 , T_2 et T_3) vers différentes positions au niveau des façades de l'habitation CAV_3. Par soucis de clarté, les strates de végétation ne sont pas représentées en trois dimensions, seules les haies, en violet, et l'annexe occultante, en marron clair, sont extrudées. De plus, nous n'avons sélectionné qu'une position verticale de cibles (1m, 2m et 3m) pour chaque front. Le calcul complet intègre évidemment l'intégralité des cibles.

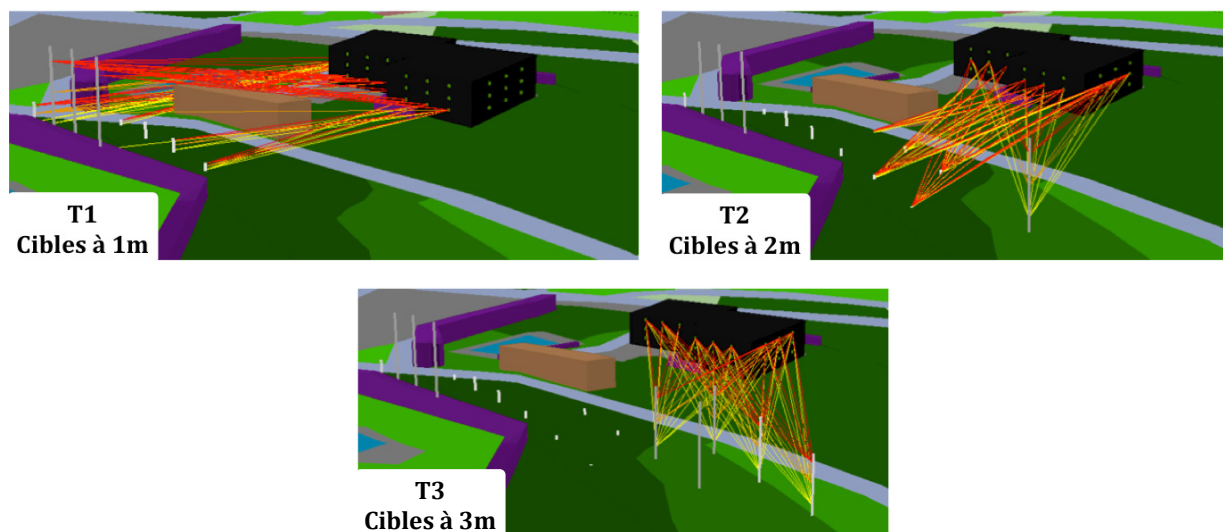


Fig. 113 : Lignes de visée tracées des fronts de flammes successifs vers trois positions verticales de cibles

6.5.2. Exposition des habitations au rayonnement thermique

a. Rayonnement thermique modélisé

Deux types de résultats du modèle PHOENIX sont utilisés pour réaliser le calcul de l'exposition au rayonnement thermique : les fichiers vecteurs des données ponctuelles et des données linéaires (Fig. 114). Nous avons découpé les données ponctuelles selon l'emprise réelle de l'incendie afin de procéder au calcul d'exposition, selon la méthode précédemment exposée. Cette altération des données brutes est sans impact sur les caractéristiques de l'incendie simulé : les surestimations de propagation sont postérieures à l'exposition des habitations étudiées, leur retrait n'a donc aucune influence sur les caractéristiques antérieures.

Les calculs d'exposition sont effectués habitation par habitation. Seules les maisons, dont la zone tampon de 30 m autour du bâtiment intersecte le contour du feu ont été considérées. Trois bâtis ont donc été écartés de l'analyse : CAV_10, CAV_11 et CAV_18. Ces trois habitations ont fortuitement les plus faibles valeurs d'indice global de vulnérabilité (2,03 ; 2,19 et 2,18 respectivement).

Le tableau suivant (Tab. 91) récapitule les valeurs du coefficient d'atténuation calculées par types de peuplement selon les différentes classes de hauteur associées. Ne disposant pas des références nécessaires au calcul des coefficients d'atténuation des haies ornementales, ces derniers ont été fixés à 0,8. En effet, lors des enquêtes de terrain, toutes présentaient un caractère occultant très prononcé. La valeur 0,8 correspond de fait à une atténuation de 80 % du rayonnement thermique incident.

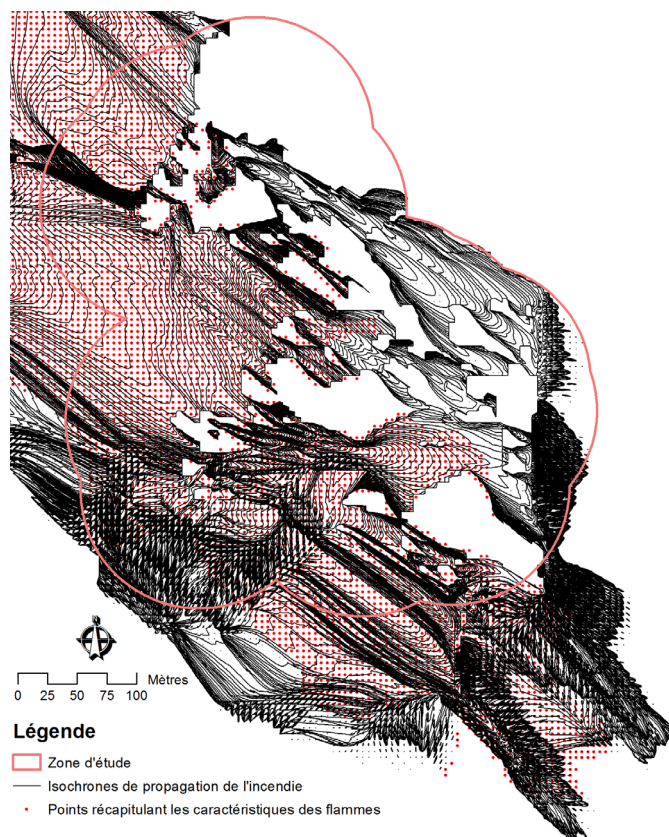


Fig. 114 : Présentation des isochrones de propagation de l'incendie et des centroïdes des mailles de 5m récapitulant l'ensemble des caractéristiques physiques de l'incendie

Type	Hauteur (m)						
	$0 < z < 0,25$	$0,25 < z < 0,6$	$0,6 < z < 1,2$	$1,2 < z < 1,7$	$1,7 < z < 3$	$3 < z < 5$	$5 < z < 13$
A	0,592	0,442	0,137	0,059	0,01	0	0,342
Ad	0,25	0	0	0	0	0	0,384
B	$0 < z < 0,25$	$0,25 < z < 0,6$	$0,6 < z < 1$	$1 < z < 3$	$3 < z < 4$	$4 < z < 9$	
B	0,507	0,357	0,403	0,322	0,396	0,074	
C	$0 < z < 0,25$	$0,25 < z < 0,5$	$0,5 < z < 1$	$1 < z < 3$			
C	0,443	0,229	0,317	0,175			
D	$0 < z < 0,25$	$0,25 < z < 0,5$	$0,5 < z < 0,7$	$0,7 < z < 1,2$			
D	0,699	0,549	0,435	0,054			
E	$0 < z < 0,25$	$0,25 < z < 0,7$	$0,7 < z < 1,5$	$1,5 < z < 3$	$3 < z < 9$		
E	0,261	0,111	0,054	0	0,248		
F	$0 < z < 0,25$	$0,25 < z < 0,6$	$0,6 < z < 1$	$1 < z < 1,6$	$1,6 < z < 4$	$4 < z < 7$	
F	0,917	0,767	0,396	0,644	0,302	0,248	
G	$0 < z < 0,25$	$0,25 < z < 0,7$	$0,7 < z < 1,2$	$1,2 < z < 3$	$3 < z < 4$	$4 < z < 9$	
G	0,395	0,567	0,376	0,322	0,396	0,074	
H	$0 < z < 0,25$	$0,25 < z < 2$	$2 < z < 3$	$3 < z < 5$	$5 < z < 7,5$	$7,5 < z < 13$	
H	0,365	0,215	0,413	0,198	0,248	0,05	
I	$0 < z < 0,25$	$0,25 < z < 0,7$	$0,7 < z < 1,2$	$1,2 < z < 3$	$3 < z < 5$	$5 < z < 13$	
I	0,908	0,758	0,161	0,054	0	0,248	
J	$0 < z < 0,25$						
J	0,5						

Tab. 91 : Coefficient d'atténuation par type de peuplement selon les différentes strates

L'analyse de l'exposition au rayonnement thermique, en trois dimensions, permet de distinguer les contraintes reçues au niveau des différentes cibles d'une habitation. Deux

groupes de cibles ont été formés : les cibles endommagées, notées « Dommage » et celles non endommagées, notées « non Dommage ». Sept variables ont été calculées pour chaque cible : le flux radiatif maximal reçu (Q_{\max} en kW/m^2) ; la durée d'exposition totale (D en s) ; l'énergie accumulée (E en kJ/m^2) ; la durée d'exposition à un flux radiatif dépassant 3 kW/m^2 ($T3$ en s), 5 kW/m^2 ($T5$ en s), 8 kW/m^2 ($T8$ en s) et 12 kW/m^2 ($T12$ en s). Ces quatre valeurs de flux thermique représentent des seuils de dommage induisant des effets caractéristiques sur l'homme et les structures (Tab. 92).

Seuil (kW/m^2)	Effets caractéristiques
1	Rayonnement solaire en zone tropicale Début de la dégradation mécanique du PVC
3	Flux minimum léthal pour 120 s d'exposition Début de pyrolyse du PVC
5	Bris de vitres Flux minimum léthal pour 60 s d'exposition
7	Flux maximum tolérable pour les pompiers complètement protégés (Butler et Cohen, 1998)
8	Début de la combustion spontanée du bois et des peintures
9,5	Flux minimum léthal pour 30 s d'exposition
12	Ignition du bois de construction après 30 secondes d'exposition (Tran <i>et al.</i> , 1992)
16	Flux thermique au-delà duquel il convient de ne pas exposer les structures de manière prolongée (hors structures béton)
20	Tenue du béton pendant plusieurs heures

Tab. 92 : Principaux seuils de dommages associés aux flux thermiques (Tran *et al.*, 1992 ; Butler et Cohen, 1998 ; Auguin *et al.*, 2008)

Les résultats obtenus indiquent que les cibles endommagées ont fait l'objet, en moyenne, d'une exposition à un flux thermique maximal de $11,2 \text{ kW/m}^2$, contre $5,6 \text{ kW/m}^2$ pour les cibles non endommagées (Tab. 93, Fig. 115). Excepté la variable caractérisant la durée d'exposition totale, les variables calculées permettent de séparer significativement les cibles endommagées des cibles non endommagées, selon le test non paramétrique de Kruskal-Wallis ($p\text{-value} < 0,0001$).

Variables	Moyenne « non dommage »	Moyenne « dommage »	Médiane « non dommage »	Médiane « dommage »	p-value
Q_{\max} (kW/m^2)	5,6	11,2	4,6	10,8	< 0,0001
D (s)	1295	1195,2	1260,1	992,9	0,44
E (kJ/m^2)	2610,6	6587,9	1702,9	6827,7	< 0,0001
$T3$ (s)	279,5	562,1	115,5	535,7	< 0,0001
$T5$ (s)	110,2	368,7	0	323,7	< 0,0001
$T8$ (s)	27	152,4	0	156,5	< 0,0001
$T12$ (s)	7,9	21,3	0	0	< 0,0001

Tab. 93 : Statistiques descriptives résumées pour les cibles endommagées et non endommagées

Le tableau suivant (Tab. 94) montre la relation entre les grandeurs thermodynamiques simulées reçues par les cibles endommagées, et la description des dommages observés. D'après les seuils critiques extraits de la littérature (Tab. 92), nous constatons que les contraintes thermiques simulées, reçues par les gouttières en PVC, sont en adéquation avec les conséquences prévisibles pour de telles expositions. En effet, le PVC entame sa dégradation mécanique dès 1 kW/m^2 . Puis, il débute sa pyrolyse lors d'une exposition à un

flux thermique incident de 3 kW/m^2 (Auguin *et al.*, 2008). Les habitations CAV_2 et CAV_8 ont toutes deux été confrontées à l'endommagement de leurs gouttières en PVC. Pour des charges maximales de 5 et 4 kW/m^2 , les gouttières présentent des déformations ainsi que des cloques. La façade exposée au vent dominant de l'habitation CAV_8 a quant à elle subi une exposition à un flux maximal de 13 kW/m^2 , pendant 18 secondes. Il en résulte, au niveau de la gouttière en PVC, un endommagement supérieur aux deux autres, avec notamment la chute de la gouttière et la présence de zones noircies.

Bâti	Q_{\max} (kW/m^2)	D (s)	E (kJ/m^2)	T3 (s)	T5 (s)	T8 (s)	T12 (s)	Dommages observés	
								Cible	Description
CAV_2	5	2732	957	73	0	0	0	Gouttière PVC	Légèrement fondue
CAV_6	9	1468	3237	559	301	98	0	Volet BOIS	Noirci + traces de charbon
CAV_8	13	1515	7250	895	740	406	18	Gouttière PVC	Fondue et décrochée
	4	1571	815	35	0	0	0	Gouttière PVC	Légèrement fondue
CAV_13	10	993	5066	504	216	74	0	Fenêtre VERRE/BOIS	Bris de vitre et encadrement noirci
CAV_15	10	1442	8420	1240	958	123	0	Établi BOIS	Entièrement consumé
	8	1125	6512	849	551	0	0	Volet BOIS	Partiellement consumé
CAV_16	13	1231	8953	799	668	391	29	Volet BOIS	Partiellement consumé
	10	707	5479	347	277	212	0	Volet BOIS	Noirci + traces de charbon
CAV_20	19	872	13638	775	414	233	96	Volet BOIS	Partiellement consumé

Tab. 94 : Relation entre les grandeurs thermodynamiques simulées, reçues par les équipements des maisons endommagées, et degré d'endommagement observés

Il en est de même pour l'habitation CAV_13 qui a vu sa fenêtre, exposée sous le vent dominant, se briser. Le flux maximal calculé est de 10 kW/m^2 pendant 39 secondes. Le seuil de bris de vitre sous l'effet du rayonnement thermique est de 5 kW/m^2 . CAV_13 a été exposée pendant 216 secondes (soit 3,6 minutes) à un flux supérieur au seuil critique.

Les constats sont différents pour les éléments de façade en bois. Ce matériau débute sa combustion spontanée pour un flux radiatif de 8 kW/m^2 . Selon Tran *et al.* (1992), une exposition de 30 secondes à un flux de 12 kW/m^2 est suffisante pour déclencher l'inflammation du bois de construction. Les habitations CAV_6, CAV_13 et CAV_16 n'ont, à aucun moment, été exposées à des flux thermiques atteignant le seuil critique ignition du bois. Elles ont cependant été exposées pendant une ou plusieurs minutes à des flux supérieurs au seuil d'auto-combustion. Les dommages restent faibles, on observe des traces de charbon sur une faible épaisseur. Pour l'habitation CAV_20, les transferts de chaleur sont plus importants. Les quatre façades ont été exposées à des flux supérieurs à 12 kW/m^2 pendant 96 secondes. Les observations après sinistre rendent compte d'un endommagement supérieur aux volets des habitations précédentes, sans pour autant donner signe d'une forte sévérité. L'explication vient des actions de lutte entreprises : l'habitation a bénéficié d'un largage d'eau limitant l'impact direct de l'incendie.

Enfin, l'habitation CAV_15 a été impactée à trois endroits différents. Le premier correspond à un établi en bois accolé à la façade orientée nord-est. Ce dernier a été entièrement brûlé. Cependant, il n'a reçu qu'un rayonnement maximal de 10 kW/m^2 , insuffisant pour enflammer le bois, et n'a pas été au contact des flammes. Le rayonnement simulé ne permet pas d'expliquer la destruction de l'établi. L'expertise après sinistre tend à favoriser la thèse de l'inflammation suite à la projection de particules incandescentes. En effet,

cette habitation a vu sa toiture endommagée suite à l'accumulation des brandons combinée au manque d'entretien (présence d'aiguilles du fait des pins d'Alep en surplomb). De plus, un véhicule stationné à moins de cinq mètres de l'établi a lui aussi été détruit. Le rayonnement réellement reçu par l'établi est donc largement sous-estimé par la simulation. Ce problème se répète pour la deuxième cible (volet en bois, façade sud). Au pied de ce dernier se trouvait un banc en bois, qui a été brûlé suite à l'action combinée du rayonnement et des projections de brandons. Ainsi, le volet a non seulement subi le rayonnement thermique de l'incendie, mais également le contact avec les flammes provenant du banc. La dernière cible a quant-à-elle été exposée pendant trente secondes à un flux radiatif de 13 kW/m². Les volets ont été partiellement consumés, des pertes de matières ont été observées à leur base. Cette caractéristique laisse à penser qu'une ignition pilotée s'est produite. Cette dernière a lieu lorsque le bois est suffisamment chauffé pour émettre des vapeurs inflammables et produire un mélange combustible avec l'air pouvant être enflammé en présence d'une petite flamme ou d'une étincelle chaude (brandons).

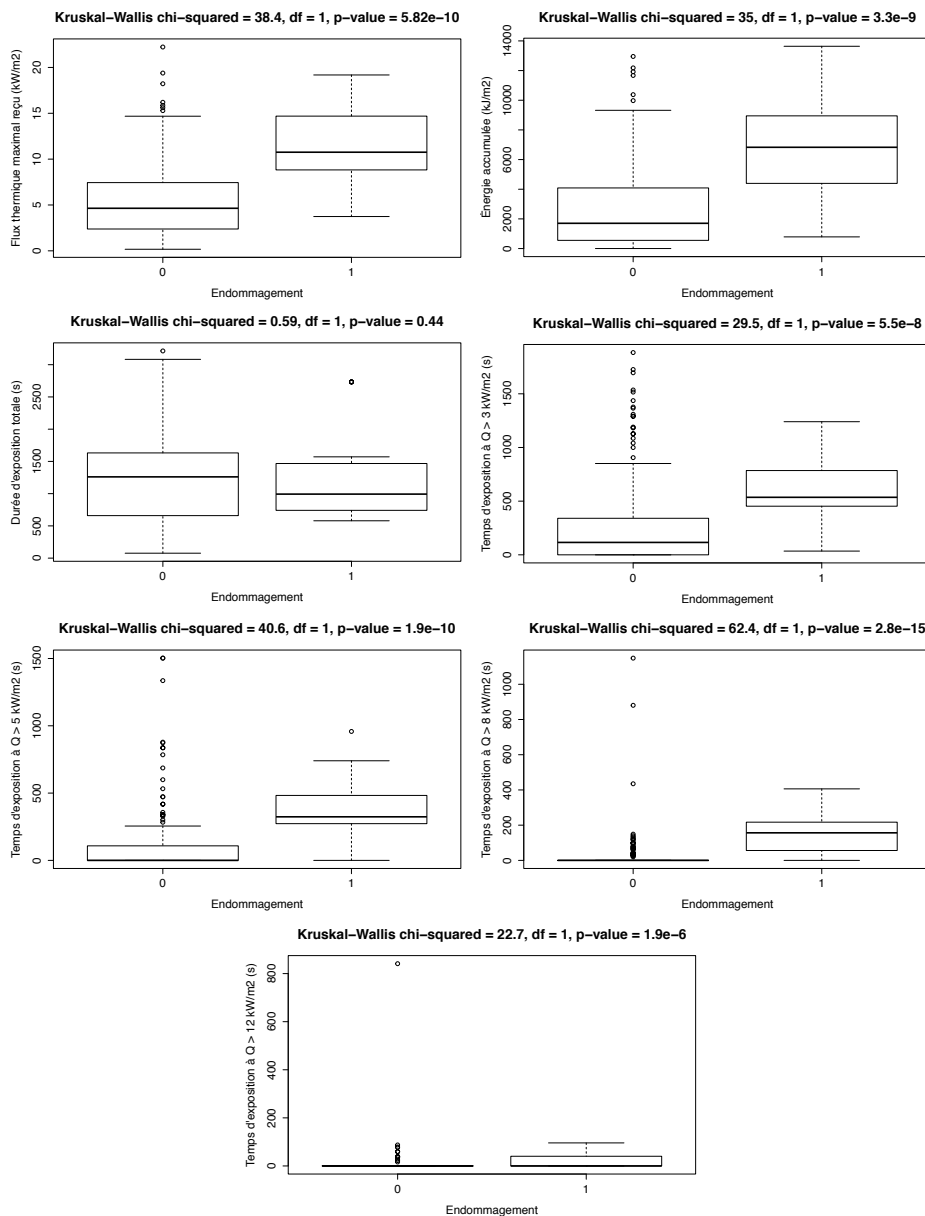


Fig. 115 : Distribution des variables calculées pour les cibles endommagées et non endommagées

b. Corrélation entre l'exposition au rayonnement thermique modélisé et la vulnérabilité à direx d'experts ou modélisation de la vulnérabilité en fonction des flux thermiques maximaux reçus

L'exposition n'est que l'une des composantes de la vulnérabilité prises en compte par l'indice global de vulnérabilité des habitations. Nous rappelons néanmoins qu'elle est jugée par les experts comme la composante principale. L'élaboration du modèle d'exposition des habitations au rayonnement thermique constitue la dernière étape du processus d'étude de la vulnérabilité des enjeux en interfaces habitat-forêt. Afin de valoriser l'indice global de vulnérabilité à direx d'experts nous allons confronter l'indice à l'évaluation de la vulnérabilité fondée sur le modèle d'exposition des habitations au rayonnement thermique.

Sur la population des habitations étudiées, les variables IGV et Q_{max} (flux thermique maximal d'exposition des habitations) sont normalement distribuées : la probabilité critique du test de Shapiro-Wilk est supérieure au seuil de signification $\alpha = 0,05$ pour les deux variables, l'hypothèse nulle (la population des 20 habitations est normalement distribuée) est donc acceptée.

Le test de corrélation linéaire de Bravais-Pearson (fonction *cor.test* sous R) valide l'existence d'une corrélation linéaire positive entre IGV et Q_{max} (Fig. 116). L'intensité de la corrélation est égale à 0,7 avec une probabilité critique très significative (p-value < 0,001 ***). Les habitations les plus vulnérables, selon les jugements des experts, sont celles ayant été exposées aux flux thermiques maximaux, issus de la simulation, les plus élevés.

```
> cor.test(IGV,RHFmax)

Pearson's product-moment correlation

data: IGV and RHFmax
t = 4.153, df = 18, p-value = 0.0005974
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.3722214 0.8720851
sample estimates:
cor
0.6995202
```

Fig. 116 : Résultats du test de corrélation de Bravais-Pearson

L'étude de la corrélation se poursuit par l'ajustement d'un modèle de régression linéaire (fonction *lm* sous R). L'IGV des habitations est modélisé en fonction du flux thermique maximal simulé auquel elles ont été exposées. Le modèle de régression linéaire s'écrit :

$$IGV = a \cdot Q_{max} + b + \varepsilon$$

a et b sont les paramètres (les coefficients) du modèle. Le coefficient a représente la pente et b la constante (*intercept*). Le terme aléatoire ε (appelé résidu de la régression) correspond à l'estimation de l'erreur du modèle. Il permet de résumer toute l'information qui n'est pas prise en compte dans la relation linéaire que l'on cherche à établir entre IGV et Q_{max} .

Les résultats de la régression indiquent que la variable Q_{max} (notée RHFmax) est significativement reliée à l'IGV (p-value < 0,001 ***). Les paramètres estimés présentent une bonne stabilité : leurs écarts-types (Std. Error) sont faibles. Deux tests permettent d'asseoir la pertinence du modèle sur la population étudiée : le test de Student et celui de Fisher. Ces deux tests reposent sur l'hypothèse nulle :

$$H_0: a = 0 \text{ contre } H_1: a \neq 0$$

La fonction *lm* fournit la statistique des deux tests (t value et F-statistic), qui présentent une probabilité critique très inférieure à 0,05. Le modèle est alors jugé pertinent. La régression obtient un R² de 0,49, signifiant que 49 % de la vulnérabilité exprimée par l'IGV peut être expliquée par le flux thermique maximal simulé, auquel les habitations ont été exposées.

```
Call:
lm(formula = IGV ~ RHFmax)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-0.20919 -0.09032 -0.03414  0.07807  0.35519

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  2.186962   0.058346  37.483 < 2e-16 ***
RHFmax       0.021176   0.005099   4.153 0.000597 ***
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 0.1571 on 18 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.4893,    Adjusted R-squared:  0.461
F-statistic: 17.25 on 1 and 18 DF,  p-value: 0.0005974
```

Fig. 117 : Résultats de la régression linéaire IGV~Q_{max}

La régression linéaire suppose que les résidus vérifient certaines hypothèses : indépendance, normalité et homoscedasticité. Le test de Shapiro-Wilk sur les résidus de la régression confirme leur normalité (p-value = 0,11). De même, le test de Moran sur les résidus de la régression (*lm.morantest* sous R) valide l'absence d'autocorrélation spatiale, selon le plus proche voisin. Les résidus sont spatialement décorrélés, l'hypothèse d'indépendance est ainsi vérifiée. Enfin, le test de White sur les résidus de la régression (*white.test* sous R) nous donne une p-value = 0,73. L'hypothèse nulle selon laquelle les résidus possèdent des variances égales n'est donc pas rejetée. L'hypothèse d'homoscédasticité est ainsi vérifiée. Le modèle est bien spécifié, nous pouvons conclure qu'il existe une relation linéaire entre le flux thermique maximal reçu par les habitations et l'indice global de vulnérabilité des habitations. La relation est définie par l'équation suivante (Fig. 118) :

$$IGV = 2,187 + 0,021 * Q_{max}$$

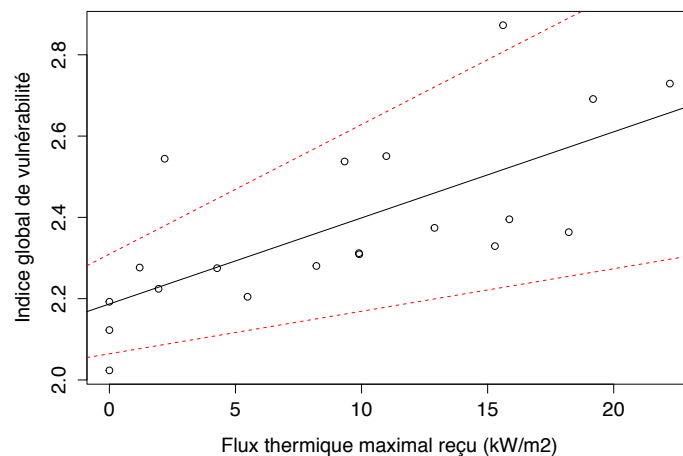


Fig. 118 : Modèle linéaire caractérisant l'indice global de vulnérabilité des habitations en fonction du flux thermique maximal reçu par les habitations (l'intervalle de confiance à 95 % est représenté en rouge)

c. Discussion

Les dommages s'interprètent assez bien par ces grandeurs thermodynamiques, notamment la densité d'énergie absorbée par l'équipement, qui combine l'intensité du flux thermique et sa durée. En effet, l'ignition des cibles (gouttières, portes, volets...) sous l'action du rayonnement thermique dépend de deux caractéristiques de la flamme : le flux thermique reçu et la durée d'exposition (Cohen et Butler, 1996). Par ailleurs, tout obstacle entre les cibles et la source de chaleur permet de bloquer tout ou partie du rayonnement incident. La végétation imbrulée, les murs, les dépendances et la topographie du site peuvent effectivement bloquer le rayonnement (Cohen et Butler, 1996). Ces spécificités ont été intégrées au calcul du rayonnement thermique impactant les zones sensibles des habitations. À travers l'étude de la corrélation entre l'indice global de vulnérabilité des habitations et le flux thermique maximal reçu, nous avons vérifié la cohérence de l'indice. Les contraintes thermiques, calculées par simulation, sont positivement et linéairement corrélées à la vulnérabilité des habitations estimée à dire d'experts.

La durée d'exposition au flux thermique influence également l'ignition. Pour un flux de chaleur radiative supérieur au seuil critique, le temps avant ignition dépend de l'amplitude du flux radiatif. En général, pour les incendies de forêt, la durée de combustion dépend de la taille des particules de végétation. Graminées, brindilles, feuilles et aiguilles représentent les combustibles légers qui entraînent des temps de résidence d'environ une minute ou moins. En revanche, un tas de bois, une dépendance en bois ou un véhicule peuvent soutenir une zone de flamme importante pendant des dizaines de minutes (Cohen et Butler, 1996). Ce type de source émettrice d'un flux de chaleur radiative n'a pas été considéré dans la simulation. Elles ont seulement servi d'éléments d'occultation (véhicule et annexes en bois). Nous nous sommes limités aux cibles enjeux, les habitations résidentielles. Néanmoins, la méthode élaborée peut être utilisée pour tout type de cibles (végétation ornementale, stock de bois, bouteille de gaz, véhicule, etc.). La prise en compte des équipements combustibles et inflammables (stocke de bois, palissade, véhicule...) comme sources de chaleur radiante au plus proche des habitations serait une amélioration précieuse.

De nombreux paramètres sont susceptibles d'influencer le flux thermique incident, mais également de se combiner à celui-ci pour amplifier la sévérité des dommages. Bien qu'il puisse être responsable de dommages légers, le rayonnement thermique n'est vraisemblablement pas la source première de l'inflammation des éléments de construction (Tran *et al.*, 1992). Compte tenu de la nature transitoire du phénomène incendiaire, il est peu probable qu'il soit le mécanisme principal d'endommagement. Notre analyse nous amène à considérer que l'ignition résulte principalement de l'action des particules incandescentes projetées au plus proche des habitations. Par ailleurs, la description des cibles reste partielle. Nous nous sommes concentrés sur les habitations ayant été impactées, afin de juger de l'efficacité du modèle à retrouver les dommages observés. Certaines habitations, notamment CAV_01, ont subi des flux thermiques supérieurs à 20 kW/m², n'ayant pas engendré de dommages. Les cibles visées présentent des caractéristiques différentes pouvant conditionner les dommages observés, comme : l'absence de matériaux sensibles (mur de façade), l'épaisseur des matériaux, la réaction au feu des enduits...

La méthode développée n'est cependant pas exempte de limites. Le calcul du rayonnement thermique est basé sur un modèle empirique développé par R.H. Leicester (1987), qui est fondé sur une équation de décroissance exponentielle, qui utilise la puissance linéique de la source de chaleur et la distance à la cible pour déterminer le flux de chaleur radiative. Cette équation suppose une température de flamme maximale de 1 014 °K en accord avec les travaux de D. Packham et A. Pompe (1971), ce qui correspond à un flux de 60

kW/m². La température est également supposée uniforme. Cette tendance se retrouve dans de nombreux travaux (Cohen et Butler, 1996 ; Sullivan *et al.*, 2003 ; Cohen, 2004 ; Zarate et al., 2008). Or, des travaux ont montré que la température variait sur la hauteur d'une flamme considérée (Wotton *et al.*, 2011). Selon les auteurs, la température maximale s'élève à environ 1 300 °K près de la base de la flamme et, diminue jusqu'à ~ 570 °K à la pointe de la flamme visible. Les hypothèses énoncées sur la température correcte à utiliser pour un incendie de forêt alimentent les débats (Sullivan *et al.*, 2003). Nombre d'auteurs fondent leurs travaux sur l'hypothèse conservatrice d'une température de flamme uniforme de 1 200 °K (Cohen et Butler, 1996 ; Sullivan *et al.*, 2003 ; Cohen, 2004 ; Zarate et al., 2008).

L'équation de Stefan-Boltzman permet cependant de modifier l'équation de R.H. Leicester, afin de considérer une température de flamme plus élevée (Fig. 119). Lorsque l'émittance totale, notée E , est égale à 60 kW/m², alors $T_f = 1\,014\text{ °K}$, ce qui correspond au coefficient 60 de l'équation de Leicester. Une température de flamme égale à 1 200 °K donne une émittance totale de 118 kW/m². Le coefficient de l'équation de Leicester prend alors la valeur 118. Il convient de noter que cette équation peut avoir besoin de nouveaux ajustements pour fournir des résultats réalistes en raison de son caractère empirique.

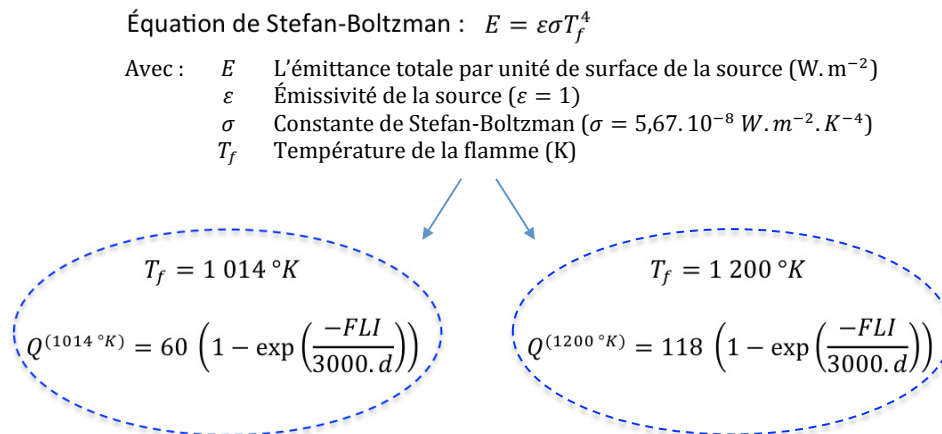


Fig. 119 : Transformation de l'équation de Leicester pour une température de flamme de 1 200 °K

Le modèle d'exposition présenté permet également de considérer l'atténuation par la végétation qui se situe entre le front de l'incendie et la maison. Cette atténuation a été citée comme un facteur favorisant la survie des habitations (Leonard, 2009 ; Cohen, 2004). Cependant, dans notre modèle, l'estimation de l'atténuation du rayonnement thermique incident par la végétation est basée sur l'hypothèse d'une végétation aléatoirement distribuée et orientée à l'intérieur de polygones 3D. L'hétérogénéité spatiale de la végétation n'est donc pas considérée. Des travaux récents se sont alors intéressés à l'utilisation de données LIDAR afin de caractériser plus précisément la structure de la végétation en trois dimensions (Siggins *et al.*, 2013). Ces données fournissent des informations très détaillées, sans précédent pour l'analyse de la distribution du combustible végétal et de l'effet de la végétation sur l'atténuation des flux de chaleur radiative. Elles permettent entre autre de mesurer l'atténuation due à la végétation en fonction de la fréquence des trouées, définie comme la probabilité qu'un rayon pénétrant dans la végétation n'ait aucun contact avec des éléments de la végétation avant d'atteindre un niveau de référence (Ross, 1981). L'utilisation de données LIDAR permettrait alors d'améliorer grandement la méthode. Cependant, ces données sont chères et pas toujours disponibles à l'emplacement et l'heure précise requis pour l'analyse post-incendies.

6.6. Conclusion du chapitre

Après avoir rappelé les principales caractéristiques des incendies de forêt, dans la première section de ce chapitre, nous avons utilisé le simulateur PHOENIX Rapidfire afin de modéliser la propagation de l'incendie de Cavaillon du 21 Juillet 2012. Ce simulateur est adapté à la problématique australienne, et utilisé pour des simulations de feux à grande échelle. Suite à un travail de calibration, en étroite collaboration avec les développeurs australiens, Phoenix a été en mesure de réaliser des prévisions fiables de la propagation du feu à Cavaillon, validées par l'expertise du chef des opérations de lutte. La qualité de la simulation de l'incendie est satisfaisante, mais la forme du feu n'a pas été parfaitement caractérisée. L'imprécision des entrées du modèle (végétation, condition météorologiques) peuvent l'expliquer. Les interactions du vent avec la topographie sont sous-estimées. La qualité de l'ajustement serait grandement améliorée par une meilleure prise en compte des effets locaux. Malgré ces limites, PHOENIX a été capable de simuler la propagation par sautes permettant au feu de franchir les crêtes, pour une résolution fine (5 m), conforme à la problématique des feux d'interface. Cependant, les fonctions qui sous-tendent la propagation de l'incendie ont été calibrées pour des forêts d'eucalyptus, les caractéristiques différentes de la végétation méditerranéenne française (structure, teneur en eau et pouvoir calorifique) peuvent être une source d'erreur supplémentaire.

En nous basant sur les niveaux de l'échelle d'intensité pour les incendies de forêt (Lampin *et al.*, 2002), nous avons croisé les résultats des deux approches élaborées dans cette thèse : l'approche à dires d'expert et l'approche par la simulation en laboratoire virtuel. Le triptyque « Intensité simulée – Vulnérabilité à dires d'experts – Sévérité des dommages observés » fait preuve d'une grande cohérence. La position centrale de l'indice global de vulnérabilité, au sein du triptyque, n'est pas anodine. D'une part, l'indice s'avère pertinent pour la modélisation de l'endommagement en interface habitat-forêt, de l'autre, il est fortement corrélé à la puissance linéique développée par l'incendie, donc à son niveau d'intensité. L'approche à dires d'experts permet alors de faire le lien entre l'intensité du feu et la sévérité des dommages. Les variables traduisant les caractéristiques physiques du feu (puissance linéique, densité de brandons...) introduites grâce à la simulation PHOENIX permettent de différencier significativement les habitations en fonction de la sévérité des dommages. Les résultats montrent que le niveau de sévérité des dommages croît à mesure que les valeurs des différentes variables augmentent. À l'issue de cette première analyse, nous avons établi une relation linéaire entre la puissance linéique moyenne du feu dans les zones d'exposition critique des habitations (buffer 30 m) et l'indice global de vulnérabilité des habitations. Le modèle est significatif au risque d'erreur de première espèce inférieur à 5 %. Enfin, un modèle logistique ordinal a été ajusté de manière à retrouver les niveaux d'intensité calculés par le simulateur PHOENIX, à partir de l'indice global de vulnérabilité des habitations. Les résultats indiquent que les niveaux d'intensité retrouvés par le modèle concordent avec ceux calculés par le simulateur. L'indice global de vulnérabilité offre ainsi un très bon potentiel discriminant des niveaux d'intensité du feu dans les 30 mètres autour des habitations, de l'occurrence et de la sévérité des dommages au niveau des habitations. Reliée à l'IGV, l'échelle d'intensité actuelle se voit alors doter d'une nouvelle dimension : mesurer *a priori* l'intensité potentielle qu'un incendie développerait dans les trente mètres environnant les habitations et estimer la sévérité des dommages engendrés sur les habitations.

À partir des résultats de la simulation, nous avons élaboré une méthode tridimensionnelle de calcul des contraintes thermiques reçues par les habitations résidentielles. Elle permet de réaliser des profils du rayonnement thermique impactant des points précis des maisons en interface. De cette manière, nous affinons la connaissance sur les mécanismes

d'endommagement associés aux niveaux d'intensité simulée dans la zone critique d'exposition des habitations. Les profils sont basés sur différentes variables : la durée d'exposition totale (en s), le flux thermique maximal reçu (en kW/m²), l'énergie totale accumulée (en kJ/m²), la durée d'exposition (en s). Ces valeurs sont alors comparées aux seuils de flux de chaleur radiative critiques usuels (3, 5, 8, 12 kW/m²). Ces variables, à l'exception de la durée d'exposition totale, permettent de séparer, de manière significative, les habitations endommagées des habitations non endommagées. Le flux thermique maximal simulé est fortement corrélé à l'indice global de vulnérabilité, et la relation linéaire entre ces deux grandeurs a pu être explicitée.

Ce travail ouvre des perspectives à la fois théoriques et opérationnelles intéressantes. Il met en valeur le rôle central de la vulnérabilité dans l'analyse du risque incendie de forêt en interface. La relation entre l'indice global de vulnérabilité, estimé à dire d'experts, et l'intensité simulée signifie également que la vulnérabilité pré-existante est à l'origine de l'intensité du phénomène au moment de l'événement. La logique des Plans de Prévention du Risque incendie de forêt, où les facteurs conditionnant l'intensité des incendies sont attribués à la composante « aléa » du risque, externe à la société, est remise en question. En amont du phénomène incendie de forêt, la société participe à la création d'un terreau favorable à l'endommagement de ses biens. Le prisme de lecture du risque, qu'offre la vulnérabilité, permet alors de le considérer comme interne, endogène aux sociétés humaines. Façonnant (consciemment ou inconsciemment) sa vulnérabilité, l'Homme conditionne l'intensité du phénomène contre lequel il cherche à se protéger.

