

---

# Vulnérabilité des enjeux à l'incendie de forêt

## *Un modèle multi-critères à dire d'experts spatialisé et confronté à l'expérience*

Lilian Pugnet<sup>1</sup>, Eric Maillé<sup>1</sup>, Christine Voiron<sup>2</sup>

1. IRSTEA-EMAX, groupe de recherche Ecosystèmes Méditerranéens et Risques  
CS40061, 13182 Aix en Provence, France  
[prenom.nom@irstea.fr](mailto:prenom.nom@irstea.fr)

2. Université de Nice Sophia Antipolis, CNRS-UMR ESPACE

---

**RESUME.** 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.

**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 by 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.

**MOTS-CLES :** vulnérabilité, incendie de forêt, modèle multi-critères, exposition, dommages

**KEYWORDS:** vulnerability, wild fires, multicriteria modeling, exposure, damages.

---

DOI:10.3199/JESA.45.1-n © Lavoisier 2012 [AR\\_DOI](#)

## 1. Introduction

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 au feu 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. La subjectivité des dires d'experts limite les possibilités d'extrapolation spatiale de l'évaluation, dans une perspective de cartographie pour l'aménagement des territoires.

Nous proposons 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.

## 2. Modélisation multicritères de la vulnérabilité à dires d'experts

Fondement de nombreux systèmes d'aide à la décision, l'analyse multicritères est aussi utilisée dans le domaine de l'évaluation du risque, pour la spécification de modèles à dires d'expert (Griot *et al.*, 2002 ; Barczak et Grivault, 2007 ; Renard et Chapon, 2010). Elle permet tout à la fois l'estimation de la cohérence interne des dires d'un expert et la confrontation des dires d'experts différents éventuellement divergents, afin de parvenir à une synthèse signifiante. Le modèle est formalisé en une combinaison linéaire de différents critères affectés de poids (Pugnet et Maillé, 2013).

La première étape est l'inventaire exhaustif des facteurs intervenants dans la vulnérabilité et leur organisation dans une hiérarchie sémantique. Aux critères élémentaires (base de la hiérarchie) sont associées des modalités (ou indicateurs) représentant les valeurs discrètes ou plages de valeurs des critères devant être discriminées (la méthode ne permet pas l'analyse des valeurs continues). La mise en place de cette hiérarchie (critères, sous-critères et modalités) est opérée de façon collégiale, dans le cadre de réunions d'un panel d'experts issus de divers horizons professionnels (services de secours et de lutte, forestiers, administration et gestion territoriale, recherche, etc.). S'agissant d'un inventaire non quantifié, une procédure de type « brainstorming » permet l'émergence d'un maximum d'information.

La deuxième étape est l'évaluation des critères et des modalités par les experts. Ce travail est réalisé par enquête postale ou électronique (web). L'importance de

chaque critère et sous-critère quant à la vulnérabilité est évaluée relativement à tous les autres critères d'une même branche de l'arborescence, selon l'échelle de comparaison par paires à neuf moments numériques, développée par Saaty (1980) (Saaty, 1993 ; Saaty, 2008). Puis la contribution (favorable ou défavorable) des modalités à la vulnérabilité est évaluée en valeur absolue sur une échelle discrète bornée (1 à 5).

Le calcul du modèle de vulnérabilité à partir des résultats de l'enquête est effectué sous R.

### 3. Spatialisation des résultats

L'obtention d'une carte d'un champ continu de vulnérabilité à partir du modèle calculé 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 variables spatiales (typiquement la topographie) sont directement extraites des bases de données géographiques. L'interpolation des valeurs d'attributs d'objets géographiques géo-référencés se fonde sur deux hypothèses :

- l'hypothèse de la diffusion spatiale de la vulnérabilité : cette hypothèse émane du 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 réglementaires instaurant un devoir de débroussaillage des résidents, y compris hors de leur propriété.
- l'hypothèse de l'auto-corrélation 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 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.

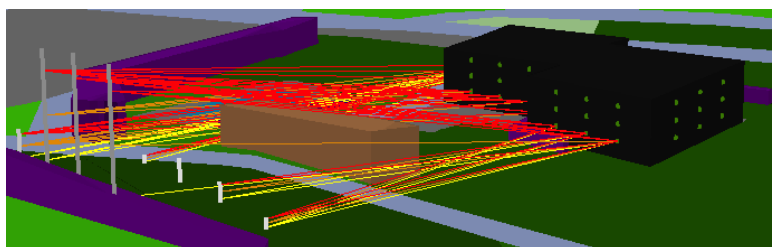
### 4. Modèle physique d'exposition

Dans une perspective de spécification du domaine de validité du modèle à dire d'experts, celui-ci est confronté à une évaluation de la vulnérabilité fondée sur l'utilisation de modèles physiques de propagation et d'exposition, eux-mêmes validés par des mesures de dommages effectuées sur le terrain après sinistre. Le feu d'interface de Cavaillon du 21 juillet 2012 (28 ha sur la Colline Saint Jacques) a servi de cas d'étude (Pugnet *et al.*, 2013).

