

# Modélisation et simulation d'incendie de forêt par automate cellulaire

L. ABIBI\*

(Reçu le 14/05/2012; Accepté le 30/11/2012)

## Résumé

L'objet de cette étude est la modélisation et la simulation d'incendies de forêt. Leur implémentation est basée sur le paradigme des automates cellulaires et le modèle de percolation. La variante des automates cellulaires utilisée est le « Jeu de la Vie ». En effet, L'étude a abouti à l'élaboration d'un logiciel LoSiFire qui simule le feu de forêt tout en permettant l'étude de son évolution. Le logiciel permet aussi de montrer les effets de la percolation (structure), de la densité de la forêt et du voisinage sur la propagation du feu. Ce type de modélisation qui décrit le phénomène d'incendie de forêt en fonction de sa densité et de sa percolation, permet en même temps de comprendre la dynamique du feu vis-à-vis de la structure (percolation) de la forêt. LoSiFire permet aussi d'envisager la possibilité de saut de feu. LoSiFire est un outil pertinent et constitue une base fondamentale pour l'élaboration d'un système d'aide à la décision, de veille, d'anticipation et d'étude du risque d'incendie de forêt.

**Mots-clés:** Feu de forêt- Automate cellulaire- Jeu de la vie- Densité- Percolation- Forêt- LoSiFire- Aide à la décision- Veille- anticipation- Risque de feu.

## INTRODUCTION

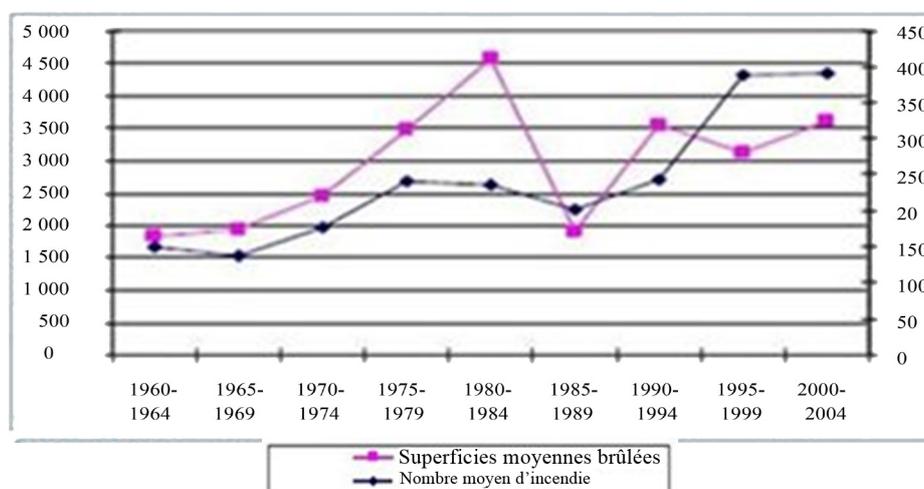
Les feux de forêt constituent un phénomène chronique et récurrent (Velez, 1999), dont l'intensité demeure croissante. Ce phénomène concerne la majeure partie des pays, et plus particulièrement ceux du bassin méditerranéen. En effet, les impacts environnementaux et socio-économiques des feux de forêt obligent les pays concernés à fournir d'intenses efforts tant au niveau préventif ou extinctif. Ainsi, l'élaboration de nouveaux paradigmes induisant l'élaboration d'outils d'aide à la décision (simulateur d'incendie) pour des luttes efficaces contre ce fléau, est un défi majeur. L'incendie est la cause principale de la disparition des forêts dans les pays

du pourtour méditerranéen. Environ 50.000 incendies ravagent chaque année une superficie de 700.000ha à 1 million d'ha de forêt méditerranéenne.

Au Maroc, la figure1 et le tableau1 montrent que durant les périodes 1960-2004 et 2009-2011 respectivement 12.912 et 6941 incendies ont ravagé de manière respective 149.292 et 1.101 hectares (ha) de forêt.

