LES RISQUES NATURELS LIES À LA PLUIE ET À LA SÉCHERESSE : ELABORATION DE CARTES DES PLUIES EXTRÊMES ET DES RISQUES D'INCENDIES DE FORÊT DANS UNE RÉGION MÉDITERRANEENNE : LA TOSCANE (ITALIE)

PIERRE CARREGA

ABSTRACT. – The Natural Risks Connected to Rainfall and Drought: Drawing Maps of Extreme Rainfalls and Risks of Forest Fires within a Mediterranean Region: Toscana (Italy). A detailed analysis of natural risks shows that the traditional distinction between "probability of occurrence" and site "vulnerability" is frequently insufficient to describe and understand natural catastrophes. An intermediate variable, called "susceptibility" (risk potential) is needed to link probability of occurrence to vulnerability. Risk potential is the likelihood that a natural risk (probability of occurrence) will create a phenomenon with variable consequences (vulnerability).The distinction described above refines the usual risk maps generated from automatic maps softwares or Geographic Information Systems (GIS). These tools are essential for both scientists and decision-makers because they provide a spatial view of the different aspects associated with natural risks: return period of dangerous phenomena (extreme rainfall events, forest fire initiation...), the susceptibility that the phenomenon will take on dangerous proportions (fire propagation in highly inflammable vegetation, runoff rates accelerated due to steep slopes and geological substrate...), catastrophic repercussions linked to site vulnerability (flash floods carrying off cars and causing victims, houses destroyed by forest fires...).

RISCURI ŞI CATASTROFE II / 2003

Il n'est pas besoin d'attendre un changement climatique annoncé (et souvent entouré d'un certain catastrophisme) pour réaliser que les risques naturels d'origine climatique sont depuis longtemps bien présents et pèsent parfois lourdement sur les sociétés humaines modernes.

La notion de risque est traditionnellement divisée en deux composantes qui sont d'une part l'aléa, et d'autre part la vulnérabilité. Cette dernière, qui correspond aux conséquences d'un évènement, est directement reliée à la société humaine concernée, en particulier par le biais de la densité de population, du type d'occupation du sol, du degré de fragilité et de technologie, de la capacité de gérer une crise, etc.

L'aléa est par contre considéré comme assez indépendant de l'homme, il est l'événement naturel à la source du risque. Caractérisé par une probabilité, il est

comme tel dénommé « hazard » par les Anglo-Saxons et ne doit pas être confondu avec le « risk », qui, lui, résulte de la combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité. Ainsi un même aléa n'aura pas les mêmes conséquences selon les lieux et l'époque, ce qui démontre bien que le risque n'existe que par rapport à une référence, l'homme.

L'utilité, sinon de prévoir, au moins de quantifier un risque quelconque s'impose alors et se traduit par la nécessité de fournir aux décideurs, aux aménageurs, aux entreprises, aux assureurs, aux habitants d'une région ou d'une commune, une information spatialisée sur ce risque. Dans cette optique, la représentation spatiale d'un risque et de ses composantes par sa cartographie fournit l'information obligatoire à toute action de prévention et de lutte contre ce risque. Mais, dans la pratique, la réalisation de telles cartes n'est pas si simple, d'une part parce que l'information n'est pas aisément disponible la plupart du temps, d'autre part parce que la quantification du risque dépasse largement le schéma simpliste aléa – vulnérabilité, et demande un traitement adapté aux différents types de risques.

Deux exemples seront développés dans cet article, l'un sur les pluies extrêmes, capables d'engendrer des dégâts importants avec les crues et glissements de terrains qu'elles engendrent ; l'autre sur le risque de feu de forêt qui affecte non seulement les forêts mais aussi les habitations et autres biens situés en forêt ou en périphérie immédiate, avec dans les deux cas un risque certain pour la vie humaine. La technique mise en œuvre est différente selon les cas, puisqu'elle relève de la cartographie automatique dans le cas des pluies, et du Système d'Information Géographique (S.I.G.) dans celui des incendies.

1. La complexite du risque.

1.1. La vulnérabilité et ses rétroactions sur l'aléa : les frontières indécises de l'aléa et de la vulnérabilité dans l'acceptation classique.

S'il est entendu que dans le cadre des risques naturels l'aléa est d'origine « naturelle », celui-ci est pourtant plus complexe qu'il n'y paraît. En effet, il existe bien des aléas dont le déclenchement est purement physique comme une puissante cellule orageuse à l'origine de pluies catastrophiques, une masse d'air avec telle ou telle caractéristique (froid, sécheresse…) etc. Mais il y a aussi des aléas humains capables de générer un aléa physique : ainsi l'étincelle (cigarette, par exemple) ne déclenche le feu que si la forêt peut brûler grâce, par exemple, à l'action combinée du vent et de la déshydratation des plantes ce dernier point constituant à la fois un aléa (présence de combustible propageant l'incendie) et une vulnérabilité (richesse économique et écologique des arbres).

Toujours dans cette vision assez simplifiée mais classiquement admise du risque fondé sur le couple aléa – vulnérabilité, il existe aussi des aléas naturels à plusieurs niveaux : ainsi une pluie très intense peut dans certaines conditions engendrer des dégâts et même la perte de vie humaines par l'intermédiaire d'une

RISCURI şi CATASTROFE II/2003

crue. Le découpage du phénomène montre que l'on ne peut réduire l'analyse à un aléa (la pluie) et une vulnérabilité (la présence d'habitations sur le lit majeur de la rivière en crue), car une série d'étapes intermédiaires ont été nécessaires pour arriver au désastre : en particulier les conditions d'écoulement de l'eau.

