

La criticalité auto-organisée des feux de forêts marocaines

L. ABIBI¹

(Reçu le 25/07/2013; Accepté le 10/12/2013)

Résumé

La Criticalité Auto-Organisée (CAO) des feux de forêts marocaines est étudiée à partir d'une analyse d'une série de données historiques (1960 à 2011). En effet, cette analyse montre que les relations entre les surfaces brûlées annuelles normalisées par la surface brûlée globale et la fréquence des incendies annuels par la surface brûlée annuelle sont décrites par des distributions en loi en puissance (queue lourde) et non en distribution gaussienne (queue mince), et ceci quelque soit la magnitude du feu. Aussi la relation log-log de la fréquence-taille ou « rang-taille » des incendies vérifie son adéquation avec une droite. L'invariance d'échelle temporelle et spatiale des feux est vérifiée. Ainsi les feux de forêts marocaines satisfont la criticalité auto-organisée. Les résultats des données réelles relatives aux feux des forêts marocaines sont confrontés avec ceux des simulations réalisées par notre logiciel « LoSiFire » (automate cellulaire basé sur le « jeu de la Vie »), leur bonne adéquation est obtenue. Par conséquent notre logiciel « LoSiFire » s'applique bien et vérifie les caractéristiques de la criticalité auto-organisée. En effet, notre automate cellulaire est un système critique auto-organisé. Enfin les caractéristiques de la criticalité auto-organisée ont des implications pratiques pour la protection des forêts contre les incendies et constituent un moyen d'évaluation et d'élaboration de la stratégie de prévention et de lutte contre les feux de forêts.

Mots-clés: Incendie de forêt, Série de données historiques, Loi en puissance, Queue mince, Queue lourde, Loi rang-taille, Criticalité auto-organisée (CAO), Automate cellulaire « LosiFire »

INTRODUCTION

Les approches analytiques, bien rigoureuses, ne permettent pas de tenir en compte la complexité des phénomènes naturels et anthropiques, afin que leurs comportements observés expérimentalement soient reproduits. Cependant les paradigmes basés sur des approches phénoménologiques sont bien adaptés pour modéliser leurs processus dynamiques sous-jacents.

La criticalité auto-organisée (CAO) proposée par Bak, (Bak et al., 1987) comme une théorie pour étudier les fractales et le bruit en $1/f$ composé de signaux de toutes fréquences, dont les amplitudes fluctuent inversement à celles-ci, montre que l'ampleur d'un événement est inversement proportionnelle à la fréquence de son occurrence. En effet, dans le cas du bruit en $1/f$ qui existe dans de nombreux phénomènes naturels et qui relèvent de la criticalité auto-organisée, tels que, les feux de forêts, les krachs boursiers, l'intensité des tâches solaires, les séismes... Il est par conséquent révélateur de la présence de corrélations à toutes les échelles tant spatiales que temporelles. Sa transformée de Fourier (sa densité spectrale de puissance exprime la répartition de la puissance entre les différentes fréquences) est une loi en puissance en f^α (avec α proche de 1).

Lors des dernières décennies, plusieurs Chercheurs ont manifesté leur fort intérêt à la criticalité auto-organisée (CAO), pour décrire des systèmes qui évoluent dans un état d'équilibre critique indépendamment de leurs conditions initiales et sans un ajustement de l'un de leurs paramètres. Par opposition aux mouvements stochastiques,

qui sont régis par une absence de corrélations. La criticalité auto-organisée (CAO) présente des corrélations tant au niveau spatial qu'au niveau temporel sous forme de lois en puissance. Cette caractéristique émergente est inhérente aux phénomènes dits « complexes ». La (CAO) est considérée semblable au mécanisme du bruit du scintillement « bruit en $1/f$ », remarqué dans plusieurs phénomènes dynamiques.

En effet, la (CAO) présente deux facettes importantes (Bougherira, 2011) :

D'abord, la criticalité qui exprime l'évolution d'un système vers un état critique déterminé par des corrélations en loi en puissance. Cette propriété émane de l'analogie avec le phénomène critique des transitions de phase du second ordre.

Ensuite, l'auto-organisation exprime que l'état critique est atteint seulement en raison des interactions intra système.

Enfin, le bruit en $1/f$ et la structure fractale demeurent les signatures principales des systèmes critiques auto-organisés (Back et Chen, 1991).

Les incendies de forêts peuvent être interprétés comme une variante des systèmes critiques auto-organisés, en étant des modèles de ruptures soudaines et majeures entre deux états au voisinage d'un seuil critique (Solé et al., 1999 ; Pascual and Guichard, 2005).

La (CAO) offre une explication pour les distributions en loi de puissance de certaines variables physiques de systèmes complexes, elle est utilisée pour expliquer l'origine des

¹ Département des Ressources Naturelles et Environnement, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, B.P. 6202 Rabat- Instituts, Rabat, Maroc

lois relatives aux tremblements de terre, aux avalanches, aux éruptions solaires et aux incendies de forêts... En l'occurrence, les incendies de forêts sont analogues à des systèmes critiques auto-organisés (Bak et al., 1987), cette analogie a été démontrée par l'introduction d'un modèle de feu de forêt basé sur un automate cellulaire probabiliste (Drossel et al., 1992),

Les feux de forêt ont été observés pendant des siècles dans le monde entier, et d'énormes ensembles de données sont accessibles sur le web. Ils contiennent de longues séries de données relatives aux incendies de forêts recensés par endroit, l'heure de l'événement, et la zone brûlée. En effet, l'Espagne a commencé sa mise en mémoire des événements feux de forêt à partir de 1960 (Mangiavillano, 2008), la France (qui dispose d'une base de données Prométhée) et l'Italie ont commencé dans les années 70, la Grèce et le Portugal se sont mis à partir des années 80. Le Canada possède une base de données sur les gros incendies (de plus de 200ha) disponible et libre sur le web. Le Maroc a entamé sa collecte depuis 1960 et le Chili en 1963, les deux pays disposent d'une « même » signature de surface brûlée moyenne des feux de forêts (10 ha). L'écart entre les pays est assez considérable en matière de mémorisation des incendies.

Les analyses statistiques de ces ensembles de données ont permis aux Chercheurs d'identifier, sur une base purement empirique, les caractéristiques générales des feux de forêt. Malamud et al. (1998) et Riccota et al. (1999) furent les premiers à étudier des statistiques des forêts brûlées aux USA et en Australie. Ils ont abouti à la même conclusion, à savoir que les zones brûlées sont réparties selon une loi de puissance. Quelques années plus tard, les premières études sur les distributions temporelles des événements d'incendie de forêts sont réalisées (Telesca et al., 2005; Lasaponara et al., 2005; Ricotta et al., 2006). Leur résultat principal est la découverte d'un degré élevé du temps-clusterisation, qui signifie que la présence de grands événements imite le processus d'apparition de petits événements, permettant ainsi de modéliser les grands feux qui sont rares sur la base des petits feux abondants. Ceci est parfaitement montré dans Corral et al. (2008). Telesca et al. (2005) ont montré aussi la présence de structures de regroupement temporelles dans les séquences d'incendies de forêts enregistrées de 1980 à 2005 au Portugal continental. Leurs résultats montrent la présence de périodicités journalières et annuelles, superposées sur un comportement d'échelle. Par conséquent la séquence des feux de forêt est un processus temps fractal avec un degré assez élevé de temps-clusterisation des événements.