**Tableau 1 : Superficies brûlées et nombre d'incendie**

Année	2009	2010	2011
Superficie Brûlée (ha)	3108	1133	2600
Nombre d'incendie	501	213	387



**Figure 1 : Evolution des incendies de forêts au Maroc par tranche de 5 ans**

\* Département des Ressources Naturelles et Environnement, Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan II, B.P. 6202 Rabat- Instituts, Rabat, Maroc. E-mail : l.abibi@iav.ac.ma

Ces dégâts sont jugés élevés, eu égard au taux de boisement très faible (8%), à l'aridité du climat et aux contraintes rendant extrêmement difficile la reconstitution des espaces boisés. Comme ce phénomène risque de s'accroître dans le futur avec le changement climatique, l'élaboration d'outils de prédiction et de prise de décision permettant d'anticiper le risque d'incendie de forêt devient un objectif primordial.

Nombreux sont les modèles qui ont été élaborés pour modéliser les incendies de forêts. La revue bibliographique révèle trois grandes approches classiques ainsi que leurs limites pour la modélisation de la propagation des feux de forêts. En effet, on peut citer:

L'approche purement physique qui n'a jamais abouti à l'implémentation d'un modèle qui prédit la propagation du feu connaissant les paramètres qui expliquent le phénomène. Ceci tient essentiellement aux difficultés à combiner et quantifier les mécanismes physiques et chimiques régissant le comportement global du feu.

L'approche empirique qui repose sur l'observation du feu *in situ*. Elle nécessite autant d'observations que de conditions possibles de propagation sont diverses. Cette approche est satisfaisante au Canada, caractérisé par des peuplements forestiers uniformes sur de très grandes superficies et par une faible diversité du combustible. La très grande hétérogénéité des conditions de propagation et leur variabilité sur de petits espaces en région méditerranéenne compromettent énormément l'usage.

L'approche intermédiaire, qui consiste à proposer des équations de propagation émanant de principes physiques, et à évaluer certains termes expérimentalement et de manière contrôlée. C'est la démarche adoptée par les chercheurs américains, qui a abouti au modèle de « ROTHERMEL » (Rothermel, 1972) utilisé par le système, de prédiction de la propagation, américain « BEHAVE ».

L'approche réseau, dit « Petit monde » (PORTERIE et al, 2005), est une autre variante élaborée sur la base des automates cellulaires (AC). Elle est susceptible de constituer un simulateur de feu de forêt.

Une autre approche, complètement différente des précédentes, est purement basée sur le concept des automates Cellulaires (AC) (Fatès, 2006). Elle est utilisée pour modéliser et simuler des phénomènes de diffusion en général, et des incendies de forêts en particulier.

Notre contribution repose sur cette dernière approche, en utilisant le « Jeu de la vie » ou « Game of life », inventé en 1970 par John Conway (Gardner, 1970), qui est une variante des automates cellulaires (AC). La métaphore du jeu est utilisée, même si elle est mal adaptée quand il s'agit de modéliser des processus d'expansion et de diffusion tels que des épidémies, des épizooties, l'évolution urbaine, la finance et les feux de forêts...

## PROBLEMATIQUE DES FEUX DE FORET

L'incendie de forêt est un processus complexe qui nécessite une approche holistique pour le cerner. En effet, plusieurs

facteurs entrent en jeu dans ce processus. Parmi eux, on peut citer ceux relatifs à l'environnement (relief, climat, flore) et ceux relatifs à l'homme. Ces différents paramètres sont en forte inter-relation et influent énormément sur la probabilité d'éclosion et d'ampleur du feu. Enfin, ce processus complexe ne peut être cerné qu'à travers une modélisation.

Avant l'élaboration même des lois qui régissent ce processus, il est pertinent de définir un modèle pour sa simulation. C'est-à-dire, qu'un prototype est indispensable pour concevoir une stratégie de lutte. Notre approche est fondée sur une modélisation du système (Forêt) selon un réseau carré de dimension  $n \times n$ , suivie d'une simulation.

En effet, nous avons considéré un échantillon de forêt (Figure 3, image a) pour lequel les cimes des arbres sont projetées sur un plan (Figure 3, image b). Ainsi, chaque arbre est représenté par une croix (modélisation). Ce type de modélisation (réseau avec sites occupés par un arbre ou vide) est équivalent au paradigme que nous avons élaboré à partir des automates cellulaires et de la percolation. En effet, cette étude a abouti à l'implémentation d'un logiciel de simulation des feux de forêts appelé LoSiFire, qui a inféré la structure de l'échantillon de forêt dont la densité est 10 arbres par unité de surface et la percolation est 0,84, ensuite étalée sur un réseau carré de  $40 \times 40$  sites.