De ce fait, on peut se demander au fond ou cesse l'aléa et ou commence la vulnérabilité. En effet, il n'y aucune raison de ne pas entrer dans le détail de la précipitation elle-même et de ses composantes : il a bien fallu que s'instaure un puissant mécanisme d'ascendance de la vapeur d'eau à condenser (une cellule orageuse), mécanisme qui n'aurait eu aucun effet en l'absence de vapeur d'eau ! Cette dernière est-elle un aléa ou bien constitue-t-elle une vulnérabilité ?

En aval, le positionnement durable, sinon l'immobilité de l'orage, pendant plusieurs heures, va entraîner une concentration des eaux de ruissellement, concentration dont la vitesse sera fonction, par exemple, du tracé et de l'organisation plus ou moins hiérarchisée du réseau hydrographique, mais aussi de la pente et de l'imperméabilité du sol, agissant sur son coefficient de ruissellement. Il paraît difficile d'énoncer que la pente d'une rivière relève plus de la vulnérabilité que de l'aléa… de même pour les conditions géologiques. Dans ce cas il peut être admis que les phénomènes physiques et biologiques appartiennent plus à l'aléa qu'à la vulnérabilité.

Pourtant il y a bien une rétroaction de la vulnérabilité sur l'aléa puisque le ruissellement est accentué par le type d'occupation du sol : ainsi l'extension des systèmes péri-urbains (nombreuses maisons individuelles de banlieue avec leur jardinet et leur route d'accès), dépourvus de réseau évolué d'évacuation des eaux tend-elle à accentuer l'imperméabilisation du sol.

Dans la même logique, l'aisance avec laquelle une forêt va brûler, dépend par exemple du stress hydrique de la végétation, provoqué par une sécheresse durable (c'est bien un aléa météorologique) mais aussi par la structure de la biomasse. Effectivement, la structure de la forêt est liée à son histoire, à un éventuel débroussaillement opéré par l'homme ou certains animaux d'élevage (ovins et surtout caprins).

Au total, l'approfondissement de la notion de risque nécessite une révision de la conception classique trop dualiste.

1.2. Les confusions entretenues entre aléa et vulnérabilité.

Deux autres points méritent d'être cités, en particulier l'incompréhension grave de la notion d'aléa : il est défini en principe par sa période de retour (voir ci-dessous en 2.2.2.) qui n'a qu'une valeur moyenne. On assiste ainsi depuis quelques mois en région parisienne à un déménagement soudain et massif de toutes les richesses stockées en zone inondable (œuvres d'art, archives …) sous prétexte que la dernière crue importante de la Seine (fleuve traversant Paris) date de 1910, et qu'étant qualifiée de centennale, elle ne va pas tarder à se reproduire …

RISCURI SI CATASTROFE II/2003

Par ailleurs, un autre problème nous semble être la confusion devenue systématique entre l'aléa et la vulnérabilité par les médias, et même, ce qui est plus grave, par certains responsables et décideurs. Il est maintenant classique de voir dans la presse ou d'entendre même parfois dans des colloques que le nombre des catastrophes naturelles ne cesse de croître et augmentera encore d'avantage dans l'avenir. Cette dernière prédiction a d'ailleurs permis de justifier, aux yeux des compagnies d'assurances françaises, l'accroissement de leur tarif et donc des cotisations pour l'année 2003 !

Or, non seulement il n'existe actuellement aucune certitude d'un tel futur accroissement des catastrophes naturelles, mais encore il n'y a pas non plus de preuve sérieuse et étayée que les dernières décennies ont vu un tel accroissement… En effet, la confusion est savamment entretenue entre la fréquence des aléas et le coût qu'ils induisent. Or ces derniers sont en réelle augmentation parce que la vulnérabilité ne cesse d'augmenter : le nombre de rivières méditerranéennes dont le lit majeur (utilisé par les crues) est maintenant colonisé par des habitations ou des zones industrielles (alors qu'il était désert il y a 50 ans) ne se compte plus. La même crue n'a évidemment pas les mêmes conséquences aujourd'hui qu'auparavant. La rapidité avec laquelle l'information circule et la manière peu rigoureuse avec laquelle elle est traitée par les médias font le reste…

Par contre (cf 1.1.) il est fort possible que localement un même aléa ait des conséquences plus importantes aujourd'hui qu'il y a plusieurs décennies. Ainsi un même évènement pluviométrique peut entraîner une crue plus grave si le coefficient de ruissellement a augmenté avec la densité de population péri-urbaine. De même, l'exode rural et l'abandon des cultures se sont accompagnés d'une augmentation de la surface couverte par la forêt, et de la densité du sous-bois : cette strate arbustive moins entretenue qu'auparavant facilite la propagation des flammes, indépendamment des autres facteurs.

1.3. Le risque comme combinaison de l'aléa, de la susceptibilité et de la vulnérabilité.

Finalement il manque un maillon entre l'aléa et la vulnérabilité, qui est la potentialité qu'un aléa puisse entraîner un développement dangereux, la « susceptibilité ». Par exemple entre l'aléa pluie extrême au cours d'une journée, et la vulnérabilité caractérisant un lotissement de maisons imprudemment construites en bordure de rivière sur les seuls terrains plats de la localité, existe la « susceptibilité » à produire une crue. Cette susceptibilité regroupe en particulier les facteurs topographiques, géologiques … qui transformeront une pluie incapable de tuer quiconque à elle seule, en torrent de boue monstrueux et potentiellement dévastateur.

Chacun de ces facteurs forme ainsi une couche d'information qui pourra donner lieu à diverses superpositions et combinaisons grâce un Système d'Information Géographique (S.I.G.), mais chaque couche considérée isolément ne

RISCURI şi CATASTROFE II / 2003

nécessite pas obligatoirement d'être conçue par un S.I.G. , et doit être reconnue comme une source d'information intéressante en tant que telle, sans combinaison ultérieure obligatoire.