Par ailleurs, l'approche par la simulation en laboratoire virtuel permet de pallier la subjectivité des expertises et les difficultés d'expérimentation en vraie grandeur, limitant l'opérationnalité de l'approche expérimentale directe pour l'étude de la vulnérabilité. Elle apporte les informations concernant la nature et l'importance des dommages à attendre en fonction du scénario de l'évènement. Elle rend possible l'analyse des conséquences liées à différents scénarii d'incendies, mais également à différentes conditions de vulnérabilité. Bien évidemment l'exercice doit être répété, de manière à asseoir la validité de l'approche couplant simulation physique d'exposition et modélisation multicritère de la vulnérabilité à dire d'experts. Cependant, la convergence des résultats nous autorise à conclure que la démarche proposée permet l'objectivation de l'évaluation de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt. Elle constitue un outil favorisant une meilleure gestion du risque incendie de forêt, aussi bien dans un cadre préventif, où les conséquences des modifications de l'occupation du sol pourront être évaluées en termes de vulnérabilité, d'intensité et de dommages potentiels, que dans un cadre protecteur, où les acteurs de la gestion de crise pourront anticiper les comportements du feu et hiérarchiser leurs actions.

Conclusion générale

Cette thèse tente de contribuer à la conception d'une méthode d'objectivation de l'évaluation de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt au regard des incendies de forêt. L'évaluation pour l'aide à la décision est au cœur de ce travail. L'objectif est d'aider les gestionnaires du risque incendie de forêt à diagnostiquer, de manière globale, la vulnérabilité territoriale des interfaces et à anticiper, de manière locale, l'impact des incendies sur les enjeux majeurs que représentent les habitations résidentielles en leur sein.

À cette occasion, nous avons été amené à utiliser des travaux existants dans le domaine de l'aide à la décision et de la modélisation des incendies, tout en tentant de concrétiser nos résultats à des fins opérationnelles. Nous pensons que ce travail peut intéresser à la fois par ses aspects conceptuels et par les perspectives qu'il offre dans le domaine de la gestion du risque incendie de forêt.

Le risque incendie est encore trop souvent considéré au travers de sa seule composante aléatoire. L'aléa feu de forêt, compris comme la probabilité d'occurrence, en un lieu donné, d'un feu d'une certaine intensité, ne permet pourtant pas à lui seul d'évaluer le risque dans sa globalité. En effet, les conséquences d'un même feu, en termes de dommages, pourront considérablement varier en fonction de la vulnérabilité des enjeux. La pratique usuelle consistant à simplement superposer aux cartes d'aléa les enjeux anthropiques ne suffit donc pas à représenter fidèlement la distribution spatiale du risque d'incendie. D'abord parce que c'est oublier que les écosystèmes eux-mêmes constituent également des enjeux à protéger, même s'ils sont moins prioritaires que les enjeux anthropiques. Mais aussi parce que tous les enjeux anthropiques, les bâtis, les infrastructures, les résidents eux-mêmes ne présentent pas tous la même vulnérabilité à l'incendie de forêt.

Dans ce travail de recherche, nous avons cherché à évaluer la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt en général, et celle des habitations résidentielles en particulier, au travers de méthodes valides et reproductibles. Dans un premier temps, nous avons interrogé les fondements du concept de vulnérabilité, sa position par rapport à celui du risque et de l'aléa (cf. Chapitre 1). L'analyse historique rend compte de la complexité du concept et de ses multiples acceptions. Ramené à la problématique des incendies de forêt, nous avons décomposé la vulnérabilité en trois composantes essentielles : la *sensibilité*, liée à la *vulnérabilité interne*, intrinsèque aux enjeux, c'est-à-dire la capacité de résistance des habitations, évaluable à partir des caractéristiques des constructions (matériaux, conception) ; la *vulnérabilité d'exposition*, liée à la susceptibilité du milieu naturel environnant les habitations (topographie, structure de la végétation) et du milieu anthropique (aménagement) à laisser prise aux attaques et à amplifier l'intensité du feu (effets de site) ; la *capacité de réponse* de la population, analysée par la prise des facteurs humains influençant la capacité à faire face au phénomène (préparation des personnes, entretien de l'habitation et de la végétation).

La vulnérabilité est un concept difficile à mesurer du fait de son caractère multicritère et adimensionnel. Notre postulat de départ est fondé sur un constat somme toute classique : les conséquences de la rencontre entre un phénomène destructeur (l'aléa, la perturbation) et un

enjeu vulnérable permettent l'interprétation de la vulnérabilité. Cependant, nous avons tenté d'en renouveler la lecture, en attirant l'attention sur les conditionnements anthropiques qui sous-tendent l'endommagement. En effet, nous pensons que l'endommagement est lié à la transformation des caractéristiques physiques de l'incendie par les effets de site, sur lesquels les sociétés influent directement ou indirectement. La naturalité de l'aléa incendie de forêt est remise en question au moment même où le feu brûle une haie, un tas de bois, ou un espace boisé non débroussaillé, proche des habitations. De même, la disposition des habitations, les remblais ou autres aménagements, agissent sur les conditions locales du vent qui influencent le comportement de l'incendie. Cette logique nous amène à considérer l'aléa incendie de forêt sous l'angle exclusif de la probabilité d'éclosion, conditionnée par des facteurs naturels (conditions météorologiques favorables) et anthropiques (la cause des incendies est principalement liée aux activités humaines). L'« intensité » du processus générateur de dommages, généralement attribuée à la composante aléatoire du risque (Blanchi *et al.*, 2002) est alors déplacée pour être lue par le prisme de la vulnérabilité.

Cette prise de position permet alors une lecture internalisant le processus d'endommagement, où la *vulnérabilité d'exposition* conditionne partiellement la répartition comme les caractéristiques locales de l'endommagement. Vulnérabilité et endommagement sont alors étroitement liés : les dommages physiques sont symptomatiques de la propension des enjeux à laisser prises aux attaques. La vulnérabilité se construit autour de critères, qui favorisent inégalement l'endommagement, qu'ils soient matériels (aspect, matériaux, entretien), environnementaux, socio-économiques, organisationnels, institutionnels et culturels (maîtrise de l'occupation du sol, préparation des personnes, choix d'adaptation face au risque).

À partir de cette conceptualisation, nous avons recherché quels sont les critères les plus pertinents permettant d'évaluer ces différentes composantes de la vulnérabilité. L'expérimentation en vraie grandeur étant exclue, nous nous sommes penché sur l'expérience des feux passés pour tenter de comprendre les circonstances de l'endommagement du bâti en cas de sinistre. Deux sources d'information pouvaient être utilisées : d'une part les dires d'experts, issus notamment de retours d'expériences opérationnelles, et d'autre part la simulation de feux et la simulation d'exposition, permettant de reconstituer le déroulement d'un incendie de forêt et des mécanismes ayant causé des dommages.

Les dires d'experts constituent la source d'information la plus directement accessible pour déterminer les principaux critères de vulnérabilité des habitations en interface. Ils présentent toutefois certaines limites pour l'élaboration d'un modèle général : ils sont individuels, et donc contextualisés, dépendant de l'expérience particulière de l'expert. Issus d'expériences non contrôlées, leur reproductibilité doit être vérifiée. Enfin, ils sont souvent qualitatifs, et donc difficiles à comparer et à agréger.

Toute démarche d'expertise dans le domaine de l'évaluation de la vulnérabilité est assimilable à un processus de décision (cf. Chapitre 3). L'analyse du contexte et des pratiques de l'expertise confirme les liens étroits entre l'information plus ou moins imparfaite et incertaine et l'évaluation pour l'aide à la décision. Les méthodes d'aide multicritère à la décision sont alors considérées comme des supports méthodologiques pertinents pour produire un modèle d'évaluation de vulnérabilité visant l'objectivité scientifique à partir des dires d'experts. La recherche de l'objectivité nécessite de compter avec la pluralité des regards disciplinaires pertinents sur toute question empirique (Godard, 2003). Face à une réalité complexe, différentes disciplines ont une méthode d'approche particulière et en tirent des interprétations différentes des faits. Être objectif, c'est alors restituer la pluralité des points de vue. Plusieurs retours d'expériences français et étrangers (américains et australiens) ont été analysés (cf. Chapitre 4), et onze experts de divers horizons, services de

secours et de lutte anti-incendie, gestionnaires de territoires, forestiers, chercheurs, ont été consultés pour établir une hiérarchie des critères de vulnérabilité et définir les modalités (plage de valeurs) caractérisant les critères élémentaires (base de la hiérarchie). L'analyse multicritère hiérarchique présente l'avantage d'être un moyen simple et accessible pour formaliser un problème d'évaluation pour l'aide à la décision. Le modèle hiérarchique a été utilisé comme un support conceptuel permettant d'organiser les critères et définir leur contribution relative. Il permet ainsi d'explicitier et de formaliser la connaissance associée à l'expertise.

La méthode proposée (Fig. 120) permet de répondre à la question de la vulnérabilité en intégrant un large spectre de critères construisant l'exposition, la capacité de réponse et la sensibilité à l'endommagement des habitations en interface. Six familles de critères ont été considérées et évaluées grâce à des modalités (ou indicateurs) induisant des effets favorables ou défavorables au regard de la vulnérabilité. Les critères, les familles de sous-critères et les modalités ont été identifiées et validées en concertation étroite avec les différents experts consultés. Du fait de leur caractère difficilement quantifiable, leur grand nombre, leur nature variée, le choix de la méthode AHP (procédure d'analyse hiérarchique) facilite la prise en compte de situations multidimensionnelles, sert à la quantification des vulnérabilités spécifiques à chaque critère, leur pondération et permet l'agrégation des différentes contributions.

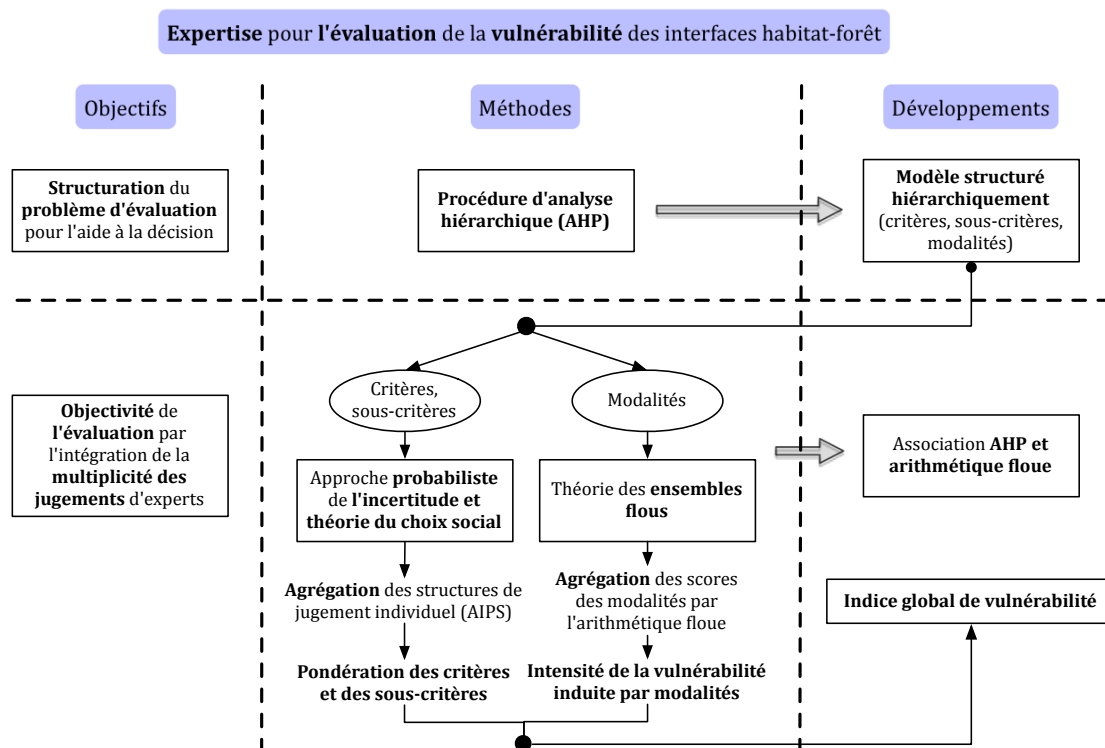


Fig. 120 : Développement de l'approche à dire d'experts pour l'évaluation de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt

La modélisation multicritère de la vulnérabilité permet de décomposer celle-ci, d'appréhender à la fois son aspect global et ses spécificités. À caractère compensatoire, l'agrégation des vulnérabilités spécifiques, hiérarchisées selon leur contribution à la vulnérabilité globale, capture les interactions, révèle les critères névralgiques et produit un indice global de vulnérabilité.

Le croisement des expertises a pour but d'aboutir à une évaluation objective. La méthode AIPS a permis de traiter l'incertitude des jugements. Elle se révèle capable d'intégrer la multiplicité des avis d'experts en respectant les principes de la théorie du choix social. La comparaison avec la méthode traditionnelle d'agrégation des jugements individuels par la moyenne géométrique (AJI) révèle sa tendance à modérer les résultats. Les poids de contribution sont plus resserrés, contrairement à l'AJI, où, le jugement du groupe est plus influencé par les valeurs extrêmes et les jugements majoritaires. Il en va de même pour les méthodes d'agrégation des jugements sur les modalités. L'arithmétique floue nous a permis de transformer un jugement qualitatif, exprimé sous forme d'une valeur textuelle, en une valeur numérique traduisant l'imprécision et l'incertitude liées au langage. Cette conversion a autorisé le calcul d'un jugement unique pour le groupe d'expert.

L'agrégation de plusieurs variables ne présentant pas toujours d'unité de mesure clairement définie a conduit à recourir à une évaluation de la vulnérabilité combinant la subjectivité de plusieurs expertises. Cette pratique courante est justifiée dans la mesure où elle traduit une agrégation des connaissances souvent impossible à réaliser, mais néanmoins reconnue et efficace (Fulleriger, 1996). Bien qu'elle soit rigoureuse et innovante, l'approche développée présente certaines limites. Le faible nombre d'experts consulté ne permet pas d'assurer une représentativité exhaustive. Un nombre supérieur de participants aurait garanti une meilleure objectivité des résultats. Il semble alors nécessaire de poursuivre les consultations auprès des experts des différents champs disciplinaires. Ainsi, de nouveaux critères et/ou modalités sont susceptibles d'être intégrés dans le modèle d'évaluation.

Afin de vérifier la pertinence du modèle à dire d'experts, celui-ci a été confronté à l'expérience. Pour ce faire, nous avons adopté une démarche *a posteriori* (cf. Chapitre 5). Le modèle a été appliqué à un cas d'étude, l'incendie de Cavaillon du 21 Juillet 2012, où les circonstances de l'endommagement induit sur les habitations ont été étudiées. La confrontation *a posteriori* de l'endommagement et des résultats du modèle à dire d'experts est spatialisée. La vulnérabilité, telle qu'elle a été définie (cf. Chapitre 1), induit deux phénomènes de diffusion : une diffusion de l'environnement (exposition liée aux effets de site) vers les habitations et, une diffusion des habitations (sensibilité, capacité de réponse) vers l'environnement. La première concerne les variables spatiales telles que la topographie et la structure de la végétation dont les valeurs sont connues en tout point de l'interface. La seconde concerne les variables dites « attributs des habitations », ponctuelles dans l'espace. La méthode d'interpolation IDW (cf. Chapitre 5) a été utilisée pour calculer les champs de vulnérabilité induits par les enjeux sur leur environnement. Ce choix est basé sur l'hypothèse que l'effet de la vulnérabilité induite par une habitation se transmet à l'ensemble du territoire et interagit avec les vulnérabilités induites par les enjeux voisins. L'influence d'un enjeu est alors considérée comme décroissante à mesure que l'on s'en éloigne.

Les cartes de vulnérabilité permettent d'identifier les zones les plus vulnérables grâce à une échelle de valeurs textuelles déclinant cinq niveaux de vulnérabilité, applicable à chaque critère. La carte de l'indice global de vulnérabilité (IGV) offre un intérêt opérationnel pour l'intégration de la vulnérabilité à l'aménagement du territoire. À travers les multiples contributions spécifiques à l'occupation du sol, cette carte synthétique traduit la vulnérabilité latente des habitations en interface habitat-forêt, et de plus offre une lecture détaillée, appropriable par tous, des forces et faiblesses du territoire en interface habitat-forêt. La carte de la distribution spatiale de la vulnérabilité produite par le modèle permet la définition des zones prioritaires d'intervention, ainsi que le ciblage des actions à entreprendre, en identifiant les critères névralgiques.

L'analyse des structures spatiales de la vulnérabilité selon les couples d'habitations de plus proche voisin a permis de mettre en évidence un phénomène d'autocorrélation spatiale

pour certains critères de vulnérabilité (Aménagement, Structure de la Végétation et Facteurs Humains). Au sein des interfaces, les habitations constituent un réseau de sites et de liens qui peuvent, selon leur état de vulnérabilité relayer ou non l'incendie au site directement voisin. Des zones de concentration de fortes vulnérabilités ont été décelées, tout comme des « îlots » de moindre vulnérabilité. Cette analyse croisée à celle de la répartition des dommages met en évidence la relation entre diffusion spatiale de vulnérabilité selon le plus proche voisin et l'endommagement des habitations, et conduit à la deuxième vocation de l'application du modèle à l'incendie de Cavaillon : la modélisation de l'endommagement observé sur les habitations en fonction de l'indice global de vulnérabilité.

Deux modèles logistiques ont été ajustés à partir de la population des vingt habitations étudiées. Tous deux prennent en compte le phénomène d'autocorrélation spatiale au niveau des variables explicatives. Ils présentent une grande cohérence avec les observations, que ce soit pour retrouver l'occurrence du dommage ou sa sévérité. Cependant, ces modèles souffrent du faible effectif de maisons étudiées. En l'état actuel, ils présentent un caractère explicatif mais non prédictif. L'exercice doit être répété sur un plus gros jeu de données de manière à procéder à une validation statistique de leur potentiel prédictif.

Les limites posées par l'approche à dire d'expert nous ont donc poussé à recourir à l'expérimentation en laboratoire virtuel. Cette deuxième approche se base sur la théorie de la physique du feu et de sa propagation. Afin de reconstituer précisément les mécanismes d'endommagement, à l'œuvre lors de l'incendie de Cavaillon, nous avons travaillé en collaboration avec deux équipes australiennes. La première est une équipe du département *Forest and Ecosystem Science* de l'université de Melbourne, en charge du développement du simulateur PHOENIX Rapidfire (Tolhurst *et al.*, 2008), utilisé pour reconstituer la propagation du feu d'interface. La seconde est une équipe du CSIRO de Melbourne (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation) en charge de nombreux travaux de recherche sur la modélisation de l'exposition des enjeux, les mécanismes d'endommagement et les scénarios ayant conduit à des pertes humaines et matérielles.

Pour reconstituer le feu de Cavaillon, nous avons procédé à un travail de calibration du simulateur et des données de végétation. La simulation est cohérente, elle retranscrit le scénario de l'incendie, tel qu'il a été décrit par les services de secours de Cavaillon. Cette reconstitution *in silico* du feu de Cavaillon nous renseigne sur les principaux paramètres du feu au moment de l'exposition des enjeux endommagés : vitesse et puissance linéique du front, hauteur et temps de résidence des flammes, etc.

À partir de ces paramètres, nous avons procédé à l'analyse de la cohérence du triptyque « Intensité simulée – Vulnérabilité à dire d'experts – Sévérité des dommages observés ». L'intensité de l'incendie est calculée sur la base de la puissance linéique du front de flamme, selon les niveaux proposés dans l'échelle d'intensité pour les incendies de forêt (Lampin *et al.* 2002). À cette intensité d'ordre physique est associée une échelle des effets induits sur les habitations. Les effets induits déterminés par niveaux correspondent avec la sévérité des dommages observés. Cette première tentative de validation de l'échelle d'intensité est fructueuse. Les résultats de la simulation sont cohérents et convergent avec les résultats de l'approche à dire d'experts. La cohérence du triptyque est vérifiée. Un modèle de régression logistique a été ajusté, permettant d'expliquer l'intensité du feu générée dans la zone critique d'exposition des habitations (buffer 30 m) par l'indice global de vulnérabilité. Ce résultat confère à l'échelle d'intensité une perspective prospectiviste inédite, qui nécessite néanmoins d'être approfondie par la répétition de l'exercice sur un jeu de données présentant un échantillon pour l'ajustement du modèle et un autre pour sa validation.

Puis, nous avons évalué la quantité d'énergie reçue par chacun des bâtis, endommagés ou non, au moyen du modèle d'exposition 3D australien (Blanchi *et al.*, 2011). Nous avons

implémenté le modèle sur le système de traitement de l'information géographique ESRI ArcGIS®10, en utilisant les modules de l'extension *3D Analyst*. Le modèle d'exposition prend notamment en compte l'occultation partielle ou totale du rayonnement incident par la végétation, les clôtures ou le bâti lui-même, ainsi que les facteurs de vues, si bien que les scènes 3D complètes des bâtis endommagés ont pu être reconstituées sur le SIG.

Les niveaux d'exposition produits par le modèle 3D sont cohérents avec les dommages observés et la vulnérabilité des habitations, évaluée au moyen du modèle multicritère à dires d'experts spécifiés au début de ce travail. Les résultats démontrent la pertinence de l'approche à dires d'experts. L'association des deux approches renforce l'objectivité de l'évaluation de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt.

Les principaux critères de vulnérabilité, identifiés par les experts, sont pertinents, tout comme le modèle de vulnérabilité qui en découle. Il est possible de les interpréter par la représentation des mécanismes d'exposition des enjeux à un feu réel. Pour l'aménageur et les gestionnaires du risque incendie de forêt, ces critères peuvent être cartographiés, permettant ainsi d'identifier les interfaces forêt-habitat les plus critiques, et les critères prioritaires sur lesquels il est possible d'agir pour limiter la vulnérabilité : amélioration des accès, renforcement de la disponibilité des hydrants, révision des densités et de l'arrangement spatial des bâtis autorisés par exemple. La démarche ouvre des perspectives opérationnelles en rendant possible la retranscription de l'évolution dynamique de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt. La simulation, à des fins prospectives, des changements d'occupation du sol est rendue possible. Dans cette perspective, l'impact sur la vulnérabilité des interfaces induit par les décisions potentielles concernant l'instauration de mesures préventives, pourra être évalué au travers des résultats du modèle multicritère à dires d'expert, couplé au modèle d'exposition physique. Ces outils pourraient certainement contribuer à l'élaboration des Plans de Prévention du Risque incendie de forêt. Il présentent une double utilité : la maîtrise et l'intégration de la vulnérabilité dans le cadre de l'urbanisation en interface ; la concertation est facilitée par la réflexion autour des cartes de vulnérabilités adaptés aux conditions spécifiques locales.

Pour le résident en interface, ces travaux permettront un auto-diagnostic de la vulnérabilité de son habitation, et l'identification des principaux points d'achoppements pouvant être améliorés pour renforcer sa propre sécurité. Contrairement à l'aléa, fortement dépendant du contexte local collectif, peu maîtrisable individuellement, la vulnérabilité dépend beaucoup de l'aménagement micro-local de l'interface, du jardin d'agrément cernant le bâti, etc. Éloigner un tas de bois de chauffage de l'habitation, améliorer la qualité de la protection des ouvertures, se préparer à la survenue du phénomène sont autant de mesures simples et souvent peu coûteuses qui peuvent permettre de limiter radicalement la vulnérabilité d'une habitation en interface.

Prochainement, le modèle multicritère devrait être implanté sur la plateforme « Géorisques » du Ministère de l'Environnement, afin de permettre à tout résident de procéder à une telle auto-évaluation de la vulnérabilité de son habitation, et de pouvoir prendre les meilleures dispositions pour améliorer sa situation.

Plusieurs perspectives s'ouvrent donc pour la poursuite de ce travail. Aussi étonnant que cela puisse paraître la connaissance précise des dommages perpétrés au sein des interfaces habitat-forêt est aujourd'hui inaccessible faute de recensement obligatoire. Un recensement systématique devrait donc être mis en place sur la base des protocoles servant à l'application de la méthode. De même la gestion des incendies par les sapeurs-pompiers ne fait qu'exceptionnellement l'objet d'un compte rendu. Or, les scénarios des sinistres mériteraient d'être décrits dans le détail pour poursuivre la calibration des simulations de feu d'interface.

Par ailleurs, notre travail n'a pas considéré la spécificité des espèces ornementales lors de la propagation du feu en interface. Un travail de caractérisation de l'inflammabilité et de la combustibilité des espèces rencontrées en région méditerranéenne française permettrait d'améliorer la modélisation du feu. Ce travail est en cours au sein de l'équipe de recherche EMAX de l'Irstea d'Aix-en-Provence, qui s'intéresse de près à la propagation de l'incendie à l'intérieur de l'interface en fonction de l'organisation spatiale des composants combustibles.

Une question spécifique à la gestion opérationnelle de la vulnérabilité qui n'a pas été abordée dans ce travail concerne l'acceptabilité du risque. Cette notion est peu débattue chez les géographes (Léone, 2007). Elle correspond, selon l'auteur, à une variable d'ajustement du seuil de réduction du risque et donc des vulnérabilités. Quel niveau de risque la population en interface, est-elle prête à supporter? Le niveau d'acceptabilité dépend de facteurs difficilement quantifiables comme l'ont montré les psychosociologues et sociologues, et sa quantification est difficile (Peretti-Watel, 2001). Nous pensons que la méthode d'analyse multicritère développée est transposable à un travail sur l'acceptabilité. Les experts seraient alors remplacés par les résidents des interfaces, qui participeraient à la fois à la décomposition hiérarchique du problème d'acceptabilité et à sa modélisation. Il serait alors possible de déterminer le niveau de vulnérabilité acceptable ou par défaut les vulnérabilités inacceptables sur lesquelles se porterait prioritairement la prévention.

Bibliographie

(par ordre alphabétique)

-A-

- Aboubaker, E.** (1996). *Évaluation de la compétence linguistique des étudiants libyens apprenants le français à l'université El-fateh (Tripoli) en Libye*, Thèse de 3^{ème} cycle, Grenoble III.
- Aczel, J.** et **Saaty, T.L.** (1983). Procedures for synthesizing ratio judgments. *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 27, pp. 93-102.
- Aguarón, J., Escobar, M.T.** et **Moreno-Jiménez, J.M.** (2003). Consistency stability intervals for a judgement in AHP decision support systems. *European Journal of Operational Research*, vol. 145, pp. 382-393.
- Agresti, A.** (2002). *Categorical Data Analysis*. Wiley, New York.
- Ahern, A.** et **Chladil, M.** (1999). How far do bushfires penetrate urban areas? *Australian Disaster Conference*, Canberra, Emergency Management Australia.
- Akaike, H.** (1974). A new look at the statistical model identification. *IEEE Transactions on Automatic Control*, vol. 19, pp. 716-723.
- Akomode, O.J., Lees, B.** et **Irgens, C.** (1998). Constructing customised models and providing information to support IT outsourcing decisions. *Logistics Information Management*, vol. 11(2), pp. 114-127.
- Albini, F.A.** (1984). Wildland fires. *Ame. Scientist* 72, pp. 590-597.
- Albouy, F.** (2002). *Le temps des catastrophes*. Descartes et Cie (éd.), Paris.
- Alexander, M.E.** (1982). Calculating and interpreting forest fire intensities. *Canadian Journal of Botany*, vol. 60, pp. 349-357.
- Alexandrian, D., Esnault, F.** et **Calabri, G.** (1998). Feux de forêt dans la région méditerranéenne. Dans *Réunion de la FAO sur les politiques publiques concernant les feux de forêt*, Rome (Italie), du 28 au 30 octobre.
<http://www.fao.org/docrep/x1880f/x1880f07.htm>
- Allen, K.** (2003). Vulnerability Reduction and the Community-based Approach. *Natural Disasters and Development in a Globalising World*, pp. 170-184.
- AMR** (2007). Demande de moratoire en matière d'élaboration des Plans de Prévention des Risques Incendie de Forêt (P.P.R.i.f.) dans le département du Var. Par l'Association des Maires du Var, l'Association des Communes Forestières du Var et l'Association des Maires Ruraux du Var, consultable sur internet :
http://amr83.amrf.asso.fr/portals/5/textes/moratoire_pprif_final.pdf
- Amouric, H.** (1992). *Le feu à l'épreuve du temps : témoins et arguments*. Narration, Aix-en-Provence, France.
- Anderson, D.H., Catchpole, E.A., De Mestre, N.J.** et **Parkes, T.** (1982). Modelling the spread of grass fires. *Journal of Australian Math. Soc. B*, vol. 23, pp. 451-466.
- Andrews, P.** (1986). *BEHAVE : Fire Behaviour Prediction and Fuel Modeling System – Burn Subsystem, Part 1*. General Technical Report INT-194, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Ogden, UT.
- Anselin, L.** (1995). Local indicators of spatial association – LISA, *Geographical Analysis*, Vol. 27(2), pp. 93-115.
- Anselin, L.** (1996). The Moran scatterplot as an ESDA tool to assess local instability in spatial association, in FISCHER, Manfred, SCHOLTEN, Henk K., UNWIN, David, *Spatial analytical perspectives on GIS*, Taylor & Francis, London, pp. 111-125.
- Apostolou, B.A., Hassell, J.M., Webber, S.A.** et **Sumners, G.E.** (2001). The Relative Importance of Management Fraud Risk Factors. *Behavioral Research In Accounting*, vol. 13, pp. 1-24.
- Arnould, P.** (2002). Histoire et mémoire des aménagements forestiers. *Ingénieries*, n° spécial, pp. 9-20.

- Arrow, K.J.** (1951). *Social Choice and Individual Values*. Cowles Foundations and Wiley, N.Y.
- Arrow, K.J.** et **Raynaud, H.** (1986). *Social Choice and Multicriterion Decision Making*, MIT Press, Cambridge.
- Auguin, G., Rabilloud, A.** et **Guillaume, E.** (2008). *Plan de Prévention des Risques Technologiques – Caractérisation et réduction de la vulnérabilité du bâti face à un phénomène dangereux technologique thermique*. Rapport pour le Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire, E-ING-07/564b-GA/AR.
<http://www.mementodumaire.net/wp-content/uploads/2012/07/Thermique.pdf>
- Azibi, R.** (2003). *Construction des critères en aide à la décision : Aspects méthodologiques, techniques et pratiques*. Thèse de Doctorat, Université Paris-Dauphine.
- B-
- Bachelard, G.** (1968). *Le nouvel esprit scientifique*. PUF, Paris.
- Bachmann, A.** et **Allgower, B.** (2000). The need for a consistent wildfire risk terminology. Dans : Neuenschwander, L., Ryan, K., Golberg, G. (éd.), *Crossing the Millennium: Integrating Spatial Technologies and Ecological Principles for a New Age in Fire Management*. The University of Idaho and the International Association of Wildland Fire, Moscow, pp. 67–77.
- Bana e Costa, C.A.** (1992) *Structuration, construction et exploitation d'un modèle multicritère d'aide à la décision*. Thèse de doctorat, Universidade Técnica de Lisboa.
- Barbero, M., Loisel, R.** et **Quézel, P.** (1988). Perturbations et incendies en région méditerranéenne française. Homenaje a Pedro Montserrat, Inst. Pyren. De Ecologia, Jaca y Huesca, pp. 409-419.
- Barbier, J.M.** (1985). *L'évaluation en formation*. PUF, Paris.
- Barbolini, M.** (2008). Deliverable 3.1 : Hazard mapping of extremely rapid mass movements in europe – State of the art methods in practice. Technical report, IRASMOS E.U. Project (contract 018412) – *Integral Risk Management of Extremely Rapid Mass Movements*, Work package 3.
- Barczak, A.** et **Grivault, C.** (2007). Système d'information géographique pour l'évaluation de la vulnérabilité au risque de ruissellement urbain. NOVATECH 2007, GRAIE, Lyon, France, pp. 139-146.
<http://hdl.handle.net/2042/25274>
- Barrocca, B., Pottier, N.** et **Lefort, E.** (2005). Analyse et évaluation de la vulnérabilité à l'inondation du bassin de l'Orge aval. *Septièmes rencontres de Théo Quant*, p. 12.
- Barroca, B.** et **Hubert, G.** (2008). *Urbaniser les zones inondables, est-ce concevable ?* Dossier 11 : Catastrophes et Territoires. <http://developpementdurable.revues.org/index7413.html>
- Barrows, H.H.** (1923). Geography as Human Ecology. *Annals of the American Geographers*, vol. 13, n°1, pp. 1-14.
- Barzilai, J.** (1997). Deriving weights from pairwise comparison matrices. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 48(12), pp. 1226-1232.
- Beck, E.** (2006). *Approche multi-risques en milieu urbain. Le cas des risques sismique et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin)*. Thèse de doctorat, Université Strasbourg I (Louis Pasteur).
- Beck, U.** (2001). *La Société du risque. Sur la voie de la modernité*. Flammarion Aubier.
- Becu, N.** (2006). *Identification et modélisation des représentations des acteurs locaux pour la gestion des bassins versants*. Thèse de doctorat, Université de Montpellier II.
- Bell, D., Raiffa, H.** et **Tversky, A.** (1988). *Decision Making : Descriptive, normative and prescriptive interactions*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Benson, C.** et **Twigg, J.** (2007). *Tools for Mainstreaming Disaster Risk Reduction: Guidance notes for Development Organisations*. Provention Consortium, Genève.
- Beucher, S.** (2008). *Risque d'inondation et dynamiques territoriales des espaces de renouvellement urbain : les cas de Seine Amont et de l'Est londonien*. Thèse de doctorat, Université Paris 10 Nanterre.
- Bihari, M.** et **Ryan, R.** (2012). Influence of social capital on community preparedness for wildfires. *Landscape and Urban Planning*, vol. 106, pp. 253–261.
- Bivand, R., Altman, M.** et **Anselin, L.** (2014). Package spdep.
<http://cran.r-project.org/web/packages/spdep/spdep.pdf>

- Black, D.** (1958). *The theory of Committees and Elections*. Cambridge University Press.
- Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I. et Wisner, B.** (1994). *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*. Routledge, London.
- Blanchi, R., Jappiot, M. et Alexandrian, D.** (2002). Forest fire risk assessment and cartography, a methodological approach. Dans : Viegas, D.X. (éd.), *IV International Conference on Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*, Coimbra, Portugal. Millpress, Rotterdam, Netherlands.
- Blanchi, R., Robert, F. et Guarnieri, F.** (2003). Première analyse du contenu et de la qualité des Plans de prévention des risques naturels (PPR), d'une complexité originelle à une pluralité fonctionnelle. *Annales des Mines*, n° 20, pp. 61-69.
- Blanchi, R., Leonard, J.E. et Leicester, R.H.** (2006). Bushfire risk at the rural/urban interface. *Australian Bushfire Conference*, Brisbane, Griffith University, Australia.
- Blong, R.** (1996). Volcanic Hazards Risk Assessment. Dans : Scarpa, R. et Tilling, R. (éd.), *Monitoring and mitigation of volcano hazards*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, pp. 675-698.
- Borda, J.C.** (1781). *Mémoire sur les élections au scrutin*. Histoire de l'Académie Royale des Sciences, Paris.
- Bonnet, E.** (2001). Évaluation des vulnérabilités territoriales. Actes du colloque *Risques et Territoires*, Lyon, 16-18 mai, Atelier n°1, pp. 185-198.
- Bonniol, J.J. et Genthon, M.** (1989). L'évaluation et ses critères : les critères de réalisation. *Repères*, n°79, pp. 107-115.
- Bouisset, C.** (1998). *Les incendies de forêts méditerranéens : limites, marges, frontières. Des seuils écologiques aux limites politico-administratives, du local à l'europpéen, un siècle de gestion des incendies en France, Espagne et Italie*. Thèse de doctorat en Géographie, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, France.
- Bourdières, V.** (2008). *De la gestion des risques aux risques de leur gestion dans les territoires touristiques de montagne. Modalités de gestion du risque d'avalanches dans les Alpes françaises et facteurs de vulnérabilité associés*. Thèse de doctorat de Géographie, université Joseph Fourier, Institut de Géographie Alpine, Grenoble.
- Bouyssou, D., Perny, P., Pirlot, M., Tsoukiàs, A. et Vincke, P.** (1993) A Manifesto for the New MCDA Era. *Journal of Multi-criteriz Decision Analysis*, vol. 2, pp. 125-127.
- Bouyssou, D., Marchant, T., Pirlot, M., Perny, P., Tsoukiàs, A. et Vincke, P.** (2000) *Evaluation and decision models: a critical perspective*. Kluwer Academic, Dordrecht.
- Brans, J.P., Mareschal, B. et Vincke, P.** (1984). PROMETHEE : a New Family of Outranking Methods in Multicriteria Analysis. Dans : Brans, J.P. (éd.), *Operational Research, IFORS 84*, North Holland, Amsterdam, pp. 477-490.
- Braudel, F.** (1985). *La Méditerranée - L'espace et l'histoire*, Champs - Flammarion, Paris.
- Brenkert-Smith, H., Champ, P.A. et Flores, N.** (2006). Insights into wildfire mitigation decisions among wildland-urban interface residents. *Society and Natural Resources*, vol. 19, pp. 759-768.
- Brooks, N.** (2003). *Vulnerability, risk and adaptation : a conceptual framework*. Tyndall Centre Working Paper No. 38 September 2003.
- Brose, P.H.** (2010). Long-term effects of single prescribed fires on hardwood regeneration in oak shelterwood stands. *Forest Ecology and Management*, vol.260, pp. 1516-1524.
- Brousselle, A., Champagne, F., Contandriopoulos, A.P. et Hartz, Z.** (2011) *L'évaluation : concepts et méthodes*. Les Presses de l'Université de Montréal, Paramètres (coll.), Deuxième édition.
- Brundl, M., Fuchs, S., Sandersen, F., Kvelsvik, V., Eidsvig, U., Bischof, N., Korup, O., Rheinberger, C., Romang, H. et Barbbolini, M.** (2008). Deliverable 5.2 : Integral risk management of snow avalanches, rock avalanches and debris flows in europe. Technical report, IRASMOS E.U. Project (contract 018412) - *Integral Risk Management of Extremely Rapid Mass Movements*.
- Burton, I. et Kates, R.W.** (1964). Perception of Natural Hazards in Resource Management. *Natural Resources Journal*, pp. 412-441.
- Burton, I., Kates, R.W. et White, G.F.** (1978). *The environment as hazard*. Oxford University Press, New York.
- Byram, G.M.** (1959). Combustion of forest fuels. Dans : Davis, K.P. (éd.), *Forest fire control and use*, New York, McGraw-Hill.

-C-

- Caballero, D., Giroud, F., Picard, C. et Xanthopoulos, G.** (2004). *Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory, a "wall-less" laboratory for wildland fire sciences and technologies in the Euro-Mediterranean Region*. Deliverable D-10-01 : Wildland-Urban Interface Management : A state of the art. <http://www.eufirelab.org/deliverable.php?unit=10>.
- Calkin, D.E., Ager, A.A. et Gilbertson-Day, J.** (2010). *Wildfire risk and hazard: procedures for the first approximation*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-235.
- Callon, M. et Rip, A.** (1992). Humains, non humains : morale d'une coexistence. Dans : Theys, J. et Kalaora, B. (dir.), *La Terre outragée. Les experts sont formels ! Autrement* (éd.), Paris, pp. 140-156.
- Callon, M., Lascoume, P. et Barthe, Y.** (2002). *Agir dans un monde incertain*. Le Seuil, Paris.
- Camia, A., Guglielmet, E., Bovio, G. Deshayes, M., Lampin, C., Salas, J., Martinez, J., Molina, D., Carrega, P., Fox, D., Berolo, W., Sabate, S., Vayreda, J., Martin, P., Martinez, J., Conese, C., Bonova, L., Karteris, M., Mallinis, G., Sergiopoulos, I. et Gitas, I.** (2006). Eufirelab: Euro-Mediterranean Wildland Fire Laboratory, a "wall-less" laboratory for wildland fire Sciences and technologies in the Euro-Mediterranean Region Deliverable D-08-07: Wildland fire danger and hazards : a state of the art, final version.
- Can, A.** (1993). Residential quality assessment : alternative approaches using GIS. *The Annals of Regional Science*, vol. 26(1), pp. 97-110.
- Cannon, T.** (1994). Vulnerability analysis and the explanation of "natural" disasters. Dans : Varley, A. (éd.), *Disasters, development and environment*, J. Wiley et sons, Chichester, pp. 13-30.
- Cannon, T.** (2002). Gender and Climate Hazards in Bangladesh. *Gender and Development*, vol. 10, n°2, pp. 45-50.
- Caplat, G.** (2002). *Modélisation Cognitive et Résolution de Problèmes*. Presse polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- Carrega, P.** (1997). *Inventories, hazards and risks*. Internal final report. TIGRA European Contract. ENV4 CT 96 – 026.
- Carrega, P.** (2003). Les risques naturels liés à la pluie et à la sécheresse : élaboration de cartes des pluies extrêmes et des risques d'incendies de forêt dans une région méditerranéenne : la Toscane (Italie). Dans : *Riscuri si catastrofe*, vol. II, Edit V. Sorocovschi ; Université de Cluj-Napoca (Roumanie), pp 271-286.
- Carrega, P.** (2008). Le risque d'incendie de forêt en région méditerranéenne : compréhension et évolution. *Actes du XXIIe colloque de l'Association Internationale de Climatologie*, Montpellier, septembre 2008, pp. 11-23.
- Carrega, P. et Napoli, A.** (2002). Climat, Foehns et incendies de forêt. *Publication de l'Association Internationale de Climatologie*, vol. 14, pp. 35-43.
- Carroue, L., Claval, P., Di Méo, G., Miossec, A., Renard, J.P., Simon, L. et Veyret, Y.** (2002). *Limites et discontinuité en géographie*. SEDES (éd.), Dossiers des images économiques du monde, Paris.
- Catchpole, E.A. et De Mestre, N.J.** (1986). Physicals models for a spreading line fire. *Australian Forestry*, vol. 49, pp. 102-111.
- Challot, A.** (2004). Forêt Méditerranéenne et incendies dans l'histoire, *Revue Forestière Française*, Tome XXV, n°4, pp. 249-258.
- Chardon, A.C.** (1994). Etude intégrée de la vulnérabilité de la ville de Manizales (Colombie) aux risques naturels. *Revue de géographie Alpine*, 82(4), pp.97-111.
- Chardon, A.C.** (1996). *Croissance urbaine et risques « naturels » : évaluation de la vulnérabilité à Manizales, Andes de Colombie*. Thèse de doctorat, Institut de Géographie Alpine, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- Cellule Pyroscope** (2007). Analyse des dégâts observés aux constructions suite au passage d'un incendie, département de Corse-du-Sud.
- Chen, K. et McAneney, J.** (2004). Quantifying bushfire penetration into urban areas in Australia. *Geophysical Research Letters*, vol. 31, L12212.
- Chen, K. et McAneney, J.** (2010). *Bushfire penetration into urban areas in Australia : A spatial analysis*. Risk Frontiers and Bushfire CRC, Macquarie University, Australia.