L'échantillon de forêt considéré est extrait de Google Map. La projection des cimes des arbres sur un plan est représentée par une croix (modélisation). Ceci montre bien des croix (arbres) et des vides (clairières) ce qui est conforme à la structure de la forêt. Le comptage de toutes les croix (cimes) et l'étude de la structure de la forêt, nous a permis de trouver une simulation dans notre base de données qui reflète et de manière adéquate notre échantillon de forêt. Le réseau de simulation correspondant est de dimension  $40 \times 40$ , les variables de contrôle de la simulation correspondante sont: densité=10 arbres par unité de surface et la percolation=0,84 (Figure 2).

## METHODES

### Modèles théoriques

#### L'équation de chaleur

Pour qu'un feu de forêt se déclenche, trois facteurs sont nécessaires: un combustible (la végétation), un gaz comburant (l'oxygène de l'air) et une source d'inflammation (une flamme ou un matériau incandescent). La teneur en eau joue un rôle important puisque le combustible ne s'enflamme qu'après avoir perdu une grande quantité de son eau par évaporation. Ainsi, les végétaux vivants sont inflammables et peu combustibles, contrairement aux végétaux morts qui sont très pauvres en eau.

A l'approche du feu, le combustible continue à s'échauffer par le rayonnement de la flamme, par la conduction et la convection. A  $300^\circ\text{C}$ , la dégradation thermique rapide des matériaux libère des gaz combustibles (pyrolyse). Ces gaz se mélangent avec l'oxygène et s'enflamment. La flamme produite court le sol, tout en étant turbulente et lumineuse.

```

>>> LoSiFire 2010 <<<
densite = 10      i_feu = 10      j_feu = 10
voisin = 4      probabilite = 0.84      percolation = 0.84 et pif_10 = 6
Etape = 0      Comptel = 0      ii = 25      jj = 25
dimension matrice : 40
nbre arbre intial:0      nbre arbre brule: 0

```

Figure 2 : Paramètres de simulation de l'échantillon de forêt simulé, densité=10 et percolation=0,84