Nous proposons ainsi dans le tableau ci-dessous inspiré d'un de nos rapports pour le contrat européen « Tigra » (1997), un exemple de traitement simplifié des composantes et des étapes du risque d'incendie de forêt.

Tableau I. Etapes et composantes majeures de l'identification du risque d'incendie de forêt.

Type	Echelle	Entrée	Modélisation	Sortie	Pixel idéal	Utilisateurs
Susceptibilité	Locale à régionale	Carte de végétation, de pente, d'exposition, d'inflammabilité, des routes, etc…	Calcul de divers indices de susceptibilité	Carte de susceptibilité au feu	20-500 m	Scientifiques Aménageurs
Aléa (1)	Locale à régionale	Mise à feu et éclosion	Probabilité de mise à feu (foudre ou homme)	Carte de risque d'éclosion	20-500m	Scientifiques Aménageurs
Aléa (2)	Locale à régionale	Eclosion et conditions météorologiques	Possibilité de propagation selon météorologie	Carte de risque météorolo-gique d'éclosion et propagation	20-500m	Scientifiques
Vulnérabilité	locale	Inventaire de l'occupation humaine et des richesses	Divers calculs de coût	Carte de vulnérabilité	20-100m	Scientifiques Aménageurs
Risque	Locale à régionale	Différentes couches d'information	Combinaison des cartes précédentes	Carte complexe de risque	20–500m	Scientifiques Aménageurs Assureurs Public

RISCURI SI CATASTROFE II / 2003

Dans cet exemple sont indiqués plusieurs paramètres :

- Les facteurs de la susceptibilité des flammes à éclore et se propager, estimés à partir de diverses informations : nature (espèces) et morphologie de la végétation, pente et exposition topographiques,
- Une succession de deux aléas : l'un est la naissance de la flamme initiale (Aléa 1), l'autre est l'aléa météorologique (Aléa 2), c'est à dire l'occurrence d'advection d'air sec, chaud, sous forme de vent assez violent, survenant à la suite d'une

longue période d'absence de pluie. Tous ces facteurs favorisent l'inflammation et la combustion de la forêt.

- La vulnérabilité de cette forêt et de ce qu'elle contient, qui déterminera les conséquences de l'incendie. Cela comprend les arbres mais aussi d'éventuelles cultures enclavées risquant de brûler, les maisons et jardins, les usines, les automobiles, les élevages d'animaux, bien sûr les vies humaines, etc. Cela comprend aussi les éventuels aménagements qui auront été imaginés pour combattre le feu soit préventivement en empêchant et gênant sa propagation (débroussaillement, pare-feux…), soit pendant le feu : routes d'accès, présence d'une caserne de pompiers proche, de réserves d'eau, de moyens aériens, etc
- Le risque résultant, c'est à dire la probabilité qu'il se passe quelque chose de plus ou moins grave provient de la combinaison de toutes ces couches d'informations que l'on relie partiellement ou totalement entre elles au sein d'indices de risques, avec des relations obéissant à des lois puissances, multiplicatives ou additionnelles (modélisation plus ou moins poussée).

Ces informations sont en principe produites sur des cartes à échelle plus ou moins fine, dont l'élément de base, essentiel est le pixel (surface élémentaire minimale et homogène), et qui est destinée à divers utilisateurs.

2. Elaboration d'une carte des precipitations extremes quotidiennes: exemple en Toscane (Italie).

2.1. Originalité et situation du problème.

Dans le cadre du programme de recherche "TEMRAP" de la Communauté Européenne, centré sur la cartographie des risques naturels de toutes sortes et le développement d'un S.I.G. pour intégrer ce genre d'informations, nous avons été chargés de la cartographie du risque de fortes précipitations. La cartographie de ces pluies extrêmes constitue une base obligatoire par exemple pour l'hydrologue chargé de définir les lieux de crues possibles et leur gravité, ou pour les géomorphologues et géologues travaillant sur les risques d'éboulement ou de solifluxion. Par rapport aux termes définis dans le chapitre précédent, il s'agit ici de donner, par la cartographie, une dimension spatiale à la probabilité qu'une quantité importante de pluie se produisent sur un lieu quelconque d'une région. Le nombre de stations dotées d'un pluviographe capable d'enregistrer des données à échelle de temps très fine (heure ou minutes) étant très limité, nous avons choisi le pas de temps quotidien (24 h) pour la définition d'une pluie extrême capable d'engendrer des dégâts en aval. Est donc retenu pour chaque station, la quantité maximale de précipitation tombée en une journée, chaque année.

On peut alors pour chaque point d'un espace travailler selon deux hypothèses :

- rechercher la « durée de retour » d'une quantité de pluie quotidienne « extrême » annuelle donnée. C'est à dire calculer la probabilité qu'a chaque année,

RISCURI şi CATASTROFE II/2003

en moyenne, cette quantité d'être atteinte ou dépassée. Par exemple, si la probabilité de non-dépassement d'une valeur est de 0,99, cela signifie qu'un tel aléa n'a qu'une chance sur 100 de se produire chaque année, et que par extension, en moyenne, il se produit tous les 100 ans. Puisqu'il s'agit d'une probabilité, elle n'a aucune valeur de prédiction et n'empêche pas que deux aléas extrêmes se succèdent deux années de suite ! ce qui, pour le temps restant diminue la probabilité qu'un même événement se reproduise…

- calculer à l'inverse quelle est la quantité de précipitation quotidienne extrême probable tous les « n » années : tous les 10 ans (pluie décennale), tous les 100 ans (pluie centennale), etc.