Au Maroc, les séries de données relatives aux incendies de forêts n'ont pas fait l'objet d'étude qui peut s'inscrire dans ce phylum. Néanmoins, la série 1960 à 2002 est exploitée lors d'une étude réalisée par le Ministère de l'Aménagement en 2005 (Kobe-Hyogo, 2005) pour tirer seulement une conclusion relative à une moyenne annuelle des surfaces brûlées de 3000ha/an, de même une autre étude menée par le Secrétariat d'Etat auprès du Ministère de l'Energie en 2008 (Risques Majeurs, 2008) de la série 1960 à 2007, a abouti au constat : selon le « Rapport d'évaluation des incendies de forêts- Campagne 2007 » publié par le Haut commissariat aux Eaux et Forêts, que « le nombre d'incendies de forêts ne cesse d'augmenter surtout

depuis l'année 1994. En terme de superficie, la variabilité interannuelle a également une tendance à la hausse ».

METHODES

Modélisation et simulation

Loi en puissance

Les études antérieures (Mangiavillano, 2008) des distributions des incendies de forêt ont utilisé la moyenne arithmétique pour la détermination des tendances de ces séries. Cette moyenne montre des ordres de grandeur, mais le recours à elle n'est pas sans conjectures, car elle suppose que l'erreur dans la série étudiée est modélisée par une distribution gaussienne (normale). En effet, une courbe symétrique est liée à cette approche gaussienne du hasard. Mais les travaux de Poincaré (Ed. Gabay, 1987) ont mis fin à ce que l'on croyait être une loi universelle dans la nature, alors qu'elle ne peut correspondre qu'à certains processus très particuliers.

Cette hypothèse de normalité présente un danger à la représentation des risques naturels. En effet, la courbe gaussienne possède des queues minces dans le sens où les grands événements probables, mais très peu fréquents sont négligés par elle. Dans la thématique qui nous intéresse, la modélisation gaussienne sous-estime ainsi la prise en compte des très grands feux de forêt. Enfin la moyenne arithmétique biaise l'appréhension des processus complexes dans la nature. D'autre part, le rapprochement du Maroc et du Chili (ont même signature (10 ha) n'est-il pas révélateur d'un biais méthodologique ?). Où bien la moyenne arithmétique amène-t-elle à comparer des pays aux comportements sociétaux et caractéristiques climatiques très différents. In fine, la moyenne arithmétique en tant que paramètre d'analyse d'une distribution statistique, peut amener à un changement structurel profond au cours du temps de la distribution en question et sa considération comme un processus stable. De même, la signature de 10ha peut être simultanément obtenue par des incendies aux alentours de 10 ha et par des incendies très disparates (une prédominance de petits feux sur une minorité de grands feux). Par conséquent, à la différence de la gaussienne, la loi en puissance permet de prendre en considération les très grands feux (phénomènes extrêmes) malgré leur rareté. Les figures (a, b) ci-dessous montrent en effet, les caractéristiques de chacune des distributions (la gaussienne et la loi en puissance).

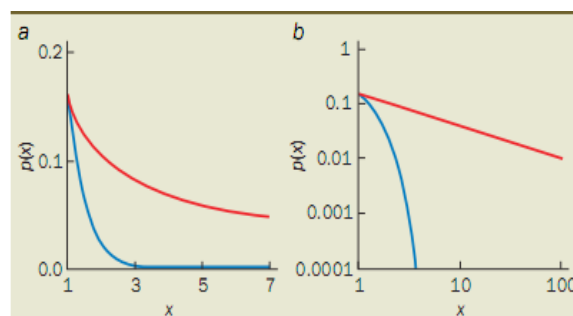


Figure 1: a) Les queues des deux distributions : - la bleue : Gaussienne à queue (très mince) asymptotique, - la rouge : distribution en loi de puissance (queue lourde). b) En représentation bi-logarithmiques, la loi de puissance devient une ligne droite.

La modélisation en loi en puissance est selon la forme : $y = \beta x^{-\alpha}$ où α est appelé exposant critique de la loi, variant entre 1 et 2.5 β , un nombre. Elle est appelée aussi loi de Pareto ou loi de Zipf.

C'est une alternative, elle montre que le phénomène étudié se présente à toute échelle et sous une forme covariante. En l'occurrence, les formes du vortex du tourbillon d'un évier et celle d'un cyclone sont semblables. Plusieurs processus anthropiques et naturels, comme les tailles des villes, les fréquences de mots dans un texte et celles des magnitudes des tremblements de terre, sont régies par une distribution en loi en puissance. Cette loi de puissance permet de comprendre la probabilité élevée des très grands événements, alors que la queue asymptotique exponentielle de la gaussienne les présente peu vraisemblables. La loi en puissance rend compte que les petites occurrences sont très fréquentes contrairement aux très grandes rarissimes mais qui restent assez probables. Les scientifiques ont remarqué que plusieurs phénomènes naturels très distincts pouvaient être régis par une même loi statistique. Cette loi est de type loi en puissance, elle est vérifiée dès que plusieurs entités de comportement individuel simple commencent à interagir entre elles. Ces phénomènes sont invariants d'échelle (lois d'échelle), c'est-à-dire qu'ils n'ont pas d'échelle caractéristique. Cette invariance d'échelle induit aussi l'existence d'une organisation dans ces systèmes et aussi dans leurs données. En effet, des lois d'échelle ont été mises en évidence dans des natures et des réalités très différentes (phénomènes naturels, géographie humaine). L'enjeu des comportements en loi d'échelle est la mise en évidence de relations, de mécanismes de transfert et de cascades entre échelles et in fine, à l'obtention de la notion d'auto-similarité, c'est-à-dire de fractalité inhérente à la criticalité auto-organisée. L'information ainsi extraite de l'observation de données est indépendante de l'échelle de mesure. La présence de corrélations justifie aussi la nature persistante des phénomènes régis par les lois d'échelle, dont la fonction de corrélation est aussi une loi de puissance : $C(\tau) \approx \tau^{-\delta}$

En effet, les tendances en loi de puissance des séries persistantes (Délignières, 2007) sont caractérisées par une « mémoire » à long terme, c'est-à-dire qu'à long terme les événements actuels et les événements futurs sont corrélés. En conséquence chaque observation mémorise les événements qui l'ont précédé. Plusieurs modèles conceptuels reflètent de tels phénomènes invariants d'échelle, ce sont des modèles de type « automate cellulaire » (Drossel et Schwabl, 1992) ou modèle « tas de sable » (Bak, 1996).

La définition générale d'une distribution en loi en puissance des surfaces brûlées lors d'un incendie est :

$$N(S_B) = \beta S_B^{-\alpha} \quad (1)$$

En effet, les tendances en loi de puissance des séries persistantes (Délignières, 2007) sont caractérisées par une « mémoire » à long terme, c'est-à-dire qu'à long terme les événements actuels et les événements futurs sont corrélés. En conséquence chaque observation mémorise les événements qui l'ont précédé. Plusieurs modèles conceptuels reflètent de tels phénomènes invariants

d'échelle, ce sont des modèles de type « automate cellulaire » (Drossel et Schwabl, 1992) ou modèle « tas de sable » (Bak, 1996).

La définition générale d'une distribution en loi en puissance des surfaces brûlées lors d'un incendie est :

$$N(S_B) = \beta S_B^{-\alpha} \quad (1)$$

$N(S_B)$: la distribution des surfaces brûlées ;

S_B : la surface brûlée annuelle.