Le feu de Cavaillon a été simulé par le modèle australien PHOENIX (Tolhurst *et al.*, 2008), afin de connaître l'évolution des principaux paramètres du feu au cours

du sinistre (puissance du front de flamme, longueur du front et hauteur des flammes, vitesse, etc.). La simulation reproduit le plus fidèlement possible les contours du feu cartographiés *a posteriori* ainsi que sa dynamique approximative, selon le scénario décrit par les principaux témoins (service départemental d'incendie et de secours SDIS, Cavaillon).

Le modèle d'exposition est spécifié à partir de travaux australiens (Leicester, 1987, Blanchi *et al.*, 2011). Il intègre temporellement et spatialement les paramètres produits par la simulation de feu pour évaluer la quantité d'énergie reçue par les diverses faces de l'enjeu étudié (le bâti), en fonction des facteurs de vue (distance, angle d'exposition, occultation) et du temps d'exposition (temps de résidence des flammes). L'algorithme 3D est développé sous ArcGIS à l'aide de l'extension *3D Analyst*. La scène 3D est construite sur la base du MNT converti en TIN (outil *Raster to TIN*). Les habitations forment la couche des cibles au format Multipatch (outil *Interpolate Polygon to Multipatch*) extrudées selon leur hauteur (outil *Extrude Between*). Les mêmes outils sont utilisés pour former la couche des entités occultantes (annexes, végétation, clôtures, etc.). Les lignes de vue (outil *Construct Sight Lines*) sont tracées des flammes (trois hauteurs d'échantillonnage) vers les habitations (fig. 1). La prise en compte des entités atténuant ou bloquant le rayonnement thermique s'effectue grâce à l'outil *Intersect 3D Line With Multipatch*.



#### 4. Résultats

La carte de vulnérabilité obtenue sur la colline Saint-Jacques permet d'identifier les principaux facteurs de vulnérabilité en fonction de la zone. Le critère « Structure de la Végétation » est le plus influent au regard de la vulnérabilité territoriale des interfaces habitat-forêt (24,6 % de contribution), selon les dires du groupe d'experts. En termes de vulnérabilité, les résultats traduisent une forte contribution de la composante « exposition », représentée par la topographie (20,3 %), la structure de la végétation du site en interface (24,6 %) et la structure de l'habitat (13,4 %). L'aménagement des interfaces participe à 14,2 % de la vulnérabilité du site, et exerce son influence sur les composantes « exposition » et « capacité de réponse ». La composante « sensibilité » révélée par les caractéristiques physiques des habitations contribue à 17,3 % de la vulnérabilité globale. Enfin, les facteurs humains (préparation, entretien...) relevant de la composante « capacité de réponse » contribuent à 10 % de la vulnérabilité du site.

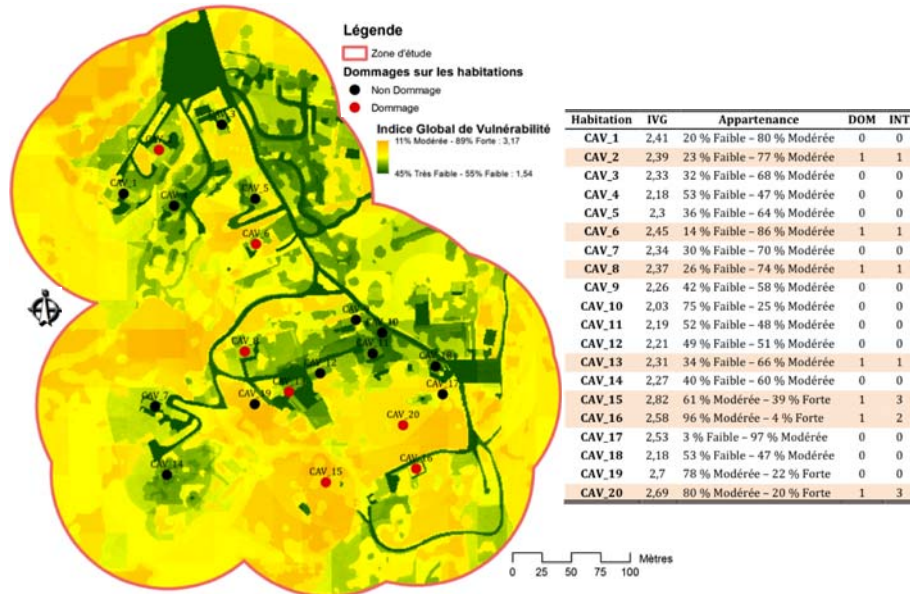


Fig 1 : carte de l'indice global de vulnérabilité calculé et dommages observés

Le tableau (tab. 1) suivant montre la relation entre les grandeurs thermodynamiques simulées reçues par les équipements endommagés, et les nature et degré d'endommagement observés sur les bâtis exposés.