- Cheney, N.P.** et **Sullivan, A.L.** (1997). *Grassfires: Fuel Weather and Fire Behaviour*. CSIRO Publishing, Melbourne.
- Cheney, N.P., Gould, J.S.** et **Catchpole, W.R.** (1998). Prediction of fire spread in grasslands. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 8(1), pp. 1-13.
- Cheng, C.H.** (1996). Evaluating naval tactical missile systems by fuzzy AHP based on the grade value ok membership function. *European Journal of Operational Research*, vol. 96, pp. 343-350.
- Christensen, R. H. B.** (2013). Analysis of ordinal data with cumulative link models — estimation with the ordinal package. *R-package version 2013.09-30*.
- Chuvieco, E., Allgöwer, B.** et **Salas, J.** (2003). Integration of Physical and Human Factors in Fire Danger Assessment. Dans : Chuvieco, E. (éd.), *Wildland Fire Danger Estimation and Mapping. The role of remote sensing data. Series in Remote Sensing*, vol. 4, Singapore, World Scientific Publishing Co., 264 p.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martin, M.P., Vilar, L., Martinez, J., Martin, S., Ibarra, P., de la Riva, J., Baeza, J., Rodriguez, F., Molina, J.R., Herrera, M.A.** et **Zamora, R.** (2010). Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling* 221, pp. 46-58.
- Clément, V.** (2005). Les feux de forêt en Méditerranée : un faux procès contre Nature. *L'Espace Géographique*, 2005 – 4, Tome 34, pp. 289-304.
- Clogg, C.C.** et **Shihadeh, E.S.** (1994). *Statistical models for ordinal variables*. Londres, SAGE pub., Coll. Advanced Quantitative Techniques, n° 4 in the Social Sciences Series.
- Cohen, J.D.** (1991). A site-specific approach for assessing the fire risk to structures at the wildland/urban interface. Dans : Nodvin, S.C. et Waldrop, T.A. (éd.) *Fire and the environment : ecological and cultural perspectives : proceedings of an international symposium*, Knoxville, Tennessee, March 20-24, 1990. General Technical Report, SE-69, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station, Ashville, pp. 252-256.
- Cohen, J.D.** (2000). A brief summary of my Los Alamos fire destruction examination. *Wildfire*, vol. 9(4), pp. 16-18.
- Cohen, J.D.** (2002). Wildland-urban fire – A different approach. Dans : *Proceedings of the Firefighter Safety Summit, International Association of Wildland Fire Missoula, MT*, 6-8 Novembre.
- Cohen, J.D.** (2003). Preventing residential fire disasters during wildfires. Dans : *Proceedings of the international workshop, Forest fires in the wildland-urban interface and rural areas in Europe: an integral planning and management challenge*, Athènes, Grèce, pp. 5-12.
- Cohen, J.D.** (2004). Relating flame radiation to home ignition using modeling and experimental crown fires. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 34, pp. 1616-1626.
- Cohen, J.D.** (2008). The Wildland-urban Interface fire problem – a consequence of the fire exclusion paradigm. *Forest history today (Fall)*, pp. 20-26.
- Cohen, J.D.** et **Butler, B.W.** (1996). Modeling potential structure Ignitions from flame radiation exposure with Implications for wildland/urban interface fire management. Dans *Proceedings, 13th Conference on Fire and Forest Meteorology*, October 24 – November 2, Lorne, Australia, pp. 81-86.
- Cohen, J.D.** et **Saveland, J.** (1997). Structure ignition assessment can help reduce fire damages in the WUI. *Fire Management Notes*, vol. 57(4), pp. 19-23.
- Colin, P.Y., Jappiot, M.** et **Mariel, A.** (2001). Protection des forêts contre l'incendie. *Cahier FAO Conservation*, n°36.
- Colin, P.Y., Lampin, C., Delboulbe, E., Coste, N., Marcillat, J., Pereira, J.C., Bingelli, F., Gaulier, A., Bothelho, H., Loureiro, C., Loddo, G., Ditana, E., Guijarro, M., Hernando, C., Diez, C., Martinez, E., Madrigal, J., Vega, J.A., Gorostiaga, P., Alexandrian, D.** et **Dimitrakopoulos, A.** (2002). SALTUS program-Spot fires. Knowledge and modelling. *Proceedings of the IV International Conference on Forest Fire Research*, 18-22 Novembre, Luso, Portugal.
- Collins, T.W.** (2009). Influences on wildfire hazard exposure in Arizona's high country. *Society and Natural Resources*, vol. 22, pp. 211-229.
- Conard, S.G., Hartzell, T., Hilbruner M.W.** et **Zimmerman, G.T.** (2001). Changing fuel management strategies – The challenge of meeting new information and analysis needs. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 10, pp 267-275.

- Concato, J., Feinstein, A.R. et Holford, T.R.** (1993). The risk of determining risk with multivariable models. *Annals of Internal Medicine*, Vol. 118(3), pp. 201-210.
- Condorcet, N.** (1785). *Essai sur l'application de l'analyse à la probabilité des décisions rendues à la pluralité des voix*. Imprimerie royale, Paris.
- Cooke, R.M.** (1991). *Experts in Uncertainty: Opinion and Subjective Probability in Science*. Oxford University Press, New York.
- Corvol, A.** (1987). *L'Homme aux Bois – Histoire des relations de l'homme et de la forêt XVIIe-XXe siècle*. Fayard, Paris.
- Corvol, A.** (2009). La forêt méditerranéenne : une forêt ou un décor ? *Forêt Méditerranéenne*, tome XXX, n°4, pp. 287-292.
- Cottrell, A.** (2005). Communities and bushfire hazard in Australia : more questions than answers. *Environmental Hazards*, vol. 6, pp. 109-114.
- Court, A.T.** (1939). Hedonic Price Indexes with Automotive Examples. *The Dynamics of Automobile Demand*, General Motors Corporation, pp. 99-117.
- Crichton, D.** (1999). The Risk Triangle. Dans : Ingleton J. (éd.), *Natural Disaster Management*, Tudor Rose, Londres, pp. 102-103.
- Cuny, F.** (1983). *Disasters and Development*. Oxford University Press, Oxford.
- Cutter, S.L.** (1995). The Forgotten Casualties: Women, Children and Environmental Change. *Global Environmental Change*, vol. 5, n°1, pp. 181- 194.
- Cutter, S.L., Mitchell, J.T. et Scott, M.S.** (2000). Revealing the Vulnerability of People and Places : A Case Study of of Georgetown County, South Carolina. *Annals of the Association of American Geographers*, Volume 90, Issue 4, pp. 713-737.

-D-

- Darbelet, M., Izard, L. et Scaramuzza, M.** (1995). *Notions fondamentales de gestion d'entreprise*. Editions Foucher, Paris.
- Dauphiné, A.** (2001). *Risques et catastrophes. Observer – Spatialiser – Comprendre – Gérer*. Armand Colin, Paris.
- Dauphiné, A.** (2003). *La théorie de la complexité chez les géographes*. Economica, Paris.
- Dauphiné, A.** (2004). Réflexions préliminaires sur les vulnérabilités analytiques et synthétiques. Dans : Veyret, Y., Garry, G. et Meschinot de Richemond, N., *Risques naturels et aménagement en Europe*, A. Colin, Paris.
- Davenport, H.J.** (1902). Proposed modifications in Austrian theory and terminology. *Quarterly Journal of Economics*, vol.16(3), pp. 355-84.
- Davis, I., Haghebeart, B. et Peppiatt, D.** (2004). *Social vulnerability and capacity analysis*. Provention Consortium publication, Genève.
- De Franchis, L.** (2003). *Les menaces sur les sols dans les pays méditerranéens – Étude bibliographique*, Les cahiers du Plan Bleu n°2.
- Dekens, J.** (2007). *Local Knowledge for Disaster Preparedness : A literature Review*. International Centre for Integrated Mountain Development (ICIMOD), Kathmandu, Nepal.
- De Ketele, J.M., Gérard, F.M. et Roegiers, X.** (1997). L'évaluation et l'observation scolaire : deux démarches complémentaires, *Éducation – Revue de diffusion des savoirs en éducation*, n°12, pp. 33-37.
- De La Cruz-Reyna, S.** (1996). Long-term probabilistic analysis of future Explosive Eruptions. Dans : Scarpa, R. et Tilling, R. (éd.), *Monitoring and Mitigation of Volcano Hazards*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, New York, pp. 599-629.
- Demoraes, F.** (2004). *Mobilité, enjeux et risques dans le district métropolitain de Quito (Équateur)*. Thèse de doctorat préparée au laboratoire EDYTEM en partenariat avec l'IRD et la Mairie de Quito.
- Denton, F.** (2002) Climate Change Vulnerability, Impacts, and Adaptation : Why Does Gender Matter ? *Gender and Development*, vol. 10, n°2, pp. 10-21.

- D'Ercole, R.** (1991). *Vulnérabilité des populations face au risque volcanique. Le cas de la région du volcan Cotopaxi (Équateur)*. Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble.
- D'Ercole, R.** (1994). Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. *Revue de géographie Alpine*, 82(4), pp.87-93.
- D'Ercole, R.** et **Metzger, P.** (2009). La vulnérabilité territoriale : une nouvelle approche des risques en milieu urbain. *Cybergeo : European Journal of Geography*, Vulnérabilités urbaines au sud, article 447, mis en ligne le 31 mars 2009, modifié le 14 mai 2009.
- Dodd, F.J.** et **Donegan, H.A.** (1989). The representation and combination of opinions. *Proceedings of ILIAM 6*, University of Ulster, pp. 17-29.
- Dong Y., Xu, Y., Li, H.** et **Dai, M.** (2008). A comparative study of the numerical scales and the prioritization methods in AHP. *European Journal of Operational Research*, vol. 186, pp. 229-242.
- Dreyfus, H.L.** (1992). La portée philosophique du connexionnisme. Dans : Adler, D. (dir.), *Introduction aux sciences cognitives*, Gallimard, Paris, pp. 356.
- Dubois, S., Mohib, N., Oget, D., Schenk, E.** et **Sonntag, M.** (2005) Connaissances et reconnaissance de l'expert. *Les cahiers de l'INSA de Strasbourg*, 1, pp. 89-108.
- Duché, Y.** et **Reymond, B.** (2007). Incendies de forêt : évaluation de la protection apportée par le débroussaillage autour des habitations. <http://www.ofme.org/documents/Synthèse> : 1 Castelli, L. (2003). Résultats de l'analyse du feu de Coti-Chiavari. DDAF 2A, Rapport de stage INRA. 2 DDAF2A-MTDA. (2004). Etude de retour d'expérience sur les opérations d'incitation au débroussaillage légal menées par la DDAF 2A de 1997 à 2002. 3 Préfecture 04 - Agence ONF 04. Incendie du 7 août 2005 : éléments d'évaluation de la protection apportée par le débroussaillage et de l'efficacité des actions de sensibilisation dans ce domaine. 4 Office de l'environnement de la Corse. (2007). Opérations de sensibilisation au débroussaillage légal. Compte-rendu d'activités 2006.
- Dumoulin, L.** (2001) *L'expertise comme nouvelle raison politique ? Discours, usages et effets de l'expertise judiciaire*. Thèse de sciences politiques, Grenoble, 2001.
- 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.
- Dyer, J.S., Saaty, T.L., Harker, P.T.** et **Vargas, L.G.** (1990). Remarks on the Analytic Hierarchy Process. *Management Science*, vol. 36(3), pp. 249- 258.

-E-

- Ellis, S., Kanowski, P.** et **Whelan, R.** (2004). *National inquiry on bushfire mitigation and management*, Commonwealth of Australia, Canberra.
- Eriksen, C.** et **Gill, N.** (2010). Bushfire and everyday life : examining the awareness-action gap in changing rural landscapes. *Geoforum*, vol. 41, pp. 814-825.
- Escobar, M.T., Aguarón, J.** et **Moreno-Jiménez, J.M.** (2004). A note on AHP group consistency for the row geometric mean prioritization procedure. *European Journal of Operational Research*, vol. 153, pp. 318-322.
- Escobar, M.T.** et **Moreno-Jiménez, J.M.** (2004). Aggregation of individual preference structures in Ahp-group decision making. *Group Decision and Negotiation*, vol. 16, pp. 287-301.

-F-

- Fabiani, J.L.** et **Theys, J.** (1987). *La société vulnérable : évaluer et maîtriser les risques*, Presses de l'École normale supérieure, Paris.
- FAO** (2007) Fire management – global assessment 2006. A thematic study prepared in the framework of the Global Forest Resources Assessment 2005. UN Food and Agriculture Organization, Forest Management Division, Forest Paper 151. (Rome, Italy). <http://www.fao.org/docrep/009/a0969e/a0969e00.htm>
- Fara, K.** (2001). How Natural Are "Natural Disasters" : Vulnerability to Drought in Southern Namibia Communal Areas. *Risk Management : An International Journal*, pp. 47-63.

- Faugères, L. et Noyelle, J.** (1992). Risques naturels, paysages et environnement en France. *Information Géographique*, pp. 194-209.
- FEDERAL REGISTER** (2001) Urban Wildland Interface communities within the vicinity of federal lands that are at high risk from wildfire. *Federal Register Notes*, vol. 66, n°3, pp. 751-777.
<http://www.blm.gov/natacq/FIRE/urbinter.html>
- Ferrier, J.P.** (1984). *Antée I. La géographie ça sert d'abord à parler du territoire ou le métier des géographes*. Edisud, Aix-en-Provence, France.
- Ferrier, J.P.** (2010). L'émergence de nouvelles conceptions de l'interface nature-culture. Dans *Géographie des interfaces. Une nouvelle vision des territoires*, QUAE (éd.), Update Sciences & Technologies (coll.), Paris, France, pp. 23-33.
- Figueira, J., Greco, S., et Ehgott, M.** (2005). *Multiple Criteria Decision Analysis : State of the art surveys*. Kluwer Academic Publishers, Boston, Dordrecht, London.
- Finney, M.A.**(1995). FARSITE : A fire area simulator for fire managers. Dans : *Proc. Biswell Symposium : Fire Issues and Solutions in Urban Interface and Wildland Ecosystems*, Walnut Creek, CA, pp. 55-56.
- Finney, M.A.** (2005). The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire. *Forest Ecology and Management* 211, pp. 97-108.
- Fishburn, P.C.** (1970). *Utility Theory for Decision Making*. Wiley, New York.
- Floyd, A.G.** (1966). Effect of fire upon weed seeds in the wet sclerophyll forests of northern new south wales. *Aust. Journ. Bot.* 14, pp. 243-256.
- Fons, W.T.** (1946). Analysis of fire spread in light forest fuels. *Journal of Agricultural Resources*, vol. 72, pp. 93-121.
- Ford, J.** (2002). *Vulnerability: concepts and issues*. Ph.D. Scholarly Field Paper, University of Guelph, Guelph, Canada.
- Fordham, M.** (2000) *The Place of Gender in Earthquake Vulnerability and Mitigation*. Anglia Polytechnic University.
- Forman, E.H.** (1993). Facts and Fictions About The Analytic Hierarchy Process. *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 17(4-5), pp. 19-26.
- Forman, E.H. et Gass, S.** (2001). The analytic hierarchy process – An exposition. *Operations Research*, vol. 49, pp. 469-486.
- Forman, E.H. et Peniwati, K.** (1998). Aggregating individual judgments and priorities with the analytic hierarchy process. *European Journal of Operational Research*, vol. 108, pp. 165-169.
- Forthofer, J.M.** (2007). *MA Thesis: Modeling wind in complex terrain for use in fire spread prediction*. Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Fumey, M.** (2001). *Méthode d'Evaluation des Risques Agrégés : application au choix des investissements de renouvellement d'installations*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse.

-G-

- Gaillard, J.C.** (2006). « Naturelles », les catastrophes ? Dossier n°51. *Pour la Science* : 118-9.
- Gaillard, J.C.** (2007). De l'origine des catastrophes : phénomènes extrêmes ou âpreté du quotidien. *Natures Sciences Sociétés*, 15, pp. 44-47.
- Gaillard, J.C., Maceda, E.A., Stasiak, E., Le Berre, I. et Espaldon M.A.O.** (2009). Sustainable livelihoods and people's vulnerability in the face of coastal hazards. *Journal of Coastal Conservation*, 13(2-3), pp. 119- 129.
- Gibbons, P., Van Bommel, L., Gill, A.M., Cary, G.J., Driscoll, D.A., Bradstock, R.A., Knight, E., Moritz, M.A., Stephens, S.L. et Lindenmayer, D.B.** (2012). Land management practices associated with house loss in wildfires. *Public Library of Science ONE* 7(1) : e29212.
- Gilbert, C.** (2003). Limites et ambiguïtés de la territorialisation des risques. *Pouvoirs locaux : les Cahiers de la décentralisation*, mars 2003, Trimestriel n° 56, pp. 48- 52.
- Gilbert, C.** (2006). La vulnérabilité, une notion à explorer. *Pour la science*, 51, pp. 116-120.

- Gilbert, C.** (2008). La vulnérabilité: une notion vulnérable? A propos des risques naturels, *Colloque Vulnérabilités sociétales, risques et environnement : comprendre et évaluer*, Université Toulouse le Mirail, 14, 15 et 16 mai 2008, pp. 1-16.
- Glatron, S.** (2003). *Culture des risques*. Editions du Temps, Paris.
- Godard, O., Henry, C., Lagadec, P. et Michel-Kerjan, E.** (2002). *Traité des nouveaux risques. Précaution, crise, assurance*. Paris, Gallimard, Coll. Folio-Actuel n° 100.
- Godard, O.** (2003). Comment organiser l'expertise scientifique sous l'égide du principe de précaution? CECO-948, Cahier n°2003-024.
- Graillot, D., Londiche, H., Dechomets, R. et Batton-Hubert, M.,** (2001), Analyse multicritère spatiale pour l'identification de la vulnérabilité aux inondations. Dans : *Actes du colloque SIRNAT 2001*, 6-7 décembre 2001, Sophia Antipolis.
- Griot, C., Sauvagnargues-Lesage, S., Dusserre, G., Pearson, D. et Picheral, H.** (2002) Vulnérabilité face aux risques liés au transport de matières dangereuses : Apports de deux méthodes multicritères d'aide à la décision. Dans : *Déchets, Sciences et Technique*, n° 27, pp. 35-46.
- Griot, C.** (2003). *Vulnérabilité et risques liés au transport de matières dangereuses. Évaluation de la vulnérabilité en vue de la préparation aux interventions de la Sécurité Civile*. Thèse de doctorat, Université Montpellier III – Paul Valéry, Montpellier.
- Granger, K., Jones, T., Leiba, M. et Scott, G.** (1999). *Community Risk in Cairns : a multi-hazard Risk Assessment*. AGSO (Australian Geological Survey Organisation) Cities Project, Dept of Industry, Science and Resources, Australie.
- Grove, A.T. et Rackham, O.** (2001). *The Nature of Mediterranean Europe. An Ecological History*. Yale, Yale University Press.
- Grünthal G.** (2001). European Macroseismic Scale 1998 (EMS 1998). *Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie*, vol. 19.
- Guiraud, P.** (1980). *Le langage du corps*. Paris PUF.
- Guitouni, A. et Martel, J.M.** (1998). Tentative guidelines to help choosing an appropriate MCDA method. *European Journal of Operational Research*, vol. 109(2), pp. 501-521.
- H-
- Habermas, J.** (1973). *La technique et la science comme « idéologie »*, Gallimard, Paris.
- Hadji, C.** (1989). *L'Évaluation, règles du jeu : des intentions aux outils*, Édition ESF, Paris.
- Haight, R.G., Cleland, D.T., Hammer, R.B., Radeloff, V.C. et Rupp, S.S.** (2004). Assessing Fire Risk in the Wildland-Urban Interface. *Journal of Forestry*, vol. 102(7), pp. 41-48.
- Hanley, J.A. et McNeil, B.J.** (1982). The meaning and use of the area under a Receiver Operating Characteristic (ROC) curve. *Radiology*, vol. 143(1), pp. 29-36.
- Hardy, C.C.** (2005). Wildland fire hazard and risk: problems, definitions, and context. *Forest Ecology and Management* 211, pp. 73-82.
- Hardy, S.** (2003). *Processus de fragmentation urbaine et risques dits « naturels » dans la ville de Managua (Nicaragua)*. Thèse de doctorat en géographie, EHES.
- Hébert, B.P.** (1998). *Régression avec une variable dépendante ordinale : comparaison de la performance de deux modèles logistiques ordinaires et du modèle linéaire classique à l'aide de données simulées*. Thèse de doctorat, Faculté des études supérieures de l'Université Laval, Québec.
- Helm, P.** (1996). Integrated Risk Management for natural and technological Disasters. *Tephra*, 15(1), pp. 4-13.
- Hewitt, K. et Burton, I.** (1971). *The Hazardousness of a Place*. Toronto University Press, Toronto.
- Hewitt, K.** (1983). The idea of calamity in a technocratic age. Dans : Hewitt, K. (éd.), *Interpretation of calamities*, Allen et Unwin Inc., Boston, pp. 3-32.
- Hewitt, K.** (1998). Excluded Perspectives in the Social Construction of Disaster. Dans : Quantarelli, E. L. (éd.), *What Is a Disaster : Perspectives on the Question*, Routledge, Londres.

Ho, W. (2008). Integrated analytic hierarchy process and its applications – A literature review. *European Journal of Operational Research*, vol. 186, pp. 211–228.

Hobbs, R.J., Currall, J.E.P. et Giminham, C.H. (1984). The use of thermocolor pyrometers in the study of heath fire behavior. *J ecol.* 72, pp. 241-250.

Holder, R.D. (1990). Some comments on the analytic hierarchy process. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 41(11), pp. 1073–1076.

Hosmer, D.W. et Lemeshow, S. (1989). *Applied Logistic Regression*. New York : John Wiley & Sons

Hubert, G. et Reliant, C. (2003). Cartographie réglementaire du risque d'inondation : décision autoritaire ou négociée ? *Annales des Pont et Chaussées*, n° 105, pp. 24-31.

Huet, P. (2003). Retour d'expérience sur les inondations du Sud-Est de septembre 2002, *Annales des Mines, Responsabilité & Environnement*, pp. 63-72.

Humphreys, P.C., Svenson, O. et Vári, A. (1983). *Analysis and aiding decision processes*. North-Holland, Amsterdam.

-J-

Ice, G.G., Neary, D.G. et Adams, P.W. (2004). Effects of wildfire on soils and watershed processes. *Journal of Forestry*, vol. 102, pp. 16-20.

Ishizaka, A. et Labib, A. (2011). Review of the main developments in the analytic hierarchy process. *Expert Systems with Applications*, vol. 38, pp. 14336–14345.

-J-

Jain, T., Pilliod, D. et Graham, R. (2004). Tongue-tied. *Wildfire*, vol. 4, pp. 22-36.

Jacquet-Lagrèze, E. (1983). PREFCALC : Manuel utilisateur. Euro-Décision, Paris.

Jennings, W.P. et Jennings, P.R. (2000). Risk, the willingness-to-pay and the value of a human life. *Journal of Insurance Issues*, vol. 23(2), pp. 180-184.

Joannon, M., Durbiano, C., Tirone, L. et De Reparaz, A. (1975). Le village dans les campagnes provençales : analyse de l'évolution récente des villages perchés. « *I paesaggi rurali europei. Atti del convegno internazionale indetto a Perugia dal 7 al 12 maggio 1973 dalla conférence européenne permanente pour l'étude du paysage rural. Deputazione di storia patria per l'Umbria* », n° appendici al bollettino n°12, pp. 303–316.

Johnson, M.P. (2001). Environmental impacts of urban sprawl : a survey of the literature and proposed research agenda. *Environment and Planning A* 33, pp. 717–735.

Johnston, P., Milne, G. et Klemitz, D. (2005). *Overview of Bushfire Spread Simulation Systems*. BUSHFIRE CRC Project B6.3, Project Progress Rep.

Joliclercq, F. (2003). *Quelle politique de prévention et d'aménagement du territoire régional ? Débroussaillage obligatoire et autoprotection des habitations. Retours d'expérience après incendie*. Étude réalisée par Joliclercq, F. (EGA) et la participation d'Espaces Méditerranéens.
<http://www.ofme.org/affdoc.php3?ID=95&Page=1>

-K-

Kainulainen, T., Leskinen, P., Korhonen, P., Haara, A. et Hujala, T. (2009). A statistical approach to assessing interval scale preferences in discrete choice problems. *Journal of the Operational Research Society*, vol. 60, pp. 252–258.

Kahraman, C., Cebeci, U. et Ruan, D. (2004). Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP : The case of Turkey. *International Journal of Production Economics*, vol. 87, pp. 171–184.

Kalabokidis, K.D. et Omi, N.P. (1998). Reduction of fire hazard through thinning/residue disposal in the urban interface. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 8(1), pp. 29-35.

- Kamenetzky, R.D.** (1982). The Relationship Between the Analytic Hierarchy Process and the Additive Value Function. *Decision Sciences*, vol. 13(4), pp. 702-713.
- Kamp, M.** et **Sampson, N.** (2002). Using GIS to identify potential wildland-urban interface areas based on population density. www.sampsongroup.com/Papers/wui_paper.pdf.
- Kaval, P.** (2009). Perceived and actual wildfire danger : an economic and spatial analysis study in Colorado (USA). *Journal of Environnement Management*, Vol. 90, pp. 1862-1867.
- Keeley, J.E.** (1998). Post fire ecosystem recovery and management : the October 1993 large fire episode in California. Dans : Moreno, J.M. (éd.), *Large forest fires*, Backbuys Publishers, Leiden, pp. 69-90.
- Keeley, J.E.** et **McGinnis, T.** (2007). Impact of prescribed fire and other factors on cheatgrass persistence in a Sierra Nevada ponderosa pine forest. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 16, pp. 96-106.
- Keeley, J.E.** (2009). Fire intensity, fire severity and burn severity : a brief review and suggested usage. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 18, pp. 116-126.
- Kelman, I.** (2003). Defining Risk. *FloodRiskNet Newsletter*, 2, pp. 6-8.
- Kelman, I.** (2006). Natural hazards and Risk Management. *RiskPost : The Newsletter of the New Zealand Society for Risk Management*, 4(3), pp. 11-13.
- Keeney, R.L.** et **H. Raiffa, H.** (1976). *Decisions with multiple objectives : Preferences and value trade-offs*. John Wiley & Sons, New York.
- Keeney, R.L.** et **H. Raiffa, H.** (1992). *Value-focused thinking. A path to creative decision making*. Harvard University Press, Cambridge.
- Kervern, J.Y.** et **Rubise, P.** (1991) *L'archipel du danger. Introduction aux cindyniques*. Paris, Economica.
- Knight, I.** et **Coleman, J.** (1993). A fire perimeter expansion algorithm based on Huygens' wavelet propagation. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 3(2), pp. 73-84.

- L -

- Laaribi, A.** (2000). *SIG et analyse multicritère*. Hermès Sciences Publications, Paris.
- Lampin-Maillet, C.** (2009). Caractérisation de la relation entre organisation spatiale d'un territoire et risque d'incendie : Le cas des interfaces habitat-forêt du sud de la France. Thèse de doctorat en Géographie, Université de Provence – Aix-Marseille I, France.
- Lampin, C., Chandiooux, O., Paulet, V.** et **Jappiot, M.** (2004). Typologie de la végétation combustible dans les interfaces agriculture forêt urbain. Conseil régional, Rapport final.
- Lampin, C., Jappiot, M., Alibert, N., Manlay, R.** et **Guillande, R.** (2002). Prototype d'une échelle d'intensité pour le phénomène Incendie de forêts. *Ingénieries - EAT*, n° 31, pp. 49-56.
- Lampin-Maillet, C., Long, M.** et **Jappiot, M.** (2008). Une méthode pour caractériser et cartographier les interfaces habitat-forêt, un enjeu pour la prévention des incendies de forêt. *Revue Forestière Française*, n°3, pp. 363-380.
- Lampin-Maillet, C., Bouillon, C., Long-Fournel, M., Morge, D.** et **Jappiot, M.** (2010). Guide de cartographie et caractérisation des interfaces habitat-forêt. Convention n°2007 11 9 071 U du ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer. 68 p.
- Landsberg, J.** (1997). Le feu et la forêt : le feu, bon serviteur ou mauvais maître. *In Actes du Congrès forestier mondial (13-22 oct. 1997), Antalya*, vol. 1(6), pp. 187-192.
- Larrere, R.** (1993). *La restauration des terrains en montagne, de la prise en charge à la protection par l'État à la gestion négociée des risques*. Rapport final, contrat 2606 A, Ministère de l'environnement.
- Lavigne, F.** et **Thouret, J.C.** (1994). Proposition d'une méthode d'évaluation et de cartographie des risques liés aux lahars sur le volcan Marapi. *Revue de géographie Alpine*, 82(4), pp. 151-166.
- Le Coz, P.** (2013). La déontologie de l'expertise. Actes du Colloque : *L'expertise scientifique : dispositifs et nouveaux enjeux*, 18 juin, Paris, pp. 14-17.

- Ledoux, B.** (1994). Les études de vulnérabilité dans la cartographie réglementaire des inondations à la Réunion : approche méthodologique, études de cas et réflexion sur leur finalité. *Revue de géographie Alpine*, 82(4), pp. 167-177.
- Ledoux, B.** (2006). *La gestion du risque inondation*. Lavoisier, Paris.
- Lee, A. et Slak, M.F.** (2007). Les paysages français changent entre 1992 et 2002 : artificialisation et fermeture des paysages aux dépens du mitage ou de la déprise des zones agricoles. *Agreste cahiers*, 22 p.
- Leicester, R.H.** (1987). *Building Technology to resist Fire, Flood and Drought*. Operations January 21, 1987, The fireman, Oakleigh.
- Le Moigne, J.L.** (1986). *Intelligence des mécanismes, mécanismes de l'intelligence*. Fayard, Fondation Diderot, Paris.
- Lentile, L.B., Holden, Z.A., Smith, A.M.S., Falkowski, M.J., Hudak, A.T., Morgan, P., Lewis, S.A., Gessler, P.E. et Benson, N.C.** (2006). Remote sensing techniques to assess active fire characteristics and post-fire effects. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 15, pp. 319-345.
- Leonard, J.E. et McArthur, N.A.** (1999). A history of research into building performance in Australian bushfires. *Proceedings Australian Bushfire Conference*, 7-9 July 1999, Albury, Australia, pp. 219-225.
- Leonard, J.E. et Bianchi, R.** (2005). *Investigation of bushfire attack mechanisms involved in house loss in the ACT Bushfire 2003*. Bushfire CRC report, CSIRO Manufacturing & Infrastructure Technology, Highett, Victoria.
- Leonard, J.P.** (2004). Société et espaces arborés dans le midi méditerranéen, *Forêt Méditerranéenne*, tome XXV, n°3, pp. 173-190.
- Léone, F., Asté, J.P. et Velasquez, E.** (1995). Contribution des constats d'endommagement au développement d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité appliquée aux phénomènes de mouvements de terrain. *Bulletin de l'Association des Géographes Français*, 1995-4, pp. 350-371.
- Léone, F.** (1996). *Concept de vulnérabilité appliqué à l'évaluation des risques générés par les phénomènes de mouvements de terrain*. Thèse de doctorat en Géographie, Université J. Fourier, Grenoble.
- Léone, F.** (2004). Une approche quantitative de la cartographie des risques naturels : application expérimentale au patrimoine bâti de la Martinique (Antilles françaises). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, N°2, pp. 117-124.
- Léone, F. et Vinet, F.** (2006). La vulnérabilité, un concept fondamental. Dans : *La vulnérabilité des sociétés et des territoires face aux menaces naturelles : analyses géographiques*, Léone, F. et Vinet, F. (éd.), Publication de Montpellier III, pp. 9-26.
- Léone, F.** (2007). *Caractérisation des vulnérabilités aux catastrophes « naturelles » : contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvement de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones)*. HDR, Université Paul Valéry – Montpellier III.
- Lévy, J. et Lussault, M.** (2003). *Dictionnaire de la géographie et de l'espace des sociétés*. Belin, Paris.
- Liao, T.M.** (1994) *Interpreting probability models : Logit, Probit, and other generalized models*. Thousand Oaks, SAGE pub., COU. SAGE University papers Quantitative applications in the social sciences (07-1 01).
- Linkov, I., Satterstrom, F., Kiker, G., Batchelor, C., Bridges, T., et Ferguson, E.** (2006). From comparative risk assessment to multi-criteria decision analysis and adaptive management: Recent developments and applications. *Environment International Environmental Risk Management – the State of the Art*, vol. 32(8), pp. 1072-1093.
- Linn, R.R.** (1997). *A transport Model for Prediction of Wildfire Behavior*. Sci. Rep. LA -13334-T, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.
- Luce, R.D. et Raiffa, H.** (1957). *Games and decisions*. Wiley, New York.
- Lutoff, C.** (2000). *Le système urbain niçois face à un séisme. Analyse des enjeux et des dysfonctionnements potentiels*. Thèse de doctorat, Université de Savoie, Chambéry.

-M-

Magne, L. et Vasseur, D. (2006). *Risques industriels : complexité, incertitude et décision : une approche interdisciplinaire*. Lavoisier, EDF R&D (coll.), Paris.

- Mangliavillano, A.** (2008). Multi-scalarité du phénomène feu de forêt en régions méditerranéennes françaises de 1973 à 2006. Thèse de doctorat en Géographie, Université d'Avignon et des Pays du Vaucluse, France.
- Marco, O., November, V., Pigeon, P. et Schoeneich, P.** (1998). La représentation des risques naturels en montagne. *Revue de Géographie Alpine*, 86(2), pp. 7-9.
- Martel, J.M.** (1988). *Aide Multicritère à la décision*. Document interne. Département d'opérations et Systèmes de Décision, Université Laval, Québec.
- Martel, J.M.** (1999). L'aide multicritère à la décision : méthodes et applications. *Bulletin de la Société Canadienne de Recherche Opérationnelle*, vol. 33(1), pp. 6-16.
- May, K.O.** (1952). A set of independent necessary and sufficient conditions for simple majority decisions. *Econometrica*, vol. 20, pp. 680-684.
- McArthur, A.G.** (1967). *Fire behaviour in Eucalypt forests*. Department of National Development, Forestry and Timber Bureau Leaflet 107. (Canberra, ACT)
- McCaffrey, S.M., Stidham, M., Toman, E. et Shindler, B.** (2011). Outreach programs, peer pressure, and common sense : what motivates homeowners to mitigate wildfire risk ? *Environmental Management*, vol. 48, pp. 475-488.
- McCaffrey, S., Toman, E., Stidham, M. et Shindler, B.** (2013). Social science research related to wildfire management : an overview of recent findings and future research needs. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 22, pp. 15-24.
- McCullagh, P.** (1980). Regression models for ordinal data. *Journal of the Royal Statistical Society, Series B* 42, 109-142.
- McCullagh, P. et Nelder, J.** (1989). *Generalized Linear Models*. Chapman & Hall/CRC.
- MEDDE** (2011). Ministère de l'Écologie du Développement Durable et de l'Énergie, *Le risque feu de forêt en France*.
<http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ED45-2.pdf>
- Mell, W.R., Manzello, S.L., Maranghides, A., Butry, D. et Rehm, R.G.** (2010). The wildland-urban interface fire problem – current approaches and research needs. *International Journal of Wildland Fire*, vol.19, pp. 238-251.
- Menard, S.** (2002). *Applied Logistic Regression Analysis*. Sage, Thousand Oaks, CA,
- Merunka, D.** (1987). *La prise de décision en management*. Vuibert, Gestion (coll.), Paris.
- Meschinet de Richemond, N.** (2003). *Statut et perception des catastrophes passées : vers une histoire des risques naturels*. Editions du temps, Paris.
- Mikhailov, L.** (2004). Group prioritization in the AHP by fuzzy preference programming method. *Computers and Operations Research*, vol. 31, pp. 293-301.
- Miller, G.A.** (1956). The magical number seven, plus or minus two : Some limits on our capacity for processing information. *Psychological Review*, vol. 63, pp. 81-97.
- Miller, C. et Ager, A.A.** (2013). A review of recent advances in risk analysis for wildfire management. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 22, pp. 1-14.
- Mironesco, C.** (1997). *Un Enjeu démocratique : le Technology Assessment. Maîtrise de la technologie aux Etats-Unis et en Europe*. Georg (éd.), Europe (coll.).
- Morrison, D.A.** (2002). Effects of fire intensity on plant species composition of sandstone communities in the Sydney region. *Austral Ecology*, vol. 27, pp. 433-441.
- Mortureux, Y.** (2004). Le retour d'expérience en questions. *L'entreprise Industrielle Techniques de l'Ingénieur*, vol. 1, n°SE 1040, pp. 15-22.

-N-

Napoleone, C., Morge, D., Raymond, V., Jappiot, M., Alexandrian, D., Godefrin, V. et Blanchi, R. (2002). *Contribution à l'évaluation des vulnérabilités en zone périurbaine sensible aux incendies de forêt*. Rapport de recherche, Cemagref (coord.), Programme 1999 « Évaluation et prise en compte des risques naturels et technologiques » du MEDD, Aix-en-Provence, France.

- Neary, D.G., Klopatek, C.C., DeBano, L.F. et Folliott, P.F.** (1999). Fire effects on belowground sustainability : a review and synthesis. *Forest Ecology and Management*, vol. 122, pp. 51-71.
- Nelson, R.M. et Adkins, C.W.** (1986). Flame characteristics of wind-driven surface fires. *Canad. J. For. Research* 16, pp. 1293-1300.
- Newnham, G.J., Siggins, A.S., Blanchi, R., Culvenor, D.S., Leonard, J.E. et Mashford, J.S.** (2012). Exploiting three dimensional vegetation structure to map wildland extent. *Remote Sensing of Environment*, vol. 123, pp. 155-162.
- Neyman, J. et Pearson, E.S.** (1928). On the use and interpretation of certain test criteria for purposes of statistical inference. *Biometrika*, 20, 175-240, 263-294.
- Noble, I.R., Bary, G.A.V. et Gill, A.M.** (1980). McArthur's fire danger meters expressed as equations. *Australian Journal of Ecology*, vol. 5, pp. 201-203.
- Noizet, G. et Caverny, J.P.** (1978). *La psychologie de l'évaluation scolaire*. Presse Universitaire Française, Paris.
- November, V.** (1994). Risques naturels et croissance urbaine : réflexion théorique sur la nature et le rôle du risque dans l'espace urbain. *Revue de géographie Alpine*, 82(4), pp. 113-123.
- November, V.** (2002) *Les territoires du risque : le risque comme objet de réflexion géographique*. Peter Langue, Berne.
- November, V.** (2006). Le risque comme objet géographique. *Cahiers de géographie du Québec*, 50(141), pp. 289-296.
- Nowicki, B.** (2002). *The Community protection Zone : Defending houses and Communities from the threat of forest fire*. Center for Biological Diversity.
<http://www.sw-center.org/swcbd/Programs/fire/wui1.pdf>

-O-

- OCR-INCENDI** (2008). *Guide interfaces forêt-habitat 2005-2008*. Guide réalisé dans le cadre des thématiques : autoprotection, cartographie, coupures et plans locaux, Programme européen Interreg III C Sud.
<http://www.risknat.org/baseprojets/ficheprojet.php?num=45&name=OCRIncendi>
- O'Keefe, P., Westgate, K. et Wisner, B.** (1976). Taking the naturalness out of natural disasters. *Nature*, 260(5552), pp. 566-567.