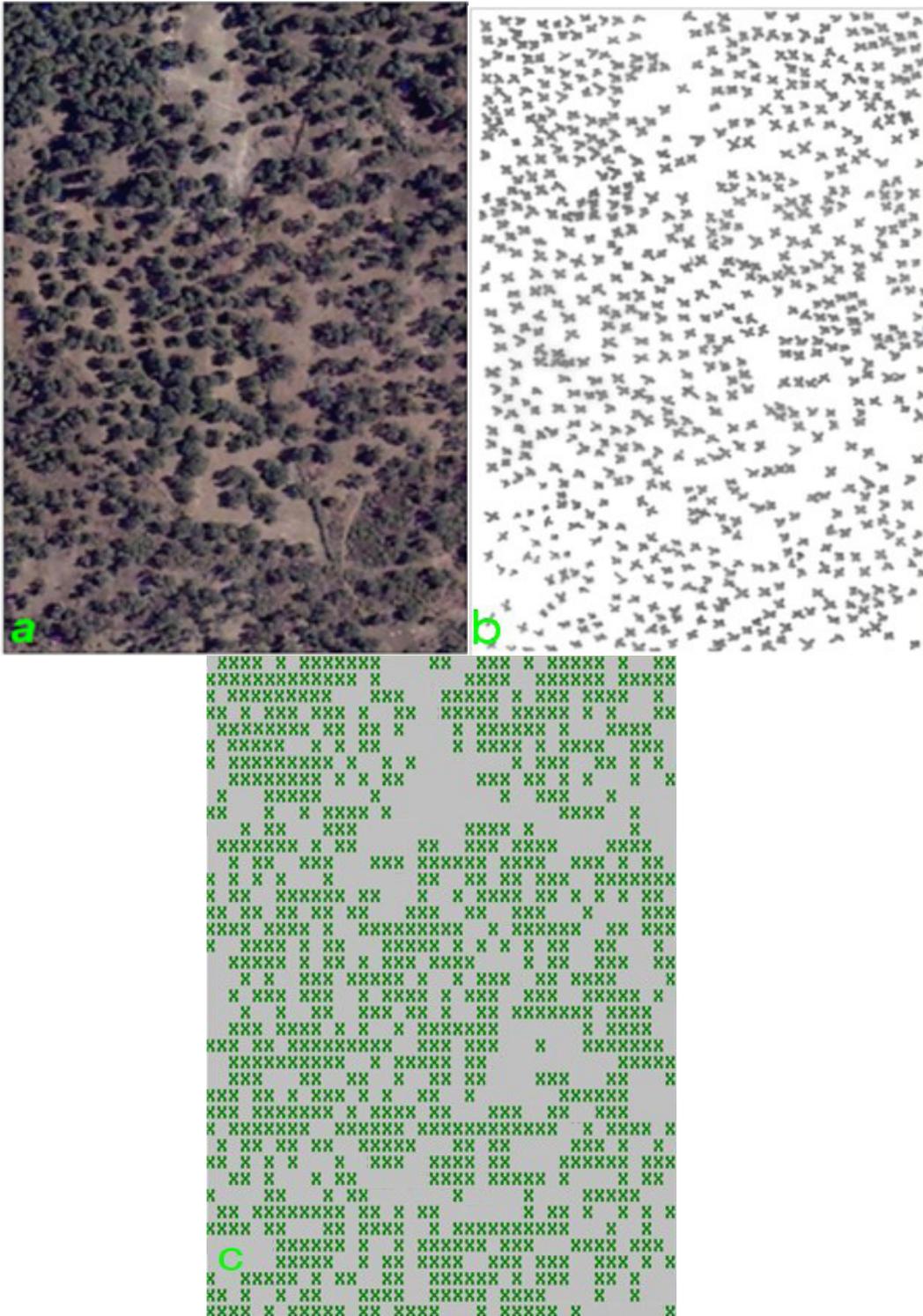


Figure 3 : Image a : Forêt in situ / Image b : Forêt projetée suivant les cimes des arbres  
Image c : Réseau et structure simulant la forêt

Ces réactions exothermiques propagent le feu. Les gaz chauds chauffent aussi la forêt, et propagent l'incendie par convection. Leur ascension crée une dépression qui aspire de l'air frais vers le front de flamme et alimente le milieu en oxygène.

La végétation forestière est hétérogène et se répartit en quatre strates (la litière, la strate herbacée, le ligneux bas (arbustes), le ligneux haut (arbres). De cette stratification végétale et des conditions météorologiques dépend la forme de l'incendie (feux de sol, de surface ou de cimes, sautes de feu).

En outre le vent influe aussi sur la propagation du feu en modifiant sa direction et en ensemençant de brandons des zones non brûlées. Le rôle du rayonnement dans la propagation augmente. Comme le vent, la pente du relief conditionne l'inclinaison des flammes par rapport à la végétation et, par conséquent, affecte la vitesse de propagation du feu.

Le processus d'incendie de forêt est régi par des équations de type diffusion (équation de chaleur) regroupant tous les phénomènes physico-chimiques accompagnant l'incendie. L'équation de diffusion qui décrit l'incendie est la suivante :

$$G(u, M, t) \cdot \frac{\partial u(M, t)}{\partial t} - \overline{\text{div}[L(u, M, t) \cdot \text{grad}(M, t)]} = S(u, M, t) \quad (1)$$

Avec :

G: Fonction régulant la diffusion temporellement L :

Fonction régulant la diffusion spatialement

u(M, t): Variable qui diffuse

S: Fonction source

L'équation de chaleur relative à l'incendie de forêt a pour variable diffusante la température T. Elle s'écrit comme suit:

Où sont les constantes physiques du milieu (forêt) dans lequel la chaleur diffuse, ce sont respectivement la masse volumique, la capacité calorifique et le coefficient de conductivité thermique. S est la fonction source de chaleur.