La relation (1) montre que la forêt est constituée d'amas de différentes tailles. La probabilité pour qu'un amas d'arbres (**a**) prend feu est :

$$N^*(a) = a N(a) \approx a a^{-\alpha} \approx a^{-(\alpha-1)} \quad (2)$$

Ainsi la fréquence d'occurrence des surfaces brûlées supérieures à une surface seuil est :

$$\sum_{a'=a}^{\infty} N^*(a') = \sum_{a'=a}^{\infty} a' N(a') \approx a^{-(\alpha-2)} \quad (3)$$

D'après Mandelbrot (Mandelbrot, 1982) et de l'équation (3) on a :

La dimension fractale du feu pour un réseau de dimension deux :

$$D_{\text{feu}} = 2(\alpha-2) \quad (4)$$

L'amas est ainsi un objet fractal avec une dimension fractale β (Drossel and Schwabl, 1992).

$$d = \beta (\alpha - 1) \quad (5)$$

La dimension topologique du réseau étant $d=2$, d'où

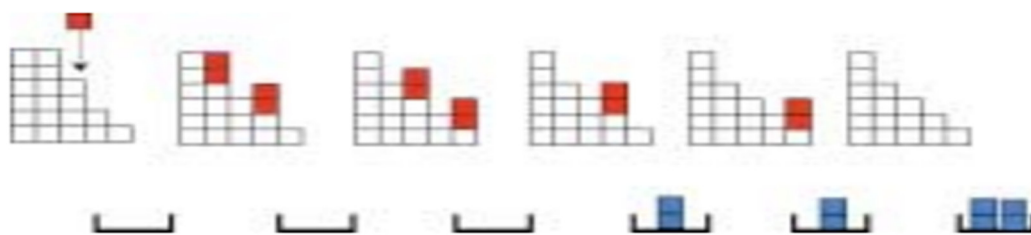
$$\beta = 2/(\alpha - 1) \quad (6)$$

La distribution en loi de puissance offre ainsi une structure statistique qualifiée comme « une fonction de distribution de quantités mesurables » (Bak, 1996).

Système critique auto-organisé

Le principe de la criticalité auto-organisée (CAO) a été proposé par Bak et son équipe (BTW) en 1987, comme théorie phénoménologique et non analytique, décrivant des systèmes dynamiques qui s'ordonnent naturellement vers un état critique (attracteur), de manière indépendante de leurs conditions initiales et de n'importe quelle force extérieure. Bak propose, qu'à l'état critique, les petites entrées dans le système provoquent des événements d'une quelconque grandeur durant des périodes d'activités intermittentes. Bak et son équipe ont démontré le concept de la CAO en étudiant un réseau de pendules à torsions couplées. Ce modèle a montré l'incroyable nature d'un système dissipatif ouvert, qui s'est auto-organisé en un état critique invariant d'échelle, ayant des « avalanches de toutes tailles et de toutes durées ». Cette implémentation explique la grande diversité des phénomènes naturels, dont les incendies de forêts sont une bonne variante. Ceci explique cette variabilité, qui prend différentes formes selon l'espace et le temps, qui « est le reflet de l'état critique auto-organisé de morceaux en interaction ».

L'énergie déployée par un événement dépend non seulement de sa position par rapport à ses voisins, mais également de toutes les énergies non déployées



Version élémentaire de l'automate cellulaire imaginé par BTW. Son fonctionnement est basé sur deux règles élémentaires. On lâche, au hasard, un petit carré (rouge) sur un point quelconque de la pyramide. La différence de hauteur entre deux piles adjacentes ne peut dépasser deux. Si c'est le cas, la pile s'écroule vers le bas en entraînant non pas une, mais deux particules qui vont dévaler sur la colonne adjacente qui peut, à son tour, s'écrouler. Et ainsi de suite jusqu'à la sortie (en bleu). C'est l'effet d'entraînement genre « domino » bien connu des avalanches réelles.

Figure 2: Modèle du «Tas de sable» d'après j. Duran (Bulletin de l'Union des Prof. De Phys.et Chimie)

antérieurement par les autres événements. Enfin les modèles ont évolué jusqu'au « Tas de sable » (Bak, 1996), modélisé selon la figure ci-après (Duran).

Le principe des systèmes critiques auto-organisés se retrouve dans des phénomènes naturels se trouvant dans un état de non équilibre, présentant plusieurs degrés de liberté, et dont les interactions des variables les constituant sont non- linéaires. Ces systèmes fluctuent de manière spontanée autour de leur point critique comme ils sont contraints par une sollicitation lente. Cette attraction vers le point critique a rendu la criticalité auto-organisée apte pour l'interprétation de l'omniprésence des lois puissance prédites par la physique statistique et leurs applications dans plusieurs phénomènes naturels (les séismes, les crues, l'Internet, l'économie,...).

En effet, un état critique est rencontré dans un incendie de forêt, qui, au voisinage de ce point critique, on a une présence d'une invariance d'échelle (transition de phase de second ordre) dans la taille des amas d'arbres brûlés et une longueur de corrélation infinie, c'est-à-dire que le feu peut se propager sur de très grandes distances au sein de la forêt.

Notre logiciel : l'automate cellulaire « LoSiFire »

Dans un article précédent, nous avons élaboré un automate cellulaire, appelé «LoSiFire», basé sur le principe du «Jeu de la vie » et dont le « tirage » initial se fait selon la méthode de Monte Carlo (nombres aléatoires). Il permet la simulation d'incendies de forêt sur une grille (réseau) carrée pour différentes percolations, dépendantes de la densité de la forêt et pour deux types de voisinage ((4 et 8) ou (Von Neumann et Moore)). Les voisinages de Von Neumann et de Moore correspondent respectivement, à la propagation du feu au sein de la forêt selon quatre ou huit directions. «LoSiFire» permet aussi un saut du feu à l'intérieur de la forêt. La taille de l'incendie est quantifiée en termes du nombre d'arbres brûlés. Le déclenchement du feu peut être amorcé de n'importe quel point de la forêt. Aussi la dimension du réseau est fixée a priori et peut atteindre 70*70 cellules. Les seuils de percolation p respectifs aux différents voisinages ont été trouvés (0.6 et 0.22). A chaque étape de l'évolution du feu, une scène de l'impact du feu est observée, en outre un comptage du nombre d'arbres brûlés est obtenu.

RESULTATS ET DISCUSSION

Notre étude porte sur l'analyse des données historiques (1960 - 2011) des feux de forêts marocaines. Cette série présente l'effectif de feux et la surface brûlée recensés annuellement à l'échelle nationale depuis 1960, date qui correspond au premier recensement des incendies de forêt au Maroc.

Depuis 1960 jusqu'à l'année 2011, le phénomène d'incendies de forêt au Maroc représente 14127 événements et une surface brûlée globale (S_g) égale à 162422 hectares. L'année 1983, est une année de sécheresse qui a connu 350 incendies avec une surface brûlée de 17730 ha (Opt. médit., 1999) (d'autres sources sur le web affectent pour cette année 360 incendies et 11500 ha comme surface brûlée).

La série (1960-2011) ne permet pas de saisir et caractériser le degré d'atteinte de chaque région écologique. Les magnitudes des feux ne sont pas mentionnées, c'est une série de totaux. Ainsi la qualité des recensements est sujette à discussion.

Notre approche pour étudier la série est basée sur la théorie des systèmes critiques auto-organisés régis par des lois en puissance. Contrairement à la distribution de Gauss, la loi en puissance indique que les séries de feux sont largement dominées par les petits feux qui semblent ne pas être pris en considération lors des recensements.

Les variables que nous avons considérées dans l'étude d'incendie de forêt sont : la taille de la surface brûlée et l'effectif des feux.

La première variable correspond ainsi à l'agressivité globale du phénomène sur une période et dans un espace géographique donnés. Quant à la seconde, elle renvoie à sa fréquence d'apparition dans un espace géographique durant cette même période. La relation entre les deux variables est tout à fait fondamentale pour comprendre et modéliser la nature complexe, résultant d'une multiplication d'interactions non linéaires entre processus physiques, climatiques et anthropiques, variable et anormale du phénomène incendie de forêt.