-P-

- Packham, D. et Pompe, A.** (1971). Radiation temperatures of forest fires. *Australian Forest Research*, vol. 5(3), pp. 1-8.
- Papadopoulos, G.D. et Pavlidou, F.N.** (2011). A Comparative Review on Wildfire Simulators. *IEEE Systems Journal*, vol. 5(2), pp. 233-243.
- Pasquier-Dorthe, J. et Raynaud, H.** (1990). *Un outil d'aide à la décision multicritère*. Rapport technique, Université Joseph Fourier.
- Paton, D., Bürgelt, P. et Prior, T.** (2008). Living with bushfire risk : social and environmental influences on preparedness. *Australian Journal of Emergency Management*, vol. 23, pp. 41-48.
- Pavé, A.** (1994). *Modélisation en biologie et en écologie*. Aléas (éd.).
- Pavé, A.** (1997). Introduction. Dans : Blasco, F. (Coord.), *Tendances nouvelles en modélisation pour l'environnement, Journées du Programme « Environnement, Vie et Sociétés » du CNRS*, Elsevier ; pp. XIV-XVI.
- Paveglio, T.B., Carroll, M.S., Absher, J. et Robinson, W.** (2011). Symbolic meanings of wildland fire : a study of residents in the U.S., Inland Northwest. *Society and Natural Resources*, vol. 24, pp. 18-33.
- Peltier, A.** (2005). *La gestion des risques naturels dans les montagnes d'Europe occidentale – Etude comparative du Valais (Suisse), de la Vallée d'Aoste (Italie) et des Hautes Pyrénées (France)*. Thèse de doctorat, Université Toulouse II.

- Penman, T.D., Eriksen, C., Bianchi, R., Chladil, M., Gill, A.M., Haynes, K., Leonard, J., McLennan, J. et Bradstock, R.A.** (2013). Defining adequate means of residents to prepare property for protection from wildfire. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, vol. 6, pp. 67–77.
- Peretti-Watel, P.** (2001). *La société du risque*. Repère, Ed. La découverte, 124 p.
- Perez, J.** (1995). Some Comments on Saaty's AHP. *Management Science*, vol. 41(6), pp. 1091-1095.
- Perez, J., Jimeno, J.L. et Mokotoff, E.** (2006). Another Potential Shortcoming of AHP. *TOP*, vol. 14(1), pp. 99-111.
- Pigeon, P.** (1998). Représentation cartographique du risque et vulnérabilité liée à la pression foncière touristique (Taconnaz, Les Houches et Vers le Nant, Chamonix). *Revue Communication et Organisation* 86 :101-17.
- Pigeon, P.** (2002). Réflexions sur les notions et les méthodes en géographie des risques dits naturels. *Annales de Géographie*, vol. 111, pp.452-470.
- Pigeon, P.** (2005). *Géographie critique des risques*. Paris, Economica – Anthropos.
- Pimont, F.** (2008). *Modélisation physique de la propagation des feux de forêts : effets des caractéristiques physiques du combustible et de son hétérogénéité*. Thèse de doctorat, Spécialité : Sciences de l'Environnement, Université de la Méditerranée – Aix Marseille II.
- Pirlot, M.** (1994). Why trying to characterize the procedures used in Multi-Criteriz Decision Aid. *Cahiers du C.E.R.O.*, vol. 36, pp. 283-292.
- Pomerol, J.C. et Barba-Romero, S.** (1993). *Choix multicritère dans l'entreprise*. Hermès Sciences Publications, Paris.
- Porrero Rodriguez, M.A.** (2001). *Incendios forestales. Investigación de causas*. Madrid, Mundi Prensa.
- Poulton, E.C.** (1994). *Behavioral decision theory : A new approach*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Pottier, N., Veyret, Y., Meschinet de Richemond, N., Hubert, G., Reliant, C. et Dubois-Maury, J.** (2004). Evaluation de la politique publique de prévention des risques naturels. *Risques naturels et aménagement en Europe*, pp. 47-67.
- Prior, T. et Eriksen, C.** (2013). Wildfire preparedness, community cohesion and social-ecological systems. *Global Environmental Change*, vol. 23, pp. 1575–1586.
- Provitolo, D.** (2003). Modélisation et simulation de catastrophe urbaine : le couplage de l'aléa et de la vulnérabilité. *SIRNAT-JPRN, Prévention des risques naturels*, Orléans, 9 p.
- Prowse, M.** (2003). *Towards a Clearer Understanding of Vulnerability in Relation to Chronic Poverty*, CPRC Working paper n°24, Graduate School of Social Science and Law University of Manchester.

-Q-

- Quarantelli, E.L.** (1998). *What is a Disaster ? Perspective on the Question*. Routledge, Londres.

-R-

- Radeloff, V.C., Hammer, R.B., Stewart, S.I., Fried, J.F., Holcomb, S.S. et McKeefry, J.F.** (2005). The wildland urban interface in the United States. *Ecological applications*, vol. 15(3), pp. 799-805.
- Radke, J.** (2007). Modeling fire in the wildland-urban interface: directions for planning. *Advances in the Economics of Environmental Resources*, vol. 6, pp. 183-210.
- Ramade, F.** (1987). *Les catastrophes écologiques*. Auckland, Paris, Mc Graw-Hill.
- Ramsay, G.C.** (1985). How bushfires set houses alight: lessons from Ash Wednesday. *Ecos*, n°43.
- Ramsay, G.C. et McArthur, N.A.** (1995). Building in the urban interface: lessons from the January 1994 Sydney bushfires. *Proceedings Australian Bushfire Conference, 27-30 September 1995*, Hobart, Tasmania.
- Ramsay, G.C., McArthur, N.A. et Dowling V.P.** (1987). Preliminary results from an examination of house survival in the 16 February 1983 bushfires in Australia. *Fire and Materials*, vol. 11(1), pp. 49-51.

- Randall, C.K.** (2003). *Fire in the wildland-urban interface : Understanding fire behaviour*. University of Florida. Institute of Food and Agricultural Science.
- Reghezza, M.** (2006). *Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine: la métropole parisienne face au risque de crue centennale*, Thèse de doctorat en géographie de l'université Paris X.
- Renard, F.** et **Chapon, P.M.** (2010). Une méthode d'évaluation de la vulnérabilité urbaine appliquée à l'agglomération lyonnaise. *L'Espace géographique*, 2010/1, Vol. 39, pp. 35-50.
- Ribot, C.** (2000). La vulnérabilité en droit administratif. Dans *Vulnérabilité et droit: le développement de la vulnérabilité et ses enjeux en droit*, sous la direction de COHET-CORDEY Frédérique, PUG, Grenoble, pp. 311-321.
- Richard, J.F.** (1998). *Les activités mentales. Comprendre, raisonner, trouver des solutions*. Armand Colin, Paris.
- Riggan, P.J., Franklin, S.E., Brass, J.A.** et **Brooks, F.E.** (1994). Perspectives on fire managements in Mediterranean ecosystems of Southern California. Dans : Moreno, J.M., Oechels, W.C. (éd.), *The role of fire in Mediterranean ecosystems*, Springer-Verlag, New York, *Ecological Studies*, vol. 107, pp. 140-162.
- Rinaudo, Y.** (1988). La forêt méditerranéenne d'hier à aujourd'hui - Le cas de la Provence. *Forêt méditerranéenne*, t. X, n°1, pp. 20-25.
- Rinaudo, Y.** (1994). La mort en direct : les forêts qui brûlent / La forêt malade. Dans *La forêt malade : débats anciens et phénomène nouveaux, XVIIe-XXe siècles*, L'Harmattan, Dir A. Corvol, Paris, pp. 159-180.
- Rodriguez, G.** (2005). La maison idéale - l'idéal de la maison. Hypothèses sur le futur de l'habitat. *Séminaire LEROY MERLIN, Nantes 13 janvier 2005*.
- Roqueplo, P.** (1991). L'expertise scientifique : convergence ou conflit des rationalités. Dans : Theys, J. (dir.) *Environnement, science et politique : les experts sont formels*, GERMES, Paris, pp. 43-80.
- Roqueplo, P.** (1997). *Entre savoir et décision, l'expertise scientifique*. INRA (éd.), Coll. Sciences en questions, Paris.
- Rosen, S.** (1974). Hedonic Prices and Implicit Markets : Product Differentiation in Pure Competition. *Journal of Political Economy*, vol. 82(1), pp. 34-55.
- Ross, J.** (1981). *The radiation regime and architecture of plant stands*. Dr. W Junk, The Hague.
- Rothermel, R.C.** (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*. General Technical Report INT-115, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Rousseau, L.** (2003). *Comparaison de points de vue pour la formulation de problèmes*. Thèse de Doctorat, Université Paris Dauphine.
- Roy, B.** (1968). Classement et choix en présence de points de vue multiples (la méthode ELECTRE). *RIRO*, 2^e année, n° 8, pp. 57-75.
- Roy, B.** et **Bertier, P.** (1973). La méthode ELECTRE II : une application au media-planning. Dans : Ross, M. (éd.), *Operational Research 72*, Dublin, pp. 291-302.
- Roy, B.** (1975). Vers une méthodologie générale d'aide à la décision. *Revue METRA*, vol. 14(3), pp. 459-497.
- Roy, B.** (1978). ELECTRE III : Un algorithme de rangement fondé sur une représentation floue des préférences en présence de critères multiples. *Cahiers du Centre d'études de recherche opérationnelle*, vol. 20, pp. 3-24.
- Roy, B.** et **Hugonnard, J.C.** (1982). Ranking of suburban line extension projects for the Paris metro system by a multicriteria method. *Transportation Research*, vol. 16a, pp. 301-312.
- Roy, B.** (1985). *Méthodologie multicritère d'aide à la décision*. Economica, Paris.
- Roy, B.** et **Bouyssou, D.** (1993). *Aide multicritère à la décision : méthodes et cas*. Collection Gestion, Economica, Paris.

-S-

Saaty, R.W. (1987). The Analytic Hierarchy Process - What it is and how is it used. *Mathematical Modelling*, vol. 9(3-5), pp. 161-176.

Saaty, T.L. (1972). *An eigenvalue allocation model for prioritization and planning*. Working paper, Energy Management and Policy Center, University of Pennsylvania.

- Saaty, T.L.** (1977). A scaling method for priorities in hierarchical structures. *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 15, pp. 234–281.
- Saaty, T.L.** (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York.
- Saaty, T.L.** (1984). *Décider face à la complexité : une approche analytique multicritère d'aide à la décision*. Entreprise moderne d'édition, Paris.
- Saaty, T.L.** (1986). Axiomatic foundation of the analytic hierarchy process. *Management Science*, vol. 32, pp. 841–855.
- Saaty, T.L.** (1991a). Rank and the Controversy About the Axioms of Utility Theory – A Comparison of AHP and MAUT. *The 2nd International Symposium on The Analytic Hierarchy Process*, Pittsburgh, PA.
- Saaty, T.L.** (1991b). Response to Holder's Comments on the Analytic Hierarchy Process. *The Journal of the Operational Research Society*, vol. 42(10), pp. 909-914.
- Saaty, T.L.** (1993). What is relative measurement? The ratio scale phantom. *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 17(4/5), pp. 1-12.
- Saaty, T.L.** (1996). *Multicriteria Decision Making, The Analytic Hierarchy Process*. RWS Publications, Pittsburgh.
- Saaty, T.L.** (2003). Decision-making with the AHP: Why is the principal eigenvector necessary. *European Journal of Operational Research*, vol. 145, pp. 85–91.
- Saaty, T.L.** (2006). There is no mathematical validity for using fuzzy number crunching in the Analytic Hierarchy Process. *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, vol. 15(4), pp. 457-464.
- Saaty, T.L.** (2008). Relative Measurement and Its Generalization in Decision Making: Why Pairwise Comparisons are Central in Mathematics for the Measurement of Intangible Factors – The Analytic Hierarchy/Network Process. *RACSAM*, vol. 102(2), pp. 251–318.
- Saaty, T.L.** et **Forman, E.** (1992). *The Hierarchon: A dictionary of hierarchies (Vol. V)*. RWS Publications, Pittsburgh.
- Saaty, T.L.** et **Hu, G.** (1998). Ranking by eigenvector versus other methods in the analytic hierarchy process. *Applied Mathematics Letters*, vol. 11, pp. 121–125.
- Saaty, T.L.** et **Tran, L.T.** (2007). On the invalidity of fuzzifying numerical judgments in the analytic hierarchy process. *Mathematical and Computer Modelling*, vol. 46(7-8) pp. 962–975.
- Saaty, T.L.** et **Vargas, L.G.** (1981). *The Logic of Priorities: Applications in Business, Energy, Health, Transportation*. Kluwer-Nijhoff, La Haye.
- Saaty, T.L.** et **Vargas, L.G.** (1984). The legitimacy of rank reversal. *Omega*, vol. 12, pp. 513–516.
- Saaty, T.L.** et **Vargas, L.G.** (2012). The possibility of group choice : pairwise comparisons and merging functions. *Social Choice and Welfare*, vol. 38, pp. 481–496.
- Saaty, T.L., Vargas, L.G.** et **Whitaker, R.** (2009). Addressing with brevity criticisms of the Analytic Hierarchy Process. *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, vol. 1(1), pp. 121-134.
- Saeedian, P., Moran, B., Tolhurst, K.G.** et **Halgamuge, M.N.** (2010). Prediction of high-risk areas in wildland fires. Dans : *5th International Conference on Information and Automation for Sustainability (ICIAfS), 2010*, pp. 399-403.
- Santoni, P.A., Morandini, F.** et **Barboni, T.** (2010). Steady and Unsteady Fireline Intensity of Spreading Fires at Laboratory Scale. *The Open Thermodynamics Journal*, vol.4, pp. 212-219.
- Sayers, P., Gouldby, B., Simm, J., Meadowcroft, I.** et **Hall, J.** (2002). *Risk, Performance and Uncertainty in Flood and Coastal Defence – a Review*. RetD Technical Report FD2302/TR1, HR Wallingford Report SR587, Crown copyright, Londres.
- Scallan, G.** (1991). *L'évaluation formative des apprentissages*. Presses de l'Université Laval, Réflexions, 3^{ème} édition, Québec.
- Schärli, A.** (1985) *Décider sur plusieurs critères. Panorama de l'aide la décision multi- critère*. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
- Schwilk, D.W., Knapp, E.E., Ferrenberg, S.M., Keeley, J.E.** et **Caprio, A.C.** (2006). Tree mortality from fire and bark beetles following early and late season prescribed fires in a Sierra Nevada mixed-conifer forest. *Forest Ecology and Management*, vol. 232, pp. 36-45.

- Sfez, L.** (1992) *Critique de la décision*. Presses de la Fondation Nationale des Sciences Politiques, 4^{ème} éd., Paris (1^{ère} éd., 1973).
- Shim, J.** (1989). Bibliography research on the analytic hierarchy process (AHP). *Socio-Economic Planning Sciences*, vol. 23, pp. 161-167.
- Siggins, A., Leonard, J., Newnham, G., Bianchi, R., Lipkin, F., Opie, K. et Culvenor, D.** (2013). *Modelling Radiant Heat Exposure at the Urban Fringe – Pine Ridge Road, Kinglake West, Case Study*. CSIRO Report EP13821.
- Simon, H.A.** (1947). *Administrative behavior: a study of Decision Making Processes in Administrative Organizations*. Mac Millan, New York.
- Sipahi, S. et Timor, M.** (2010). The analytic hierarchy process and analytic network process : An overview of applications. *Management Decision*, vol. 48, pp. 775-808.
- Siret, D. et Rodriguez, G.** (2006). *Evolution de la maison individuelle à travers le discours des petites annonces : une étude prospective*. Rapport final. Laboratoire CERMA. Ecole Nationale d'architecture de Nantes.
- Siskos, J.** (1983). Application de la méthode UTA I à un problème de sélection de points de vente mettant en jeu des critères multiples. *Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle*, tome 17, n°2, pp. 121-136.
- Smith, K.** (1996). *Environmental hazards: Assessing Risk and reducing Disaster*. Routledge (2^{ème} éd.), Londres/USA/Canada.
- Sorensen, J.H.** (2000). Hazard warning systems : Review of 20 years of progress. *Natural Hazards Review*, vol. 1, n°2, pp. 119-125.
- Soulet, M.H.** (2005). La vulnérabilité comme catégorie de l'action publique. *Pensée plurielle*, vol. 10, pp. 49-59.
- SOUTHERN FOREST ALLIANCE** (2003). Southwest, F.F.i.t.A. Forest Fire in the American Southwest Analysis : The Wildland urban interface. Southern Center for Wildland-Urban Interface Research and Information. <http://www.interfacesouth.org/>
- STANDARDS AUSTRALIA** (2009). *Construction of buildings in bushfire-prone areas*. Standards Australia, AS 3959-2009, Sydney, Australia.
- Starr, C.** (1969). Social Benefit versus Technological Risk. *Science*, pp. 1232-1238.
- Stenchion, P.** (1997). Development and disaster management. *The Australian Journal of Emergency Management*, 12 (3), pp. 40-44.
- Stevens, S.S.** (1951). Mathematics, measurement, and psychophysics. *Handbook of Experimental Psychology*, Wiley, New York, pp. 1-49.
- Stevens, S.S.** (1957). On the psychophysical law. *Psychological Review*, vol. 64, pp. 153-181.
- Stewart, S.I., Radeloff, V.C. et Hammer, R.B.** (2003). Characteristics and location of the wildland-urban interface in the United States. Dans : *2nd International Wildland Fire Ecology and Fire Management Congress*, Orlando, 19 November 2003. (American Meteorological Society : Boston, MA). <http://ams.confex.com/ams/pdfpapers/65316.pdf>
- Steyerberg, E.W., Vickers, A.J., Cook, N.R., Gerds, T., Gonen, M., Obuchowski, N., Pencina, M.J. et Kattan, M.W.** (2010). Assessing the performance of prediction models : a framework for traditional and novel measures. *Epidemiology*, vol. 21(1), pp. 128-138.
- Stronach, N.H. et McNaughton, S.J.** (1989). Grassland fire dynamics in the Serengeti ecosystem, and potential method of retrospectively estimating fire energy. *Journal of Applied Ecology*, vol. 26, pp. 1025-1033.
- Sturtevant, V. et McCaffrey, S.** (2007). Encouraging wildland fire preparedness : lessons learned from three wildfire education programs. Dans : McCaffrey, S. (éd.), *The Public and Wildland Fire Management : Social Science Findings for Managers*. US Forest Service, Northern Research Station, Newtown Square, PA, pp. 125-136.
- SUAMME** (2007). *Guide méthodologique pour la gestion des coupures de combustible par le pastoralisme et l'agriculture*. Piloté par Dimanche Marc, 71p.
- Subramanian, N. et Ramanathan, R.** (2012). A review of applications of Analytic Hierarchy Process in operations management. *International Journal of Production Economics*, vol. 138, pp. 215-241.
- Sullivan, A.L., Ellis, P.F. et Knight, I.K.** (2003). A review of radiant heat flux models used in bushfire applications. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 12, pp. 101-110.

Suppes, P. (1959). Measurement empirical meaningfulness and three-valued logic. In *Measurement: Definition and Theories*, Churchman (éd.), John Wiley and Sons, New York, pp. 129-143.

-T-

Tacnet, J.M., Burnet, R., Ravel, P., Maurel, P. et Lievois, J. (2005). *Systèmes d'information et P.P.R. avalanches : contribution à l'amélioration de la traçabilité des données et des raisonnements*. Rapport d'étude. Rapport Technique, Cemagref – ONF/RTM – Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable/Direction de la Prévention des Pollutions et des Risques.

Tacnet, J.M. (2009). *Prise en compte de l'incertitude dans l'expertise des risques naturels en montagne par analyse multicritères et fusion d'information*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne.

Tea, C. (2009). *Retour d'expérience et données subjectives : quel système d'information pour la gestion des risques ? Le cas de la sécurité dans le transport ferroviaire*. Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Arts et Métiers, Paris.

Theobald, D.M. et Romme, W.H. (2007). Expansion of the US wildland–urban interface. *Landscape and Urban Planning*, vol. 83, n°4, pp. 340–354.

Thomas, P.H. (1963). The size of flames from natural fires. *Intern. Symp. Combust.* 9, pp. 844-859.

Thompson, M.P. et Calkin, D.E. (2011). Uncertainty and risk in wildland fire management : a review. *Journal of Environmental Management* 92(8), pp. 1895–1909.

Thompson, E., Berger, M., Blomquist, G. et Allen S. (2002). Valuing the arts : a contingent valuation approach. *Journal of Cultural Economics*, vol. 26, pp. 87-113.

Thouret, J.C. et D'Ercole, R. (1994) Les phénomènes naturels créateurs de dommages (= menace) : diagnostic, inventaire et typologie. *Revue de géographie Alpine*, 82(4), pp. 17-25.

Thouret, J.C. et D'Ercole, R. (1996). Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales. *Cah. Sci. hum.* 32(2), pp. 407-422.

Thouret, J.C. et Léone, F. (2003). Aléas, vulnérabilités et gestion des risques naturels. Dans : *Questions de Géographie. Les Risques*, Éditions Du Temps, Paris, pp. 37-70.

Thurstone, L. (1927). A law of comparative judgments. *Psychological Review*, vol. 34, pp. 273–286.

Tolhurst, K.G., Shields, B.J. et Chong, D.M. (2008). PHOENIX : development and application of a bushfire risk management tool. *The Australian Journal of Emergency Management*, vol. 23, n°4, pp. 47-54.

Tolhurst, K.G. (2009). *Report on the physical nature of the Victorian fires occurring on 7th February 2009*. Victorian Bushfires Royal Commission. EXP.003.001.0017.

Tolhurst, K.G. et Chong, D.M. (2011). Assessing potential house losses using PHOENIX RapidFire. *Proceedings of Bushfire CRC & AFAC 2011 Conference Science Day*, Sydney, Australia, Bushfire CRC, pp. 74-86.

Tolhurst, K.G. et Chong, D.M. (2012). Capturing some convective aspects of wildfire in a empirical model – PHOENIX RapidFire. *Coupled Atmosphere-Bushfire Modelling Workshop*, University of Melbourne, 16-18 Mai 2012, Bushfire CRC.

Torry, W. (1979). Hazards, hazes and holes : a critique of the Environment as hazard, and general reflections on disaster research. *Canadian Geographer*, 23(4), pp. 368-383.

Torterotot, J.P. (1993). *Le coût des dommages dus aux inondations : estimation et analyse des incertitudes*. Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.

Trabaud, L. (1979). Étude du comportement du feu dans la garrigue à chêne kermès à partir des températures et des vitesses de propagation. *Annales de Sciences Forestières*, vol. 36, pp. 13-38.

Trabaud, L. (1989). *Les Feux de forêts, mécanismes, comportement et environnement*. France-Sélection, Aubervilliers.

Tran, H.C., Cohen, J.D. et Chase, R.A. (1992). Modeling ignition of structures in wildland/urban interface fires. Dans : *Proceedings of the First International Fire and Materials Conference, Inter Science Communications Limited*, London. Arlington, September 24–25, pp. 253–262.

Tricart, J. (1978). *Géomorphologie applicable*. Masson, Paris.

- Tsoukiàs, A.** (2003a) From decision theory to decision aiding methodology. Tech. Rep. 21, DIMACS, Rutgers University.
- Tsoukiàs, A.** (2003b) On the concept of decision aiding process. Tech. Rep. 21, DIMACS, Rutgers University.
- Tversky, A., Slovic, P. et Kahneman, D.** (1990). The causes of preference reversal. *The American Economic Review*, vol. 80(1), pp. 204–215.

-U-

- Upton, G. et Fingleton, B.** (1985). *Spatial data analysis by example*. New York, Wiley

-V-

- Vaidya, O.S. et Kumar, S.** (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, vol. 169, pp. 1-29.
- Vanderpooten, D. et Vallin, D.** (2002). *Aide à la décision : Une approche par les cas – Gestion – Mathématiques – Informatique*. Ellipses, Paris.
- Vansnick, J.C.** (1990). Measurement theory and decision aid. Dans : Bana e Costa, C.A. (ed.), *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, Springer-Verlag, Berlin, pp. 81–100.
- Van Wagner, C.E.** (1970). *An index to estimate the current moisture content of the forest floor*. Canadian Forest Serv. Pub., 1288.
- Van Wagner, C.E.** (1977). Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 7(1), pp. 23–34.
- Van Wagner, C.E.** (1985). Fire behavior modeling, how to blend Art and Science. Dans : *Eighth Conference on Fire and Forest Meteorology*, Society of American Foresters.
- Velez, R.** (1992). *Recent history of forest fires in the Mediterranean area*. European School of Climatology and Natural Hazards course, Porto Carras, Halkidiki, Greece.
- Velez, R.** (1997). Recent history of forest fires in Mediterranean area. Dans : Balabanis P, Eftichidis G, Fantechi R (eds) *Forest fire risk and management. Proceedings of the European School of Climatology and Natural Hazards*, Greece, 27 Mai au 4 Juin 1992. European Commission, Bruxelles, pp. 15–26.
- Velez, R.** (2000). *La Defensa contra incendios forestales. Fundamentos y experiencias*. Madrid, Mac Graw Hill.
- Veyret, Y.** (2003). *Les risques*. Paris, SEDES.
- Veyret, Y. et Meschinot de Richemond, N.** (2003). Le risque, les risques. Dans : Veyret Y. (dir). *Les risques*. Dossiers des Images Economiques du Monde, SEDES, Paris, pp.17-47.
- Veyret, Y.** (2004). *Géographie des risques naturels en France. De l'aléa à la gestion*. Hatier, Paris.
- Veyret, Y. et Reghezza, M.** (2005). Aléas et risques dans l'analyse géographique. *Annales des Mines*, n°40, pp. 61-69.
- Veyret, Y.** (2006). Risques, assurance et vulnérabilité. Actes du colloque : *Géographes et assureurs face aux risques majeurs*, 6 avril 2006 à l'Université de Versailles, pp. 22-33.
- Vial, M.** (1999). Modèle et logique de l'évaluation. *Colloque international : Ethique et qualité dans l'évaluation*, 25-26 octobre, Université de Reims Pol'èvalue, Reims.
- Vincke, P.** (1989). *L'aide multicritère à la décision*. Éditions de l'Université de Bruxelles, Bruxelles.
- Vinet, F.** (2002). La question du risque climatique en agriculture : le cas de la grêle en France. *Annales de Géographie*. n°627-628, pp. 592-613.
- Vinet, F.** (2007). *Approche institutionnelle et contraintes locales de la gestion du risque. Recherche sur le risque d'inondation en Languedoc-Roussillon*. Mémoire d'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Paul Valéry – Montpellier III.
- Voogd, H.** (1983). *Multicriteria evaluation for urban and regional planning*. Pion, London.

-W-

- Waddell, E.** (1977). The hazards of scientism : a review article. *Human Ecology*, 5(1), pp. 69-76.
- Wald, A.** (1943). Tests of statistical hypotheses concerning several parameters when the number of observations is large. *Transactions of the American Mathematical Society*, vol. 54, pp. 426-482.
- Waldrop, T.A.** et **Brose, P.H.** (1999) A comparison of fire intensity levels for stand replacement of table mountain pine (*Pinus pungens* Lamb.). *Forest Ecology and Management*, vol. 113, pp. 155-166.
- Waugh, F.V.** (1929). *Quality as a Determinant of Vegetable Prices: A Statistical Study of Quality Factors Influencing Vegetable Prices in the Boston*. Columbia University Press, New-York.
- Weber, R.** (1991). Modelling fire spread through fuel beds. *Prog. En. Combust. Sci.*, vol. 17, pp. 67-82.
- Webster, R. et Oliver, M.A.** (1992). Sample adequately to estimate variograms of soil properties. *Journal of Soil Science*, vol. 43, pp.177-192.
- Wells, C.G., DeBano, L.F., Lewis, C.E., Fredriksen, R.L., Franklin, E.C., Froelich, R.C.** et **Dunn, P.H.** (1979). *Effects of fire on soil: a state-of-knowledge review*. USDA Forest Service, General Technical Report WO-7, Washington DC.
- Whelan, R.J.** (1995). *The Ecology of Fire*. Cambridge University Press, New York.
- White, G.F., Calef, W.C., Hudson, J.W., Mayer, H.M., Shaeffer, J.R.** et **Volk, D.J.** (1958) *Changes of urban occupancy of Flood Plains in the United States*. Chicago, University of Chicago, Department of Geography, Research paper n°57.
- White, G.F.** (1960). *Papers on Flood Problems*, Research Paper n°70, University of Chicago, Department of Geography, Chicago.
- White, G.F.** (1968). Paths to Risk Analysis. *Risk Analysis*, vol. 8, n° 2, pp. 171-175.
- White, G.F.** (1973). Natural Hazards Research. Dans Chorley, R.J. (dir.), *Geography*, Methuen & Co Ltd, Londres.
- White, G.F.** (1974) *Natural Hazards. Local, National, Global*. Oxford University Press, New York, London, Toronto.
- White, G.F.** et **Haas, E.** (1975). *Assessment of Research on Natural Hazards*. Cambridge : MIT Press.
- Whittaker, J., Handmer, J.** et **Mercer, D.** (2012). Vulnerability to bushfires in rural Australia : a case study from East Gippsland, Victoria. *Journal of Rural Studies*, vol. 28, pp. 161-173.
- Whyte, L.L.** (1969). *Hierarchical Structures*. American Elsevier, New York.
- Winter, G.** et **Fried, J.S.** (2000). Homeowner perspectives on fire hazard, responsibility, and management strategies at the wildland-urban interface. *Society and Natural Resources*, vol. 13(1), pp. 33-49.
- Wisner, B., O'Keefe, P.** et **Westgate, K.** (1976). Taking the Naturalness out of Natural Disasters. *Nature* : 566-7.
- Wisner, B.** (1998). World Views, Belief Systems, and Disasters : Implications for Preparedness, Mitigation and Recovery. *23rd Annual Natural Hazards Research and Applications Workshop*, Boulder, Colorado, 12-15 July, 1998.
<http://www.radixonline.org/resources/worldview98.doc>
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T.** et **Davis, I.** (2004). *At Risk, Natural hazards, people's vulnerability and disasters*. Routledge 2^{ème} édition, Londres.
- Wotton, B.M., Gould, J.S., McCaw, W.L., Cheney, N.P.** et **Taylor, S.W.** (2011). Flame temperature and residence time of fires in dry eucalypt forest. *International Journal of Wildland Fire*, vol. 21(3), pp. 270-281.

-Y-

- Yoo, S.H.** (2004). South Koreans' willingness to pay for Korean unification. *Applied Economics Letters*, vol. 11, pp. 15-19.
- Yokoyama, M.** (1921). The Nature of the affective judgment in the method of paired comparison. *The American Journal of Psychology*, vol. 32, pp. 357-369.
- Yue, J., Bintong, C.** et **Minchiang, W.** (1998). New approaches to Analytical Hierarchy Process. *INFORMS meeting*, Seattle, October 25-28.

-Z-

Zárate, L., Arnaldos, J. et Casal, J. (2008). Establishing safety distances for wildland fires. *Fire Safety Journal*, vol. 43(8), pp. 565-575.

Zeng, T., Hudson, J., Kay, S. et Laginestra, E. (2003). A fuzzy GIS approach to fire risk assessment : a case study of Sydney Olympic Park, Australia. *Spatial Sciences Conferences 2003*.

Zoller, H.G. et Beguin, H. (1992). *Aide à la décision : l'évaluation des projets d'aménagement*. Economica, Paris.

Sites internet consultés

Agreste – Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt

<http://agreste.agriculture.gouv.fr>

Littré – Dictionnaire de la langue française

www.littre.org

Patrick Lagadec

<http://www.patricklagadec.net/fr/>

le Petit Robert – Dictionnaire de la langue française

pr.bvdep.com (compte utilisateur IRSTEA)

PPRIF 66 – Direction Départementale des Territoires et de la Mer (Pyrénées-Orientales)

<http://www.pyrenees-orientales.gouv.fr/Politiques-publiques/Environnement-eau-risques-naturels-et-technologiques/Risques-majeurs/Plan-de-Prevention-des-Risques-PPR>

PPRIF 84 – Direction Départementale des Territoires (Vaucluse)

<http://www.vaucluse.gouv.fr/reglement-des-ppr-incendies-de-a8119.html>

PROMÉTHÉE – base de données sur les incendies de forêt du Sud-Est de la France

www.promethee.com

Prévention incendie de forêt

www.prevention-incendie-foret.com

Observatoire régional de la forêt méditerranéenne – Site d'information sur la forêt de Provence-Alpes-Côte d'Azur

www.ofme.fr

Liste des annexes

- Annexe 1. Questionnaire pour le recueil des jugements d'experts**
- Annexe 2. Étude des jugements bruts sur les critères**
- Annexe 3. Étude des jugements bruts sur les modalités**
- Annexe 4. Résultats de l'agrégation des jugements sur les modalités**
- Annexe 5. Protocole de recueil des données post-incendie en interface habitat-forêt**
- Annexe 6. Enquête auprès des résidents des interfaces habitat-forêt**
- Annexe 7. Analyse des réponses des résidents au questionnaire**
- Annexe 8. Typologie du combustible**

Annexe 1. Questionnaire pour le recueil des jugements d'experts

Évaluation de la vulnérabilité des Interfaces Habitat-Forêt au regard des incendies de forêt

RECUEIL D'AVIS D'EXPERTS

- | | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|
| 1. Définition des Interfaces Habitat-Forêt | p. 2 |
| 2. La procédure d'analyse hiérarchique | p. 3 |
| 3. Évaluation de l'importance des critères à caractériser la vulnérabilité des Interfaces Habitat-Forêt | p. 4 |
| 4. Évaluation de l'intensité de la vulnérabilité induite par modalités | p. 11 |
| 5. Auto-évaluation de l'expert | p. 14 |
| 6. Remarques personnelles sur la démarche d'évaluation | p. 15 |

1. Définition des Interfaces Habitat-Forêt

Dans les régions françaises soumises au risque d'incendie de forêt, la loi d'orientation forestière du 11 juillet 2001 impose l'obligation de débroussailler dans un rayon de 50 m autour des bâtis situés à moins de 200 m de forêts, garrigues ou maquis (Art. L.322.3). Dans la définition proposée des Interfaces Habitat-Forêt (IHF), seuls les bâtis résidentiels situés à moins de 200 m de forêts, garrigues ou maquis sont pris en compte (Lampin-Maillet, 2009).

L'IHF est délimitée par l'espace inscrit dans un rayon de 100 m autour des habitations résidentielles (Fig. 1).

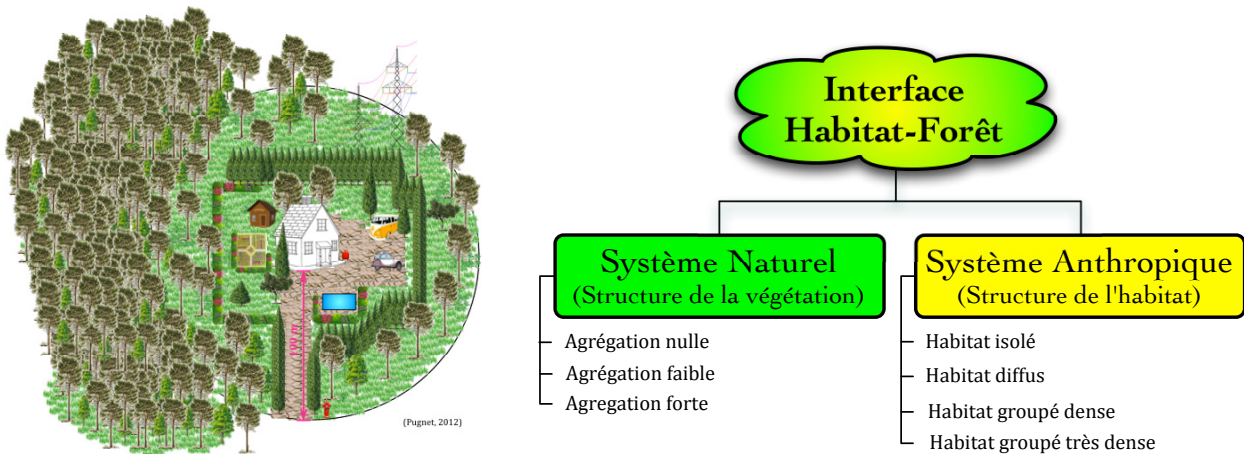


Fig. 121 : Schématisation et définition d'une interface habitat-forêt

Les IHF forment des territoires plus ou moins complexes dans lesquels espaces forestiers et urbains sont en contact ou s'interpénètrent, marquant une rupture plus ou moins brusque dans l'espace (Lampin-Maillet, 2009). Cette définition conduit à élaborer des types d'interface en fonction des structures des systèmes « Habitat » et « Végétation » (Fig. 1).

L'indice d'agrégation de la végétation fait référence à l'arrangement spatial et au regroupement d'objet sur une image. Il met en évidence l'organisation spatiale de la végétation en termes de continuité horizontale (Figure 2).

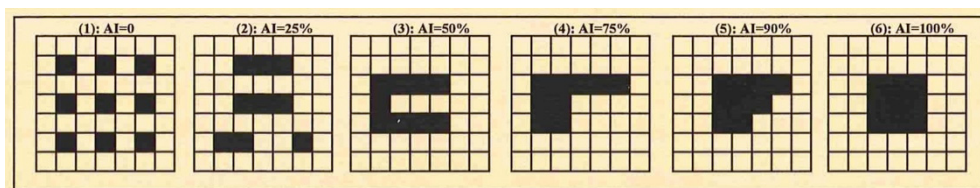


Fig. 122 : Évolution de l'indice d'agrégation relatif à l'arrangement spatial des 9 pixels noirs (Lampin *et al.*, 2006)

2. La procédure d'analyse hiérarchique

La procédure d'analyse hiérarchique (Analytic Hierarchy Process, AHP) intervient pour faciliter les choix entre différentes évaluations dans des situations complexes, où plusieurs critères qualitatifs et quantitatifs entrent en jeu (Saaty, 1980). La méthode AHP permet de structurer la réalité complexe en une arborescence hiérarchique (Fig. 3).

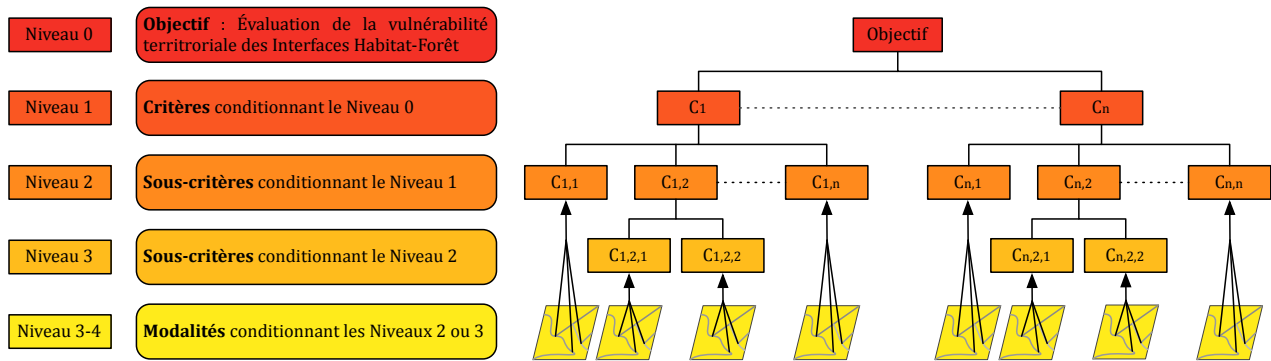


Fig. 123 : Structure hiérarchique de la modélisation spatiale multicritère

L'analyse logique d'un problème décisionnel conduit à le décomposer en ses critères principaux, et à réitérer cette décomposition sur les composantes ainsi obtenues autant de fois que nécessaire. **Chaque critère d'un même niveau hiérarchique ne revêt pas la même importance dans sa capacité à résoudre le problème.**

L'objectif consiste ici, à **quantifier les intensités de contribution** relative de chaque critère d'un même niveau hiérarchique. Chaque niveau de la hiérarchie contient une série d'éléments **auxquels l'expert doit attribuer une importance** selon son influence sur la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt. Les priorités se définissent en comparant par paires tous les critères d'un même niveau, selon une échelle spécifique (Fig. 4).