| Bâti   | Densité de flux moyen reçu simulée (kW/m <sup>2</sup> ) | Temps d'exposition (mn) | Densité d'énergie absorbée (kJ/m <sup>2</sup> ) | Dommages observés   |                                   |
|--------|---------------------------------------------------------|-------------------------|-------------------------------------------------|---------------------|-----------------------------------|
|        |                                                         |                         |                                                 | Equipement/matériau | Nature et degré d'endommagement   |
| CAV_2  | 5.6                                                     | 19                      | 6 384                                           | Gouttière PVC       | Légèrement fondue                 |
| CAV_6  | 13.26                                                   | 20                      | 15 912                                          | Volet BOIS          | Noirci + traces de charbon        |
| CAV_8  | 18.4                                                    | 34                      | 37 536                                          | Gouttière PVC       | Fondue et décrochée               |
|        | 7.3                                                     | 10                      | 4 380                                           | Gouttière PVC       | Légèrement fondue                 |
| CAV_13 | 20.1                                                    | 23                      | 27 738                                          | Fenêtre VERRE/BOIS  | Vitre brisée + encadrement noirci |
| CAV_15 | 34                                                      | 28                      | 57 120                                          | Gouttière ZINC      | Partiellement fondue              |
|        | 18.7                                                    | 40                      | 44 880                                          | Volet BOIS          | Partiellement consumé             |
|        | 36                                                      | 27                      | 58 320                                          | Etabli BOIS         | Entièrement consumé               |
| CAV_16 | 16                                                      | 56                      | 53 760                                          | Volet BOIS          | Noirci + traces de charbon        |
| CAV_20 | 28.9                                                    | 36                      | 62 424                                          | Volet BOIS          | Partiellement consumé             |

Tab 1. Relation entre les grandeurs thermodynamiques simulées reçues par les équipements endommagés, et la nature et degré d'endommagement observés sur les bâtis exposés

Les endommagements s'interprètent assez bien par ces grandeurs thermodynamiques, notamment la densité d'énergie absorbée par l'équipement, mais de nombreux autres paramètres sont susceptibles d'intervenir (puissance de crête, température, etc.). Par ailleurs, côté enjeu, la description des équipements est également partielle, de nombreux autres paramètres pouvant conditionner les niveaux d'endommagement observés (épaisseur du bois, combustibilité des enduits, etc.).

## 5. Conclusion

En mettant l'accent sur la lutte opérationnelle, le modèle multicritères à dires d'experts permet surtout d'évaluer une « probabilité » de dommage, sans réellement apporter d'éléments très approfondis sur la nature et le degré potentiel de ces dommages. 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. Par ailleurs, le modèle physique d'exposition apporte les informations concernant l'importance des dommages à attendre en fonction du scénario de l'évènement. Ces scénarios doivent cependant être renseignés au moyen d'un modèle physique de feu, en envisageant diverses situations météorologiques.

## 6. Bibliographie

- Blanchi, R., Leonard, J., Leicester, R., Lipkin, F., Boulaire, F. et McNamara, C. (2011). Assessing vulnerability at the urban interface. *The 5th International Wildland Fire Conference*, Sun City, South Africa.
- 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>
- 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.
- Haight RG., Cleland DT., Hammer RB., Radeloff VC., Rupp TS. (2004). Assessing fire risk in wildland-urban interface. *J. For.* 102(7):41-48
- Leicester, R.H. (1987). *Building Technology to resist Fire, Flood and Drought*. Operations January 21, 1987, The fireman, Oakleigh.
- Pugnet, L., Chong, D.M., Duff, T.J. et Tolhurst, K.G. (2013). Wildland-urban interface (WUI) fire modelling using PHOENIX Rapidfire: A case study in Cavaillon, France. *20th International Congress on Modelling and Simulation*, Adelaide, Australia, 1-6 December 2013. [www.mssanz.org.au/modsim2013](http://www.mssanz.org.au/modsim2013)

- Pugnet, L. et Maillé, E. (2013). Assessment of wildland–urban interface vulnerability to fire using a multi-criteria analysis. *International conference on forest fire risk modelling and mapping - Vulnerability to forest fire at wildland-urban interfaces*, 30<sup>th</sup> of September, 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> of October 2013, Aix en Provence, France.
- 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.
- Saaty, T.L. (1980). *The analytic hierarchy process*. McGraw-Hill, New York.
- 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. (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.
- 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.