L'histogramme (Figure 3) correspondant à la série considérée et objet de l'étude permet de constater une nette différence entre la distribution des données (les surfaces brûlées) et la distribution de Gauss. L'enveloppe

de l’histogramme ne concorde pas avec une courbe en cloche, ce qui montre bien qu’une distribution de Gauss est inadéquate pour aborder la thématique des feux de forêt au Maroc. La gaussienne ayant une queue asymptotique (très mince, 99.7% des événements sont considérés entre $\mu-3\sigma$ et $\mu+3\sigma$, il y a très peu de chance qu’un événement s’écarte de la moyenne de 3σ), ne permet pas donc de prendre en considération les grands feux (les événements extrêmes).

La relation « rang-taille » (Fig.4), liant le rapport (S_B/S_g) de la surface brûlée annuelle sur la surface brûlée globale (S_g) le long de la période étudiée (1960-2011), au rapport (NI/S_B) du nombre d’incendie annuel par la surface brûlée annuelle (S_B) vérifie la loi en puissance (Fig.4) avec l’exposant $\alpha=0.67$ (inférieur à 1), qui quantifie le ratio des petits feux sur les grands. Ainsi le régime de feux des forêts marocaines est caractérisé par une domination des grands feux. De même que la relation bi-logarithmiques (Fig.5) est une ligne droite avec une pente (α) et un paramètre b élevé en valeur absolue (grande pression des feux par unité de surface (1 ha)) (ordonnée, quand $\alpha=0$). Par conséquent le couple $(\alpha,b)=(0.67,-2.249)$ est caractéristique des feux de forêts marocaines.

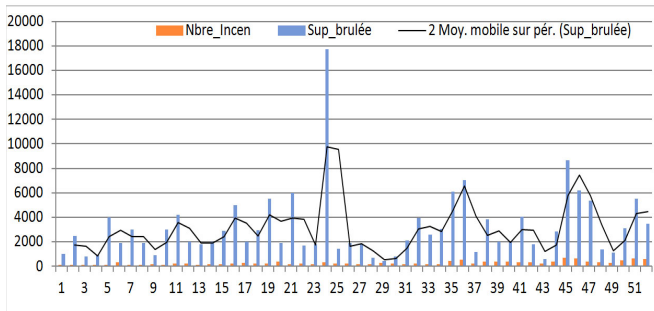


Figure 3 : Enveloppe de l’histogramme relatif à la série 1960-2011; (S_B =Sup_brulée: Surface brûlée annuelle en hectares)

En effet, les pertes causées par les feux aux forêts marocaines satisfont une bonne loi en puissance, et une ligne droite pour un nuage de points épais dans le plan log-log dont la pente est $\alpha=0.67$, et $b=-2.249$, ce qui prouve que la série des feux des forêts marocaines est une série des grands feux ($\alpha < 1$). Comme le montrent les tracés correspondants aux (Fig.4-5) le phénomène « incendie de forêts marocaines » est régi par des lois en puissance, donc invariant d’échelle (caractéristiques similaires et satisfaction d’une loi en puissance à n’importe quelle échelle(décennies)). Enfin, cette invariance d’échelle résulte de dynamiques sous-jacentes au phénomène, et non d’une coïncidence des statistiques. Une loi de puissance et une auto-similarité sont associées à un phénomène critique et auto-organisé, par conséquent les feux de forêts marocaines satisfont la criticalité auto-organisée.

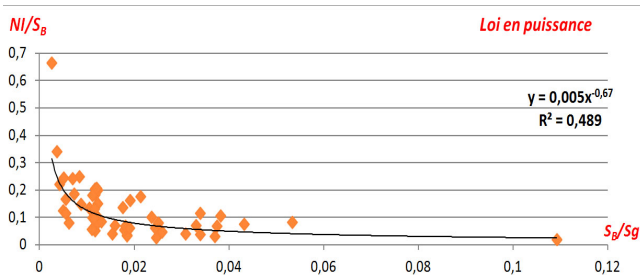


Figure 4 : NI/S_B en fonction (S_B/S_g): série 1960-2011

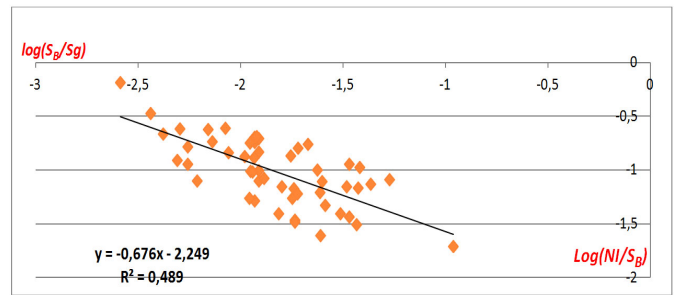


Figure 5 : $Log(NI)$ en fonction de $Log(S_B/S_g)$: "rang-taille": série 1960-2011

Aussi une fenêtre décennale est utilisée, pour déterminer la régularité ou l’irrégularité du régime de feux durant la période historique étudiée. En effet, les différentes décennies montrent des exposants α différents (Tableau.1). Aussi une légère augmentation de l’exposant α est visible pour les trois dernières périodes (Tableau.1), ce qui peut être justifié par une amélioration de la qualité de la collecte et probablement par l’effet de prévention et de lutte. Mais l’exposant α demeure inférieur à un, ce qui prouve une domination des grands sur les petits, contrairement à ce qui est rencontré dans d’autres pays.

L’exposant α est un indicateur qui reflète l’impact de la stratégie de prévention et de lutte contre les incendies de forêts suivie par les services concernés et la qualité des recensements. Le tableau.1 montre une variation de l’exposant α d’une décennie à l’autre ce qui prouve une stratégie de lutte non constante, variable d’une décennie à l’autre. Quant au coefficient b qui correspond à $\alpha=0$, il représente le nombre de feux normalisé par unité de surface brûlée, soit un hectare. Il est considéré aussi comme le point où l’égalité des nombres des grands et des petits feux par «unité» de surface brûlée (1ha) (Malamud et al., 2005) est réalisée. Nous l’avons considéré comme la «pression» des feux par unité de surface brûlée, le Tableau.1 montre les paramètres α et b (régime de feu) relatifs aux différentes décennies et à la série globale, on remarque que la hendéca-années 2001-2011 a connu une légère amélioration ($\alpha=0.76$) en ce qui concerne la quantification du ratio petits feux sur grands feux. Les figures (Fig. 6-10) montrent que les différentes décennies présentent des couples (α,b) différents donc des régimes de feux différents.

Tableau 1 : Régimes de feux (α) des différents décennies

Décennie	α	b	R^2
1960-1970	0.51	-2.136	0.476
1971-1980	0.32	-1.714	0.281
1981-1990	0.63	-1.744	0.687
1991-2000	0.68	-1.731	0.554
2001-2011	0.76	-2.141	0.900
1960-2011	0.67	-2.249	0.489

Les Figures 6-10 relatives aux décennies 1960-1970, 1971-1980, 1981-1990, 1991-2000 et 2001-2011 vérifient aussi des lois en puissance. Néanmoins, l’exposant varie de 0.32 à 0.76 et le coefficient b varie de -2.136 à -1.744 (Tableau.1). Ce qui prouve que l’action de lutte et de prévention (et de mesure de l’accroissement de stabilité) est variable d’une décennie à l’autre.