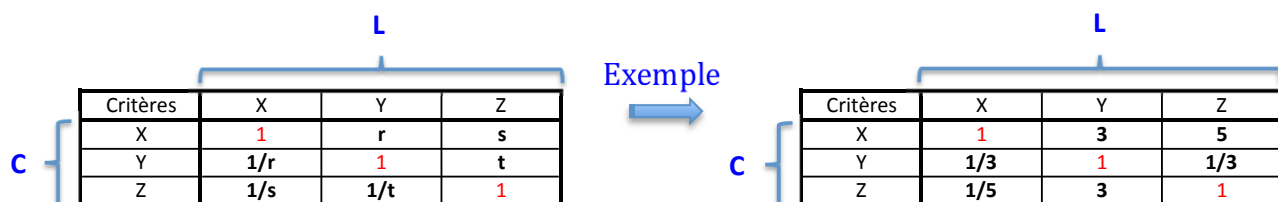
IMPORTANTANCE

1 : (A) a la même importance que (B) 3 : (A) a légèrement plus d'importance que (B) 5 : (A) a plus d'importance que (B) 7 : (A) a beaucoup plus d'importance que (B) 9 : (A) a la priorité sur (B)	1/3 : (B) a légèrement plus d'importance que (A) 1/5 : (B) a plus d'importance que (A) 1/7 : (B) a beaucoup plus d'importance que (A) 1/9 : (B) a la priorité sur (A)
----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Fig. 124 : Échelle fondamentale des comparaisons par paire

3. Évaluation de l'importance des critères à caractériser la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt

Le sens de lecture d'un tableau de comparaison est toujours : **C** (colonne des titres) par rapport à **L** (ligne des titres). La moitié inférieure (à la diagonale) du tableau d'évaluation correspond à l'**inverse** de la moitié supérieure, et n'apporte donc pas d'information supplémentaire.

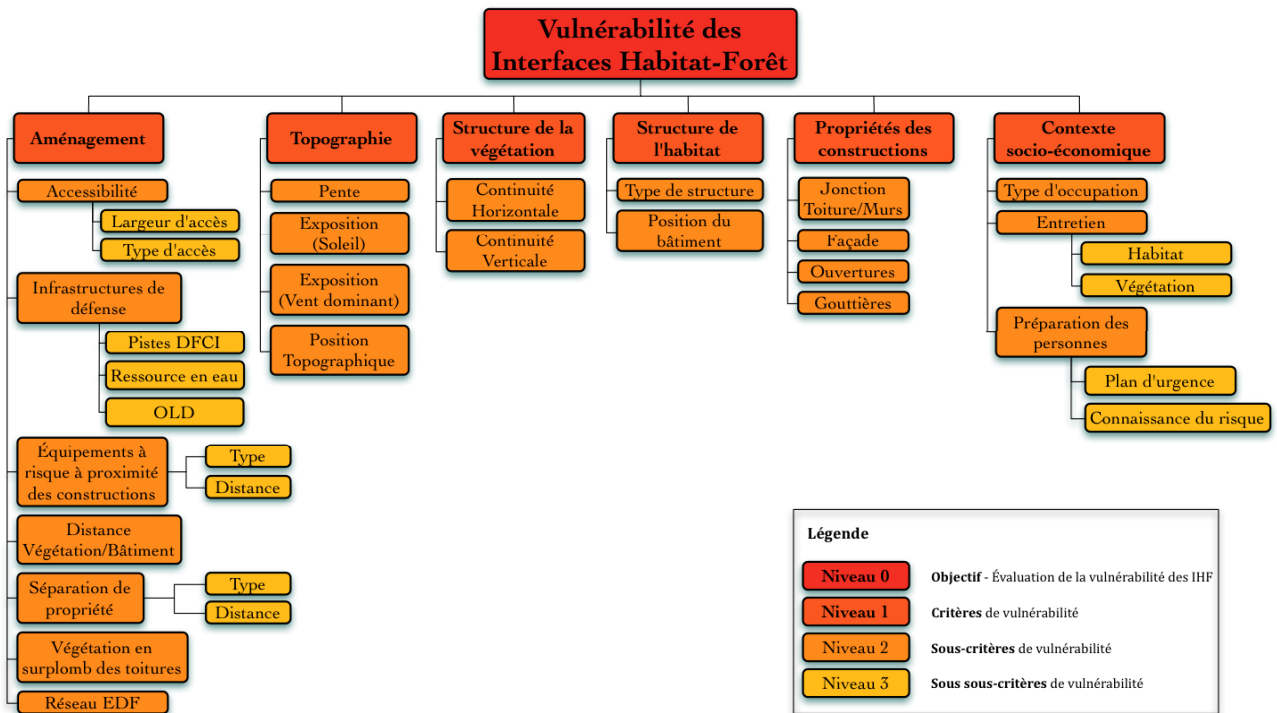


Partie supérieure à la diagonale :

- (X) par rapport à (Y) → (X) a légèrement plus d'importance que (Y) → $r = 3$
- (X) par rapport à (Z) → (X) a plus d'importance que (Z) → $s = 5$
- (Y) par rapport à (Z) → (Y) a légèrement moins d'importance que (Z) → $t = 1/3$

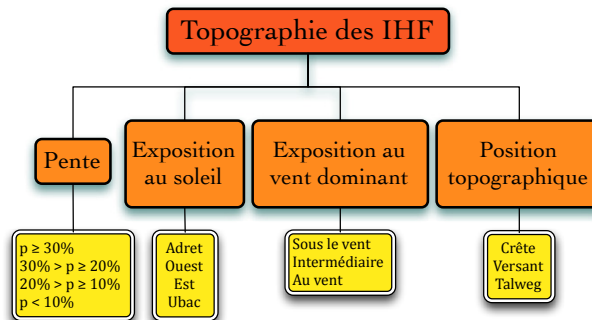
Partie inférieure à la diagonale :

- (Y) par rapport à (X) → (Y) a légèrement *moins d'importance* que (X) → $1/r = 1/3$
- (Z) par rapport à (X) → (Z) a *moins d'importance* que (X) → $1/s = 1/5$
- (Z) par rapport à (Y) → (Z) a légèrement plus d'importance que (Y) → $1/t = 3$



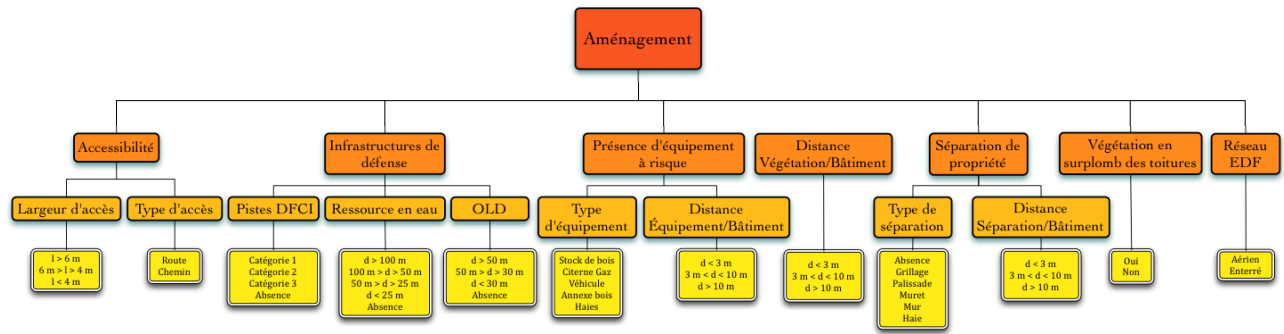
Niveau 1. Comparaison des critères de « Vulnérabilité » du point de vue de leur importance à influencer la vulnérabilité des Interfaces Habitat-Forêt

Critères "Vulnérabilité"	Aménagement	Topographie	Structure de la végétation	Structure de l'habitat	Propriétés des constructions	Contexte socio-économique
Aménagement	1					
Topographie		1				
Structure de la végétation			1			
Structure de l'habitat				1		
Propriétés des constructions					1	
Contexte socio-économique						1



Niveau 2. Comparaison des sous-critères « Topographie » du point de vue de leur importance à influencer la vulnérabilité des Interfaces Habitat-Forêt

Sous-critères "Topographie"	Pente	Exposition au soleil	Exposition au vent dominant	Position topographique
Pente	1			
Exposition au soleil		1		
Exposition au vent dominant			1	
Position topographique				1



Niveau 2. Comparaison des sous-critères « Aménagement » du point de vue de leur importance à influencer la vulnérabilité des Interfaces Habitat-Forêt

Sous-critères "Aménagement"	Accessibilité	Infrastructures pour la défense	Présence d'équipement à risque	Distance Végétation/Bâtiment	Séparation de propriété	Végétation en surplomb des toitures	Réseaux EDF
Accessibilité	1						
Infrastructures pour la défense		1					
Présence d'équipement à risque			1				
Distance Végétation/Bâtiment				1			
Séparation de propriété					1		
Végétation en surplomb des toitures						1	
Réseaux EDF							1

Niveau 3. Comparaison des sous-critères « Infrastructures de défense » du point de vue de leur importance à influencer la vulnérabilité des constructions en IHF

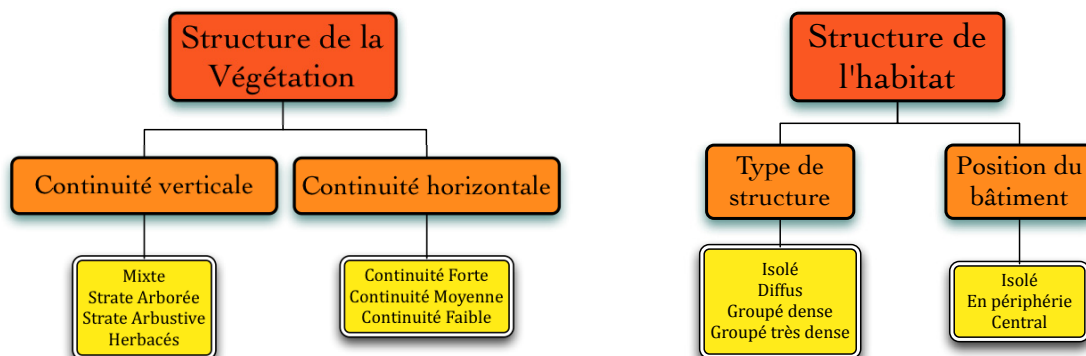
Sous-critères "Infrastructures de défense"	Pistes DFCI	Ressource en eau	OLD
Pistes DFCI	1		
Ressource en eau		1	
OLD			1

Niveau 3. Comparaison des sous-critères « Équipements à risque » du point de vue de leur importance à influencer la vulnérabilité des Interfaces Habitat-Forêt

Sous-critères "Présence d'équipement à risque"	Type	Distance Équipement/Bâtiment
Type d'équipement	1	
Distance Équipement/Bâtiment		1

Niveau 3. Comparaison des sous-critères « Séparation » du point de vue de leur importance à influencer la vulnérabilité des Interfaces Habitat-Forêt

Sous-critères "Séparation de propriété"	Type de séparation	Distance Séparation/Bâtiment
Type de séparation	1	
Distance Séparation/Bâtiment		1

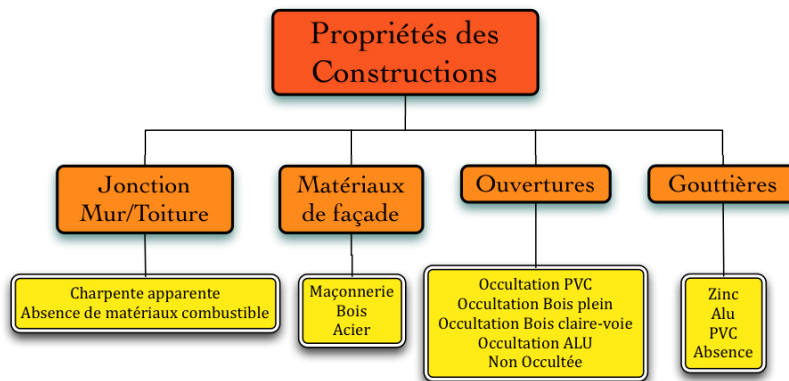


Niveau 2. Comparaison des « Structures de la végétation » du point de vue de leur importance à influencer la vulnérabilité des Interfaces Habitat-Forêt

Sous-critères "Structure de la végétation"	Continuité horizontale	Continuité verticale
Continuité horizontale	1	
Continuité verticale		1

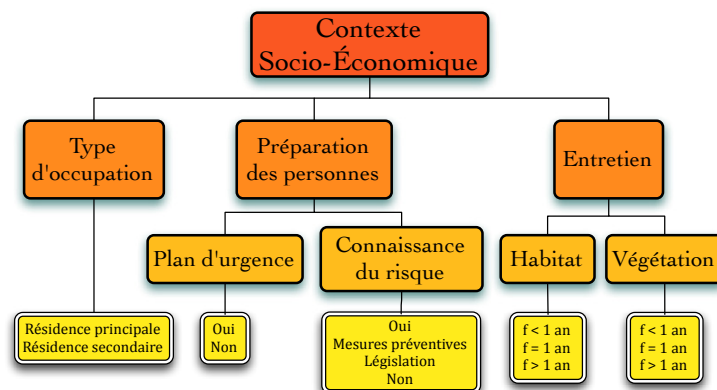
Niveau 2. Comparaison des sous-critères « Structures de l'habitat » du point de vue de leur importance à influencer la vulnérabilité des Interfaces Habitat-Forêt

Sous-critères "Structure de l'habitat"	Type de suture	Position du bâtiment
Type de structure	1	
Position du bâtiment		1



Niveau 2. Comparaison des sous-critères « Propriétés des constructions » du point de vue de leur importance à influencer la vulnérabilité des Interfaces Habitat-Forêt

Sous-critères "Propriétés des constructions"	Jonction Mur/Toiture	Matériaux de façade	Ouvertures	Gouttières
Jonction Mur/Toiture	1			
Matériaux de façade		1		
Ouvertures			1	
Gouttières				1



Niveau 2. Comparaison des sous-critères « Contexte Socio-Économique » du point de vue de leur importance à influencer la vulnérabilité des Interfaces Habitat-Forêt

Sous-critères "Contexte Socio-Économique"	Occupation	Préparation des personnes	Entretien
Occupation	1		
Préparation des personnes		1	
Entretien			1

Niveau 3. Comparaison des sous-critères « Préparation des personnes » du point de vue de leur importance à influencer la vulnérabilité des Interfaces Habitat-Forêt

Sous-critères "Préparation des personnes"	Plan d'urgence	Connaissance du risque
Plan d'urgence	1	
Connaissance du risque		1

Niveau 3. Comparaison des sous-critères « Entretien » du point de vue de leur importance à influencer la vulnérabilité des Interfaces Habitat-Forêt

Sous-critères "Entretien"	Habitat	Végétation
Habitat	1	
Végétation		1

4. Évaluation de l'intensité de la vulnérabilité induite par modalités

[DEGRÉ D'INTENSITÉ : pour chaque modalité entourer la note d'intensité de la vulnérabilité induite (1 - Très faible ; 2 - Faible ; 3 - Modérée ; 4 - Forte ; 5 - Très forte)

Modalités relatives à la topographie des interfaces habitat-forêt

Classes de pente	Intensité
0 à 10 %	1 2 3 4 5
10 à 20 %	1 2 3 4 5
20 à 30 %	1 2 3 4 5
> 30 %	1 2 3 4 5

Classes d'exposition au soleil	Intensité
Adret	1 2 3 4 5
Est	1 2 3 4 5
Ouest	1 2 3 4 5
Ubac	1 2 3 4 5

Classes d'exposition au vent	Intensité
Au vent	1 2 3 4 5
Intermédiaire	1 2 3 4 5
Sous le vent	1 2 3 4 5

Classes de position topographique	Intensité
Crête	1 2 3 4 5
Versant	1 2 3 4 5
Talweg	1 2 3 4 5

Modalités relatives à l'aménagement des interfaces habitat-forêt

Classes de largeur d'accès	Intensité
$l > 6 \text{ m}$	1 2 3 4 5
$4 \text{ m} < l < 6 \text{ m}$	1 2 3 4 5
$l < 4 \text{ m}$	1 2 3 4 5

Classes de type d'accès	Intensité
Route	1 2 3 4 5
Chemin	1 2 3 4 5

Classes de pistes DFCI	Intensité
Catégorie 1	1 2 3 4 5
Catégorie 2	1 2 3 4 5
Catégorie 3	1 2 3 4 5
Absence	1 2 3 4 5

Classes de Ressource en eau	Intensité
$d > 100 \text{ m}$	1 2 3 4 5
$50 \text{ m} < d < 100 \text{ m}$	1 2 3 4 5
$25 \text{ m} < d < 50 \text{ m}$	1 2 3 4 5
$d < 25 \text{ m}$	1 2 3 4 5
Absence	1 2 3 4 5

Classes d' OLD	Intensité
$d > 50 \text{ m}$	1 2 3 4 5
$50 \text{ m} > d > 30 \text{ m}$	1 2 3 4 5
$d < 30 \text{ m}$	1 2 3 4 5
Absence	1 2 3 4 5

Classes de type d'équipement	Intensité
Stock de bois	1 2 3 4 5
Bouteille de gaz	1 2 3 4 5
Véhicule	1 2 3 4 5
Annexe bois	1 2 3 4 5
Haies	1 2 3 4 5

Classes de distance équipement/bâtiment	Intensité
$d < 3 \text{ m}$	1 2 3 4 5
$3 \text{ m} < d < 10 \text{ m}$	1 2 3 4 5
$d > 10 \text{ m}$	1 2 3 4 5

Classes "Distance Végétation/Bâtiment"	Intensité
Contact	1 2 3 4 5
$d < 3 \text{ m}$	1 2 3 4 5
$3 \text{ m} < d < 10 \text{ m}$	1 2 3 4 5
$d > 10 \text{ m}$	1 2 3 4 5

Classes de type de séparation	Intensité
Absence	1 2 3 4 5
Grillage	1 2 3 4 5
Palissade	1 2 3 4 5
Muret	1 2 3 4 5
Mur	1 2 3 4 5

Classes de distance séparation/bâti	Intensité
$d < 3 \text{ m}$	1 2 3 4 5
$3 \text{ m} < d < 10 \text{ m}$	1 2 3 4 5
$d > 10 \text{ m}$	1 2 3 4 5

Classes de végétation en surplomb	Intensité
Oui	1 2 3 4 5
Non	1 2 3 4 5

Classes de réseau EDF	Intensité
Enterré	1 2 3 4 5
Aérien	1 2 3 4 5

Modalités relatives à la structure de la végétation des interfaces habitat-forêt

Classes de continuité horizontale de la végétation	Intensité
Continuité forte	1 2 3 4 5
Continuité faible	1 2 3 4 5
Continuité nulle	1 2 3 4 5

Classes de continuité verticale de la végétation	Intensité
Mixte	1 2 3 4 5
Strate arborée	1 2 3 4 5
Strate arbustive	1 2 3 4 5
Herbacés	1 2 3 4 5

Modalités relatives à la structure de l'habitat des interfaces habitat-forêt

Classes de type de structure	Intensité
Isolée	1 2 3 4 5
Diffuse	1 2 3 4 5
Groupée dense	1 2 3 4 5
Groupée très dense	1 2 3 4 5

Classes de position dans l'interface	Intensité
Isolé	1 2 3 4 5
En périphérie	1 2 3 4 5
Central	1 2 3 4 5

Modalités relatives aux propriétés des habitations en interfaces habitat-forêt

Classes de jonction mur/toiture	Intensité
Charpente apparente	1 2 3 4 5
Absence de matériaux combustibles	1 2 3 4 5

Classes de matériaux de façade	Intensité
Maçonnerie	1 2 3 4 5
Bois	1 2 3 4 5
Acier	1 2 3 4 5

Classes Ouverture	Intensité
Occultation Bois plein	1 2 3 4 5
Occultation Bois claire-voie	1 2 3 4 5
Occultation PVC	1 2 3 4 5
Occultation ALU	1 2 3 4 5
Non occultée	1 2 3 4 5

Classes de gouttière	Intensité
Zinc	1 2 3 4 5
Alu	1 2 3 4 5
PVC	1 2 3 4 5
Absence	1 2 3 4 5

Modalités relatives aux facteurs humains en interfaces habitat-forêt

Classes de type d'occupation	Intensité
Permanente	1 2 3 4 5
Secondaire	1 2 3 4 5

Classes de plan d'urgence	Intensité
Oui	1 2 3 4 5
Non	1 2 3 4 5

Classes de connaissance du risque	Intensité
Oui	1 2 3 4 5
Mesures préventives	1 2 3 4 5
Législation	1 2 3 4 5
Non	1 2 3 4 5

Classes d'entretien de l'habitat	Intensité
Fréquence > 1an	1 2 3 4 5
Fréquence = 1 an	1 2 3 4 5
Fréquence < 1an	1 2 3 4 5

Classes d'entretien de la végétation	Intensité
Fréquence > 1an	1 2 3 4 5
Fréquence = 1 an	1 2 3 4 5
Fréquence < 1an	1 2 3 4 5

5. Auto-évaluation de l'expert

Fonction :

Grade :

Service :

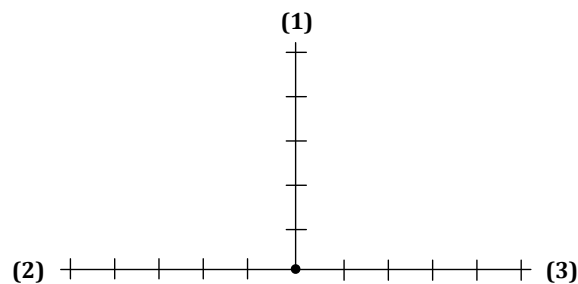
Nombre de participation à la lutte contre les feux de forêt en interface habitat-forêt :

Nombre de participation à des retours d'expérience sur l'impact des feux de forêt en interface habitat-forêt :

Auto-évaluation selon les trois critères suivants :

- (1) Compétences personnelles pour l'évaluation de la vulnérabilité des territoires face aux incendies de forêt
- (2) Expérience personnelle en gestion de crise feu de forêt
- (3) Expérience personnelle en analyse des dommages après incendie

Graphes à compléter selon une échelle à cinq niveaux du plus faible au plus fort : 1, 2, 3, 4, 5.



6. Remarques personnelles sur la démarche d'évaluation

(Remarques sur la démarche, les critères..., lacunes éventuelles...)

Merci de votre participation

Annexe 2. Étude des jugements bruts sur les critères

Niveau 1 de la hiérarchie

Niveau 1 : famille des critères de vulnérabilité

→ Ensemble des comparaisons construisant la matrice de jugement du Niveau 1 de la hiérarchie.

Comparaison	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁
C ₁ vsC ₂	6	1/5	3	1/9	1/5	7	1/5	1/5	1/5	1/3	5
C ₁ vsC ₃	2	1/7	1/5	1/7	1	3	1/5	1/5	1/3	1/5	1/5
C ₁ vsC ₄	6	1/3	1	1/3	2	7	7	1/5	7	1/5	1/3
C ₁ vsC ₅	1/7	1/3	3	1/5	2	7	1/7	7	1	1/5	3
C ₁ vsC ₆	1/4	1/3	7	1	5	1/5	1/5	7	7	5	9
C ₂ vsC ₃	1/3	1/3	1/5	3	3	1/7	1/5	1/3	3	1/3	1/3
C ₂ vsC ₄	3	5	1/3	7	5	7	3	5	5	1/5	1/3
C ₂ vsC ₅	1/6	5	1/3	5	5	3	1/5	7	3	1/5	1/3
C ₂ vsC ₆	2	5	1	9	7	1/7	5	9	9	7	9
C ₃ vsC ₄	4	7	3	5	2	5	7	5	7	1	3
C ₃ vsC ₅	1/7	7	3	7	2	7	7	7	1	3	5
C ₃ vsC ₆	3	7	5	9	5	1/5	7	9	7	9	9
C ₄ vsC ₅	1/8	1	3	3	1	1/5	1/7	7	1/7	3	3
C ₄ vsC ₆	1/3	1	3	7	2	1/7	1/5	9	1	9	9
C ₅ vsC ₆	5	1	5	5	2	1/7	5	3	7	7	9

C₁ = « Aménagement » ; C₂ = « Topographie » ; C₃ = « Structure de la végétation » ; C₄ = « Structure de l'Habitat »
C₅ = « Propriétés des Habitations » ; C₆ = « Facteurs Humains »

→ Statistiques descriptives sur les comparaisons et effectifs relatifs aux trois groupes (NEFS, NEFE, NEFI).

Comparaison	NEFS	NEFE	NEFI	Min	Max	Médiane	Moyenne Géométrique
C ₁ vsC ₂	4	0	7	1/9	7	1/5	0,641
C ₁ vsC ₃	2	1	8	1/7	3	1/5	0,360
C ₁ vsC ₄	5	1	5	1/5	7	1	1,179
C ₁ vsC ₅	5	1	5	1/7	7	1	0,878
C ₁ vsC ₆	6	1	4	1/5	9	5	1,656
C ₂ vsC ₃	3	0	8	1/7	3	1/3	0,512
C ₂ vsC ₄	8	0	3	1/5	7	5	2,209
C ₂ vsC ₅	6	0	5	1/6	7	3	1,174
C ₂ vsC ₆	9	1	1	1/7	9	7	3,787
C ₃ vsC ₄	10	1	0	1	7	5	3,890
C ₃ vsC ₅	9	1	1	1/7	7	5	3,055
C ₃ vsC ₆	10	0	1	1/5	9	7	4,835
C ₄ vsC ₅	5	2	4	1/8	7	1	0,893
C ₄ vsC ₆	6	2	3	1/7	9	2	1,675
C ₅ vsC ₆	9	1	1	1/7	9	5	3,080

NEFS = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue plus que le second.

NEFE = Nombre d'experts jugeant les deux critères équivalents

NEFI = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue moins que le second

→ Pondérations individuelles brutes et structures de jugement associées.

Expert	C₁	C₂	C₃	C₄	C₅	C₆	Structure de Jugement
E₁	0,147	0,074	0,13	0,028	0,491	0,129	C ₅ > C ₁ > C ₃ > C ₆ > C ₂ > C ₄
E₂	0,037	0,267	0,483	0,071	0,071	0,071	C ₃ > C ₂ > C ₄ = C ₅ = C ₆ > C ₁
E₃	0,194	0,052	0,419	0,175	0,116	0,044	C ₃ > C ₁ > C ₄ > C ₅ > C ₂ > C ₆
E₄	0,03	0,454	0,4	0,111	0,079	0,026	C ₂ > C ₃ > C ₄ > C ₅ > C ₁ > C ₆
E₅	0,157	0,47	0,167	0,083	0,083	0,042	C ₂ > C ₃ > C ₁ > C ₄ = C ₅ > C ₆
E₆	0,239	0,066	0,165	0,024	0,042	0,464	C ₆ > C ₁ > C ₃ > C ₂ > C ₅ > C ₄
E₇	0,051	0,127	0,482	0,025	0,239	0,077	C ₃ > C ₅ > C ₂ > C ₆ > C ₁ > C ₄
E₈	0,087	0,291	0,411	0,16	0,032	0,019	C ₃ > C ₂ > C ₄ > C ₁ > C ₅ > C ₆
E₉	0,139	0,416	0,213	0,034	0,17	0,028	C ₂ > C ₃ > C ₅ > C ₁ > C ₄ > C ₆
E₁₀	0,055	0,094	0,301	0,329	0,199	0,022	C ₄ > C ₃ > C ₅ > C ₂ > C ₁ > C ₆
E₁₁	0,169	0,075	0,409	0,226	0,102	0,018	C ₃ > C ₄ > C ₁ > C ₅ > C ₂ > C ₆
Moyenne Géométrique	0,122	0,201	0,375	0,100	0,140	0,061	C₃ > C₂ > C₅ > C₁ > C₄ > C₆
Écart-type	0,070	0,168	0,134	0,099	0,131	0,130	

Niveau 2 de la hiérarchie

Niveau 2 : famille des sous-critères relatifs à l'aménagement des interfaces

→ Ensemble des comparaisons construisant la matrice de jugement.

Comparaison	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁
C ₁₁ vsC ₁₂	1/5	1	1	3	1/2	1/3	1/5	1/7	1/3	1/3	1/3
C ₁₁ vsC ₁₃	1/7	1	3	5	1/2	1/9	1/7	1/7	1/5	5	1/5
C ₁₁ vsC ₁₄	1/7	1/5	1/3	9	2	1/9	1/5	1/7	1/7	1	1/7
C ₁₁ vsC ₁₅	1/6	2	7	1/2	1/2	1/5	1/5	5	3	9	7
C ₁₁ vsC ₁₆	1/7	1/5	3	7	1/3	1/9	3	1/5	1/5	3	1/7
C ₁₁ vsC ₁₇	1	1	5	1	1/2	7	5	7	1	9	7
C ₁₂ vsC ₁₃	1/4	7	5	1/3	1	1/9	1/5	5	3	7	1/5
C ₁₂ vsC ₁₄	1/4	1/3	3	7	1	1/9	1/5	5	1	3	1/7
C ₁₂ vsC ₁₅	1/3	3	7	1/3	2	1	1/3	7	7	9	7
C ₁₂ vsC ₁₆	1/5	1/5	3	5	2	1/9	3	7	1	3	1/7
C ₁₂ vsC ₁₇	4	3	5	2	1/2	7	5	9	7	9	7
C ₁₃ vsC ₁₄	1/3	1/7	1/3	5	1	5	5	1	1	1/5	1/5
C ₁₃ vsC ₁₅	3	1/3	3	1/3	1/2	9	1/5	7	7	3	9
C ₁₃ vsC ₁₆	1/3	1/5	1	3	1	5	5	5	1	1/3	1/5
C ₁₃ vsC ₁₇	5	1/3	3	3	1/2	9	5	9	7	3	9
C ₁₄ vsC ₁₅	3	3	7	5	1/3	7	1/5	7	7	7	9
C ₁₄ vsC ₁₆	1	1	5	7	1	1	5	5	1	5	1/3
C ₁₄ vsC ₁₇	7	3	5	5	1/2	9	5	9	7	7	9
C ₁₅ vsC ₁₆	1/4	1/3	1/5	1/7	1/2	1/7	5	1/5	1/7	1/7	1/9
C ₁₅ vsC ₁₇	5	1	1	1	1	5	5	5	3	1	5
C ₁₆ vsC ₁₇	7	3	5	9	2	9	1	7	7	7	9

C₁₁ = « Accessibilité » ; C₁₂ = « Défense » ; C₁₃ = « Équipement aggravant » ; C₁₄ = « Distance Végétation/Habitation »
 C₁₅ = « Séparation des propriétés » ; C₁₆ = « Végétation en surplomb des toitures » ; C₁₇ = « Réseau EDF »

→ Statistiques descriptives sur les comparaisons et effectifs relatifs aux trois groupes (NEFS, NEFE, NEFI).

Comparaison	NEFS	NEFE	NEFI	Min	Max	Médiane	Moyenne Géométrique
C ₁₁ vsC ₁₂	1	2	8	1/7	3	1/3	0,435
C ₁₁ vsC ₁₃	3	1	7	1/9	5	1/5	0,5
C ₁₁ vsC ₁₄	2	1	8	1/9	9	1/5	0,354
C ₁₁ vsC ₁₅	6	0	5	1/6	9	2	1,325
C ₁₁ vsC ₁₆	4	0	7	1/9	7	1/5	0,540
C ₁₁ vsC ₁₇	6	4	1	1/2	9	5	2,612
C ₁₂ vsC ₁₃	5	1	5	1/9	7	1	1,028
C ₁₂ vsC ₁₄	4	2	5	1/9	7	1	0,798
C ₁₂ vsC ₁₅	7	1	3	1/3	9	3	2,161
C ₁₂ vsC ₁₆	6	1	4	1/9	7	2	1,017
C ₁₂ vsC ₁₇	10	0	1	1/2	9	5	4,258
C ₁₃ vsC ₁₄	3	3	5	1/7	5	1	0,794
C ₁₃ vsC ₁₅	7	0	4	1/5	9	3	1,904
C ₁₃ vsC ₁₆	5	3	3	1/5	5	1	1,048
C ₁₃ vsC ₁₇	9	0	2	1/3	9	5	3,338
C ₁₄ vsC ₁₅	9	0	2	1/5	9	7	3,268
C ₁₄ vsC ₁₆	5	5	1	1/3	7	1	1,939
C ₁₄ vsC ₁₇	10	0	1	1/2	9	7	4,982
C ₁₅ vsC ₁₆	1	0	10	1/9	5	1/5	0,261
C ₁₅ vsC ₁₇	6	5	0	1	5	3	2,297
C ₁₆ vsC ₁₇	10	1	0	1	9	7	5,033

NEFS = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue plus que le second.

NEFE = Nombre d'experts jugeant les deux critères équivalents

NEFI = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue moins que le second

→ Pondérations individuelles brutes et structures de jugement associées.

Expert	C ₁₁	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	Structure de Jugement
E ₁	0,026	0,070	0,175	0,281	0,113	0,306	0,028	C ₁₆ >C ₁₄ >C ₁₃ >C ₁₅ >C ₁₂ >C ₁₇ >C ₁₁
E ₂	0,079	0,144	0,038	0,281	0,072	0,309	0,077	C ₁₆ >C ₁₄ >C ₁₂ >C ₁₁ >C ₁₇ >C ₁₅ >C ₁₃
E ₃	0,194	0,308	0,076	0,266	0,029	0,093	0,034	C ₁₂ >C ₁₄ >C ₁₁ >C ₁₆ >C ₁₃ >C ₁₇ >C ₁₅
E ₄	0,276	0,151	0,143	0,143	0,125	0,116	0,046	C ₁₁ >C ₁₂ >C ₁₃ =C ₁₄ >C ₁₅ >C ₁₆ >C ₁₇
E ₅	0,086	0,174	0,119	0,099	0,159	0,185	0,180	C ₁₆ >C ₁₇ >C ₁₂ >C ₁₅ >C ₁₃ >C ₁₄ >C ₁₁
E ₆	0,031	0,047	0,449	0,202	0,052	0,202	0,016	C ₁₃ >C ₁₄ =C ₁₆ >C ₁₅ >C ₁₂ >C ₁₁ >C ₁₇
E ₇	0,053	0,093	0,260	0,152	0,382	0,031	0,029	C ₁₅ >C ₁₃ >C ₁₄ >C ₁₂ >C ₁₁ >C ₁₆ >C ₁₇
E ₈	0,052	0,433	0,191	0,191	0,030	0,088	0,016	C ₁₂ >C ₁₃ =C ₁₄ >C ₁₆ >C ₁₁ >C ₁₅ >C ₁₇
E ₉	0,052	0,251	0,191	0,227	0,036	0,214	0,029	C ₁₂ >C ₁₄ >C ₁₆ >C ₁₃ >C ₁₁ >C ₁₅ >C ₁₇
E ₁₀	0,206	0,367	0,049	0,223	0,023	0,109	0,023	C ₁₂ >C ₁₄ >C ₁₁ >C ₁₆ >C ₁₃ >C ₁₅ =C ₁₇
E ₁₁	0,057	0,076	0,153	0,288	0,025	0,385	0,015	C ₁₆ >C ₁₄ >C ₁₃ >C ₁₂ >C ₁₁ >C ₁₅ >C ₁₇
Moyenne géométrique	0,093	0,188	0,166	0,250	0,077	0,185	0,040	C₁₄>C₁₂>C₁₆>C₁₃>C₁₁>C₁₅>C₁₇
Écart-type	0,084	0,130	0,115	0,063	0,106	0,111	0,048	

Niveau 2 : Famille des sous-critères relatifs à la topographie des interfaces

→ Ensemble des comparaisons construisant la matrice de jugement.

Comparaison	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁
C ₂₁ vsC ₂₂	5	1/5	7	1/3	5	1/7	5	9	5	5	9
C ₂₁ vsC ₂₃	3	1/5	1/3	1/3	2	1/3	5	1/7	3	1	3
C ₂₁ vsC ₂₄	1	1/3	1/3	3	1	1/9	1/5	5	3	3	3
C ₂₂ vsC ₂₃	1/5	1	1/7	1/2	1/5	7	1/7	1/9	1/3	1/5	1/9
C ₂₂ vsC ₂₄	1/4	5	1/5	3	1/5	1/9	1/5	1/7	1/3	1/3	1/9
C ₂₃ vsC ₂₄	1	5	3	3	1/2	1/9	1/7	9	1	3	1/3

C₂₁ = « Pente » ; C₂₂ = « Exposition au soleil » ; C₂₃ = « Exposition au vent dominant » ; C₂₄ = « Position topographique »

→ Statistiques descriptives sur les comparaisons et effectifs relatifs aux trois groupes (NEFS, NEFE, NEFI).

Comparaison	NEFS	NEFE	NEFI	Min	Max	Médiane	Moyenne Géométrique
C ₂₁ vsC ₂₂	8	0	3	1/7	9	5	2,423
C ₂₁ vsC ₂₃	6	1	4	1/7	5	1	0,892
C ₂₁ vsC ₂₄	5	2	4	1/9	5	1	1
C ₂₂ vsC ₂₃	1	1	9	1/9	7	1/5	0,308
C ₂₂ vsC ₂₄	2	0	9	1/9	5	1/5	0,335
C ₂₃ vsC ₂₄	5	2	4	1/9	9	1	1,112

NEFS = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue plus que le second.

NEFE = Nombre d'experts jugeant les deux critères équivalents

NEFI = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue moins que le second

→ Pondérations individuelles brutes et structures de jugement associées.

Expert	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	Structure de Jugement
E ₁	0,415	0,064	0,235	0,286	C ₂₁ > C ₂₄ > C ₂₃ > C ₂₂
E ₂	0,064	0,411	0,411	0,113	C ₂₂ = C ₂₃ > C ₂₄ > C ₂₁
E ₃	0,174	0,046	0,503	0,277	C ₂₃ > C ₂₄ > C ₂₁ > C ₂₂
E ₄	0,184	0,280	0,309	0,227	C ₂₃ > C ₂₂ > C ₂₄ > C ₂₁
E ₅	0,360	0,061	0,218	0,360	C ₂₁ = C ₂₄ > C ₂₃ > C ₂₂
E ₆	0,034	0,197	0,057	0,711	C ₂₄ > C ₂₂ > C ₂₃ > C ₂₁
E ₇	0,244	0,047	0,119	0,589	C ₂₄ > C ₂₁ > C ₂₃ > C ₂₂
E ₈	0,211	0,029	0,673	0,086	C ₂₃ > C ₂₁ > C ₂₄ > C ₂₂
E ₉	0,522	0,078	0,200	0,200	C ₂₁ > C ₂₃ = C ₂₄ > C ₂₂
E ₁₀	0,390	0,068	0,390	0,152	C ₂₁ = C ₂₃ > C ₂₄ > C ₂₂
E ₁₁	0,506	0,032	0,169	0,292	C ₂₁ > C ₂₄ > C ₂₃ > C ₂₂
Moyenne géométrique	0,276	0,102	0,309	0,314	C ₂₄ > C ₂₃ > C ₂₁ > C ₂₂
Écart-type	0,167	0,124	0,182	0,194	

Niveau 2 : Famille des sous-critères relatifs à la structure de la végétation des interfaces

→ Ensemble des comparaisons construisant la matrice de jugement.

Comparaison	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁
C ₃₁ vsC ₃₂	1/3	5	3	1/5	1/2	1/5	1/5	7	5	1/3	3

C₃₁ = « Continuité horizontale » ; C₃₂ = « Continuité verticale »

→ Statistiques descriptives sur les comparaisons et effectifs relatifs aux trois groupes (NEFS, NEFE, NEFI).

Comparaison	NEFS	NEFE	NEFI	Min	Max	Médiane	Moyenne Géométrique
C ₃₁ vsC ₃₂	5	0	6	1/5	7	1/2	0,968

NEFS = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue plus que le second.

NEFE = Nombre d'experts jugeant les deux critères équivalents

NEFI = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue moins que le second

→ Pondérations individuelles brutes et structures de jugement associées.

Expert	C ₃₁	C ₃₂	Structure de Jugement
E ₁	0,250	0,750	C ₃₂ > C ₃₁
E ₂	0,833	0,167	C ₃₁ > C ₃₂
E ₃	0,750	0,250	C ₃₁ > C ₃₂
E ₄	0,167	0,833	C ₃₂ > C ₃₁
E ₅	0,333	0,667	C ₃₂ > C ₃₁
E ₆	0,167	0,833	C ₃₂ > C ₃₁
E ₇	0,167	0,833	C ₃₂ > C ₃₁
E ₈	0,875	0,125	C ₃₁ > C ₃₂
E ₉	0,833	0,167	C ₃₁ > C ₃₂
E ₁₀	0,250	0,750	C ₃₂ > C ₃₁
E ₁₁	0,750	0,250	C ₃₁ > C ₃₂
Moyenne géométrique	0,492	0,508	C₃₂ > C₃₁
Écart-type	0,312	0,312	

Niveau 2 : Famille des sous-critères relatifs à la structure de l'habitat des interfaces

→ Ensemble des comparaisons construisant la matrice de jugement.