La région d'étude est le nord de la Toscane (Italie), entre La Spezia et Pise. Elle est très montagneuse et on y distingue un bassin-versant (celui du Serchio), encadré par deux lignes de crêtes parallèles à la côte culminant à 1800-2000 m d'altitude. La ligne de crête la plus à l'ouest, constituée par les Alpes Apuanes, est située à 15 km seulement de la mer ; ce qui confère de fortes pentes au massif et favorise les ascendances orographiques très puissantes des masses d'air méditerranéennes prises dans un flux de S ou SW. Rares en été du fait de la persistance de conditions anticycloniques en surface et surtout en altitude, les ascendances (renforcées par cet effet orographique) se produisent avec l'arrivée de circulations cycloniques (talweg et gouttes froides sur l'Espagne) en automne, et peuvent encore se produire en hiver. La chaleur de la mer dans la deuxième moitié de l'année accentue l'instabilité verticale de l'air et fournit de grandes quantités de vapeur d'eau qui seront à l'origine des fortes pluies.

Cette région a été choisie parce qu'historiquement elle a fréquemment été victime de catastrophes, et continue à l'être, recevant certaines années des totaux pluviométriques impressionnants (tableau II) :

Tableau II. . Nombre mensuel d'épisodes pluviométriques $\geq$ 150 mm en une journée enregistrés dans le nord de la Toscane sur 49 postes (période de référence variable selon les postes, comprise au maximum entre 1958 et 1998).

J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
14	7	3	6	3	5	2	4	15	10	10	9

L'extension spatiale des précipitations exceptionnellement abondantes peut être considérable : le 28 octobre 1959 par exemple, 16 postes enregistrent plus de 150 mm le même jour. Mais en dehors de quelques cas spectaculairement étendus, les épisodes très pluvieux sont généralement assez localisés (sur 1 ou 2 postes) et engendrent par conséquent de très forts gradients spatiaux.

Ajoutons que contrairement à une opinion en vogue, la tendance actuelle des fortes pluies quotidiennes n'est pas du tout à la hausse généralisée : les calculs de tendance (trend) effectués ont montré que moins de 10% des postes ont une

RISCURI SI CATASTROFE II/2003

tendance positive, et que la plupart sont en baisse affirmée, trait que l'on retrouve également pour les séquences de 3 jours consécutifs de forte pluie. Si recrudescence des crues ou glissements de terrain il y a, son origine ne doit pas être recherchée dans un accroissement de la pluviométrie, mais plus en aval du cycle de l'eau, dans les modalités et conséquences du ruissellement.

Les deux étapes majeures de l'étude sont les suivantes :

- d'abord, constitution d'une base de données fiable comportant pour chaque poste la quantité de pluie associée à quelques durées de retour caractéristiques (10 ans, 100 ans …) ;
- ensuite reconstitution spatiale de ces champs pluviométriques caractéristiques selon une logique appropriée, permettant leur cartographie et donc de déterminer les endroits les plus exposés, information reprise en aval par les géomorphologues et les hydrologues.

2.2. Méthode et technique cartographique.

2.2.1. Sélection des stations et calcul des périodes des quantités de pluies associées aux périodes de retour choisies.

On ne saurait trop insister sur l'importance de l'étape, pénible mais essentielle, que constitue la critique des données disponibles, et donc la sélection des stations. Après une série de tests non détaillés ici, nous n'avons retenu que 49 postes s'étendant sur une période malheureusement inégale (de 23 à 41 ans) entre 1958 et 1998. Ce nombre de stations sélectionnées est un compromis entre une excellente fiabilité des données (peu de postes pluviométriques) et la meilleure base de départ pour l'interpolation spatiale des valeurs (beaucoup de postes).

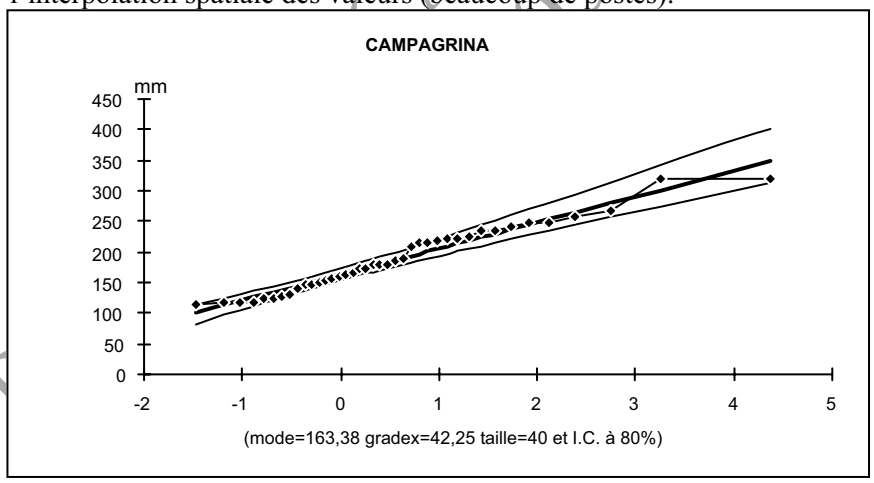

Figure 2. Ajustement d'une loi de Gumbel (droite avec intervalles de confiance de part et d'autre) à la série des précipitations quotidiennes maximales annuelles de Campagrina dans le massif des Alpes Apuanes (850 m d'altitude) de 1958 à 1997 (points).