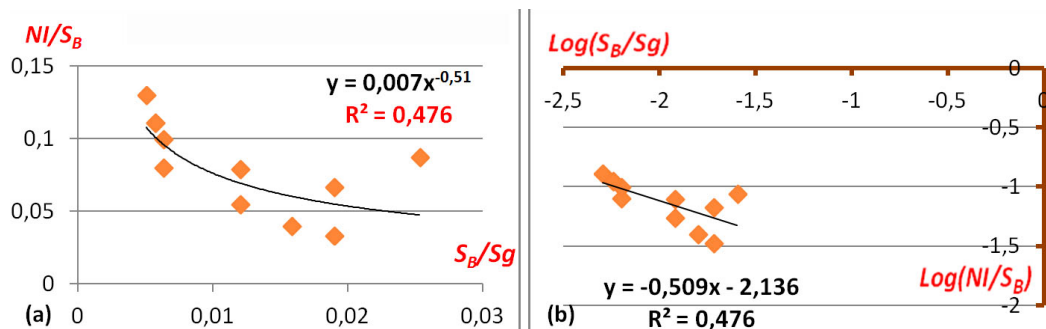


Figure 6: a) NI/S_B en fonction(SB/S_g) : Série 1960-70 b) $\log(NI/S_B)$ en fonction $\log(SB/S_g)$: Série 1960-70

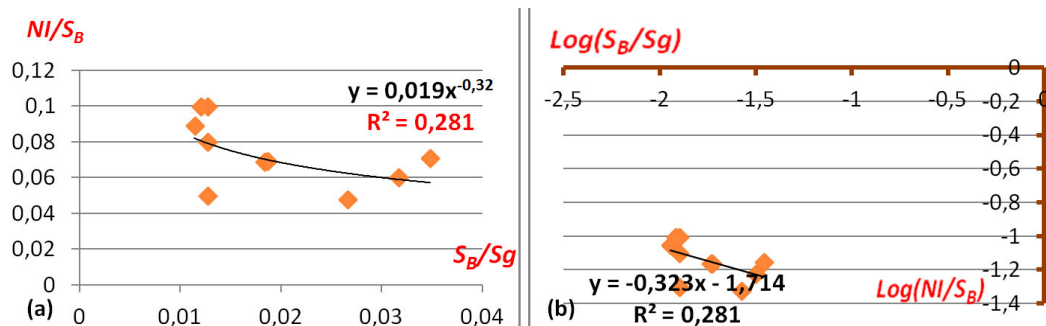


Figure 7: a) NI/S_B en fonction(SB/S_g) : Série 1971-80 b) $\log(NI/S_B)$ en fonction $\log(SB/S_g)$: Série 1971-80

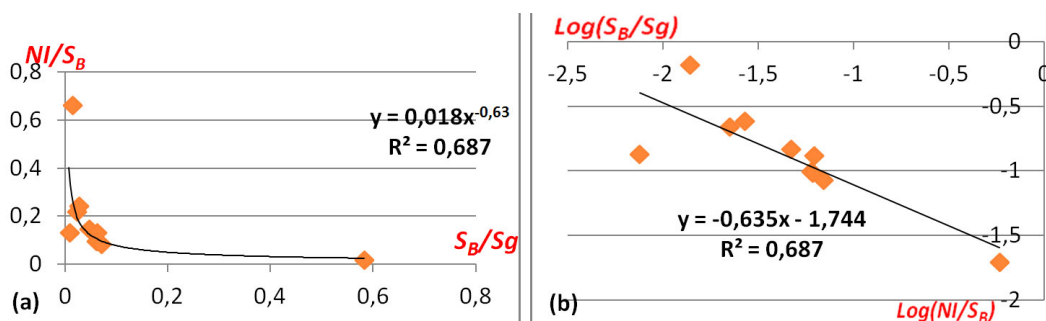


Figure 8: a) NI/S_B en fonction(SB/S_g) : Série 1981-90 b) $\log(NI/S_B)$ en fonction $\log(SB/S_g)$: Série 1981-90

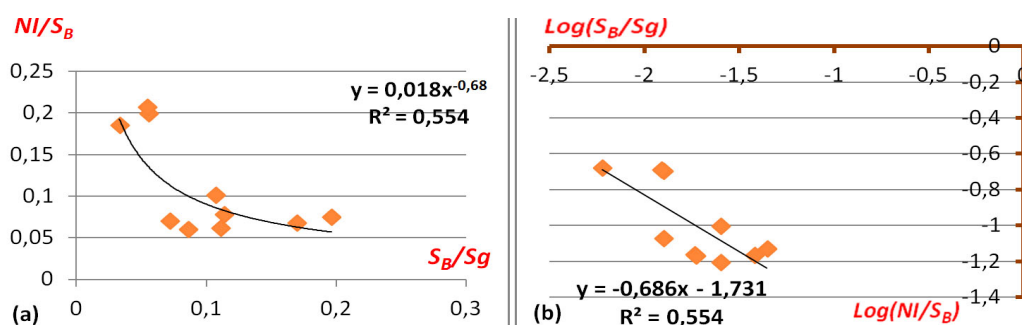


Figure 9: a) NI/S_B en fonction(SB/S_g) : Série 1991-2000 b) $\log(NI/S_B)$ en fonction $\log(SB/S_g)$: Série 1991-2000

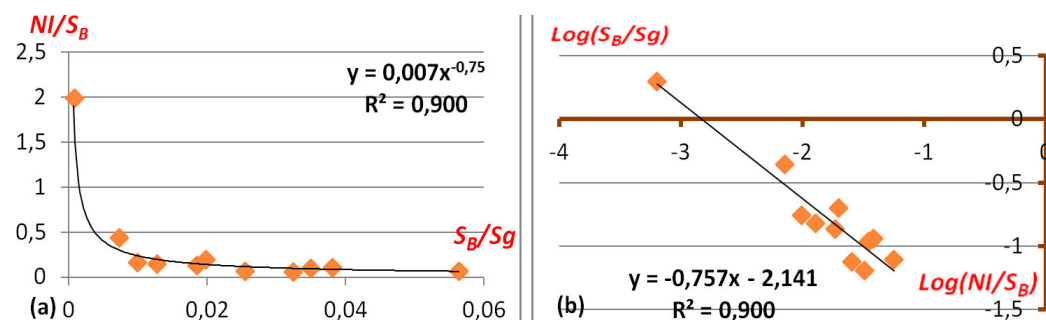


Figure 10: a) NI/S_B en fonction(SB/S_g) : Série 2001-2011 b) $\log(NI/S_B)$ en fonction $\log(SB/S_g)$: Série 2001-2011

Ainsi nous pouvons conclure que les périodes 1991-2000 et 2001-2011 (pour lesquelles respectivement $\alpha = 0.68$ et 0.76) ont connu une légère amélioration dans la collecte des petits feux et dans l'effort de la prévention et de la lutte. Ainsi le ratio « grands feux/petits feux » est sensible aux actions et méthodes de lutte et de prévention. Les résultats obtenus à partir de l'analyse de la relation rang-taille par décennie sont présentés dans le Tableau 1. Ils sont compatibles avec ceux d'autres études réalisées par Moreno et al. (2011) ; Telesca et al. (2010) ; Malamud et al. (2005) et Song et al. (2001).

L'utilisation de la fenêtre décennale pour la détermination de la pente (coefficient de la loi puissance) et le coefficient reflète une diversité de régimes de feux (Fig.11) pour les différentes périodes. La décennie 1971-1980 ($\alpha = 0.32$) (Fig.11) est très particulière par son régime caractérisé par une forte domination des grands feux.

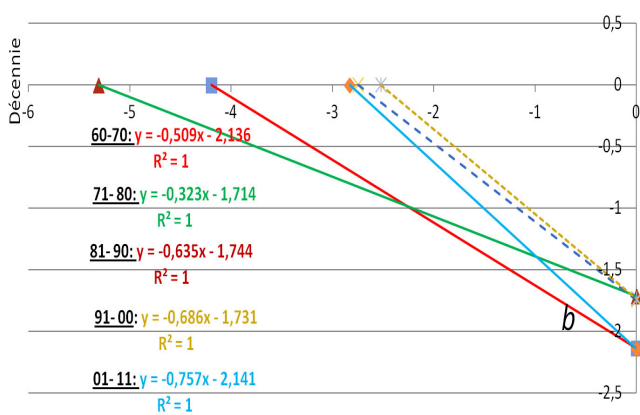


Figure 11 : Les relations bi-logarithmiques des différentes périodes correspondantes à différents régimes de feux (α, b)

Avec l'augmentation de α , les grands événements se font plus rares et les petits feux deviennent très nombreux.