Comparaison	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁
C₄₁vsC₄₂	1	5	1/5	1/3	1/3	1/5	1/5	1/7	3	1/7	1/5

C₄₁ = « Type de structure d'Habitat » ; C₄₂ = « Position dans la structure d'Habitat »

→ Statistiques descriptives sur les comparaisons et effectifs relatifs aux trois groupes (NEFS, NEFE, NEFI).

Comparaison	NEFS	NEFE	NEFI	Min	Max	Médiane	Moyenne Géométrique
C₄₁vsC₄₂	2	1	8	1/7	5	1/5	0,410

NEFS = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue plus que le second.

NEFE = Nombre d'experts jugeant les deux critères équivalents

NEFI = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue moins que le second

→ Pondérations individuelles brutes et structures de jugement associées.

Expert	C ₄₁	C ₄₂	Structure des contributions
E₁	0,500	0,500	C ₄₁ = C ₄₂
E₂	0,833	0,167	C ₄₁ > C ₄₂
E₃	0,167	0,833	C ₄₂ > C ₄₁
E₄	0,250	0,750	C ₄₂ > C ₄₁
E₅	0,250	0,750	C ₄₂ > C ₄₁
E₆	0,167	0,833	C ₄₂ > C ₄₁
E₇	0,167	0,833	C ₄₂ > C ₄₁
E₈	0,125	0,875	C ₄₂ > C ₄₁
E₉	0,750	0,250	C ₄₁ > C ₄₂
E₁₀	0,125	0,875	C ₄₂ > C ₄₁
E₁₁	0,167	0,833	C ₄₂ > C ₄₁
Moyenne géométrique	0,291	0,709	C₄₂ > C₄₁
Écart-type	0,257	0,257	

Niveau 2 : Famille des sous-critères relatifs aux propriétés des habitations des interfaces

→ Ensemble des comparaisons construisant la matrice de jugement.

Comparaison	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁
C ₅₁ vsC ₅₂	1/3	1	5	7	1	1/5	1/5	3	7	3	5
C ₅₁ vsC ₅₃	1/3	1/3	1	5	1/5	1/7	5	1/5	1	1	1/3
C ₅₁ vsC ₅₄	1/2	1	5	3	2	1/7	7	5	3	9	7
C ₅₂ vsC ₅₃	1/2	1/3	1/3	1/3	1/5	1/5	5	1/5	1/7	1/3	1/7
C ₅₂ vsC ₅₄	3	3	1/3	1/5	1	1/3	7	5	1/5	9	5
C ₅₃ vsC ₅₄	3	3	7	1/3	9	5	7	7	5	9	9

C₅₁ = « Jonction Mur/Toiture » ; C₅₂ = « Matériaux d'enveloppe » ; C₅₃ = « Ouvertures » ; C₅₄ = « Gouttières »

→ Statistiques descriptives sur les comparaisons et effectifs relatifs aux trois groupes (NEFS, NEFE, NEFI).

Comparaison	NEFS	NEFE	NEFI	Min	Max	Médiane	Moyenne Géométrique
C ₅₁ vsC ₅₂	6	2	3	1/5	7	3	1,574
C ₅₁ vsC ₅₃	2	3	6	1/7	5	1/3	0,621
C ₅₁ vsC ₅₄	8	1	2	1/7	9	3	2,385
C ₅₂ vsC ₅₃	1	0	10	1/7	5	1/3	0,33
C ₅₂ vsC ₅₄	6	1	4	1/5	9	3	1,457
C ₅₃ vsC ₅₄	10	0	1	1/3	9	7	4,583

NEFS = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue plus que le second.

NEFE = Nombre d'experts jugeant les deux critères équivalents

NEFI = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue moins que le second

→ Pondérations individuelles brutes et structures de jugement associées.

Expert	C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃	C ₅₄	Structure de Jugement
E ₁	0,104	0,311	0,439	0,146	C ₅₃ > C ₅₂ > C ₅₄ > C ₅₁
E ₂	0,162	0,223	0,487	0,127	C ₅₃ > C ₅₂ > C ₅₁ > C ₅₄
E ₃	0,400	0,076	0,415	0,109	C ₅₃ > C ₅₁ > C ₅₄ > C ₅₂
E ₄	0,565	0,055	0,118	0,262	C ₅₁ > C ₅₄ > C ₅₃ > C ₅₂
E ₅	0,137	0,116	0,663	0,085	C ₅₃ > C ₅₁ > C ₅₂ > C ₅₄
E ₆	0,042	0,121	0,606	0,230	C ₅₃ > C ₅₄ > C ₅₂ > C ₅₁
E ₇	0,261	0,584	0,117	0,037	C ₅₂ > C ₅₁ > C ₅₃ > C ₅₄
E ₈	0,218	0,127	0,609	0,046	C ₅₃ > C ₅₁ > C ₅₂ > C ₅₄
E ₉	0,374	0,046	0,441	0,140	C ₅₃ > C ₅₁ > C ₅₄ > C ₅₂
E ₁₀	0,393	0,180	0,393	0,034	C ₅₃ = C ₅₁ > C ₅₂ > C ₅₄
E ₁₁	0,288	0,099	0,575	0,038	C ₅₃ > C ₅₁ > C ₅₂ > C ₅₄
Moyenne géométrique	0,263	0,161	0,467	0,109	C₅₃ > C₅₁ > C₅₂ > C₅₄
Écart-type	0,155	0,156	0,184	0,078	

Niveau 2 : Famille des sous-critères relatifs aux facteurs humains des interfaces

→ Ensemble des comparaisons construisant la matrice de jugement.

Comparaison	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁
C ₆₁ vsC ₆₂	1/3	1/3	3	3	1/3	1/5	1/7	1/7	1/5	5	1/5
C ₆₁ vsC ₆₃	2	1/5	1/7	1/5	1/5	1/7	1/9	1/5	1/7	1/9	1/5
C ₆₂ vsC ₆₃	3	1/3	1/5	1/3	1/2	1/3	1/7	5	1/5	1/9	1/5

C₆₁ = « Type d'occupation » ; C₆₂ = « Préparation des personnes » ; C₆₃ = « Entretien »

→ Statistiques descriptives sur les comparaisons et effectifs relatifs aux trois groupes (NEFS, NEFE, NEFI).

Comparaison	NEFS	NEFE	NEFI	Min	Max	Médiane	Moyenne Géométrique
C ₆₁ vsC ₆₂	3	0	8	1/7	5	1/3	0,474
C ₆₁ vsC ₆₃	1	0	10	1/9	2	1/5	0,202
C ₆₂ vsC ₆₃	2	0	9	1/9	5	1/3	0,394

NEFS = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue plus que le second.

NEFE = Nombre d'experts jugeant les deux critères équivalents

NEFI = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue moins que le second

→ Pondérations individuelles brutes et structures de jugement associées.

Expert	C ₆₁	C ₆₂	C ₆₃	Structure des contributions
E ₁	0,249	0,594	0,157	C ₆₂ > C ₆₁ > C ₆₃
E ₂	0,105	0,258	0,637	C ₆₃ > C ₆₂ > C ₆₁
E ₃	0,170	0,092	0,738	C ₆₃ > C ₆₁ > C ₆₂
E ₄	0,223	0,127	0,651	C ₆₃ > C ₆₁ > C ₆₂
E ₅	0,110	0,309	0,582	C ₆₃ > C ₆₂ > C ₆₁
E ₆	0,072	0,279	0,649	C ₆₃ > C ₆₂ > C ₆₁
E ₇	0,048	0,191	0,761	C ₆₃ > C ₆₂ > C ₆₁
E ₈	0,067	0,715	0,218	C ₆₂ > C ₆₃ > C ₆₁
E ₉	0,067	0,218	0,715	C ₆₃ > C ₆₂ > C ₆₁
E ₁₀	0,151	0,052	0,797	C ₆₃ > C ₆₁ > C ₆₂
E ₁₁	0,080	0,234	0,685	C ₆₃ > C ₆₂ > C ₆₁
Moyenne géométrique	0,123	0,253	0,625	C ₆₃ > C ₆₂ > C ₆₁
Écart-type	0,068	0,203	0,213	

Niveau 3 de la hiérarchie

Niveau 3 : Famille des sous-critères relatifs à l'accessibilité des habitations

→ Ensemble des comparaisons construisant la matrice de jugement.

Comparaison	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁
C ₁₁₁ VS _{C112}	1/5	1/5	1/5	1/5	1/3	1/3	1/7	1/7	1/5	1/9	5

C₁₁₁ = « Type d'accès » ; C₁₁₂ = « Largeur d'accès »

→ Statistiques descriptives sur les comparaisons et effectifs relatifs aux trois groupes (NEFS, NEFE, NEFI).

Comparaison	NEFS	NEFE	NEFI	Min	Max	Médiane	Moyenne Géométrique
C ₁₁₁ VS _{C112}	1	0	10	1/9	5	1/5	0,262

NEFS = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue plus que le second.

NEFE = Nombre d'experts jugeant les deux critères équivalents

NEFI = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue moins que le second

→ Pondérations individuelles brutes et structures de jugement associées.

Expert	C ₁₁₁	C ₁₁₂	Structure des contributions
E ₁	0,167	0,833	C ₁₁₂ > C ₁₁₁
E ₂	0,167	0,833	C ₁₁₂ > C ₁₁₁
E ₃	0,167	0,833	C ₁₁₂ > C ₁₁₁
E ₄	0,167	0,833	C ₁₁₂ > C ₁₁₁
E ₅	0,250	0,750	C ₁₁₂ > C ₁₁₁
E ₆	0,250	0,750	C ₁₁₂ > C ₁₁₁
E ₇	0,125	0,875	C ₁₁₂ > C ₁₁₁
E ₈	0,125	0,875	C ₁₁₂ > C ₁₁₁
E ₉	0,167	0,833	C ₁₁₂ > C ₁₁₁
E ₁₀	0,100	0,900	C ₁₁₂ > C ₁₁₁
E ₁₁	0,833	0,167	C ₁₁₁ > C ₁₁₂
Moyenne géométrique	0,208	0,792	C₁₁₂ > C₁₁₁
Écart-type	0,206	0,206	

Niveau 3 : Famille des sous-critères relatifs à la défense des interfaces

→ Ensemble des comparaisons construisant la matrice de jugement.

Comparaison	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁
C ₁₂₁ VS _{C122}	5	1/3	5	3	1/2	3	1/3	5	1/3	1/3	5
C ₁₂₁ VS _{C123}	1/4	1/9	1/5	1/3	1/3	3	1/9	1/7	1/7	1/7	1/5
C ₁₂₂ VS _{C123}	1/9	1/5	1/7	1/3	1/2	3	1/9	1/7	1/7	1/9	1/5

C₁₂₁ = « Piste DFCI » ; C₁₂₂ = « Distance à la ressource en eau » ; C₁₂₃ = « Débroussaillage réglementaire »

→ Statistiques descriptives sur les comparaisons et effectifs relatifs aux trois groupes (NEFS, NEFE, NEFI).

Niveau 3 - Jugements comparatifs individuels							
Comparaison	NEFS	NEFE	NEFI	Min	Max	Médiane	Moyenne Géométrique
C ₁₂₁ VS _{C122}	6	0	5	1/3	5	3	1,381
C ₁₂₁ VS _{C123}	1	0	10	1/9	3	1/5	0,235
C ₁₂₂ VS _{C123}	1	0	10	1/9	3	1/7	0,226

NEFS = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue plus que le second.

NEFE = Nombre d'experts jugeant les deux critères équivalents

NEFI = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue moins que le second

→ Pondérations individuelles brutes et structures de jugement associées.

Expert	C ₁₂₁	C ₁₂₂	C ₁₂₃	Structure des contributions
E ₁	0,231	0,060	0,709	C ₁₂₃ > C ₁₂₁ > C ₁₂₂
E ₂	0,070	0,178	0,751	C ₁₂₃ > C ₁₂₂ > C ₁₂₁
E ₃	0,218	0,067	0,715	C ₁₂₃ > C ₁₂₁ > C ₁₂₂
E ₄	0,281	0,135	0,584	C ₁₂₃ > C ₁₂₁ > C ₁₂₂
E ₅	0,163	0,297	0,540	C ₁₂₃ > C ₁₂₂ > C ₁₂₁
E ₆	0,584	0,281	0,135	C ₁₂₁ > C ₁₂₂ > C ₁₂₃
E ₇	0,062	0,130	0,808	C ₁₂₃ > C ₁₂₂ > C ₁₂₁
E ₈	0,184	0,063	0,753	C ₁₂₃ > C ₁₂₁ > C ₁₂₂
E ₉	0,076	0,158	0,766	C ₁₂₃ > C ₁₂₂ > C ₁₂₁
E ₁₀	0,072	0,138	0,790	C ₁₂₃ > C ₁₂₂ > C ₁₂₁
E ₁₁	0,234	0,080	0,685	C ₁₂₃ > C ₁₂₁ > C ₁₂₂
Moyenne géométrique	0,176	0,141	0,683	C₁₂₃ > C₁₂₁ > C₁₂₂
Écart-type	0,150	0,082	0,192	

Niveau 3 : Famille des sous-critères relatifs aux équipements aggravants des habitations

→ Ensemble des comparaisons construisant la matrice de jugement.

Comparaison	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁
C ₁₃₁ VSC ₁₃₂	3	1	1/3	3	1/5	3	1/7	1/5	1/5	1/9	1/3

C₁₃₁ = « Type d'équipement aggravant » ; C₁₃₂ = « Distance à l'équipement aggravant »

→ Statistiques descriptives sur les comparaisons et effectifs relatifs aux trois groupes (NEFS, NEFE, NEFI).

Niveau 3 - Jugements comparatifs individuels							
Comparaison	NEFS	NEFE	NEFI	Min	Max	Médiane	Moyenne Géométrique
C ₁₃₁ VSC ₁₃₂	3	1	7	1/9	3	1/3	0,489

NEFS = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue plus que le second.

NEFE = Nombre d'experts jugeant les deux critères équivalents

NEFI = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue moins que le second

→ Pondérations individuelles brutes et structures de jugement associées.

Expert	C ₁₃₁	C ₁₃₂	Structure des contributions
E ₁	0,750	0,250	C ₁₃₁ > C ₁₃₂
E ₂	0,500	0,500	C ₁₃₁ = C ₁₃₂
E ₃	0,250	0,750	C ₁₃₂ > C ₁₃₁
E ₄	0,750	0,250	C ₁₃₁ > C ₁₃₂
E ₅	0,167	0,833	C ₁₃₂ > C ₁₃₁
E ₆	0,750	0,250	C ₁₃₁ > C ₁₃₂
E ₇	0,125	0,875	C ₁₃₂ > C ₁₃₁
E ₈	0,167	0,833	C ₁₃₂ > C ₁₃₁
E ₉	0,167	0,833	C ₁₃₂ > C ₁₃₁
E ₁₀	0,100	0,900	C ₁₃₂ > C ₁₃₁
E ₁₁	0,250	0,750	C ₁₃₂ > C ₁₃₁
Moyenne géométrique	0,328	0,672	C₁₃₂ > C₁₃₁
Écart-type	0,271	0,271	

Niveau 3 : Famille des sous-critères relatifs aux séparations des habitations

→ Ensemble des comparaisons construisant la matrice de jugement.

Comparaison	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁
C ₁₅₁ VSC ₁₅₂	4	3	3	3	3	1	1/7	5	1	9	1

C₁₅₁ = « Type de séparation » ; C₁₅₂ = « Distance à la séparation »

→ Statistiques descriptives sur les comparaisons et effectifs relatifs aux trois groupes (NEFS, NEFE, NEFI).

Niveau 3 - Jugements comparatifs individuels							
Comparaison	NEFS	NEFE	NEFI	Min	Max	Médiane	Moyenne Géométrique
C ₁₅₁ VSC ₁₅₂	7	3	1	1/7	9	3	2,003

NEFS = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue plus que le second.

NEFE = Nombre d'experts jugeant les deux critères équivalents

NEFI = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue moins que le second

→ Pondérations individuelles brutes et structures de jugement associées.

Expert	C ₁₅₁	C ₁₅₂	Structure des contributions
E ₁	0,800	0,200	C ₁₅₁ > C ₁₅₂
E ₂	0,750	0,250	C ₁₅₁ > C ₁₅₂
E ₃	0,750	0,250	C ₁₅₁ > C ₁₅₂
E ₄	0,750	0,250	C ₁₅₁ > C ₁₅₂
E ₅	0,800	0,200	C ₁₅₁ > C ₁₅₂
E ₆	0,500	0,500	C ₁₅₁ = C ₁₅₂
E ₇	0,125	0,875	C ₁₅₂ > C ₁₅₁
E ₈	0,125	0,875	C ₁₅₂ > C ₁₅₁
E ₉	0,500	0,500	C ₁₅₁ = C ₁₅₂
E ₁₀	0,900	0,100	C ₁₅₁ > C ₁₅₂
E ₁₁	0,500	0,500	C ₁₅₁ = C ₁₅₂
Moyenne géométrique	0,598	0,402	C₁₅₁ > C₁₅₂
Écart-type	0,268	0,268	

Niveau 3 : Famille des sous-critères relatifs à la préparation des personnes en interface

→ Ensemble des comparaisons construisant la matrice de jugement.

Comparaison	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁
C ₆₂₁ vsC ₆₂₂	1/5	1/5	1/5	1/5	2	1/5	5	1/7	1/3	1/3	1/5

C₆₂₁ = « Plan d'urgence » ; C₆₂₂ = « Connaissance »

→ Statistiques descriptives sur les comparaisons et effectifs relatifs aux trois groupes (NEFS, NEFE, NEFI).

Niveau 3 - Jugements comparatifs individuels							
Comparaison	NEFS	NEFE	NEFI	Min	Max	Médiane	Moyenne Géométrique
C ₆₂₁ vsC ₆₂₂	2	0	9	1/7	5	1/5	0,352

NEFS = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue plus que le second.

NEFE = Nombre d'experts jugeant les deux critères équivalents

NEFI = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue moins que le second

→ Pondérations individuelles brutes et structures de jugement associées.

Expert	C ₆₂₁	C ₆₂₂	Structure des contributions
E ₁	0,167	0,833	C ₆₂₂ > C ₆₂₁
E ₂	0,167	0,833	C ₆₂₂ > C ₆₂₁
E ₃	0,167	0,833	C ₆₂₂ > C ₆₂₁
E ₄	0,167	0,833	C ₆₂₂ > C ₆₂₁
E ₅	0,667	0,333	C ₆₂₁ > C ₆₂₂
E ₆	0,167	0,833	C ₆₂₂ > C ₆₂₁
E ₇	0,833	0,167	C ₆₂₁ > C ₆₂₂
E ₈	0,125	0,875	C ₆₂₂ > C ₆₂₁
E ₉	0,250	0,750	C ₆₂₂ > C ₆₂₁
E ₁₀	0,250	0,750	C ₆₂₂ > C ₆₂₁
E ₁₁	0,167	0,833	C ₆₂₂ > C ₆₂₁
Moyenne géométrique	0,260	0,740	C₆₂₂ > C₆₂₁
Écart-type	0,236	0,236	

Niveau 3 : Famille des sous-critères relatifs à l'entretien des propriétés en interface

→ Ensemble des comparaisons construisant la matrice de jugement.

Comparaison	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁
C ₆₃₁ VS _{C632}	3	3	1/5	1/7	1/2	1/5	1/7	1/7	1/5	1/9	1/3

C₆₃₁ = « Entretien de l'habitat » ; C₆₃₂ = « Entretien de la végétation »

→ Statistiques descriptives sur les comparaisons et effectifs relatifs aux trois groupes (NEFS, NEFE, NEFI).

Niveau 3 - Jugements comparatifs individuels							
Comparaison	NEFS	NEFE	NEFI	Min	Max	Médiane	Moyenne Géométrique
C ₆₃₁ VS _{C632}	2	0	9	1/9	3	1/5	0,322

NEFS = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue plus que le second.

NEFE = Nombre d'experts jugeant les deux critères équivalents

NEFI = Nombre d'experts jugeant que le premier critère contribue moins que le second

→ Pondérations individuelles brutes et structures de jugement associées.

Expert	C ₆₃₁	C ₆₃₂	Structure des contributions
E ₁	0,750	0,250	C ₆₃₁ > C ₆₃₂
E ₂	0,750	0,250	C ₆₃₁ > C ₆₃₂
E ₃	0,167	0,833	C ₆₃₂ > C ₆₃₁
E ₄	0,125	0,875	C ₆₃₂ > C ₆₃₁
E ₅	0,333	0,667	C ₆₃₂ > C ₆₃₁
E ₆	0,167	0,833	C ₆₃₂ > C ₆₃₁
E ₇	0,125	0,875	C ₆₃₂ > C ₆₃₁
E ₈	0,125	0,875	C ₆₃₂ > C ₆₃₁
E ₉	0,167	0,833	C ₆₃₂ > C ₆₃₁
E ₁₀	0,100	0,900	C ₆₃₂ > C ₆₃₁
E ₁₁	0,250	0,750	C ₆₃₂ > C ₆₃₁
Moyenne géométrique	0,244	0,756	C₆₃₂ > C₆₃₁
Écart-type	0,243	0,663	

Annexe 3. Étude des jugements bruts sur les modalités

Niveau 4 : modalités du critère « Aménagement » :

Sous-Critère « Accessibilité »					
Expert	Type		Largeur		
	C ₁₁₁₁	C ₁₁₁₂	C ₁₁₂₁	C ₁₁₂₂	C ₁₁₂₃
E1	1	2	2	2	3
E2	1	3	1	3	5
E3	1	1	1	1	1
E4	1	2	1	2	3
E5	1	1	1	1	4
E6	nc	nc	nc	nc	nc
E7	1	1	1	1	1
E8	1	2	1	1	1
E9	1	2	1	1	4
E10	1	1	1	1	3
E11	1	1	1	1	4
Min	1	1	1	1	1
Max	1	3	2	3	5
Médiane	1	2	1	1	3

Sous-Critère « Défense »													
Expert	Piste DFCI				Ressource en eau					OLD			
	C ₁₂₁₁	C ₁₂₁₂	C ₁₂₁₃	C ₁₂₁₄	C ₁₂₂₁	C ₁₂₂₂	C ₁₂₂₃	C ₁₂₂₄	C ₁₂₂₅	C ₁₂₃₁	C ₁₂₃₂	C ₁₂₃₃	C ₁₂₃₄
E1	2	2	3	4	2	1	1	1	2	2	3	4	5
E2	2	3	4	5	2	1	1	1	5	1	1	1	5
E3	1	1	2	3	3	1	1	1	5	1	1	1	5
E4	1	1	1	3	2	1	1	1	3	1	1	1	3
E5	1	2	3	4	1	1	1	1	1	1	2	4	5
E6	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
E7	1	1	1	5	1	1	1	1	5	1	1	5	5
E8	1	1	1	1	1	1	1	1	5	1	1	1	4
E9	1	1	1	4	1	1	1	1	5	1	1	1	5
E10	1	1	1	3	3	1	1	1	5	1	1	1	5
E11	1	1	1	3	4	1	1	1	5	1	1	1	5
Min	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	3
Max	2	3	4	5	4	1	1	3	5	2	3	5	5
Médiane	1	1	1	4	2	1	1	1	5	1	1	1	5

Sous-Critère « Equipement Aggravant »								
Expert	Type					Distance		
	C ₁₃₁₁	C ₁₃₁₂	C ₁₃₁₃	C ₁₃₁₄	C ₁₃₁₅	C ₁₃₂₁	C ₁₃₂₂	C ₁₃₂₃
E1	4	5	4	4	5	5	4	2
E2	1	3	3	2	5	4	3	1
E3	4	3	4	3	4	5	3	1
E4	2	5	3	3	4	3	1	1
E5	2	4	5	1	4	4	3	2
E6	5	5	5	5	5	nc	nc	nc
E7	3	2	4	5	5	5	3	2
E8	3	4	4	2	3	5	3	1
E9	3	5	4	3	3	5	4	2
E10	4	3	5	5	4	nc	nc	nc
E11	4	4	3	3	4	4	3	1
Min	1	2	3	1	3	3	1	1
Max	5	5	5	5	5	5	4	2
Médiane	3	4	4	3	4	5	3	1

Sous-Critère « Distance Végétation »					Sous-Critère « Séparation des propriétés »								
Expert	C ₁₄₁	C ₁₄₂	C ₁₄₃	C ₁₄₄	Expert	Type					Distance		
						C ₁₅₁₁	C ₁₅₁₂	C ₁₅₁₃	C ₁₅₁₄	C ₁₅₁₅	C ₁₅₂₁	C ₁₅₂₂	C ₁₅₂₃
E1	5	5	4	3	E1	1	1	2	1	1	1	1	1
E2	4	3	1	1	E2	1	1	2	1	3	4	2	1
E3	5	4	2	1	E3	1	1	3	1	1	5	4	1
E4	4	2	1	1	E4	1	1	2	1	1	2	1	1
E5	5	4	3	1	E5	1	1	1	1	1	3	2	1
E6	5	4	3	1	E6	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
E7	5	3	1	1	E7	5	3	3	1	1	5	3	1
E8	5	3	2	1	E8	1	2	2	1	2	3	2	1
E9	5	5	3	2	E9	1	3	3	1	1	4	3	1
E10	nc	nc	nc	nc	E10	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc	nc
E11	5	5	4	3	E11	1	1	1	1	1	1	1	1
Min	4	2	1	1	Min	1	1	1	1	1	1	1	1
Max	5	5	4	3	Max	5	3	3	1	3	5	4	1
Médiane	5	4	3	1	Médiane	1	1	2	1	1	3	2	1

Sous-Critère « Végétation en surplomb des habitations »		
Expert	C ₁₆₁	C ₁₆₂
E1	5	1
E2	4	1
E3	5	1
E4	3	1
E5	3	1
E6	5	1
E7	2	1
E8	4	1
E9	5	1
E10	nc	nc
E11	5	1
Min	2	1
Max	5	1
Médiane	5	1

Sous-Critère « Réseau EDF »		
Expert	C ₁₇₁	C ₁₇₂
E1	1	3
E2	1	4
E3	1	3
E4	1	1
E5	1	1
E6	nc	nc
E7	1	5
E8	2	1
E9	1	3
E10	nc	nc
E11	1	1
Min	1	1
Max	2	5
Médiane	1	3

Niveau 4 : modalités du critère « Topographie » :

Sous-Critère « Pente »				
Expert	C ₂₁₁	C ₂₁₂	C ₂₁₃	C ₂₁₄
E1	3	4	5	5
E2	1	3	4	5
E3	1	2	3	4
E4	1	3	4	5
E5	1	2	4	5
E6	1	3	3	4
E7	1	2	3	4
E8	1	3	4	5
E9	1	2	3	5
E10	1	2	3	5
E11	2	3	4	5
Min	1	2	3	4
Max	3	4	5	5
Médiane	1	3	4	5

Sous-Critère « Exposition Soleil »				
Expert	C ₂₂₁	C ₂₂₂	C ₂₂₃	C ₂₂₄
E1	3	2	2	1
E2	4	1	3	1
E3	3	1	2	1
E4	3	1	3	1
E5	3	1	3	1
E6	4	1	3	1
E7	4	2	3	4
E8	3	1	1	1
E9	5	4	4	1
E10	5	1	3	1
E11	3	2	1	1
Min	3	1	1	1
Max	5	4	4	4
Médiane	3	1	3	1

Sous-Critère « Exposition Vent dominant »			
Expert	C ₂₃₁	C ₂₃₂	C ₂₃₃
E1	4	2	1
E2	5	3	1
E3	5	3	1
E4	5	2	1
E5	4	2	1
E6	nc	nc	nc
E7	5	3	1
E8	5	1	1
E9	5	4	1
E10	5	1	1
E11	4	2	1
Min	4	1	1
Max	5	4	1
Médiane	5	2	1

Sous-Critère « Position Topographique »			
Expert	C ₂₄₁	C ₂₄₂	C ₂₄₃
E1	4	3	1
E2	5	3	1
E3	5	4	3
E4	4	5	1
E5	4	2	2
E6	4	3	1
E7	4	5	1
E8	2	4	1
E9	4	5	2
E10	5	3	3
E11	5	4	1
Min	2	2	1
Max	5	5	3
Médiane	4	4	1

Niveau 4 : modalités du critère « Structure de la Végétation » :

Sous-Critère « Continuité Horizontale »			
Expert	C ₃₁₁	C ₃₁₂	C ₃₁₃
E1	4	3	2
E2	5	1	1
E3	5	1	1
E4	4	1	1
E5	3	2	1
E6	4	3	1
E7	4	3	1
E8	4	1	1
E9	5	3	1
E10	nc	nc	nc
E11	5	3	1
Min	3	1	1
Max	5	3	2
Médiane	4	3	1

Sous-Critère « Continuité Verticale »				
Expert	C ₃₂₁	C ₃₂₂	C ₃₂₃	C ₃₂₄
E1	5	1	3	3
E2	4	1	1	1
E3	4	2	5	1
E4	5	3	5	2
E5	4	3	4	2
E6	5	3	4	2
E7	5	5	4	1
E8	5	3	4	1
E9	5	2	4	1
E10	nc	nc	nc	nc
E11	5	3	4	4
Min	4	1	1	1
Max	5	5	5	4
Médiane	5	3	4	2

Niveau 4 : modalités du critère « Structure de l'Habitat » :

Sous-Critère « Type »				
Expert	C ₄₁₁	C ₄₁₂	C ₄₁₃	C ₄₁₄
E1	3	2	1	1
E2	5	3	1	1
E3	5	4	1	1
E4	nc	nc	nc	nc
E5	3	2	1	1
E6	nc	nc	nc	nc
E7	5	4	1	1
E8	4	2	1	1
E9	5	4	1	1
E10	nc	nc	nc	nc
E11	5	4	1	1
Min	3	2	1	1
Max	5	4	1	1
Médiane	5	4	1	1

Sous-Critère « Position Interne »			
Expert	C ₄₂₁	C ₄₂₂	C ₄₂₃
E1	4	3	2
E2	4	2	1
E3	5	4	1
E4	nc	nc	nc
E5	4	2	1
E6	nc	nc	nc
E7	5	4	1
E8	5	4	1
E9	5	3	1
E10	nc	nc	nc
E11	5	4	1
Min	4	2	1
Max	5	4	2
Médiane	5	4	1

Niveau 4 : modalités du critère « Propriétés des Habitations » :

Sous-Critère « Jonction Mur/Toiture »		
Expert	C ₅₁₁	C ₅₁₂
E1	2	1
E2	4	1
E3	3	1
E4	3	1
E5	3	1
E6	nc	nc
E7	5	1
E8	4	1
E9	5	1
E10	nc	nc
E11	4	1
Min	2	1
Max	5	1
Médiane	4	1

Sous-Critère « Façade »			
Expert	C ₅₂₁	C ₅₂₂	C ₅₂₃
E1	1	4	1
E2	1	2	3
E3	1	3	1
E4	1	2	1
E5	1	2	1
E6	nc	nc	nc
E7	1	5	4
E8	1	2	2
E9	1	2	3
E10	nc	nc	nc
E11	1	2	2
Min	1	2	1
Max	1	5	4
Médiane	1	2	2

Sous-Critère « Ouvertures »					
Expert	C ₅₃₁	C ₅₃₂	C ₅₃₃	C ₅₃₄	C ₅₃₅
E1	3	4	2	1	2
E2	1	1	4	1	5
E3	1	1	5	4	5
E4	1	2	1	1	2
E5	1	1	2	1	5
E6	nc	nc	nc	nc	nc
E7	1	5	5	3	5
E8	1	1	1	1	5
E9	1	1	3	2	4
E10	1	1	5	3	5
E11	1	4	4	4	5
Min	1	1	1	1	2
Max	3	5	5	4	5
Médiane	1	1	4	2	5

Sous-Critère « Gouttières »				
Expert	C ₅₄₁	C ₅₄₂	C ₅₄₃	C ₅₄₄
E1	3	3	1	1
E2	1	1	3	1
E3	1	1	5	1
E4	3	1	1	1
E5	1	1	2	1
E6	nc	nc	nc	nc
E7	1	1	5	1
E8	1	2	4	1
E9	2	2	3	1
E10	1	1	3	1
E11	2	2	2	1
Min	1	1	1	1
Max	3	3	5	1
Médiane	1	1	3	1

Niveau 4 : modalités du critère « Facteurs Humains » :

Sous-Critère « Type de résidence »		
Expert	C ₆₁₁	C ₆₁₂
E1	1	3
E2	1	2
E3	1	4
E4	1	2
E5	1	1
E6	nc	nc
E7	1	3
E8	1	2
E9	1	2
E10	1	2
E11	2	3
Min	1	1
Max	2	4
Médiane	1	2

Sous-Critère « Préparation des personnes »						
Expert	Plan d'urgence		Connaissance			
	C ₆₂₁₁	C ₆₂₁₂	C ₆₂₂₁	C ₆₂₂₂	C ₆₂₂₃	C ₆₂₂₄
E1	1	2	1	1	4	5
E2	1	2	1	1	2	5
E3	1	2	1	1	2	4
E4	1	2	1	1	2	3
E5	1	1	1	1	2	3
E6	nc	nc	1	1	1	4
E7	1	3	1	1	1	3
E8	1	2	1	1	2	3
E9	1	2	1	1	2	3
E10	1	1	1	1	1	3
E11	1	2	1	1	1	4
Min	1	1	1	1	1	3
Max	1	3	1	1	4	5
Médiane	1	2	1	1	2	3

Sous-Critère « Entretien »						
Expert	Habitat			Végétation		
	C ₆₃₁₁	C ₆₃₁₂	C ₆₃₁₃	C ₆₃₂₁	C ₆₃₂₂	C ₆₃₂₃
E1	1	1	2	1	1	3
E2	1	2	4	1	1	3
E3	1	1	1	1	1	1
E4	1	2	4	1	2	4
E5	1	1	3	1	1	4
E6	nc	nc	nc	nc	nc	nc
E7	1	3	5	1	3	5
E8	1	1	2	1	1	2
E9	1	1	3	1	1	3
E10	1	1	1	1	1	1
E11	1	1	2	1	1	4
Min	1	1	1	1	1	1
Max	1	3	5	1	3	5
Médiane	1	1	3	1	1	3

Annexe 4. Résultats de l'agrégation des jugements sur les modalités

Niveau 4 : modalités du critère « Aménagement »

Code	Modalité	Nombre flou (M)			Nombre flou (3M)			EVM	EV3M
		$t_1^{(M)}$	$t_2^{(M)}$	$t_3^{(M)}$	$t_1^{(3M)}$	$t_2^{(3M)}$	$t_3^{(3M)}$		
C ₁₁₁₁	Route	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25
C ₁₁₁₂	Chemin	1,1	1,6	2,6	1	1,6	4	1,73	2,05
C ₁₁₂₁	l > 6 m	1	1,1	2,1	1	1,1	3	1,33	1,55
C ₁₁₂₂	4 m < l < 6 m	1,1	1,4	2,4	1	1,4	4	1,58	1,95
C ₁₁₂₃	l < 4 m	2,2	2,9	3,8	1	2,9	5	2,95	2,95
C ₁₂₁₁	Catégorie 1	1	1,2	2,2	1	1,2	3	1,4	1,6
C ₁₂₁₂	Catégorie 2	1,1	1,4	2,4	1	1,4	4	1,58	1,95
C ₁₂₁₃	Catégorie 3	1,4	1,8	2,8	1	1,8	5	1,95	2,4
C ₁₂₁₄	Absence	2,6	3,5	4,3	1	3,5	5	3,48	3,25
C ₁₂₂₁	d > 100 m	1,4	2	3	1	2	5	2,1	2,5
C ₁₂₂₂	50 m < d < 100 m	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25
C ₁₂₂₃	25 m < d < 50 m	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25
C ₁₂₂₄	d < 25 m	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25
C ₁₂₂₅	Absence	3,2	4,1	4,4	1	4,1	5	3,95	3,55
C ₁₂₃₁	d > 50 m	1	1,1	2,1	1	1,1	3	1,33	1,55
C ₁₂₃₂	50 m > d > 30 m	1,1	1,3	2,3	1	1,3	4	1,5	1,9
C ₁₂₃₃	d < 30 m	1,7	2	2,9	1	2	5	2,15	2,5
C ₁₂₃₄	Absence	3,7	4,7	4,9	2	4,7	5	4,5	4,1
C ₁₃₁₁	Stock de bois	2,3	3,2	4,1	1	3,2	5	3,18	3,09
C ₁₃₁₂	Bouteille Gaz	2,9	3,9	4,5	1	3,9	5	3,82	3,45
C ₁₃₁₃	Véhicule	3	4	4,7	2	4	5	3,93	3,75
C ₁₃₁₄	Annexe bois	2,4	3,3	4	1	3,3	5	3,23	3,14
C ₁₃₁₅	Haies	3,2	4,2	4,8	2	4,2	5	4,09	3,84
C ₁₃₂₁	d < 3 m	3,4	4,4	4,9	2	4,4	5	4,31	3,97
C ₁₃₂₂	3 m < d < 10 m	2,1	3	4	1	3	5	3,03	3
C ₁₃₂₃	d > 10 m	1	1,4	2,4	1	1,4	3	1,58	1,72
C ₁₄₁	Contact	3,8	4,8	5	3	4,8	5	4,6	4,4
C ₁₄₂	d < 3 m	2,8	3,8	4,5	1	3,8	5	3,73	3,4
C ₁₄₃	3 m < d < 10 m	1,7	2,4	3,4	1	2,4	5	2,48	2,7
C ₁₄₄	d > 10 m	1,2	1,5	2,5	1	1,5	4	1,68	2
C ₁₅₁₁	Absence	1,3	1,4	2,3	1	1,4	5	1,64	2,22
C ₁₅₁₂	Grillage	1,2	1,6	2,6	1	1,6	4	1,72	2,03
C ₁₅₁₃	Palissade	1,3	2,1	3,1	1	2,1	4	2,17	2,31
C ₁₅₁₄	Muret	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25
C ₁₅₁₅	Mur	1,1	1,3	2,3	1	1,3	4	1,53	1,92
C ₁₅₂₁	d < 3 m	2,3	3,1	3,9	1	3,1	5	3,11	3,06
C ₁₅₂₂	3 m < d < 10 m	1,4	2,1	3,1	1	2,1	5	2,19	2,56
C ₁₅₂₃	d > 10 m	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25
C ₁₆₁	Oui	3,1	4,1	4,6	1	4,1	5	3,98	3,55
C ₁₆₂	Non	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25
C ₁₇₁	Enterré	1	1,1	2,1	1	1,1	3	1,33	1,56
C ₁₇₂	Aérien	1,9	2,4	3,3	1	2,4	5	2,53	2,72

Niveau 4 : modalités du critère « Topographie »

Code	Modalité	Nombre flou (M)			Nombre flou (3M)			EVM	EV3M
		$t_1^{(M)}$	$t_2^{(M)}$	$t_3^{(M)}$	$t_1^{(3M)}$	$t_2^{(3M)}$	$t_3^{(3M)}$		
C ₂₁₁	0 à 10 %	1,1	1,3	2,3	1	1,3	4	1,48	1,89
C ₂₁₂	10 à 20 %	1,6	2,6	3,6	1	2,6	5	2,64	2,82
C ₂₁₃	20 à 30 %	2,6	3,6	4,5	2	3,6	5	3,61	3,57

C ₂₁₄	> 30 %	3,7	4,7	5	3	4,7	5	4,55	4,36
C ₂₂₁	Adret	2,6	3,6	4,5	2	3,6	5	3,59	3,57
C ₂₂₂	Est	1,2	1,5	2,5	1	1,5	5	1,7	2,27
C ₂₂₃	Ouest	1,7	2,5	3,5	1	2,5	5	2,59	2,77
C ₂₂₄	Ubac	1,2	1,3	2,3	1	1,3	5	1,5	2,14
C ₂₃₁	Au vent	3,7	4,7	5	3	4,7	5	4,53	4,35
C ₂₃₂	Intermédiaire	1,5	2,3	3,3	1	2,3	5	2,35	2,65
C ₂₃₃	Sous le vent	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25
C ₂₄₁	Crête	3,2	4,2	4,8	1	4,2	5	4,09	3,59
C ₂₄₂	Versant	2,7	3,7	4,5	1	3,7	5	3,66	3,36
C ₂₄₃	Talweg	1,2	1,5	2,5	1	1,5	4	1,7	2,02