Ensuite, l'hypothèse de travail retenue a été de considérer que la précipitation quotidienne maximale annuelle est distribuée selon une loi de Gumbel. Ce principe présente l'avantage d'associer une durée d'observation d'un an à chaque occurrence, telle qu'une valeur de fréquence $F(x_{0,9}) = 0,9$ par exemple, est en moyenne dépassée une fois sur dix. La période de retour est alors:

$$T(x) = \frac{1}{1 - F(x)}$$, soit ici T = 10 ans.

La figure 2 montre ainsi l'ajustement d'une loi de Gumbel, aux valeurs quotidiennes extrêmes de chaque année : la valeur maximale absolue est de 320 mm (à droite sur le graphique). Le calcul a montré que sa fréquence de non-dépassement est de 0,98 et donc la période de retour de cette pluie : 55 ans

Le calcul effectué pour tous les postes retenus permet d'obtenir le tableau III qui ne constitue ici que le début et la fin de la liste des stations :

Tableau III. Précipitation quotidienne maximale annuelle calculée pour différentes périodes de retour dans les stations toscanes.

Nom des stations	10 ans	50 ans	100 ans
ASCIANO PISANO	123	169	188
BAGNI DI LUCCA	110	133	143
BORGO A MOZZANO	114	139	150
BOSCOLUNGO	213	274	300
CALICE AL CORNOVOGLIO	146	184	200
CAMAIORE	135	181	200
CAMPAGRINA	252	316	343
		.....	
VARESE LIGURE	192	262	292
VIAREGGIO	106	144	159
VILLACOLLEMANDINA	148	203	226
VINCHIANA	118	153	168

On notera les impressionnantes quantités de pluie susceptibles de s'abattre sur cette région montagnarde méditerranéenne : 48 postes sur 49 dépassent 100 mm en 24 heures pour une durée de retour décennale, et encore 4 dépassent 200 mm ! Le seuil des 300 mm en 24 heures est dépassé pour 3 postes en valeur centennale... Ces abats spectaculaires ont évidemment pour conséquence des crues et glissements de terrain parfois très graves, favorisés par les fortes pentes.

2.2.2. Technique d'interpolation spatiale retenue pour la cartographie du champ pluviométrique.

Rappelons qu'il existe deux logiques majeures de reconstitution d'un champ spatial de données à partir de données ponctuelles.

Pour attribuer sa valeur la plus probable à un point non documenté on peut :

RISCURI ŞI CATASTROFE II / 2003

- soit se fonder sur les valeurs des points voisins documentés, en pondérant plus ou moins leur influence en fonction de la distance les séparant du point considéré. L'hypothèse d'autocorrélation spatiale doit être dans ce cas prouvée en particulier par l'usage du variogramme. L'ensemble des techniques fondées sur l'autocorrélation spatiale s'appelle techniques "BLUE" (Best Linear Unbiaised Estimation).

- soit se fonder sur les relations entre la valeur d'un point documenté et certains paramètres caractéristiques de son environnement. Ces derniers sont censés avoir une influence statistique (souvent proche d'une influence physique plus ou moins directe) sur la valeur (ici la pluie). Dans ce cas, on a recours à une régression multiple entre la pluviométrie et les variables "explicatives" (altitude, exposition, latitude, longitude, etc), à condition que l'intensité de cette relation soit suffisante (tests statistiques). C'est cette dernière logique qui a été retenue ici, l'hypothèse d'autocorrélation spatiale aboutissant souvent à une impasse en topographie complexe, du fait d'un réseau de postes pluviométrique toujours insuffisamment dense par rapport aux variations spatiales très fortes de la pluviométrie.

Que ce soit pour les périodes de retour de 10, 50, ou 100 ans la régression multiple "pas à pas" (stepwise) a permis de conserver 3 variables explicatives significatives, déterminables à l'aide du modèle numérique de terrain « NTT DEM », disponible sur Internet, avec une définition de 900m environ (30 secondes d'arc) :

- l'altitude Z : les précipitations augmentent avec l'altitude,
- la longitude X : la pluie diminue vers l'est et donc en s'éloignant de la mer,
- Le produit YZ (latitude x altitude) : la pluie diminue quand ce produit augmente, ce qui montre que le gradient pluviométrique vertical diminue vers le nord.

Les coefficients de corrélation multiple sont de 0,79 pour les périodes de retour décennales, et 0,74 pour les centennales, ce qui prouve qu'ici, le relief n'explique qu'un peu plus de 50 % de la variance des précipitations extrêmes (davantage en général pour des valeurs moyennes).

La part de variance non expliquée par la régression est responsable des résidus (pluie observée - pluie estimée) dont la localisation apporte une information qu'il serait dommage de négliger : ce que le relief n'explique pas a une structure spatiale modérément marquée, comme l'attestent les variogrammes avec une portée de 12 à 14 km, mais il serait dommage de ne pas utiliser cette information. Les résidus sont donc soumis au krigeage, ce qui attribue une valeur à chaque noeud de grille, ensuite ajoutée à celle obtenue par la régression.

La cartographie a été réalisée à l'aide de SURFER version 7 et le nécessaire Modèle Numérique de Terrain (MNT) est NTT (disponible sur Internet) dont la maille est de 30 secondes d'arc -soit environ 900 m-, précision suffisante

RISCURI SI CATASTROFE II / 2003

pour l'interpolation spatiale de pluies. La projection cartographique a été ramenée au Lambert III.

2.3. Résultats : exemple des cartes de pluies quotidiennes centennale.

La fiabilité d'une telle carte suppose de la rigueur pour constituer une série de données sérieusement sélectionnées, établir une relation validée entre la pluie extrême et l'environnement d'un lieu. Une fois établie, la carte est une précieuse source d'information sur les probabilités de pluie. Cela permet alors de proposer aux scientifiques travaillant en aval de quantifier les conséquences induites par de telles pluies, en dressant par exemple des cartes de risque de crue ou de glissements de terrain en fonction aussi de paramètres de susceptibilité (pente, géologie, etc).