Les deux paramètres α et b caractérisant un régime de feu d'une zone géographique donnée, montrent que les droites relatives aux différentes périodes ont des pentes différentes et des ordonnées à l'origine ($\alpha = 0$) différentes. Les données de Telesca (Telesca et al., 2010) montrent un régime de feu ($\alpha = 1.82$ et $b = -0.381$) (Tableau.3 ; Fig.18) et une quantification du ratio « petits feux sur grands feux » élevé, caractérisé par $\alpha = 1.82$ et $b = -0.381$.

Résultats de simulation par notre logiciel « LoSiFire »

Les résultats de simulation de notre logiciel (LoSiFire) pour différents réseaux carrés (40*40, 50*50 et 70*70) montrent que le nombre d'arbres brûlés en fonction

du temps (durée de l'incendie exprimé par le nombre d'étapes) (Fig.12-17), aux seuils de percolation et pour les deux voisinages, vérifie une loi en puissance, avec des exposants α variant de 1.48 à 1.84 (Tableau.2). Les graphiques log-log sont des droites dont les pentes respectives sont les coefficients α respectifs. Le coefficient α relatif au voisinage de Von Neumann (4 proches voisins) et supérieur à celui du voisinage de Moore (8 proches voisins) et les coefficients b varient de -0.29 à -0.06. Les magnitudes de l'exposant α sont importantes et les valeurs faibles du paramètre (« pression » du feu) prouvent que notre logiciel « LoSiFire » prend en considération les petits incendies. En effet, les deux paramètres α et b caractérisant le régime de feux de forêts simulés reflètent une domination quantitative des petits feux.

La comparaison des résultats réels avec ceux de nos simulations montre : le comportement en lois de puissance reste quantitativement le même, mais les exposants α sont différents, ceux des simulations sont de mêmes grandeurs (Tableau.3) que celles trouvées par Malamud et al., (2005) et Moreno et al., (2011). Mais supérieures à celles des distributions réelles (0.32 - 0.76) de la série des feux de forêts marocaines. De même les valeurs du paramètre b (-2.43 à -1.71) des données réelles sont très différentes. Ainsi nous pouvons conclure que la collecte marocaine a négligé le recensement des petits feux et que la stratégie de lutte n'arrive pas à empêcher une domination des grands feux.

Le voisinage de Von Neumann, pour lequel α varie de 1.64 à 1.84, prend plus en considération les petits feux que le voisinage de Moore dont l'exposant varie de 1.47 à 1.64. Enfin notre logiciel « LoSiFire » est régi par des lois en puissance et est invariant d'échelle (quelque soit la dimension du réseau), il est donc un système critique auto-organisé. Il satisfait en fait la criticalité auto-organisée.

Le régime des feux des forêts marocaines est très différent des régimes de feux à travers le monde à cause probablement de la collecte des événements qui négligent le recensement des petits feux. Le régime (1.81, 0.381) des forêts portugaises est très remarquable (Figure18), car c'est un régime à domination de petits feux.

Tableau.2 : Les différents régimes de feux (α, b) obtenus par notre logiciel « LoSiFire »

Réseau	Seuils de Percolation	Densité	Voisinage	Exposant	b	Coef.
40*40	0,60	30	4	1,775	-0.057	0,985
40*40	0,22	30	8	1,643	-0.213	0,976
50*50	0,60	30	4	1,839	-0.083	0,996
50*50	0,22	30	8	1,580	-0.070	0,993
70*70	0,60	30	4	1,645	-0.295	0,985
70*70	0,22	30	8	1,476	-0.105	0,992

Tableau.3 : Résultats comparatifs : (*)notre logiciel ; ()in Moreno et al., (2011) ; (***)in Telesca et al., (2010) ;(****) : in Malamud et al.,(2005)**

		Coefficient	b	Coef.
Simulations avec LoSiFire (*)	R40x40, $p_c=0.6$, $V=4$	1,775	-0.057	0,985
	R40x40, $p_c=0.24$, $V=8$	1,643	-0.213	0,976
	R50x50, $p_c=0.6$, $V=4$	1,839	-0.083	0,996
	R50x50, $p_c=0.24$, $V=8$	1,580	-0.070	0,993
	R70x70, $p_c=0.6$, $V=4$	1,645	-0.295	0,985
	R70x70, $p_c=0.24$, $V=8$	1,476	-0.105	0,992
Forêts Espagnoles (**)	Mediterranean Continental	1.72 0.25	-3.150.63	0.985
	Mediterranean Mountain	1.540.23	-3.100.55	0.993
	Mediterranean Coast	1.590.25	-3.100.55	0.989
Forêts portugaises (***)		1.820.01	-0.381	0.999
Forêts Américaines (****)	Mediterranean	1.300.05	-3.440.07	0.987
	MediterraneanMtns	1.460.05	-3.930.06	0.989
Forêts marocaines	1960-1970	0.51	-2.136	0.476
	1971-1980	0.32	-1.714	0.281
	1981-1990	0.63	-1.744	0.687
	1991-2000	0.68	-1.731	0.554
	2001-2011	0.76	-2.141	0.900
	1960-2011	0.67	-2.249	0.489

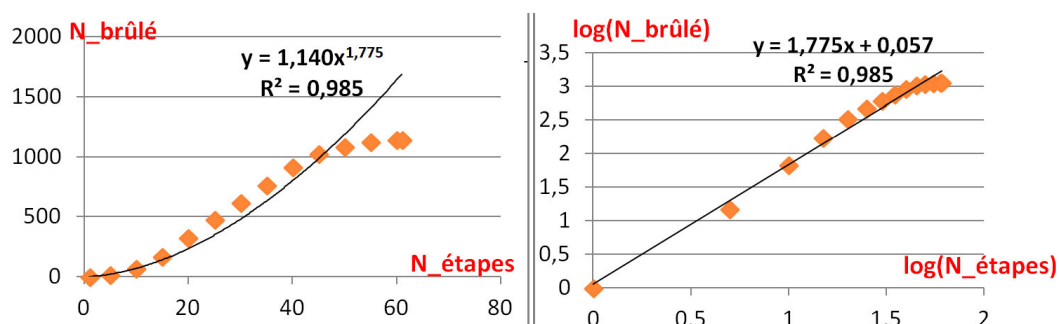


Figure 12 : Résultats obtenus par simulation LoSiFire pour : R40*40 $p_c=0,6$ $D=30$ $V=4$

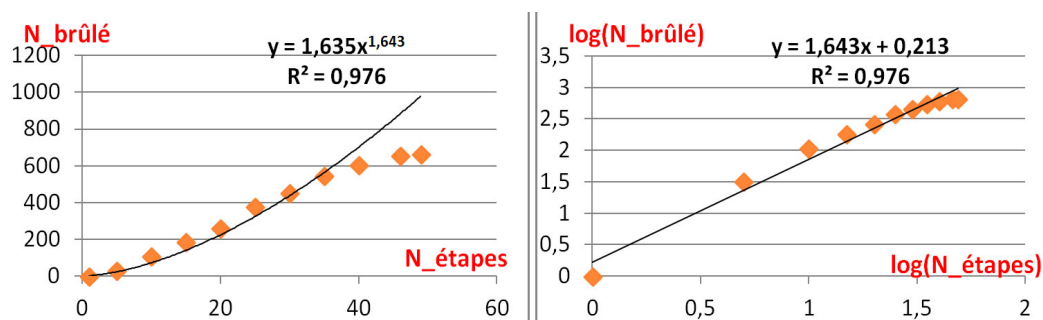


Figure 13 : Résultats obtenus par simulation LoSiFire pour : R40*40 $p_c=0,22$ $D=30$ $V=8$