Niveau 4 : modalités du critère « Structure de la Végétation »

Code	Modalité	Nombre flou (M)			Nombre flou (3M)			EVM	EV3M
		$t_1^{(M)}$	$t_2^{(M)}$	$t_3^{(M)}$	$t_1^{(3M)}$	$t_2^{(3M)}$	$t_3^{(3M)}$		
C ₃₁₁	Continuité forte	3,3	4,3	4,9	2	4,3	5	4,2	3,9
C ₃₁₂	Continuité faible	1,5	2,1	3,1	1	2,1	4	2,2	2,3
C ₃₁₃	Continuité nulle	1	1,1	2,1	1	1,1	3	1,33	1,55
C ₃₂₁	Strate mixte	3,7	4,7	5	3	4,7	5	4,53	4,35
C ₃₂₂	Strate arborée	1,8	2,6	3,5	1	2,6	5	2,63	2,8
C ₃₂₃	Strate arbustive	2,9	3,8	4,6	1	3,8	5	3,78	3,4
C ₃₂₄	Strate herbacées	1,3	1,8	2,8	1	1,8	5	1,93	2,4

Niveau 4 : modalités du critère « Structure de l'habitat »

Code	Modalité	Nombre flou (M)			Nombre flou (3M)			EVM	EV3M
		$t_1^{(M)}$	$t_2^{(M)}$	$t_3^{(M)}$	$t_1^{(3M)}$	$t_2^{(3M)}$	$t_3^{(3M)}$		
C ₄₁₁	Isolé	3,4	4,4	4,8	2	4,4	5	4,22	3,94
C ₄₁₂	Diffus	2,1	3,1	4,1	1	3,1	5	3,13	3,06
C ₄₁₃	Groupé dense	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25
C ₄₁₄	Groupé très dense	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25
C ₄₂₁	Isolée	3,6	4,6	5	3	4,6	5	4,47	4,31
C ₄₂₂	En périphérie	2,3	3,3	4,3	1	3,3	5	3,25	3,13
C ₄₂₃	Centrale	1	1,1	2,1	1	1,1	3	1,34	1,56

Niveau 4 : modalités du critère « Propriétés des Habitations »

Code	Modalité	Nombre flou (M)			Nombre flou (3M)			EVM	EV3M
		$t_1^{(M)}$	$t_2^{(M)}$	$t_3^{(M)}$	$t_1^{(3M)}$	$t_2^{(3M)}$	$t_3^{(3M)}$		
C ₅₁₁	Charpente apparente	2,7	3,7	4,4	1	3,7	5	3,61	3,33
C ₅₁₂	Absence de matériaux combustibles	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25
C ₅₂₁	Maçonnerie	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25
C ₅₂₂	Bois	1,7	2,7	3,6	1	2,7	5	2,64	2,83
C ₅₂₃	Acier	1,4	2	3	1	2	5	2,11	2,5
C ₅₃₁	Occultation Bois plein	1,1	1,2	2,2	1	1,2	4	1,43	1,85
C ₅₃₂	Occultation Bois claire-voie	1,7	2,1	3	1	2,1	5	2,23	2,55
C ₅₃₃	Occultation PVC	2,4	3,2	3,9	1	3,2	5	3,18	3,1
C ₅₃₄	Occultation ALU	1,6	2,1	3,1	1	2,1	5	2,23	2,55
C ₅₃₅	Non occultée	3,3	4,3	4,6	1	4,3	5	4,13	3,65
C ₅₄₁	Zinc	1,2	1,6	2,6	1	1,6	4	1,75	2,05
C ₅₄₂	Alu	1,1	1,5	2,5	1	1,5	4	1,65	2
C ₅₄₃	PVC	2,1	2,9	3,7	1	2,9	5	2,9	2,95
C ₅₄₄	Absence	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25

Niveau 4 : modalités du critère « Facteurs Humains »

Code	Modalité	Nombre flou (M)			Nombre flou (3M)			EVM	EV3M
		$t_1^{(M)}$	$t_2^{(M)}$	$t_3^{(M)}$	$t_1^{(3M)}$	$t_2^{(3M)}$	$t_3^{(3M)}$		
C ₆₁₁	Permanente	1	1,1	2,1	1	1,1	3	1	1,1
C ₆₁₂	Secondaire	1,5	2,4	3,4	1	2,4	5	1,5	2,4
C ₆₂₁₁	Oui	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25
C ₆₂₁₂	Non	1,1	1,9	2,9	1	1,9	4	1,95	2,2
C ₆₂₂₁	Oui	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25
C ₆₂₂₂	Mesures préventives	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25
C ₆₂₂₃	Législation	1,2	1,8	2,8	1	1,8	5	1,91	2,41
C ₆₂₂₄	Non	2,6	3,6	4,5	2	3,6	5	3,59	3,57
C ₆₃₁₁	Fréquence > 1an	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25
C ₆₃₁₂	Fréquence = 1 an	1,1	1,4	2,4	1	1,4	4	1,58	1,95
C ₆₃₁₃	Fréquence < 1an	1,9	2,7	3,6	1	2,7	5	2,73	2,85
C ₆₃₂₁	Fréquence > 1an	1	1	2	1	1	2	1,25	1,25
C ₆₃₂₂	Fréquence = 1 an	1,1	1,3	2,3	1	1,3	4	1,5	1,9
C ₆₃₂₃	Fréquence < 1an	2,2	3	3,9	1	3	5	3,03	3

Annexe 5. Protocole de recueil de données post-incendie en interface habitat-forêt

Date_Incendie :

N°_Prométhée :

N°_Construction :

1. Localisation de l'habitation

Commune :

Département :

Région :

Identifiant géographique (BD_Topo^{©IGN}) :

2. Accessibilité de l'habitation

Caractéristiques de la route d'accès

- Route : Unique Multiple
- Type : Revêtue Non revêtue
- Largeur : <4 m <6 m >6 m
- Impasse : Oui Non
- Retournement possible : Oui Non

Longueur de la voie privée (m) :

Débroussaillée de part et d'autre : Oui Non

Accessibilité de l'habitation : 1 point 2 points >2 points

3. Contexte de l'habitation

Structure de l'habitat : Isolé Diffus Groupé dense Groupé très dense

Position dans l'interface : Isolée Périphérique Centrale

Usage : Saisonnier Permanent

Nombre de niveaux fonctionnels : 1 2 >2

Entretien de l'habitat : f > 1 fois/an f = 1 fois/an f < 1 fois/an

Entretien de la végétation : f > 1 fois/an f = 1 fois/an f < 1 fois/an

Réseau EDF : Aérien Enterré

Gaz/Carburant : <10 m >10 m Enterré

Ressource en eau : d > 100 m 50 m < d < 100 m 25 m < d < 50 m d < 25 m Absence

Motopompe : Oui Non

Organisme de lutte : < 5 km > 5 km Aucun

Plan d'évacuation pour les résidents : Oui Non

4. Environnement de l'habitation

Végétation entretenue : < 10 m 10-30 m 30-50 m > 50 m

Profondeur de débroussaillage réglementaire réalisé (m) :

d > 50 m 50 m > d > 30 m d < 30 m Absence

Caractéristiques du débroussaillage

- Strates basses : Aucun < 30 m 30-50 m > 50 m → Qualité : %
- Élagage : Aucun < 30 m 30-50 m > 50 m → Qualité : %
- Mise à distance : Aucun < 30 m 30-50 m > 50 m → Qualité : %

Espèces dominantes :**Caractéristiques des haies**

- Présence de haies : Oui Non → Endommagées : Oui Non
- Espèces :
- Distance minimale à la maison (m) :
- Hauteur : m -- Largeur : m

Distance Bâti/Végétation la plus proche : m

5. Prévention et lutte**Action des services de sécurité**

Aucune Évacuation forcée Évacuation optionnelle Demande rester Protection de la maison
 Attaque du feu Inconnu

Moyens mis en œuvre

1 Véhicule >1 Véhicule Aérien Aérien + véhicules Inconnu

Rapidité d'intervention → Inconnu

Lent Rapide Délai :

Action du propriétaire → Inconnu

- Absent Évacuer Rester Lutter
- Occultation des ouvertures Retrait des facteurs aggravants

Activités de lutte pendant et après le feu (extinction des points d'éclosions) :

Aucune Pompiers Pompier + Propriétaire Propriétaire Propriétaire + voisins Voisins

6. Propriétés de l'habitation

Matériaux de base : Maçonnerie Bois PVC Aluminium Autre :

Gouttières : Zinc Aluminium PVC Absence

Clôtures

- Type de séparation : Absence Grillage Palissade Muret Mur Haie
- Distance Séparation/Bâtiment : d < 3 m 3 m < d < 10 m d > 10 m

Toiture

- Entretien non entretenue
- Matériau de couverture :
- Végétation en surplomb de la toiture : Oui Non

- Charpente apparente : Oui Non

Ouvertures

- **Porte** → Oui Non → **Matériau** : Bois PVC Aluminium
- **Fenêtre** → Oui Non → **Occultation** : Oui Non → **Matériau** : Bois PVC Aluminium
- **Baie vitrée** → Oui Non → **Occultation** : Oui Non → **Matériau** : Bois PVC Alu
- **Fenestron** → Oui Non → **Occultation** : Oui Non → **Matériau** : Bois PVC Alu
- **Grille d'aération** → Oui Non → **Occultation** : Oui Non → **Matériau** : Bois PVC Alu

Annexe 1

- Usage :
- Distance : m
- Matériaux de base : Maçonnerie Bois PVC Aluminium Autre :

Annexe 2

- Usage :
- Distance : m
- Matériaux de base : Maçonnerie Bois PVC Aluminium Autre :

Annexe 3

- Usage :
- Distance : m
- Matériaux de base : Maçonnerie Bois PVC Aluminium Autre :

Équipement aggravant (à digitaliser)	Distance Équipement/Bâtiment		
	d > 10 m	10 m > d > 3 m	d < 3 m
<input type="checkbox"/> Stock de bois	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Bouteille de gaz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Véhicule	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Annexe bois	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Haie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
<input type="checkbox"/> Absence			

7. Dommages au niveau des constructions (dans l'axe de menace du feu)

Habitation endommagée : Oui Non

Sévérité des dommages : 0 1 2 3 4

Point d'entrée du feu dans l'habitation : Ouverture Toiture Charpente

Annexes endommagées : Oui Non

Localisation	Éléments endommagés	Aucun	Faible	Moyen	Fort	Mécanisme
Extérieur de l'habitation	Façade	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P
	Fenêtre	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P
	Volet	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P
	Porte	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P
	Grille d'aération	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P
	Gouttières	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P
	Avant-toit	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P

Localisation	Éléments endommagés	Aucun	Faible	Moyen	Fort	Mécanisme
	Toiture	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P
	Autre :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P
	Intérieur de l'habitation	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
	Annexe 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P
Installations périphériques	Annexe 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P
	Annexe 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P
	Autre :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P
	Bouteille de gaz	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P
	Tas de bois	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P
Équipement aggravant	Véhicule	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P
	Mobilier	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P
	Haie	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P
	Autre :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> F <input type="checkbox"/> R <input type="checkbox"/> P

Annexe 6. Enquête auprès des résidents des interfaces habitat-forêt

1. Avez-vous déjà été affecté(e) par un incendie de forêt ? Oui Non

(1) Êtes-vous ? Propriétaire Locataire

(2) Êtes-vous ? Actif Retraité Sans emploi

(3) Tranche d'âge ? 20-30 30-40 40-50 50-60 >60

(4) Le logement est-il ? Permanent Saisonnier

(5) Combien de personnes résident dans votre logement ?

2. Les mesures préventives

(6) À l'approche d'un feu, quelle est la conduite à tenir ?

Évacuation Confinement dans l'habitation Respect des instructions gendarmerie/pompiers Nsp

(7) Combien de temps une habitation, reste-t-elle exposée aux flammes lors d'un feu de forêt ?

5 min 10 min 15 min 20 min > 30 min Ne sais pas

(8) Quelles sont les actions à engager afin de préserver sa sécurité ?

Ouverture du portail Occultation des ouvertures Retrait des facteurs aggravants Arrosage des façades des bâtiments Arrosage de la végétation Nsp

(9) Disposez-vous d'une piscine ou d'une réserve d'eau ? Oui Non

(10) Disposez-vous d'une motopompe ? Oui Non

(11) Connaissez-vous le signal de déclenchement d'une alerte de risque majeur ? Oui Non Nsp

(12) Entendez-vous les signaux d'alerte les 1^{er} mercredi du mois ? Oui Non

(13) Connaissez-vous les réflexes de confinements ? Oui Non Nsp

(14) Existe-t-il une procédure d'évacuation en cas d'alerte (point de rassemblement, itinéraire...) ?

Oui Non Nsp

(15) Avez-vous déjà participé à une simulation ou un exercice de feux de forêt ? Oui Non

(16) Entretenez-vous votre terrain régulièrement (bâti, végétation...) ? Oui Non

(17) À quelle fréquence ?

- < 1 fois par an Oui Non
- 1 fois par an Oui Non
- > 1 fois par an Oui Non

(18) Brûlez-vous la végétation morte ? Non Oui

(19) Si oui, de quelle manière ? Dans un baril En tas à même le sol

3. La réglementation forestière

Connaissez-vous les articles des arrêtés préfectoraux concernant ?

(20) Débroussaillage réglementaire Oui Non

(21) Emploi du feu Oui Non

Connaissez-vous les articles des arrêtés préfectoraux concernant ?

(22) Affichage du risque journalier Oui Non

(23) Accès aux massifs pour les piétons/véhicules Oui Non

(24) Usage de certains appareils et matériels (barbecue...) Oui Non

(25) Êtes-vous soumis aux obligations légales de débroussaillage ? Oui Non Nsp

Annexe 7. Analyse des réponses des résidents de l'interface habitat-forêt de la colline Saint-Jacques (Cavaillon)

Les réponses au questionnaire s'intéressant à la préparation des personnes ont été traitées par analyse des correspondances multiples (ACM). Les variables retenues pour l'analyse permettent de vérifier à la fois la connaissance des résidents sur la législation liée au risque incendie de forêt (questions 20 à 25), et leur connaissance sur les comportements à adopter en temps de crise (questions 6, 8 et 13).

Nous souhaitons conduire une analyse qui permette de connaître rapidement les informations contenues dans les réponses en termes de proximité entre individus et variables. L'objectif est ainsi de « classer » les résidents selon les quatre modalités du sous-critère « Connaissance du risque » (Fig. 125) : *globale* signifie que l'individu a connaissance des mesures préventives et de la législation ; *mesures préventives* signifie que l'individu n'a connaissance que des mesures comportementales assurant sa sécurité (réflexe de confinement, mise en sécurité de l'habitation, etc.) ; *législation* signifie que l'individu n'a connaissance que des textes de loi (débroussaillage légal, emploi du feu, etc.) auxquels il est soumis sur sa propriété ; enfin, *non* signifie que l'individu n'a aucune connaissance du risque.

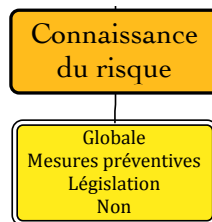


Fig. 125 : Modalités associées au sous-critères « Connaissance du risque »

Le questionnaire a été rempli par les résidents lors des enquêtes menées après l'incendie de Cavaillon. De cette manière, nous avons pu assurer l'exhaustivité des réponses (20 individus) (Tab. 95).

	CON_1	CON_2	CON_3	CON_4	REF	ACT_1	ACT_2	ACT_3	ACT_4	ACT_5	DEB	FEU	JOU	MAS	USA	OLD
CAV_1	non	non	non	oui	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
CAV_2	non	non	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
CAV_3	non	non	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
CAV_4	non	non	non	oui	oui	non	oui	oui	non	non	oui	oui	oui	non	oui	oui
CAV_5	non	non	non	oui	oui	non	non	oui	non	oui	oui	oui	non	non	non	oui
CAV_6	non	non	non	oui	oui	non	non	oui	non	oui	oui	oui	non	non	oui	oui
CAV_7	non	non	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
CAV_8	oui	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	oui	oui	non	oui	non	oui
CAV_9	non	non	oui	oui	oui	non	non	oui	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui
CAV_10	non	non	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non	non	oui
CAV_11	non	non	oui	oui	oui	non	oui	oui	oui	oui	non	non	non	non	non	oui
CAV_12	oui	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non	oui	non	non	non	nsp
CAV_13	non	non	non	oui	oui	non	oui	oui	non	non	oui	oui	non	non	oui	oui
CAV_14	non	non	oui	oui	oui	non	non	oui	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui	oui
CAV_15	oui	non	non	non	non	non	non	non	oui	oui	non	oui	non	non	non	nsp
CAV_16	oui	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui
CAV_17	non	oui	non	non	non	oui	non	non	non	non	oui	oui	oui	oui	oui	oui
CAV_18	oui	non	non	non	non	oui	non	non	oui	non	non	oui	non	non	non	nsp
CAV_19	oui	non	non	non	non	oui	non	non	oui	non	non	oui	non	non	non	nsp
CAV_20	oui	non	non	non	non	oui	non	non	non	non	non	non	non	non	non	nsp

Tab. 95 : Réponses aux questions servant à l'analyse des correspondances multiples

Les questions sont fermées et à choix multiples. Les modalités de réponses ont été codées de la manière suivante :

(6) À l'approche d'un feu, quelle est la conduite à tenir ?

CON_1 : Évacuation ; CON_2 : Confinement dans l'habitation ; CON_3 : Respect des instructions gendarmerie/pompiers ; CON_4 : Nsp

(8) Quelles sont les actions à engager afin de préserver sa sécurité ?

ACT_1 : Nsp ; ACT_2 : Ouverture du portail ; ACT_3 : Occultation des ouvertures ; ACT_4 : Retrait des facteurs aggravant ; ACT_5 : Arrosage

(13) Connaissez-vous les réflexes de confinements ?

REF : Oui Non Nsp

Connaissez-vous les articles des arrêtés préfectoraux concernant ?

(20) Débroussaillage réglementaire DEB : Oui Non

(21) Emploi du feu FEU : Oui Non

Connaissez-vous les articles des arrêtés préfectoraux concernant ?

(22) Affichage du risque journalier JOU : Oui Non

(23) Accès aux massifs pour les piétons/véhicules MAS : Oui Non

(24) Usage de certains appareils et matériels (barbecue...) USA : Oui Non

(25) Êtes-vous soumis aux obligations légales de débroussaillage ? OLD : Oui Non Nsp

Les résultats de ACM se présentent sous forme de graphiques permettant de visualiser la position des individus sur les axes factoriels (Fig. 127) ainsi que celle des modalités (Fig. 128). Les deux premiers axes factoriels (composantes) ont été retenus. Ils expliquent 69 % de la variance des réponses (Fig. 126).

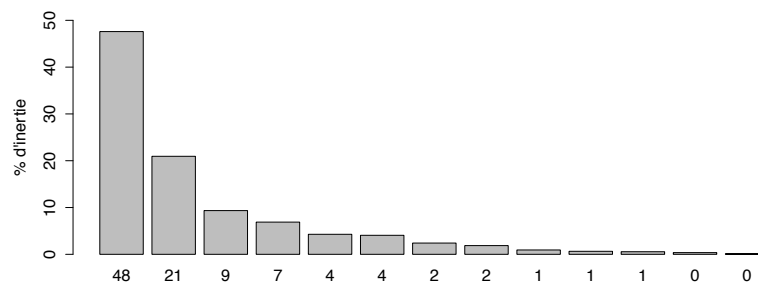


Fig. 126 : Pourcentages d'inertie expliqués par composantes

Le facteur 1 oppose (Fig. 129) :

- Les variables qui représentent une connaissance globale (à gauche) ;
- Les variables qui représentent une absence de connaissance (à droite).

Le facteur 2 oppose (Fig. 130) :

- Les variables qui représentent une connaissance des mesures préventives (à gauche) ;
- Les variables qui représentent une connaissance de la législation (à droite) ;

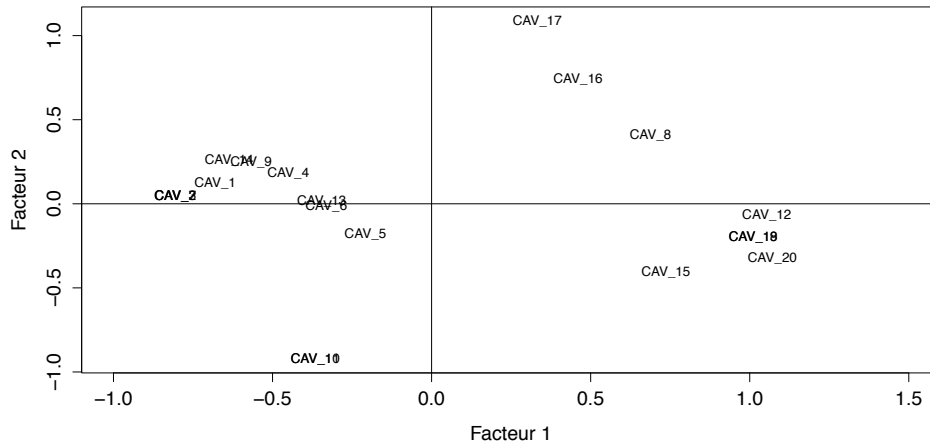


Fig. 127 : Position des individus sur les deux premiers axes factoriels

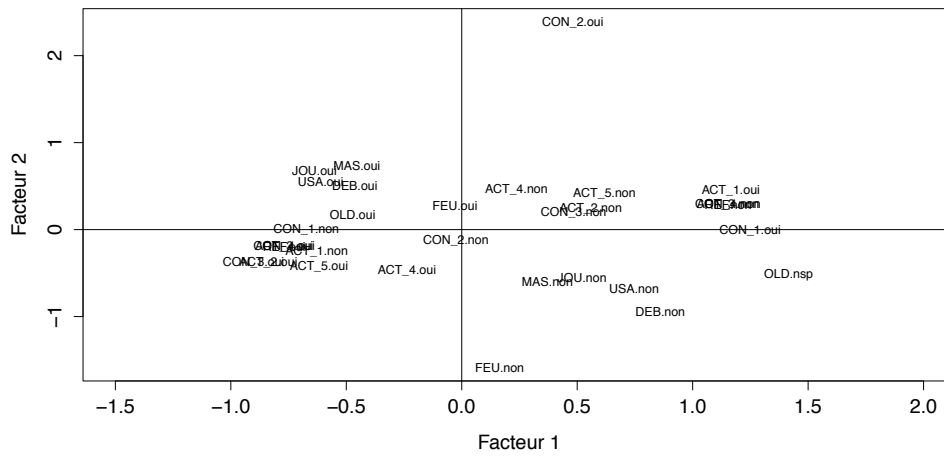


Fig. 128 : Position des modalités sur les deux premiers axes factoriels

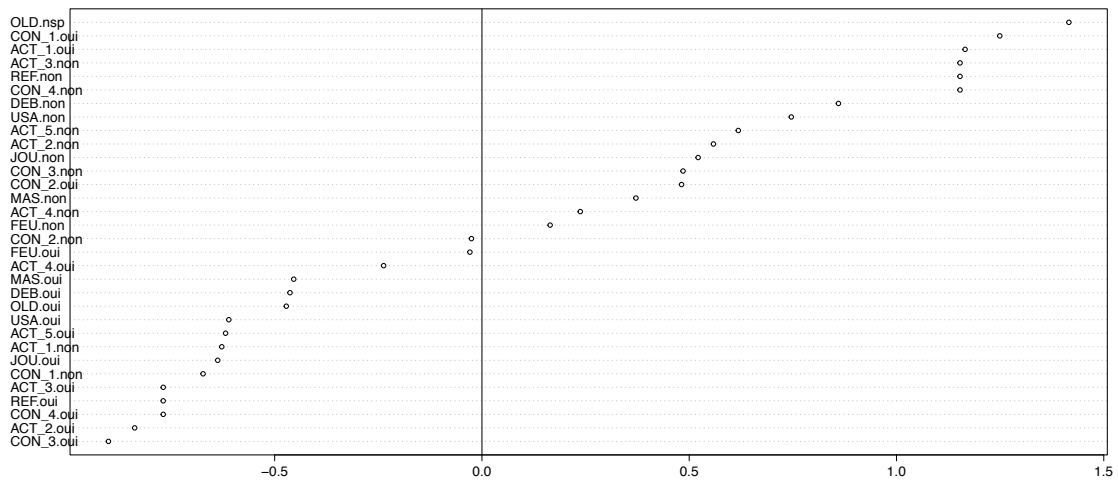


Fig. 129 : Répartition des modalités sur le premier axe factoriel

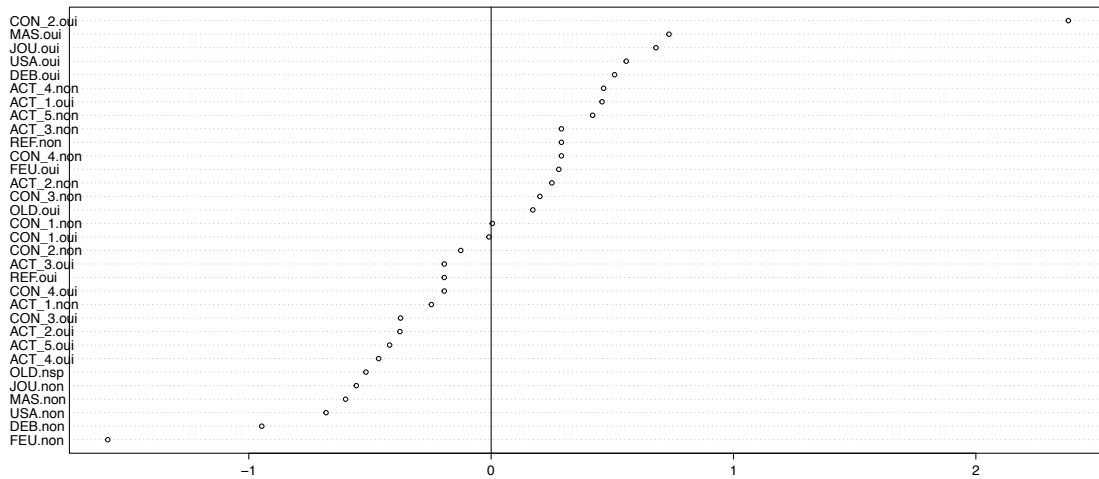


Fig. 130 : Répartition des modalités sur le deuxième axe factoriel

La suite logique d'une analyse statistique utilisant l'Analyse des Correspondances Multiples est la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) qui permet d'établir une classification des variables analysées. La CAH s'avère très adaptée à notre problématique car elle permet d'aboutir à une classification des individus, basée sur les résultats de l'ACM. La CAH permet de rassembler les individus statistiques en fonction de leur « ressemblance » du point de vue de l'analyse statistique multivariée.

Les individus sont regroupés selon le critère d'agrégation de la méthode Ward, minimisant la variance à l'intérieur d'une même classe pour créer des groupes homogènes les plus différents possibles les uns des autres. Les résultats se présentent sous la forme d'un dendrogramme (Fig. 131).

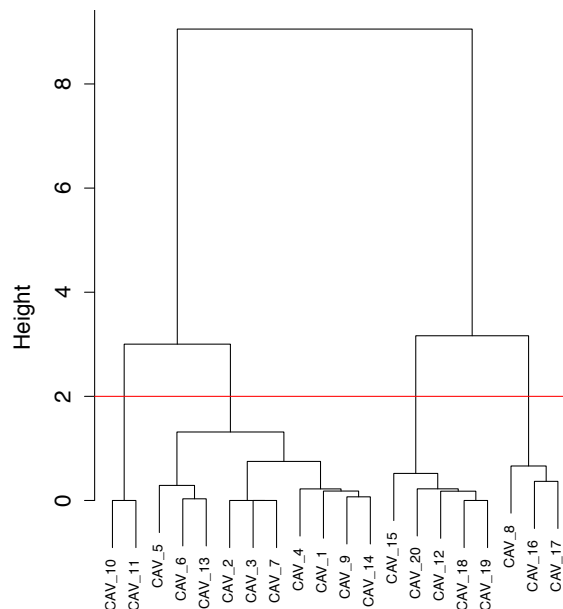


Fig. 131 : Dendrogramme de la CAH

Les résultats de la CAH ont fait apparaître quatre groupes d'individus correspondant aux quatre modalités du sous-critère « Connaissance du risque ». Le premier groupe rassemble les individus (CAV_5, 6, 13, 2, 3, 7, 4, 1, 9, 14) possédant une connaissance globale. Le deuxième groupe rassemble les individus (CAV_8, 16 et 17) possédant une connaissance de la législation

uniquement. Le troisième groupe rassemble les individus (CAV_10 et CAV_11) possédant une connaissance des mesures préventives uniquement. Le quatrième groupe rassemble les individus (CAV_15, 20, 12, 18, 19) méconnaissant à la fois la législation et les mesures préventives. La figure suivante propose une représentation des quatre groupes sur les deux premiers axes factoriels.

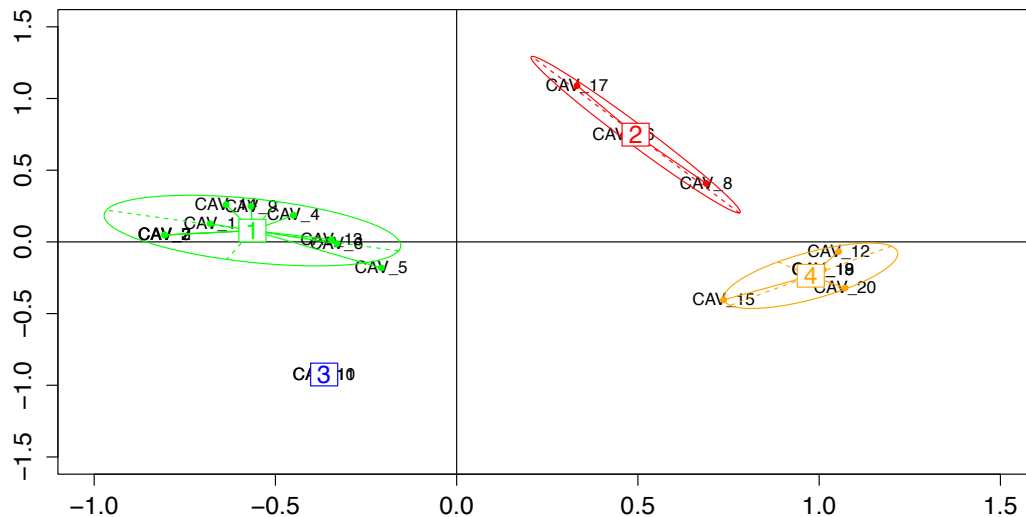


Fig. 132 : Position des quatre groupes déterminés sur les deux premiers axes factoriels

L'évaluation se base sur les réponses « institutionnelles » aux questions posées (www.prevention-incendie-forêt.com). Une fiche « réponse » a été distribuée à tous les individus interrogés de manière à participer à l'objectif de prévention du risque incendie de forêt et assurer que l'information soit transmise. En voici un aperçu :

Les mesures préventives

À l'approche d'un feu, quelle est la conduite à tenir ?

À l'approche du feu sur votre propriété, votre habitation en dur demeure votre meilleure protection à la condition expresse que ses abords soient correctement débroussaillés.

Pour les sapeurs pompiers, la logique reste le confinement des personnes dans les habitations. Si vous décidez malgré tout de partir, faites le très tôt bien avant les premières fumées.

L'expérience prouve que les victimes se comptent le plus souvent parmi les personnes surprises par le feu lors de leur déplacement. Lors d'un incendie, pour vous et vos proches, le confinement doit donc rester la règle et l'évacuation devenir l'exception.

Dans tous les cas, suivez les instructions données par les personnes habilitées (gendarmerie, police, pompiers). Ne jamais décider de partir au dernier moment. Vous pouvez vous retrouver au cœur de l'incendie sans aucune protection.

Évacuation Confinement dans l'habitation Respect des instructions gendarmerie/pompiers Ne sais pas

L'intérêt de se confiner dans son habitation réside dans le fait qu'une fois le feu passé, vous pouvez sortir pour traiter les urgences :

- Reconnaître et vérifier les parties incandescentes « cachées » qui peuvent couvrir dans les combles et toitures.

- Traiter les foyers résiduels avec vos tuyaux d'arrosage ou votre motopompe. Il est important de concentrer vos efforts sur les toitures, les gouttières et les végétaux proches de la maison.
- Pour les foyers résiduels, diriger le jet d'eau de votre tuyau d'arrosage sur la base du foyer afin de rabattre l'intensité des flammes. Surveillez, afin d'éviter toute reprise du feu.
- Pour les parties qui se consomment (absence de flamme), il est important de les refroidir avec un jet d'eau diffusé et de dégarnir les parties noircies.

Quelles actions doit-on engager afin de préserver sa sécurité ?

Dans l'idéal, une demi-heure avant le passage du feu :

- Ouvrez votre portail pour faciliter l'accès des secours, même si vous évacuez la maison.
- Rentrez ensuite au moins un tuyau d'arrosage. Il vous sera utile par la suite. Mettez également motopompe (si vous en disposez) et tuyaux à l'abri du feu.
- Fermez les bouteilles de gaz et rentrez-les dans le bâtiment ou plongez les dans votre piscine.
- Garez les voitures, vitres fermées, contre les façades opposées à la direction d'où vient le feu.
- Mettez à l'abri les mobiliers de jardin et autres équipements combustibles.
- Arrosez les façades des bâtiments avant l'arrivée du feu. Attention ne consommez pas toute votre eau car elle vous sera très précieuse après le passage des flammes. L'arrosage préventif des végétaux n'est pas nécessaire car il n'a pas d'impact sur la résistance au feu des plantes, et vide les réserves d'eau.

Ouverture du portail Occultation des ouvertures Retrait des facteurs aggravants Arrosage des façades des bâtiments

Arrosage de la végétation Ne sais pas (Nsp)

Connaissez-vous les réflexes de confinement ?

- Habillez-vous avec des vêtements en coton (les synthétiques brûlent sous l'effet de la chaleur). Portez des gants et des chaussures en cuir, foulard et lunettes enveloppantes. Portez un linge humide sur le nez pour vous protéger des fumées.
- Fermez toutes les ouvertures (portes et fenêtres) et calfeutrez-les avec des linges mouillés pour éviter les appels d'air et l'entrée de fumées. Fermez en plus les volets, pour protéger les vitres du rayonnement thermique.
- Bouchez les appels d'air (ventilation, trappe de cheminée) car la fumée arrive avant le feu.
- Arrêtez les systèmes de ventilation électrique (VMC).
- Prévoyez une lampe de poche ou des bougies car l'électricité peut être coupée.
- Surveillez les vitres non protégées par des volets (fenestrons) afin de pouvoir agir rapidement sur les particules enflammées entrant dans la maison si les vitres venaient à céder sous l'effet de la chaleur. Les vitres cassent avant l'arrivée des flammes.
- Surveillez l'évolution de la situation à l'extérieur (l'arrivée du feu est précédée de fumées, de retombées de cendres ou de particules incandescentes. L'arrivée des flammes est quant à elle annoncée par une chaleur extrême et une fumée dense).

Entretenez-vous votre terrain régulièrement (bâti, végétation...) ?

L'entretien de votre propriété est primordial. Il doit s'effectuer à une fréquence supérieure à une fois par an.

- Éclaircir les végétaux autour de votre habitation, c'est lors d'un sinistre, limiter la puissance du feu.
- Le débroussaillage, l'élagage et la coupe de certains arbres permettent de réduire la masse végétale combustible aux abords de votre maison, et de rompre les continuités verticales et horizontales de la végétation, qui permettent au feu de s'étendre.
- En aucun cas cela signifie la suppression de toute la végétation de votre propriété.
- La continuité entre les strates herbacées, arbustives et arborées favorise la propagation et le gain en intensité des incendies. Par ailleurs, les herbes et les arbustes en stress hydrique sont très inflammables. Il en est de même pour les éléments de votre maison. Les volets en bois, et autres matériaux s'assèchent pendant la période estivale. Ils deviennent à leur tour plus vulnérable.
- Il est important d'entretenir constamment les toitures, de retirer les aiguilles et autres feuilles mortes qui se concentrent dans les gouttières et les angles, afin d'éviter les amorces du feu.
- Attention aux vecteurs de feu proches de la maisons (tas de bois, abris en bois ou cannisses, haies, accumulation d'objet divers...). Laissez une distance de 10 m entre les réserves de bois et la maison.

La réglementation forestière

Connaissez-vous les articles des arrêtés préfectoraux concernant ?

Débroussaillage réglementaire

L'article 32 de la loi d'orientation sur la forêt du 9 Juillet 2011 définit le débroussaillage obligatoire comme « *les opérations dont l'objectif est de diminuer l'intensité et de limiter la propagation des incendies par la réduction des combustibles végétaux, en garantissant la continuité du couvert végétal* ». Les préfets, dans leur département, arrêtent les modalités du présent article en tenant compte des particularités spécifiques à chaque département.

Le débroussaillage vous protège : les pompiers peuvent intervenir avec plus d'efficacité et à moindre risque dans une propriété débroussaillée. Lorsque le feu arrive sur une zone débroussaillée, il diminue en intensité. Faute de combustible, son évolution est forcément réduite. Vous êtes davantage en sécurité confiné dans votre maison.

Zones à débroussailler

Selon les zonages du POS (Plan d'Occupation des Sols) ou du PLU (Plan Local d'Urbanisme) consultables en mairie. Par ailleurs, le débroussaillage doit être réalisé sur toutes les parcelles, construites ou non, des zones urbaines, zones d'activité commerciales (ZAC), camping et caravaning, lotissements et associations foncières urbaines. Il est à la charge du propriétaire de la parcelle. Le périmètre de 50 mètres autour des bâtiments doit également être débroussaillé dans le cas où ce dernier empiéterait sur une zone non urbaine.

Les zones mitoyennes

Si la zone à débroussailler se trouve en partie sur la propriété d'un ou plusieurs voisins, le propriétaire concerné doit prendre en charge la totalité des travaux. Si les secteurs à

débroussailler se recoupe sur deux propriétés (A et B), le propriétaire A débroussaille chez lui. B prend en charge sa partie. A et B partagent les travaux sur la zone commune.

Comment débroussailler ?

1. Tous les arbres et les branches à moins de 3 m doivent être supprimés de l'aplomb des murs de façade des maisons. L'habitation doit être à bonne distance de la végétation.
2. Les arbres morts et dépérissant doivent être éliminés. Un peuplement trop dense avec des arbres trop proches les uns des autres est souvent synonyme de mortalité importante et d'un état sanitaire médiocre.
3. Sur les arbres, supprimer toutes les branches basses (souvent mortes) situées à moins de 3 m du sol.
4. Laisser au moins 3 m entre les houppiers des arbres dans la zone des 50 m, c'est limiter les dangers d'un feu de cime très puissant et toujours très destructeur.
5. Supprimer tous les arbustes sous les arbres est vivement conseillé.
6. Evacuer les végétaux coupés. Vous pouvez les broyer sur place ou les porter en déchetterie. Si vous n'avez pas d'autre solution que de les brûler sur place, suivez attentivement la réglementation sur l'emploi du feu. D'une manière générale, arbres et arbustes ne doivent pas occuper plus d'un tiers de la surface à débroussailler. Il vous faut être intraitable avec les espèces les plus inflammables comme le chêne Kermès. Les îlots de végétation doivent être bien isolés entre eux (2 m).
7. Oter la litière sèche (surtout dans les pinèdes) dans un rayon de 10 m autour de la maison.

Emploi du feu

Il est interdit à toutes personnes autres que les propriétaires de terrains boisés ou non et les ayant droit de ces propriétaires, de porter ou d'allumer du feu sur ces terrains et jusqu'à une distance de 200 m des bois, forêts, plantations, reboisements ainsi que des landes, maquis et garrigues ayant été parcourus par des incendies.

Le préfet peut réglementer, par arrêté préfectoral, l'usage du feu, que ce soit par les propriétaires et leurs ayants droit, ou toute autre personne. Les arrêtés préfectoraux relatifs à l'emploi du feu y instaurent différentes périodes, à des dates fixes ou en fonction du niveau de risque (dans certains départements, lorsque le vent est supérieur à 40 km/h), au cours desquelles doivent être respectées des prescriptions plus ou moins rigoureuses. L'incinération des végétaux coupés est possible du 1^{er} février au 14 juin inclus sur déclaration préalable à la mairie, et du 16 septembre au 31 janvier sans déclaration.