### Le modèle de percolation

La percolation (Bef̄ara, 2011) est un modèle de physique statistique, introduit par S.R Broadbent et J.M Hammersley (Hammersley et al, 1957) en 1957, pour étudier le flot d'un fluide à travers un milieu aléatoire poreux, représenté par un réseau de canaux microscopiques pour lequel se produit un changement d'état, appelé transition de phase. En effet, il existe plusieurs types de percolation : percolation de sites (Figure 4. a), percolation de liens (Figure 4. b) et percolation mixte. Notre étude est basée sur la percolation de sites, qui se caractérise par une occupation aléatoire de sites (arbres) dans le réseau (forêt) considéré. Cette occupation se fait avec une probabilité p. Ainsi, si deux sites contigus sont occupés, alors ils sont connectés entre eux. Lorsque la probabilité p est faible, le nombre de sites connectés entre eux est aussi minime. Par conséquent les amas (ensemble de sites connectés entre eux) sont de tailles très réduites. Néanmoins, lorsque la probabilité p est grande, les amas deviennent de

plus en plus grands et tendent vers un amas infini ou percolant. La probabilité correspondante à l'apparition d'un amas est appelé seuil de percolation  $p_c$  ou percolation critique. Par conséquent si la probabilité p est inférieure à  $p_c$  (Figure 4. c), aucune information ne pourra circuler au sein du réseau : c'est la phase non percolante. Dans le cas contraire, c'est-à-dire quand la probabilité est supérieure à  $p_c$ , l'information pourra circuler au sein du réseau : alors, c'est la phase percolante.

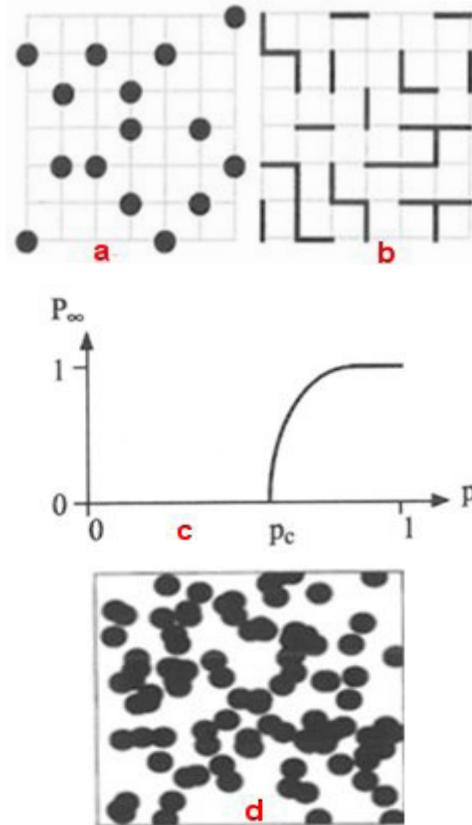


Figure 4 : a- Percolation de sites  
b- percolation de liens  
c- Saut de la percolation pour l'obtention d'un chemin de percolation  
d-Modèle de gruyère sous le seuil de percolation (absence de chemin de percolation)

L'application du modèle de percolation sur réseau à notre problématique trouve sa raison d'être. La forêt est définie par un réseau carré de dimension  $n*n$  sites avec une répartition aléatoire d'arbres dans les sites. Ces derniers sont occupés avec une probabilité p. La percolation de site correspond au cas d'arbres dispersés dans une mosaïque de végétation (la forêt). La densité d d'arbres, exprimée en nombre d'arbres par unité de surface est un paramètre implicite de la percolation p. Par conséquent, la forêt est une distribution aléatoire d'arbres ayant une densité d et une percolation p.

Le problème posé est de savoir si un feu peut se propager à travers une forêt ou non. Autrement dit, on doit s'intéresser à la probabilité p qui permet au feu de traverser la forêt. En effet, cette traversée passe par les sites les plus proches voisins occupés. La probabilité correspondante à la présence de ce chemin de traversée est appelée « seuil de percolation » ou « percolation critique »  $p_c$ . Ainsi, sous le seuil de percolation, les arbres forment des amas de taille finie, qui ne permettent pas la propagation du feu. Au plus la probabilité d'occupation p augmente, au plus les amas

grossissent et permettent le passage du feu à travers la forêt. La structure d'un amas de percolation est complexe, c'est une fractale dont la dimension peut être connue. La variation de la percolation  $p$  aboutit au cas où  $p < p_c$  à une absence de chemin continu de traversée pour le feu. Dans le cas contraire, lorsque le seuil est dépassé  $p > p_c$ , l'existence d'un amas permet au feu de s'infiltrer dans la forêt. Peu de seuils de percolation sont connus théoriquement de manière exacte. Dans la plupart des cas, ils sont déterminés numériquement. Dans le tableau 2 (ORLOWSKA, 2003) quelques exemples de réseaux avec leurs seuils de percolation respectifs. Le seuil de percolation du réseau carré qui nous intéresse est proche de 0,6.