Cette carte n'est donc pas une carte de « risque » au sens le plus complet, mais une carte d'aléa météorologique, étape obligatoire pour aboutir à une carte de risque plus global.

3. Cartes de susceptibilite et de risque de feux de foret

3.1. Les couches d'information.

Il s'agit ici, de tracer une carte de susceptibilité concernant le risque de feu de forêt dans une région méditerranéenne, ce domaine étant souvent menacé en été surtout par les incendies. La région choisie est encore la Toscane Dans cette problématique apparaissent très vite les limites de disponibilité de l'information, en particulier l'échelle spatiale des données très souvent trop grossière, et sauf si des études ou cartographies locales et ponctuelles ont été effectuées (provenant des Forestiers ou d'Universitaires), on est vite obligé d'adopter comme ici des pixels de plusieurs kilomètres de coté, ce qui n'est pas assez fin pour une bonne précision dans la détermination du risque…

Les sources d'information sont :

- le modèle numérique de terrain NTT (cf ci-dessus) ;
- la couverture du sol fournie par la base de données européenne « Corine landcover » ;
- une carte indiquant les routes, villages et villes de la région.

L'outil utilisé est le S.I.G. ArcView, en mode « raster ». A partir des différentes sources d'informations, il est possible de déterminer des classes de paramètres : pourcentage de couverture forestière (≥ 60%, 30-60%, <30%) ; typologie des pentes topographiques (≤ 15°, 3-15°, < 3°), classes d'altitude (ex : ≥ 800m, 300-800m, < 300m) qui vont constituer des couches d'information.

En effet, ces classes de paramètres sont ensuite utilisées dans deux indices de risque de Chuvieco indiquant soit le risque d'éclosion, soit le risque de propagation d'un incendie de forêt. Au sens que nous avons défini plus haut, il s'agit en fait de cartes (et d'indices) de susceptibilité, dont la taille (trop grande) du

RISCURI SI CATASTROFE II / 2005

pixel est de 5 km pour diverses raisons (parmi lesquelles la faible densité de certaines informations), ce qui toutefois n'enlève rien à la valeur de la démarche méthodologique…

3.2. Le « risque » (susceptibilité) d'éclosion.

L'indice d'éclosion de Chuvieco a été simplifié (manque d'information sur le rayonnement solaire et la vitesse du vent) ce qui le rend « permanent » et indépendant des conditions météorologiques, et il devient :

$$IE: 4R + 2V - A$$

Où

R = densité de routes (nombre de routes par pixel) ;
V = classe de couverture forestière ;
A = classe d'altitude.

L'interprétation est qu'à la suite d'un éventuel aléa de mise à feu d'origine naturelle (foudre) ou anthropique (volontaire par un pyromane ou involontaire par imprudence), la potentialité d'éclosion – donc la susceptibilité – est favorablement liée à :

- une forte densité routière (la plupart des incendies démarrent d'un bord de route), phénomène pesant d'un poids très lourd ;
- une forte couverture forestière (ce qui compte le plus pour l'éclosion étant la présence d'une strate herbacée et arbustive qui communiquera le feu à la strate arborée) ;
- une faible altitude (ce qui est une manière indirecte d'introduire des paramètres climatiques favorisant l'éclosion puisqu'au contraire de la montagne, en plaine l'air est plus chaud, plus sec et les pluies moins abondantes (surtout en été).

3.3. Le « risque » (susceptibilité) de propagation.

C'est un autre indice, de Chuvieco également, qui a été utilisé cette fois pour exprimer la susceptibilité de propagation des flammes, une fois le feu éclos sur quelques m^2 ou dizaines de m^2. Il est :

$$IE: 6V + 4P - A - R$$

Où

V = classe de couverture forestière ;
P = classe de pente ;
A = classe d'altitude ;
R = densité de routes (nombre de routes par pixel).

Ici, un facteur facilitant l'éclosion, comme les routes le long desquelles sont jetés de nombreux mégots de cigarettes etc, constitue au contraire un obstacle à la propagation : c'est à la fois un barrage physique exerçant une effet de coupure du combustible, et un axe par lequel les pompiers vont arriver pour éteindre les flammes. Inversement, une importante couverture forestière et une forte pente

RISCURI SI CATASTROFE II / 2003

favorisent la propagation. En effet, le long d'une pente forte les flammes irradient une surface végétale plus importante que sur une pente nulle, préparant ainsi la combustion par pré-chauffage et déshydratation, ce qui accélère la propagation. De plus on constate fréquemment la présence d'une brise thermique remontant la pente en journée, ce vent ayant pour effet de favoriser la combustion.

CONCLUSION

Dès lors qu'il s'agit d'être opérationnel, c'est à dire de quantifier, de donner une valeur qui engage, et non plus de discourir, le concept de risque doit être approfondi au delà de la classique séparation aléa - vulnérabilité.

Nos sociétés sont sensibles aux risques naturels d'origine climatique et les décideurs doivent donc être en possession d'informations leur permettant d'évaluer non seulement la probabilité qu'un aléa (pluie ou mise à feu par exemple) se produise, mais encore d'estimer si le terrain rencontré par l'aléa est favorable (susceptible) au développement d'un événement (crue ou feu de forêt) dont les conséquences seront fonction de la vulnérabilité (nature et coût des dégâts).