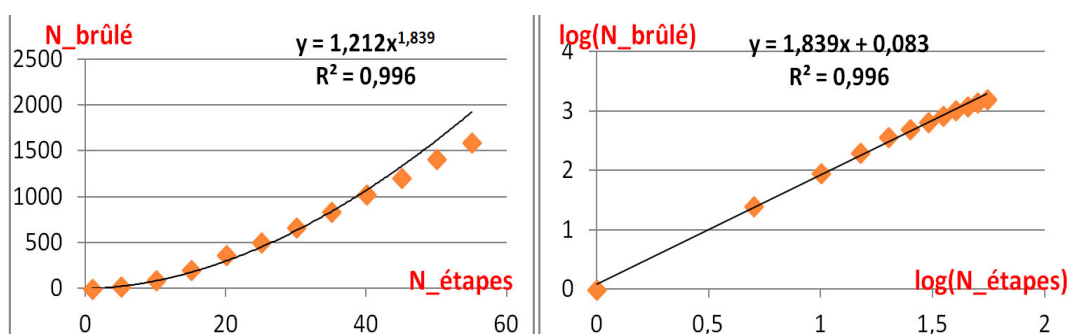


Figure 14 : Résultats obtenus par simulation LoSiFire pour : R50*50 $p_c=0,6$ $D=30$ $V=4$

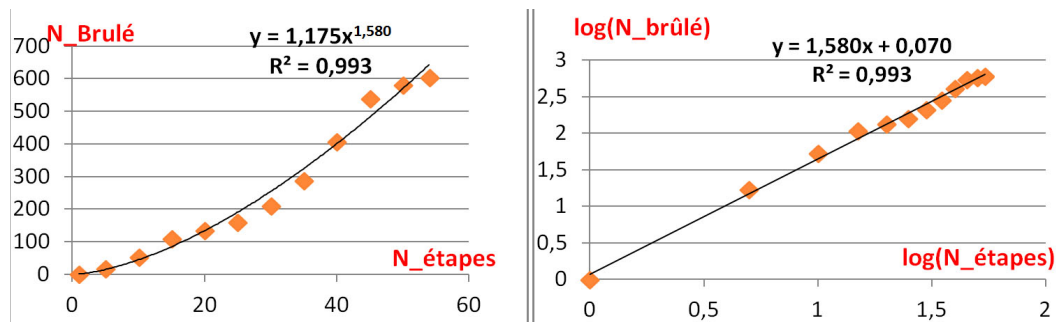


Figure 15 : Résultats obtenus par simulation LoSiFire pour : R50*50 pc =0,22 D=30 V=8

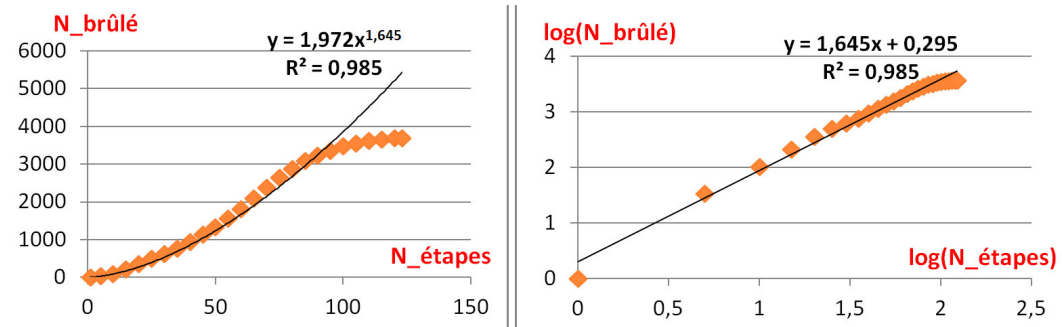


Figure 16 : Résultats obtenus par simulation LoSifire pour : R70*70 pc =0,6 D=30 V=4

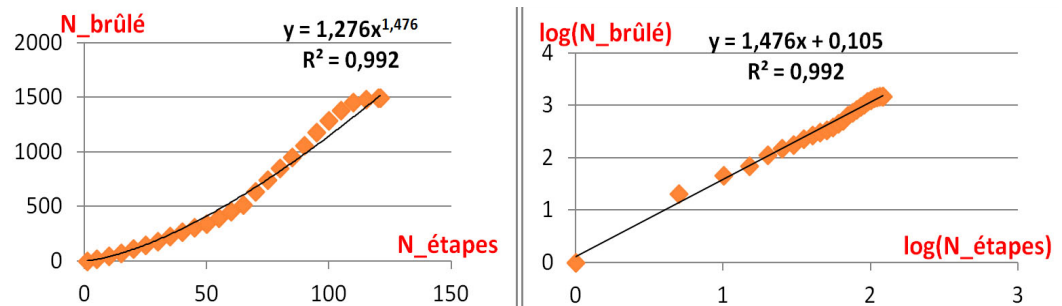


Figure 17 : Comparaison des différents régimes de feux de forêts de certains pays avec celui des forêts marocaines

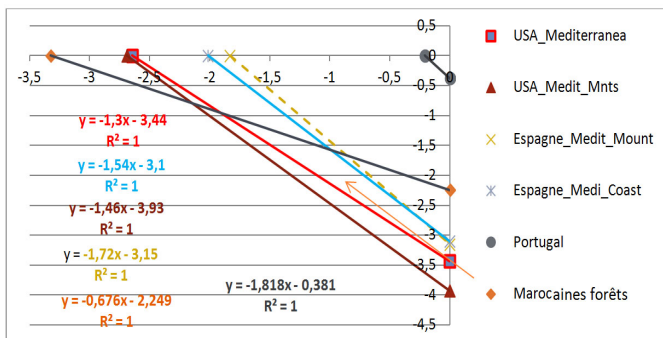


Figure18 : Comparaison des différents régimes de feux de forêts de certains pays avec celui des forêts marocaines

CONCLUSION

Le comportement d'un phénomène naturel ou anthropique selon la criticalité auto-organisée(CAO), se manifeste par des lois en puissance intimement liées à l'auto-similarité et à l'invariance d'échelle. Cette approche récente nous l'avons utilisée pour étudier les feux des forêts marocaines.

En effet, l'analyse de la série de données historiques (1960-2011) relatives aux incendies des forêts marocaines

est analysée de manière globale et par l'utilisation d'une fenêtre décennale. L'analyse a montré que La distribution de la fréquence des pertes, ainsi que les distributions « rang-taille »satisfont et de manière robuste des lois en puissance, à l'instar des séries de données d'autres pays (USA, Autriche, Italie, Espagne, Portugal, Chine,). En effet, l'exposant est caractéristique de chaque pays et même de sa région écologique.

Les distributions des différentes décennies des forêts marocaines montrent leur comportement en loi en puissance, mais avec des exposants α différents (0.32 à 0.76) et des paramètres b différents (-2.432 et -1.714), ce qui correspond à des régimes de feux différents. Les différentes décennies, caractérisées par des exposants très petits (<1) manifestent donc une dominance de grands feux. L'étude des décennies montre aussi une évolution minimale (les valeurs de ont connu une légère croissance lors des deux dernières décennies (Tableaux.1-3)) de la qualité des recensements des petits feux et probablement et aussi celle de la prévention et de la lutte contre les incendies de forêts au Maroc.