**Tableau 2 : Différents types de réseaux avec leurs seuils respectifs (ORLOWSKA, 2003)**

réseau	dimension	Seuil percolation $p_c$
Nid d'abeilles	2	0.6962
Carré	2	0.5927
Triangulaire	2	0.50
Cubique	3	0.3116

### Les automates cellulaires

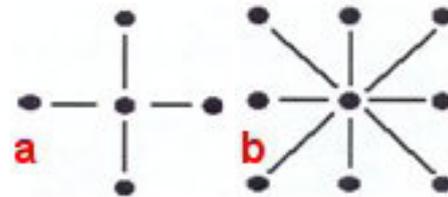
Les travaux de Ulam et Von Neumann dans les années cinquante pour l'élaboration d'une machine auto-reproductible ont donné naissance aux automates cellulaires (AC). Ce paradigme de calcul se bâtit sur l'usage d'un espace discontinu au sein duquel, des représentations élémentaires et locales entraînent l'obtention d'un comportement global et complexe. Ce passage de la simplicité locale à la complexité globale se reflète bien dans la variante des (AC) qu'est le « Jeu de la vie ». En dépit de la simplicité des règles qui le caractérisent, il permet d'obtenir des processus imprévisibles, qui sont difficiles à obtenir par les formalismes analytiques classiques. De cette façon, aux formalismes d'équations différentielles pratiqués pour la modélisation de processus complexes, les possibilités de calcul permises par les (AC) deviennent une alternative, et décrivent les processus dont la dynamique globale est seulement basée sur des interactions locales de leurs composantes.

L'automate cellulaire «Jeu de la vie» se compose d'une grille de cellules dont chacune peut être pleine « vivante » ou vide « morte » avec les lois suivantes : une cellule qui a moins de 2 voisines meurt d'isolement tandis qu'une

cellule entourée de plus de 3 voisines meurt d'étouffement. Ces cellules sont des êtres particuliers, appelés automates cellulaires (AC): Trois parents sont requis pour engendrer une naissance. C'est-à-dire qu'une cellule vide ou morte entourée de 3 cellules vivantes donne lieu à une naissance.

### Programmation du « jeu de la vie »

L'étude a débuté avec la programmation du «Jeu de la vie» en langage java. L'applet implémentée, permet d'éditer une grille sous forme de tableau booléen, sur laquelle la création et la destruction de cellules via des boutons (play, stop, clear) sont possibles. La visualisation de l'évolution d'une population choisie suivant un intervalle de temps régulier est réalisée, ainsi que le choix de fixer le voisinage soit à quatre ou huit (4: voisinage de Von Neumann, Figure 5.a ou 8: voisinage de Moore, Figure 5.b). L'évolution du «Jeu de la vie» est complètement déterminée par sa configuration initiale et des règles qui le régissent.

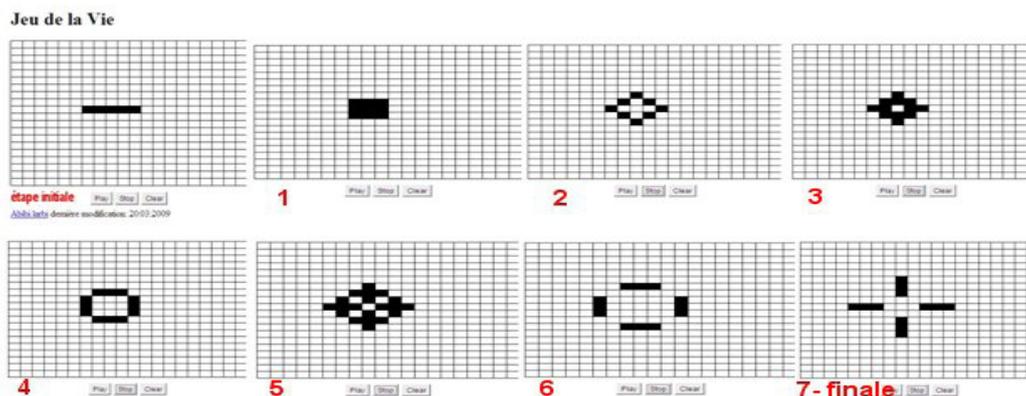


**Figure 5 : (a) : Voisinage de Von Neumann (4 proches voisins)  
(b): Voisinage de Moore (8 proches voisins)**

### Etude de l'évolution d'une configuration par le «Jeu de la vie»

La grille éditée et ses trois boutons (Play, Stop, Clear) permet de choisir la configuration des cellules, en cliquant dans celle-ci, comme on peut changer l'état des cellules (vide ou plein) et fixer le nombre de voisin (4 ou 8).