La plupart des cartes de risque provenant d'une cartographie automatique (par exemple Surfer) ou d'un S.I.G. (par exemple ArcView) ne traitent en fait que d'une composante du risque. Représenter une carte complète du risque suppose une mise à jour permanente de cette dernière, à un pas de temps parfois horaire, puisque les conditions météorologiques évoluent parfois très rapidement. La conséquence en est une grande complexité car il n'est pas facile de maintenir combinées en permanence de telles sommes d'informations d'échelles spatiale et temporelle très variées.

C'est pourquoi l'on distingue fréquemment deux familles de « niveaux » de risque : ceux évoluant sur un long terme (susceptibilité, vulnérabilité) et ceux évoluant très rapidement, nécessitant dans la pratique une évaluation en temps réel (de type météorologique), exemple non développé ici.

RISCURI SI CATASTROFE
II / 2003

BIBLIOGRAPHIE

1. Caredio, F., D'amato-Avanzi, G., et al. (1996), *La catastrofe idrogeologica del 19/6/1996 in Versilia et Garfagnana (Toscana, Italia): aspetti geomorfologici e valutazioni idrauliche*, Convegno internazionale 5-7 nov., Alba (Italia).
2. Carrega, P. (1992), *Topoclimatologie et habitat*, Thèse Doctorat d'Etat, ronéo, Nice, 475 p. + annexes. Publiée en 1994 dans la Revue d'Analyse Spatiale, Nice, n° 35 et 36. 408 p.
3. Carrega, P. (1993), *Les pluies azuréennes de septembre-octobre 1992*, Revue de Géographie de Lyon. Risques naturels dans le couloir rhodanien. Les excès pluviométriques. Vol. 63. n°2-3 1993, pp. 115-124.

4. Carrega, P. (1994), *Risque de feu de forêt et habitat dispersé dans le sud de la France Finisterra*, vol. XXVII, n° 53-54, pp. 95-114, Lisbonne.
5. Carrega, P. (1995), *Les précipitations et la situation météorologique responsables de la crue exceptionnelle du Var, le 5 novembre 1994,* Nimbus, Societa meteorologica subalpina, Torino, n° 6-7, pp. 68-73.
6. Carrega, P. (1997), *Phénomènes climatiques extrêmes : de la statistique aux processus. Exemples des fortes pluies en Méditerranée*, Revue d'Analyse Spatiale, Nice, n° 38-39. Mélanges Julian. Nice, pp. 157-166.
7. Carrega, P. (1997), *Programme Environnement et climat de la C.E*, Contrat TIGRA. Final Report, 17 p.
8. Carrega, P., Garcia, E., Sliti, F. (2000), *Heavy rainfall and fire risk*, Programme Environnement et climat de la C.E. Contrat TEMRAP. Final report, 47p.
9. Chuvieco, E., Congalton, R.G. (1989), *Application of remote-sensing and Geographic Information System to forest fire hazard mapping*, Rem. Sens. Environ.29, pp. 147-159.
10. Laborde, J.P. (1995), *Les différentes étapes d'une cartographie automatique: exemple de la carte pluviométrique de l'Algérie du nord,* Public. de l'A.I.C., vol. 8, pp. 37-46.
11. Rapetti, C., Rapetti, F. (1996), *L'evento pluviometrico eccezionale del 19 giugno 1996 in alta Versilia (Toscana) nel quadro delle precipitazioni delle Alpi Apuani,* Atti Soc. Sci. nat., Mem., Serie A, 103 (1996), pp. 143-159.
12. Rapetti, F., Vittorini, S. (1994), *Le precipitazioni in Toscana: osservazioni sui casi estremi*, Riv. Geogr. Italiani, pp. 47-76.

N.B. : Ce travail a été partiellement financé par la Commission des Communautés Européennes. Contrat TEMRAP (DG XII) n° ENV 4 - CT97 0589.

RISCURI ŞI CATASTROFE
II / 2003

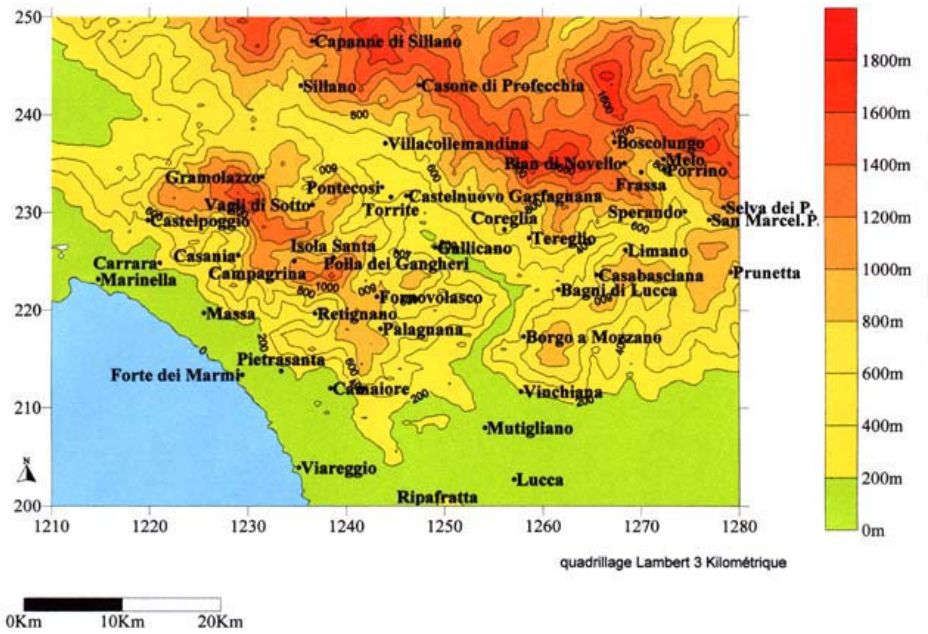

Figure 1. Carte du relief de Toscane (Italie). D'après NTT DEM.