La structuration en loi en puissance de la série statistique (1960-2011) des feux de forêts marocaines est prouvée,

elle suit solidement une loi en puissance avec un exposant $\alpha=0.61$ et une « pression » des feux à l'origine, $b=2,249$. Les coefficients et caractérisent son régime de feu. L'exposant qui caractérise la pente de la distribution et mesure l'inégalité des magnitudes des feux, en quantifiant le rapport entre les petits et les grands feux. Ainsi avec l'augmentation de la valeur absolue de α , les grands feux se font rares et les petits deviennent très nombreux. Par conséquent les feux des forêts marocaines recensés sont en majorité grands. Les résultats indiquent aussi que les distributions en loi en puissance des feux sont invariantes d'échelle et invariantes dans le temps. En effet, le comportement en loi en puissance des distributions correspond à la criticalité auto-organisée (COS), déterminée par des dynamiques sous-jacentes du système feu de forêt. Cette constante en loi en puissance des répartitions des incendies, a d'importantes implications pratiques: l'obtention de données historiques suffisantes des feux dans les dernières années, permet de déterminer les différents régimes de feux et la prévision de risque de feux pour les années à venir, grâce à la stabilité temporelle de la distribution en loi en puissance. Aussi la relation en loi en puissance, permet l'utilisation de la fréquence d'occurrence des petits feux pour évaluer le risque de grands feux. En effet, on peut calculer la probabilité d'occurrence de grands feux via la relation en loi en puissance.

Ensuite, les résultats de nos simulations par notre logiciel « LoSiFire » (automate cellulaire) montrent des exposants α (de 1.48 à 1.84) et b (-0.295 à -0.057), ce qui prouve que c'est un système auto-organisé critique. L'exposant étant supérieur à 1 corrobore que notre logiciel prend en considération les petits feux.

La comparaison des exposants de notre modèle des feux de forêt (LoSiFire) ($\alpha=1.48$ à 1.84 et $b=-0.295$ à -0.05) avec ceux des incendies réels de forêt, notamment de l'Espagne (Tableau.4) montre une bonne concordance en loi de puissance.

La différence entre les exposants α simulés et ceux des forêts marocaines est due probablement à la qualité de la collecte des événements réels qui sont très variables d'une décennie à l'autre et à la qualité du recensement des plus petites surfaces brûlées. Contrairement aux recensements d'autres pays, qui possèdent des bases de données pour les feux de forêts. Ainsi la base de données des feux de forêts aux USA comprend plus de 500 000 feux entre 1970 et 2000 et prend en considération 0,4 ha comme surface brûlée minimale. La base de données des feux de forêts au Canada est en ligne, avec une précision de mesure de 0,2 ha. Dans la base de données française « Prométhée », 0,001 ha est recensé, quant à la base de données des feux de forêts au Japon, sa finesse est de 0,01 ha.

L'absence d'une base de données pour les feux des forêts marocaines rend difficile l'acquisition de données réelles. La loi en puissance vérifiée par les données sur les incendies de forêts marocaines, montre qu'un tel comportement entraîne que la probabilité qu'un événement ayant un poids majeur soit rare, mais moins rare que le cas où la distribution est traitée par une loi gaussienne. Les feux de forêts ont ainsi une caractéristique, à l'image

d'autres phénomènes complexes (tremblements de terre, finance,...) à savoir une dominance d'événements de faible intensité et une rareté des grands événements. Ceci constitue une caractéristique statistique indépendante de l'espace et du temps et établit une récurrence importante pour faire avancer la compréhension et la modélisation du phénomène « feu de forêt » aussi bien chez les gestionnaires que chez les scientifiques. Nous avons montré que les données réelles correspondantes aux incendies de forêts marocaines ont un comportement COS. Les régimes de feux de forêts marocaines miment donc la criticalité auto-organisée (COS). Par conséquent les régimes d'incendies dans les prochaines décennies peuvent être prévus avec des données historiques et des caractéristiques COS. L'obtention des fréquences d'occurrences des petits incendies, nécessitent un recensement rigoureux de toute surface brûlée aussi petite soit telle à l'image des grands feux. L'implémentation d'une base de données pour les feux des forêts marocaines et selon chaque zone écologique est primordiale pour l'acquisition de données fiables dont la source est unique. En fait, le nombre d'événements dépend de la qualité des recensements. Ainsi des données peuvent être utilisées pour quantifier le risque de grands feux futurs, dont la stratégie pour éviter ce risque peut être élaborée...

REMERCIEMENTS

Je remercie mon cher collègue, Professeur Mohamed EL HAJJAJI pour son aide pour le traitement des données. Ses encouragements, ses remarques et ses critiques enrichissantes m'ont été d'une grande utilité.

REFERENCES CITEES

- Rapport national sur la prévention des désastres : Synthèse Conférence de KOBE-HYOGO Janv.2005.
- Etude pour la réalisation d'une cartographie et d'un SIG sur les risques majeurs au Maroc Sept. 2008.
- Bak, P., Tang, C., and Wiesenfeld, K. (1987). Self-organized criticality : An explanation of the 1/f noise, Phys.Rev.Lett. 59, 381-384
- Bougherira, Y., Thèse de Doctorat, Univ. Paul Verlaine-Metz, soutenue le 27/09/2011.
- Bak, P., Chen, K (1990). A forest-fire model and some thoughts on turbulence. Phys. Lett. A 147, 297-300.
- Solé, R.V., Manrubia, S.C., Benton, M.J, Kauffman, S. (1999). Trends Ecol. Evol., 14, 156-160.
- Pascual, M., Guichard, F. (2005). Criticality and disturbance in Spatial ecological systems, Trends Ecol. Evol., Vol.20, N° 2, 88-95.
- Malamud, B.D., Morein, G., Turcotte, D.L., Forest fires : an example of self-organized critical behavior. Science 281, 1840-1841, 1998
- Ricotta, C., Avena, G., Marchetti, M. (1999). The flaming sandpile : self-organized criticality and wildfires. Ecol. Model. 119, 177-185.
- Telesca, L., Amatulli, C., Lasaponara, R., Lovallo, M., Santulli, A. (2005). Time-scaling properties in forest-fire sequences observed in Gargano area (southern Italy). Ecol. Model. 185, 531-544.

- Telesca, L. and M ;G ; Pereira (2010). Time-clustering investigation of fire temporal fluctuations in Portugal : Natural Hazards and Earth System Sciences, 10,661-666.
- Lasaponara, R., Santulli, A., Telesca, L. (2005). Time-clustering analysis of forest-fire sequences in southern Italy. Chaos Soliton. Fract24,139-149.
- Ricotta, C., Miccozzi, L., Bellelli, M., Mazzoleni, S. (2006). Characterizing self-similar temporal clustering of wildfires in the Cilento National Park (Southern Italy), Ecol. Model, 197,512-515.
- Corral, A., Telesca, L., Lasaponara, R. (2008). Scaling and correlations in the dynamics of forest-fire occurrence. Phys. Rev. E77, 1-7.
- Poincaré, H (1987). Calcul des probabilités Ed. Jacques Gabay (2^{ème} édition) (Paris).
- Mandelbrot, B. (1962). Paretian distributions and income maximisation, Quarterly Journal of Economics, 76, 57-85 .
- Drossel, B., Schwabl, F., Self-organized critical forest-fire model. Phys.Rev ; Lett. 69,1629- , 1992.
- Zipf, G.K. (1949). Human Behavior and the principle of Least Effort. Addison Wesley Cambridge MA .
- Pareto, V., Cours d'Economie Politique, Droz, Geneva.
- Song, W., Weicheng, ., Bihong,., and Jianjung, Z. (2001). Self-organized criticality of forest fire in China, Ecol. Model. 145, 61-68.
- Options méditerranéennes Série B (1999). Etudes et Recherches N° 26.
- Délicnières, D. (2008). Analyse des séries temporelles, 2007.Mangiavillano, A. ; Thèse.