Usage du feu par le propriétaire	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin 15	Juillet	Août	15/sept.	Octobre	Novembre	Décembre
Brûler des végétaux coupés	Possible (*) sans déclaration		Possible (*) avec déclaration				INTERDIT		Possible (*) sans déclaration			
Brûler des végétaux sur pied	Possible (*) avec déclaration						INTERDIT		Possible (*) avec déclaration			

(*) Sauf si vent supérieur à 20 Km/heure

Ces mesures ne peuvent s'étendre en aucun cas aux habitations, à leurs dépendances ainsi qu'aux chantiers, ateliers ou usines, sous réserve de l'observation des prescriptions édictées par l'autorité publique. Concernant les mesures applicables à toute personne, les préfets peuvent :

- réglementer l'incinération de végétaux sur pied à moins de 200 m des bois, forêts, plantations, reboisements ainsi que des landes, maquis et garrigues ayant été parcourus par des incendies.
- interdire de fumer sur ces terrains, cette interdiction s'appliquant également aux usagers des voies publiques traversant ces terrains.
- interdire, en cas de risque exceptionnel d'incendie, l'apport sur ces terrains d'allumettes et de certains appareils porteurs de feu.

Les arrêtés préfectoraux réglementant l'emploi du feu sont consultables en mairie et en préfecture. Ils peuvent également être téléchargés sur le site de la préfecture ou celui de l'Observatoire de la forêt méditerranéenne (www.ofme.org).

Affichage du risque journalier

Les conditions météorologiques ont une influence directe sur la nature et le développement des incendies. Avec le concours de météo-France, l'Etat Major de Zone Sud (EMZ) basé à Valabre (Bouches-du-Rhône), dispose d'une cellule météo qui renseigne quotidiennement sur l'indice forêt météo (IFM). Cette prévision basée sur des relevés de températures, de précipitations, d'humidité de l'air et de la teneur en eau des végétaux et du sol permet d'établir des niveaux de danger pour 120 secteurs du sud de la France et d'orienter la mise en place du dispositif et des moyens.

niveau	appellation	abréviation	couleur	définition
1	Faible	F	Bleu	La zone est peu sensible. Le danger météorologique d'éclosion est très faible. L'éclosion d'un feu est improbable.
2	Léger	L	Vert	La zone est peu sensible. Dans l'hypothèse peu probable où un feu prendrait, celui-ci se propagerait à une vitesse faible.
3	Modéré	M	Jaune	La sensibilité de la zone augmente. L'état de dessèchement est faible ou modéré. En cas de feu, celui-ci se propagerait avec une vitesse modérée.
4	Sévère	S	Orange	La zone est sensible. Le dessèchement est modéré ou fort. Deux cas principaux : - Le départ d'un feu est peu probable. Toutefois, en cas de départ, le feu pourrait se propager avec une vitesse élevée. Ce cas est rencontré dans des situations où l'humidité de l'air est élevée. - Le danger météorologique d'éclosion est important. En présence d'une cause de feu, le départ de feu est probable. La vitesse de feu pourrait être assez forte. Ce cas est rencontré dans des situations où l'humidité de l'air est faible.
5	Très sévère	T	Rouge	La zone est très sensible. Le danger d'éclosion est élevé. Toute flamme ou source de chaleur risque donner un feu se propageant à une vitesse élevée.
6	Exceptionnel	E	Noir	La zone est extrêmement sensible. Le niveau de sécheresse est extrême. Le danger d'éclosion est très élevé. Toute cause de feu risque de donner un feu de très forte intensité, se propageant à une vitesse extrêmement rapide.

Vous pouvez vous renseigner sur le site de Météo France, rubrique « Vigilance Météo ». Il est important d'être informé sur les phénomènes de vents dangereux et de sécheresse extrême.

Accès aux massifs pour les piétons/véhicules

L'accès en forêt en période estivale est réglementé pour diverses raisons :

- vulnérabilité des massifs forestiers méditerranéens
- rôle et missions des différents services appelés à y intervenir
- risques encourus en cas d'incendie
- nécessité de faciliter la lutte contre les incendies et d'en limiter les conséquences

Ce sont les autorités préfectorales et communales qui évaluent la prévision du danger en fonction des conditions locales du risque et de l'importance de la fréquentation touristique.

Les jours où la prévision de danger météorologique est classée en risque exceptionnel par l'antenne Météo-France de Valabre, l'accès dans les massifs forestiers est totalement interdit. Cette information est communiquée aux maires par un serveur d'alerte de la préfecture la veille pour le lendemain.

Le texte de cette réglementation est affiché en mairie et, dans certains départements, à l'entrée des massifs forestiers.

Usage de certains appareils et matériels (barbecue...)

La réglementation sur l'emploi du feu s'applique pour les barbecues et autres appareils porteurs du feu à moins de 200 mètres d'un espace boisé.

Rappel sur le comportement et les dangers du feu :

L'incendie cause de lourdes pertes forestières, matérielles et humaines. Depuis 1973, pas moins de 5 millions de m³ de bois, 8900 hectares de plantations et plus de 400 véhicules de lutte ont été détruits.

1. **Écllosion.** Le feu n'a besoin que d'air, de chaleur et de combustible sec pour se développer.
2. **Départ de feu.** Le feu démarre très souvent à moins de 100 m d'une habitation ou d'une route car il a la plupart du temps, une origine humaine (imprudence, accident, malveillance).
3. **Développement du feu.** Selon le schéma habituel, un feu débute le plus souvent dans la strate herbacée. Il prend de l'ampleur au contact de la broussaille et des arbustes. Les flammes atteignent facilement les branches basses des arbres puis le feuillage des arbres les plus hauts.
4. **Vitesse de propagation.** Le feu peut se déplacer et atteindre des vitesses pouvant aller jusqu'à 5 km/h. Il va plus vite en montant une pente qu'en la descendant.
5. **Sens de déplacement.** Le feu se déplace généralement dans le sens du vent et les flammes de bas en haut (des broussailles vers les houppiers des arbres). Mais le vent et le relief modifient souvent l'avancée du feu. Ainsi il peut être conduit par une pente ascendante perpendiculairement à la direction du vent.
6. **Contours.** Ce sont souvent des centaines de mètres de linéaires en combustion. Sous vent fort, le front de feu se déplace plus vite que les flancs.
7. **Saute de feu.** Avec les courants d'air ascendants générés par l'incendie, des fragments de végétaux incandescents peuvent être transportés en avant du front sur des distances supérieures à 2 km et provoquer de nouvelles éclosions très défavorables à la lutte. Il est à noter qu'en région méditerranéenne française, les sautes de feu atteignent une distance moyenne de 200m. Cependant les sautes de courte distance (10 à 50 m) sont très fréquentes surtout dans le contexte des interfaces habitat-forêt.
8. **Reprises.** Un incendie est dit maîtrisé lorsqu'il ne progresse plus, et éteint lorsqu'il a été noyé. Durant ce laps de temps, l'incendie doit être sous surveillance pour éviter les reprises, quelquefois pendant plusieurs jours.

Toutes ces informations sont disponibles sur le site internet : www.prevention-incendie-foret.com

Annexe 8. Typologie du combustible

Type A : Peuplement forestier haut et fermé

Espèces	Recouvrement (%)	Hauteur (m)	CBH (m)	BD (kg/m ³)	Fuel load (t/ha)
Brachypodium retusum	30	0,25	0	0,44	0,3
Rosmarinus officinalis	20	0,5	0	1,64	1,64
Quercus coccifera (1)	30	0,6	0	1,96	3,53
Quercus coccifera (2)	15	1,2	0	0,97	1,75
Quercus ilex (1)	10	1,7	0	1,32	2,24
Quercus ilex (2)	20	3	0	0,4	1,8
Pinus halepensis	70	13	5	0,15	8,4

Type Ad : Peuplement forestier haut et fermé sans sous étage

Espèces	Recouvrement (%)	Hauteur (m)	CBH (m)	BD (kg/m ³)	Fuel load (t/ha)
Brachypodium retusum	50	0,25	0	0,44	0,55
Pinus halepensis	80	13	5	0,15	9,6

Type B : Peuplement bas et fermé

Espèces	Recouvrement (%)	Hauteur (m)	CBH (m)	BD (kg/m ³)	Fuel load (t/ha)
Brachypodium retusum	30	0,25	0	0,44	0,3
Rosmarinus officinalis	15	0,5	0	1,64	0,9
Quercus coccifera	30	0,6	0	1,96	3,5
Quercus ilex (1)	15	1	0	2,24	3,36
Quercus ilex (2)	60	4	0,5	0,25	5,25
Pinus halepensis	15	9	3	0,15	1,3

Type C : Garrigues hautes

Espèces	Recouvrement (%)	Hauteur (m)	CBH (m)	BD (kg/m ³)	Fuel load (t/ha)
Brachypodium retusum	30	0,25	0	0,44	0,3
Rosmarinus officinalis	20	0,5	0	1,64	1,64
Cistus albidus	10	0,5	0	0,85	0,4
Quercus ilex (1)	40	1,5	0	1,32	9
Quercus ilex (2)	30	3	0,5	0,4	2,25

Type D : Garrigues basses

Espèces	Recouvrement (%)	Hauteur (m)	CBH (m)	BD (kg/m ³)	Fuel load (t/ha)
Brachypodium retusum	30	0,25	0	0,44	0,3
Rosmarinus officinalis	20	0,5	0	1,5	1,5
Quercus coccifera	60	0,7	0	1,65	6,93
Quercus ilex	10	1,2	0	2,11	4

Type E : Peuplement ouvert sans sous étage

Espèces	Recouvrement (%)	Hauteur (m)	CBH (m)	BD (kg/m ³)	Fuel load (t/ha)
Brachypodium retusum	30	0,25	0	0,44	0,3
Rosmarinus officinalis	10	0,7	0	1,5	1,1
Quercus ilex	10	1,5	0	1,5	2,25
Pinus halepensis	50	9	3	0,15	4,5

Type F : Peuplement très bas et fermé

Espèces	Recouvrement (%)	Hauteur (m)	CBH (m)	BD (kg/m ³)	Fuel load (t/ha)
Brachypodium retusum	30	0,25	0	0,44	0,3
Rosmarinus officinalis	30	0,5	0	1,64	2,46
Quercus coccifera (1)	40	0,6	0	1,96	4,7
Quercus coccifera (2)	20	1,5	0	1,13	3,39
Quercus ilex (1)	40	1,6	0	1,5	9,66
Quercus ilex (2)	10	4	0,5	0,25	0,88
Pinus halepensis	50	7	1	0,15	4,5

Type G : Peuplement dense de hauteur moyenne

Espèces	Recouvrement (%)	Hauteur (m)	CBH (m)	BD (kg/m ³)	Fuel load (t/ha)
Brachypodium retusum	30	0,25	0	0,44	0,3
Quercus coccifera	30	0,7	0	1,96	3,53
Quercus ilex (1)	10	1,2	0	2,11	2,53
Quercus ilex (2)	60	4	0,5	0,25	5,25
Pinus halepensis	15	9	3	0,15	1,35

Type H : Peuplement haut et clairsemé

Espèces	Recouvrement (%)	Hauteur (m)	CBH (m)	BD (kg/m ³)	Fuel load (t/ha)
Brachypodium retusum	30	0,25	0	0,44	0,3
Quercus ilex	40	3	0	0,3	3,6
Pinus halepensis (1)	40	7,5	2	0,15	3,3
Pinus halepensis (2)	10	13	5	0,15	0,8

Type I : Peuplement haut et clairsemé à sous étage dense

Espèces	Recouvrement (%)	Hauteur (m)	CBH (m)	BD (kg/m ³)	Fuel load (t/ha)
Brachypodium retusum	30	0,25	0	0,44	0,3
Rosmarinus officinalis	20	0,5	0	1,64	1,64
Cistus albidus	40	0,5	0	0,85	1,7
Quercus coccifera	40	0,7	0	1,96	5,49
Quercus ilex (1)	20	1,2	0	2,11	5,06
Quercus ilex (2)	10	3	0	0,4	1,2
Pinus halepensis	50	13	5	0,15	6

Type J : Strate herbacée

Espèces	Recouvrement (%)	Hauteur (m)	CBH (m)	BD (kg/m ³)	Fuel load (t/ha)
Brachypodium retusum	100	0,25	0	0,44	1,1

Type K : Haies ornementales

Espèces	Hauteur (m)	BD (kg/m ³)	Fuel Load (t/ha)
Cupressus sempervirens	2	18,99	265,9
Cupressus sempervirens	3	18,99	398,8
Cupressus sempervirens	4	18,99	531,7
Cupressus sempervirens	5	18,99	664,7
Cupressus sempervirens	6	18,99	797,6
Elaeagnus	1	1,09	7,6
Elaeagnus	1,2	1,09	9,2
Ligustrum vulgare	2	1,01	14,1
Ligustrum vulgare	2,5	1,01	17,7
Nerium oleander	1,5	4,14	43,5
Pyracantha coccinea	1,5	1,01	10,6
Pyracantha coccinea	1,7	1,01	12,0
Pyracantha coccinea	2	1,01	14,1

Viburnmu tinus	1	6,38	44,7
Viburnmu tinus	1,2	6,38	53,6

Table des illustrations

Fig. 1 : Démarche d'objectivation de l'évaluation de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt, à l'échelle de l'habitation résidentielle	12
Fig. 2 : Synthèse des différentes approches de la vulnérabilité, d'après D'Ercole <i>et al.</i> , 1994	26
Fig. 3 : Interactions et rapports de causalité entre facteurs de vulnérabilité (Gaillard, 2007).....	28
Fig. 4 : Synthèse des différentes approches d'évaluation des vulnérabilités, d'après (Léone et Vinet, 2006).....	29
Fig. 5 : Le triangle du feu.....	34
Fig. 6 : Concept de vulnérabilité spatiale appliqué aux incendies de forêt.....	39
Fig. 7 : Température moyenne saisonnière (°C), normale 1981 – 2010 (source Météo-France®, fond de carte IGN®)	41
Fig. 8 : Précipitations cumulées par saisons (mm), normale 1981 – 2010 (source Météo-France®, fond de carte IGN®).....	42
Fig. 9 : Insolation annuelle moyenne (h), normale 1991 – 2010 (source Météo-France®, fond de carte IGN®).....	42
Fig. 10 : Bilan hydrique à Marseille (source : Vigneau, 2005)	43
Fig. 11 : Diagramme ombrothermique de Marseille (source : Vigneau, 2005).....	44
Fig. 12 : Méthode de calcul de l'Indice-Forêt-Météo (IFM) (Source : Météo-France).....	44
Fig. 13 : Typologie des peuplements forestiers sur substrat cristallin d'après (Jappiot, 1997).....	47
Fig. 14 : Départements couverts par la base de données Prométhée (BD_Topo v2 ©IGN)	53
Fig. 15 : Évolution annuelle des surfaces brûlées (ha) sur les 15 départements de la zone Prométhée, de 1973 à 2013	54
Fig. 16 : Cartographie des densités de surfaces brûlées (en ha/km ²) sur les 15 départements de la zone Prométhée, de 1973 à 2013 (source Prométhée)	55
Fig. 17 : Évolution annuelle du nombre d'incendies sur les 15 départements de la zone Prométhée, de 1973 à 2013.	55
Fig. 18 : Cartographie des densités de feux de forêt (en nombre/km ²) sur les 15 départements de la zone Prométhée, de 1973 à 2013 (source Prométhée).....	56
Fig. 19 : Pourcentage de feux par mois sur l'ensemble de la zone Prométhée, entre 1973 et 2013.....	56
Fig. 20 : Pourcentage des feux par heure sur l'ensemble de la zone Prométhée, entre 1973 et 2013	56
Fig. 21 : Répartition des causes de départs de feux sur l'ensemble de la zone Prométhée, entre 1973 et 2013.....	57
Fig. 22 : La procédure PPRIF, une volonté de concertation et de transparence pour intimer confiance (source : Guide PPRIF, 2003)	62
Fig. 23 : Processus d'élaboration d'un PPRIF (Guide PPRIF, 2003).....	62
Fig. 24 : État des lieux 2010 sur les PPRIF prescrits dans 17 départements français (source : MEDDE, 2011)	69
Fig. 25 : Processus de décision d'après H.A. Simon, 1947	87
Fig. 26 : Analyse et synthèse au travers de l'AHP, d'après (Tacnet, 2009)	103
Fig. 27 : Hiérarchie de type [1-n] – Nombre d'alternatives limité	104
Fig. 28 : Hiérarchie de type [1-∞] – Nombre d'alternatives grand.....	104
Fig. 29 : Avantages de la méthode AHP (Saaty, 1984)	110
Fig. 30 : Présentation des différentes étapes de la démarche	117
Fig. 31 : Le retour d'expérience comme un processus de construction de connaissances utile à l'élaboration du modèle hiérarchique.....	119

Fig. 32 : Schéma du croisement pour l'exploitation des données (Pyroscope, 2007)	120
Fig. 33 : Influence des activités de lutttes avant et après le passage du feu, sur les dommages occasionnés aux constructions, synthèse des trois enquêtes (Blanchi <i>et al.</i> , 2006)	132
Fig. 34 : Exemple d'une « mauvaise candidate à la survie » (Ramsey, 1985)	136
Fig. 35 : Structure hiérarchique générique du modèle conceptuel	137
Fig. 36 : Premier niveau de la hiérarchie du modèle conceptuel – Les critères conditionnant la vulnérabilité territoriale des interfaces habitat-forêt	137
Fig. 37 : Définition des zones exposées au vent dominant.....	138
Fig. 38 : Structure hiérarchique associée au critère « Topographie ».....	138
Fig. 39 : Deuxième et troisième niveaux de la hiérarchie du modèle conceptuel – Sous-critères conditionnant le critère « Structure de la Végétation» et modalités (alternatives) définissant chacun des sous-critères	140
Fig. 40 : Deuxième et troisième niveaux de la hiérarchie du modèle conceptuel – Sous-critères conditionnant le critère « Structure de l'Habitat» et modalités (alternatives) définissant chacun des sous-critères.....	141
Fig. 41 : Construction du critère « Aménagement » et niveaux hiérarchiques associés à sa structure.....	142
Fig. 42 : Deuxième et troisième niveaux de la hiérarchie du modèle conceptuel – Sous-critères conditionnant le critère « Propriétés des Constructions» et modalités (alternatives) définissant chacun des sous-critères	143
Fig. 43 : Construction du critère « Facteurs Humains» et niveaux hiérarchiques associés à sa structure	144
Fig. 44 : Modèle conceptuel pour l'évaluation de la vulnérabilité territoriale des interfaces habitat-forêt	145
Fig. 45 : Exemple d'une matrice de jugement – Expert 1 – Niveau 1 de la hiérarchie	150
Fig. 46 : Distribution des Experts (a) et des poids de critères (b) sur le premier plan factoriel.....	151
Fig. 47 : Distribution des Experts (a) et des poids de critères (b) sur le deuxième plan factoriel	151
Fig. 48 : Classification des experts en cinq groupes, et leur position sur le premier plan factoriel.....	152
Fig. 49 : Distribution des ratios de cohérence par groupes professionnels	153
Fig. 50 : Distribution des ratios de cohérence par groupes professionnels sur les six matrices de dimension supérieure à 2	154
Fig. 51 : Distribution des ratios de cohérence par groupes de compétence en diagnostic de vulnérabilité.....	154
Fig. 52 : Exemple d'insertion de l'incertitude dans une matrice de jugement – E ₁ – Niveau 1	159
Fig. 53 : Comparaison des importances marginales et holistiques des classements sur le Niveau 1 de la hiérarchie	165
Fig. 54 : Positionnement des experts et des classements sur un espace euclidien de dimension 2	166
Fig. 55 : Fonctions d'appartenance des cinq sous-ensembles de la vulnérabilité	170
Fig. 56 : Définition des angles au sommet d'un nombre flou triangulaire (Pandley <i>et al.</i> , 2012)	171
Fig. 57 : Position des groupes d'experts et des résultats de l'agrégation (C1311).....	173
Fig. 58 : Position des groupes d'experts et des résultats de l'agrégation (C6324).....	173
Fig. 59 : Approche <i>a posteriori</i> pour la caractérisation et la cartographie de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt.....	179
Fig. 60 : Comparaison des contours des incendies de forêt survenus en 2006 et en 2012 sur la colline Saint-Jacques à Cavaillon (Source : SDIS Cavaillon).....	183
Fig. 61 : Cartographie de l'incendie de Cavaillon, illustrant le déroulement de l'incendie du départ jusqu'à l'extinction. Les axes de propagation sont représentés par les flèches noires. (Sources : SDIS Cavaillon, BD ORTHO 2010 IGN®)	183
Fig. 62 : Cartographie de l'occupation du sol de la zone d'étude	184
Fig. 63 : Carte thématique des dommages observés (BD ORTHO® IGN)	185
Fig. 64 : Dommages observés sur l'habitation CAV_2 : (a) façade endommagée par la combustion du matériel en bois entreposé ; (b) endommagement de la gouttière en PVC suite à l'incendie de la haie de cyprès vert..	185

Fig. 65 : Dommages observés sur l'habitation CAV_6 : façade et volet endommagés par la combustion d'un banc en bois accolé à la maison.....	186
Fig. 66 : Dommages observés sur l'habitation CAV_8 : gouttière endommagée suite à l'incendie d'un camion et de son effet sur la végétation environnante	186
Fig. 67 : Dommages observés sur l'habitation CAV_13 : (a) un stock de bois entre en contact avec le feu, sa combustion entraîne celle du camion ; (b) l'incendie du camion impacte par rayonnement le matériel stocké au pieds de la maison et brise la vitre (c).....	186
Fig. 68 : Dommages observés sur l'habitation CAV_8 : (a) volet en bois (façade sud-est) dégradé par la combustion d'un banc en bois accolé atteint par des brandons ; (b) volets façade sud-est partiellement détruit par l'exposition au rayonnement thermique (auto-inflammation) ; (c) façade nord-ouest endommagée par la combustion d'un établi en bois accolé ; (d) toiture endommagée par les brandons.....	187
Fig. 69 : Dommages observés sur l'habitation CAV_16 : (a) toiture endommagée par les particules incandescentes de la haie de cyprès en combustion (b) volet en bois (façade nord-ouest) légèrement noirci	187
Fig. 70 : Cartographie de la structure de l'habitat résidentiel de la commune de Cavaillon.....	191
Fig. 71 : Cartographie des modalités du sous-critère « Position » (source : BD TOPO® de l'IGN).....	192
Fig. 72 : Graphe des plus proches voisins d'ordre 1 et table des distances associées	194
Fig. 73 : Explication des quatre quadrants du nuage de points de Moran.....	195
Fig. 74 : Nuage de points de Moran pour l'indice global de vulnérabilité et les critères relatifs à l'aménagement (C_1), à la structure de la végétation (C_3) et aux facteurs humains (C_6).....	197
Fig. 75 : Boîtes à moustaches pour le critère « Aménagement » (groupes d'échantillons « DOM » et « SEV »).....	200
Fig. 76 : Planche cartographique du critère « Aménagement » et vulnérabilité spécifique des habitations.....	201
Fig. 77 : Planche cartographique du critère « Topographie » et vulnérabilité spécifique des habitations.....	203
Fig. 78 : Planche cartographique du critère « Structure de la Végétation » et vulnérabilité spécifique des habitations.....	205
Fig. 79 : Boîtes à moustaches pour le critère « Structure de la Végétation » et ses sous-critères (groupes d'échantillons « DOM » et « SEV »)	206
Fig. 80 : Planche cartographique du critère « Structure de l'Habitat » et vulnérabilité spécifique des habitations	207
Fig. 81 : Planche cartographique du critère « Propriétés des Habitations » et vulnérabilité spécifique des habitations.....	209
Fig. 82 : Planche cartographique du critère « Facteurs Humains » et vulnérabilité spécifique des habitations.....	211
Fig. 83 : Planche cartographique de l'indice global de vulnérabilité et vulnérabilité globale des habitations.....	212
Fig. 84 : Comparaison de la distribution de l'IGV selon les groupes « DOM » et « SEV »	213
Fig. 85 : Boîtes à moustaches pour la variable $IGV^{(D)}$ (groupes d'échantillons « DOM » et « SEV »).....	214
Fig. 86 : Exemple de fonction logistique	216
Fig. 87 : Sigmoïdes des quatre modèles logistiques avec effets principaux.....	219
Fig. 88 : Matrices de confusion des quatre modèles logistiques avec effets principaux.....	221
Fig. 89 : Courbes ROC des quatre modèles MLEP	223
Fig. 90 : Mécanismes de la propagation d'un feu de forêt.....	233
Fig. 91 : Géométrie d'une flamme	236
Fig. 92 : Schéma représentant les entrées, les procédures de traitements et les sorties du simulateur PHOENIX Rapidfire (Tolhurst <i>et al.</i> , 2008).....	243
Fig. 93 : Carte des vents locaux présentée sous l'interface graphique Google Earth (version 7.1.2.2041).....	247
Fig. 94 : Comparaison de l'incendie simulé (S) avec celui observé (R) par la méthode SDI (I représente la surface de l'intersection, ou la surface de bonne prédiction) (d'après Cui et Perrera, 2010).....	248

Fig. 95 : Graphe des ADI comparant les emprises spatiales successives des feux simulés à différentes résolutions	249
Fig. 96 : Cartographie du périmètre observé à 18 heures et des périmètres simulés (Pugnet <i>et al.</i> , 2013)	250
Fig. 97 : Démarche d'objectivation de l'évaluation de la vulnérabilité croisant l'approche multicritère à dire d'experts et l'approche par la simulation en laboratoire virtuel.....	252
Fig. 98 : Distribution spatiale du FLI brut simulé	253
Fig. 99 : Distributions des variables C_2 , C_3 et de l'IGV en fonction des six niveaux de l'échelle d'intensité.....	255
Fig. 100 : Distribution du FLI simulé (kW/m) en fonction des niveaux de vulnérabilité calculés	256
Fig. 101 : Distributions des variables FLI moyen, NEI et EMBd en fonction des classes de sévérité des dommages sur les habitations, et distribution des classes de sévérité des dommages en fonction des niveaux de l'échelle d'intensité.....	258
Fig. 102 : Résultats du test de corrélation de Bravais-Pearson	259
Fig. 103 : Résultats de la régression linéaire IGV~ FLI moyen	260
Fig. 104 : Modèle linéaire caractérisant l'indice global de vulnérabilité des habitations en fonction de la puissance linéique moyenne d'un incendie, simulée dans les 30 m autour d'une habitation (l'intervalle de confiance à 95 % est représenté en rouge)	260
Fig. 105 : Distributions de la variable IGV _H en relation avec les niveaux de l'échelle d'intensité.....	261
Fig. 106 : Schématisation des fichiers vecteurs points et polygones en sortie du simulateur	264
Fig. 107 : TIN représentant la morphologie de la Colline St Jacques. Les habitations sont représentées en noir par des entités 3D <i>multipatch</i>	265
Fig. 108 : Couche cartographique des sources de dangers extrudées selon leur hauteur. Les classes couleurs correspondent aux cinq premiers niveaux de l'échelle d'intensité pour les incendies de forêt.....	265
Fig. 109 : Couche cartographique regroupant les entités d'occultation	265
Fig. 110 : Prise en compte de la dynamique de l'incendie dans la zone critique de 30 m autour d'une habitation	267
Fig. 111 : Schématisation des différentes sections d'une flamme	267
Fig. 112 : Illustration du calcul du rayonnement thermique reçu par la cible A, prenant en compte l'atténuation de la végétation environnante.....	268
Fig. 113 : Lignes de visée tracées des fronts de flammes successifs vers trois positions verticales de cibles	269
Fig. 114 : Présentation des isochrones de propagation de l'incendie et des centroïdes des mailles de 5m récapitulant l'ensemble des caractéristiques physiques de l'incendie.....	270
Fig. 115 : Distribution des variables calculées pour les cibles endommagées et non endommagées	273
Fig. 116 : Résultats du test de corrélation de Bravais-Pearson	274
Fig. 117 : Résultats de la régression linéaire IGV~ Q_{max}	275
Fig. 118 : Modèle linéaire caractérisant l'indice global de vulnérabilité des habitations en fonction du flux thermique maximal reçu par les habitations (l'intervalle de confiance à 95 % est représenté en rouge) ...	275
Fig. 119 : Transformation de l'équation de Leicester pour une température de flamme de 1 200 °K.....	277
Fig. 120 : Développement de l'approche à dire d'experts pour l'évaluation de la vulnérabilité des interfaces habitat-forêt.....	282
Fig. 121 : Schématisation et définition d'une interface habitat-forêt.....	312
Fig. 122 : Évolution de l'indice d'aggrégation relatif à l'arrangement spatial des 9 pixels noirs (Lampin <i>et al.</i> , 2006)	312
Fig. 123 : Structure hiérarchique de la modélisation spatiale multicritère.....	313
Fig. 124 : Échelle fondamentale des comparaisons par paire	313
Fig. 125 : Modalités associées au sous-critères « Connaissance du risque »	352

Fig. 126 : Pourcentages d'inertie expliqués par composantes	353
Fig. 127 : Position des individus sur les deux premiers axes factoriels	354
Fig. 128 : Position des modalités sur les deux premiers axes factoriels	354
Fig. 129 : Répartition des modalités sur le premier axe factoriel	354
Fig. 130 : Répartition des modalités sur le deuxième axe factoriel	355
Fig. 131 : Dendogramme de la CAH	355
Fig. 132 : Position des quatre groupes déterminés sur les deux premiers axes factoriels	356

Liste des tableaux

Tab. 1 : Bilan sur la genèse du concept de vulnérabilité en sciences sociales (Reghezza, 2006).....	24
Tab. 2 : Typologie des peuplements forestiers sur substrat rocheux calcaire, hauteur dominante et intervalle de recouvrement (recouvrement moyen) d'après (Lampin, 2004)	47
Tab. 3 : Seuils d'intensité fixés pour l'aléa incendie de forêt, en France (sources : SDIS 83 ; Guide PPRIF, 2003) .	61
Tab. 4 : Exemples de prescriptions délivrées par les PPRIF (source : PPRIF Grambois (84) ; PPRIF Puget-sur-Durance (84) ; PPRIF massif d'Uchaux (84) ; PPRIF Ménerbes (84) ; PPRIF Le Boulou (66) ; PPRIF Céret (66)).....	66
Tab. 5 : Exemples révélant la longue durée entre prescription et approbation des PPRIF (sources : DDTM 66, DDT 84).....	69
Tab. 6 : Caractéristiques des structures d'habitat : moyennes (écarts type ; CV %) calculées dans un rayon de 50 m autour des bâtis (Lampin-Maillet, 2009).....	73
Tab. 7 : Typologie de l'évaluation, dans le domaine scolaire d'après (C. Hadji, 1989).....	80
Tab. 8 : Les problématiques de références en aide multicritère à la décision (Roy, 1985).....	93
Tab. 9 : Synthèse des méthodes multicritères d'aide à la décision en fonction des approches retenues. D'après (Schärlig, 1985 ; Roy, 1985 ; Vincke, 1989).....	99
Tab. 10 : Échelle fondamentale de comparaison par paires (Saaty et Vargas, 1981).....	106
Tab. 11 : Indice aléatoire de cohérence (Saaty, 2008).....	109
Tab. 12 : Statistiques des dommages observés lors des incendies de Coti, Santa Maria di Lota et Porto-Vecchio (Cellule Pyroscope, 2007)	120
Tab. 13 : Identification de l'incendie de Vidauban.	121
Tab. 14 : État du débroussaillage avant l'incendie sur l'ensemble de l'échantillon (Joliclerq, 2004).....	121
Tab. 15 : Typologie des impacts au niveau de la végétation et du bâtiment (Joliclerq, 2004).....	121
Tab. 16 : Impact sur les habitations et la végétation aux abords des bâtiments en fonction du débroussaillage effectué (Joliclerq, 2004).....	121
Tab. 17 : Identification de l'incendie d'Esparron-de-Verdon.....	122
Tab. 18 : Bilan des niveaux de dommages perpétrés sur l'ensemble des 179 propriétés bâties, en fonction de l'état du débroussaillage (Reymond et Duché, 2007)	122
Tab. 19 : Récapitulatif des incendies et des infrastructures étudiés (CEREN, 2005).....	124
Tab. 20 : Synthèse des éléments favorables et défavorables à la défense des infrastructures contre l'incendie (CEREN, 2005).....	125
Tab. 21 : Identification des incendies de forêt du 30 août 2010 de l'Hérault (source Prométhée).....	126
Tab. 22 : Types de dommages recensés par types de constructions pour l'incendie de Villeveyrac (source DDTM 34).....	126
Tab. 23 : Types de dommages recensés par types de constructions pour l'incendie de Fontanés (source DDTM 34).....	127
Tab. 24 : Les incendies de forêt en Australie impliquant des pertes considérables (humaines et matérielles) depuis 1939 (Leonard, 1999 ; Ellis, 2004 ; Bianchi <i>et al.</i> , 2006)	128
Tab. 25 : Présentation des incendies de forêt ayant menés à des retours d'expérience par le CSIRO (Blanchi <i>et al.</i> , 2006)	128
Tab. 26 : Sévérité des dommages observés sur les habitations (Blanchi <i>et al.</i> , 2006).....	129
Tab. 27 : Les sinistres causés en interface habitat-forêt lors des incendies de forêt sur la période 1990 -2007 (Cohen, 2008)	133

Tab. 28 : Bilan des contacts et des participations effectués dans le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité territoriale des interfaces habitat-forêt par la méthode d'aide multicritère à la décision AHP	147
Tab. 29 : Profils des experts ayant participé à l'évaluation	148
Tab. 30 : Ensemble des comparaisons construisant la matrice de jugement du Niveau 1 de la hiérarchie.....	149
Tab. 31 : Statistiques descriptives sur les comparaisons du Niveau 1, et effectifs relatifs aux trois groupes.....	149
Tab. 32 : Niveau 1 – Critères de vulnérabilité – Pondérations individuelles et structures de jugement associées	150
Tab. 33 : Classification des experts en cinq groupes, sur le premier niveau hiérarchique.....	152
Tab. 34 : Bilan des ratios de cohérence des experts	153
Tab. 35 : Échelle d'intensité de la vulnérabilité.....	155
Tab. 36 : Évaluations des intensités induites par les différentes modalités du critère « Propriétés des Habitations »	155
Tab. 37 : Nombre de matrices possibles en fonction de la dimension initiale, et temps de calcul.....	160
Tab. 38 : Distribution des probabilités de chaque structure de jugements pour les onze experts	161
Tab. 39 : Distances entre les experts – Niveau 1	161
Tab. 40 : Matrice de similarité – Niveau 1	163
Tab. 41 : Distances des experts par rapport aux classements et distance globale des classements par rapport au groupe d'experts.....	164
Tab. 42 : Bilan par méthodes des contributions relatives des critères du Niveau 1	166
Tab. 43 : Contributions relatives des éléments du modèle conceptuel et structures de jugements calculées pour chaque nœuds de la hiérarchie, selon les méthodes AJI et AIPS.....	167
Tab. 44 : Fuzzification de l'échelle de vulnérabilité	169
Tab. 45 : Nombres flous triangulaires, de la modalité C_{1311} , calculés selon les quatre méthodes présentées	172
Tab. 46 : Nombres flous triangulaires, de la modalité C_{6224} , calculés selon les quatre méthodes présentées	172
Tab. 47 : Bilan des valeurs attendues (EV), pour les modalités du critères « Propriétés des Habitations ».....	174
Tab. 48 : Présentation des incendies étudiés au cours de la thèse.....	179
Tab. 49 : Classement des niveaux d'endommagement des habitations suivant une sévérité croissante.....	181
Tab. 50 : Correspondance entre types de dommage et nombre de propriétés sur les huit feux d'interface étudiés.	181
Tab. 51 : Inventaire des types de variables associées aux critères du modèle, et de leur méthode de spatialisation	189
Tab. 52 : Résultats des tests de Moran pour les critères du modèle	194
Tab. 53 : Contributions locales à la structure spatiale de l'IGV.....	198
Tab. 54 : Statistiques descriptives résumées pour les échantillons du groupe « DOM » – Aménagement.....	200
Tab. 55 : Statistiques descriptives résumées pour les échantillons du groupe « SEV » – Aménagement	200
Tab. 56 : Test de Kruskal-Wallis pour la comparaison des échantillons « DOM » et « SEV » – Aménagement.....	202
Tab. 57 : Statistiques résumées pour les échantillons du groupe « DOM » et « SEV »– Topographie.....	204
Tab. 58 : Test de Kruskal-Wallis pour la comparaison des échantillons « DOM » et « SEV » – Topographie	204
Tab. 59 : Statistiques résumées pour les échantillons du groupe « DOM » et « SEV » – Structure de la Végétation	205
Tab. 60 : Test de Kruskal-Wallis pour la comparaison des échantillons « DOM » et « SEV » – Structure de la Végétation.....	206
Tab. 61 : Statistiques résumées pour les échantillons du groupe « DOM » et « SEV » – Structure de l'Habitat.....	206

Tab. 62 : Test de Kruskal-Wallis pour la comparaison des échantillons « DOM » et « SEV » – Structure de l'Habitat	207
Tab. 63 : Statistiques résumées pour les échantillons du groupe « DOM » et « SEV » – Propriétés des Habitations	208
Tab. 64 : Test de Kruskal-Wallis pour la comparaison des échantillons « DOM » et « SEV » – Propriétés des Habitations.....	208
Tab. 65 : Statistiques résumées pour les échantillons du groupe « DOM » et « SEV » – Facteurs Humains.....	210
Tab. 66 : Test de Kruskal-Wallis pour la comparaison des échantillons « DOM » (D) et « SEV » (S) – Facteurs Humains	211
Tab. 67 : Statistiques descriptives pour les échantillons « DOM » et « SEV » – IGV.....	213
Tab. 68 : Test de Kruskal-Wallis pour la comparaison des échantillons « DOM » (D) et « SEV » (S) – IGV.....	213
Tab. 69 : Résultats de l'analyse univariée pour les variables significatives des modèles AIPS-EVM et AIPS-EV3M	217
Tab. 70 : Résultats de l'analyse univariée pour les variables significatives des modèles AJI-EVM et AJI-EV3M ...	217
Tab. 71 : Résultats des quatre modèles logistiques avec effets principaux.....	219
Tab. 72 : Pseudo-R ² de McFadden et AIC des quatre modèles logistiques avec effets principaux.....	220
Tab. 73 : Prédictions des dommages sur les habitations calculées par les quatre modèles et confrontation avec les dommages observés.....	221
Tab. 74 : Comparaisons des performances relatives aux quatre modèles MLEP.....	222
Tab. 75 : Interprétation des valeurs du critère AUC.....	223
Tab. 76 : Résultats des régressions logistiques polytomiques ordonnées pour les quatre méthodes multicritères	226
Tab. 77 : Comparaisons des prédictions et des observations de la sévérité des dommages pour les quatre modèles.....	227
Tab. 78 : Niveaux d'intensité du feu selon la classification générale associée à la capacité de lutte (Hough et Albini, 1978 ; Hirsh et Martell, 1996).....	238
Tab. 79 : Échelle d'intensité pour les incendies de forêt (Lampin <i>et al.</i> , 2002).....	239
Tab. 80 : Charge en combustible en t/ha des différents types de peuplement. Les intervalles présentent les charges minimales et maximales.....	245
Tab. 81 : Conditions météorologiques du jour de l'incendie par pas de temps horaire.....	246
Tab. 82 : Résultats des ADI successifs en fonction de la résolution des simulations	249
Tab. 83 : Résumé statistique des variables contributives aux effets de site(C ₂ – Topographie, et C ₃ – Structure de la végétation) et de l'indice global de vulnérabilité en fonction du niveau d'intensité de l'incendie.....	254
Tab. 84 : Test de la normalité et de l'homoscédasticité des distributions de C ₂ , C ₃ et de l'IGV selon les 6 niveaux d'intensité	254
Tab. 85 : Résultats du test de Kruskal-Wallis sur les niveaux d'intensité en fonction des variables de vulnérabilité	254
Tab. 86 : Résultats du test des comparaisons multiples pour les trois variables étudiées.....	256
Tab. 87 : Caractéristiques moyennes (médianes) de l'incendie par niveau de vulnérabilité	256
Tab. 88 : Statistiques descriptives (moyennes, médianes entre parenthèses) des variables calculées par classes de sévérité des dommages, et probabilité d'indépendance des échantillons selon le test de Kruskal-Wallis et de Student.....	257
Tab. 89 : Résultats de la régression logistique ordinale	262
Tab. 90 : Comparaisons des NEI modélisés avec les NEI calculés par le simulateur PHOENIX.....	262
Tab. 91 : Coefficient d'atténuation par type de peuplement selon les différentes strates.....	270

Tab. 92 : Principaux seuils de dommages associés aux flux thermiques (Tran <i>et al.</i> , 1992 ; Butler et Cohen, 1998 ; Auguin <i>et al.</i> , 2008)	271
Tab. 93 : Statistiques descriptives résumées pour les cibles endommagées et non endommagées	271
Tab. 94 : Relation entre les grandeurs thermodynamiques simulées, reçues par les équipements des maisons endommagées, et degré d'endommagement observés.....	272
Tab. 95 : Réponses aux questions servant à l'analyse des correspondances multiples.....	352