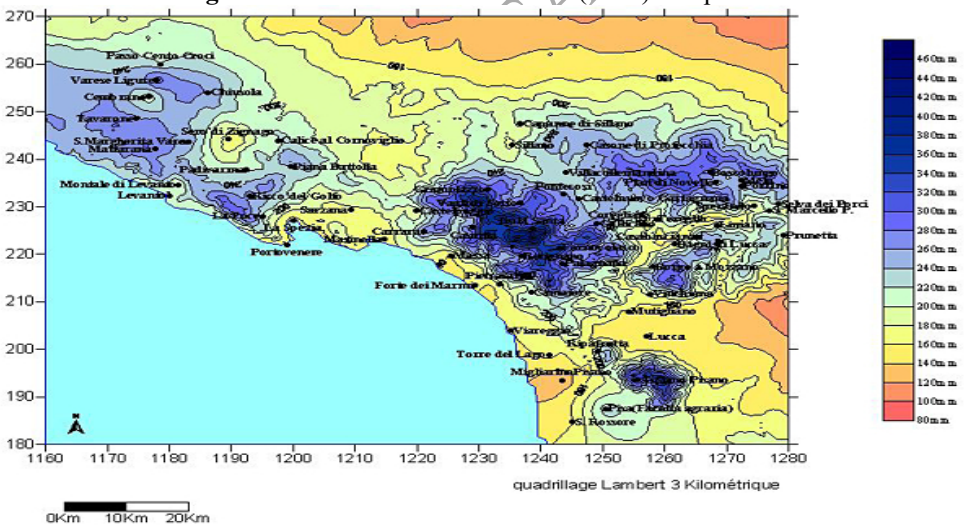

Figure 3. Cartographie des précipitations quotidiennes maximales annuelles d'une période de retour de 100 années par la technique de régression multiple avec paramètres topographiques, et krigeage des résidus. D'après Carrega, Garcia (2000).

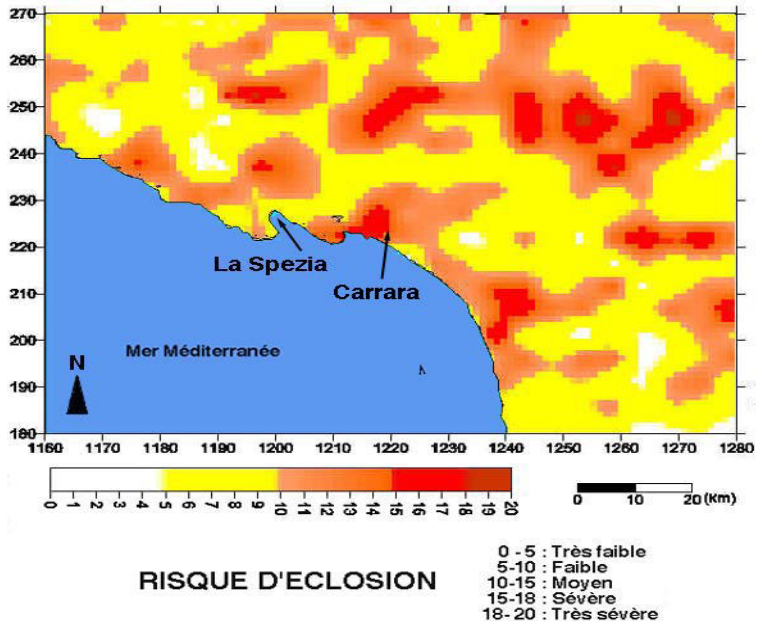

Figure 4. Carte représentant la susceptibilité d'éclosion de feu de forêt en région Toscane (Italie). D'après Carrega, Sliti (2000) modifiée.

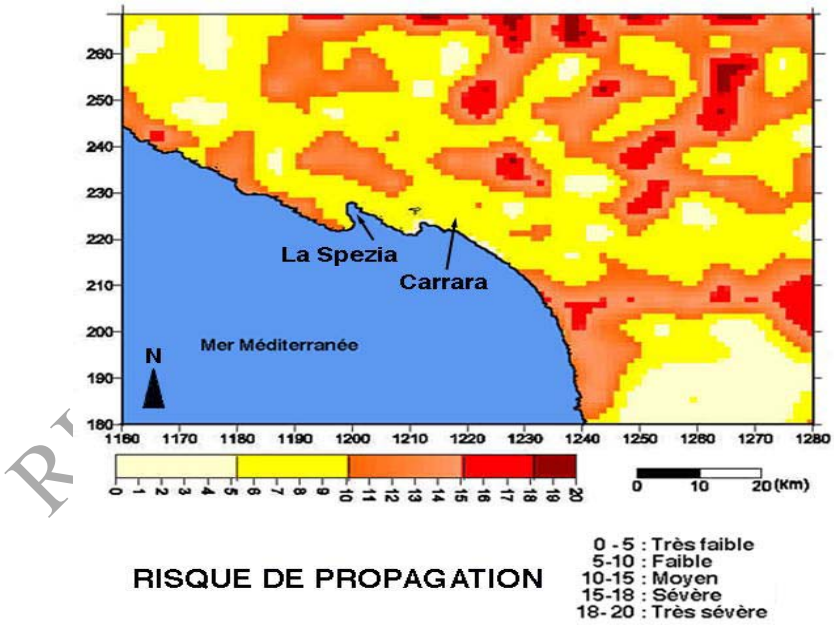

Figure 5. Carte représentant la susceptibilité de propagation de feu de forêt en région Toscane (Italie). D'après Carrega, Sliti (2000) modifiée.