A titre démonstratif, on a choisit de simuler l'évolution de la configuration correspondante à une population initiale de 5 cellules alignées horizontalement. L'évolution de cette population se fait suivant les générations représentées par les étapes 1 à 7 (Figure 6). On remarque que les générations 6 et 7 sont stables (attracteur périodique), elles sont formées de 4 clignotants verticaux et horizontaux, elles sont aussi de période deux.



**Figure 6 : Evolution de la population (configuration initiale) selon le paradigme du « jeu de la vie »**

**Discrétisation de l'équation de chaleur**

L'étude de l'incendie de forêt est abordée via l'équation (1) discrétisée suivant le temps et l'espace sur un maillage à deux dimensions et à pas constants respectifs et, à l'aide de la méthode des différences finies de type implicite (Nougier, 1993). Ainsi, on obtient les équations (2), (3) et (4). Le développement dans un voisinage de Von Neumann du second terme du premier membre de l'équation (2) permet d'écrire :

$$G(u, M, (j - 1), \Delta t) \cdot \frac{u(M, j, \Delta t) - u(M, (j-1)\Delta t)}{\Delta t} - \overrightarrow{div}[L(u, M, (j - 1)\Delta t) \cdot \overrightarrow{grad} u(M, (j - 1)\Delta t)] = S(u, M, (j - 1)\Delta t) \tag{2}$$

$$\overrightarrow{div}[L(u, M, t) \cdot \overrightarrow{grad} u(M, t)] \cong \gamma_M \cdot u(x_M, y_M, t) + \gamma_R \cdot u(x_M + \Delta h, y_M, t) + \gamma_L \cdot u(x_M - \Delta h, y_M, t) + \gamma_U \cdot u(x_M, y_M + \Delta h, t) + \gamma_D \cdot u(x_M, y_M - \Delta h, t) \tag{3}$$

Où les coefficients  $\gamma_M, \gamma_R, \gamma_L, \gamma_U, \gamma_D$  reflètent le voisinage de Von Neumann (Figure 7 a). L'analogie entre l'équation aux dérivées partielles discrétisée et un automate cellulaire apparaît donc justifiée. L'équation (1) devient en tenant compte de (3):

$$G \cdot \frac{u(x_M, y_M, j\Delta t) - u(x_M, y_M, (j-1)\Delta t)}{\Delta t} = S + \gamma_M \cdot u(x_M, y_M, (j - 1)\Delta t) + \gamma_R \cdot u(x_M + \Delta h, y_M, (j - 1)\Delta t) + \gamma_L \cdot u(x_M - \Delta h, y_M, (j - 1)\Delta t) + \gamma_U \cdot u(x_M, y_M + \Delta h, (j - 1)\Delta t) + \gamma_D \cdot u(x_M, y_M - \Delta h, (j - 1)\Delta t)$$

En conséquence, nous rencontrons le même paradigme que celui des automates cellulaires à voisinage de Von Neumann. La méthode des conditions aux limites ne peut être appliquée, car les incendies peuvent se propager sur toute la forêt et les conditions aux bords, utilisées en physique ne peuvent être appliquées. Le développement de la divergence s'écrit:

$$\overrightarrow{div}[L(u, M, t) \cdot \overrightarrow{grad} u(M, t)] = \frac{\partial}{\partial x} \left( L(u, M, t) \cdot \frac{\partial u(M, t)}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( L(u, M, t) \cdot \frac{\partial u(M, t)}{\partial y} \right) \tag{4}$$

L'équation (4) après un développement en différences finies et factorisation devient:

$$= \left[ \frac{L(M, t)}{\Delta h^2} + \frac{1}{2\Delta h} \cdot \frac{\partial L(M, t)}{\partial x} \right] \cdot u(x_M + \Delta h, y_M, t) + \left[ \frac{-4}{\Delta h^2} \cdot L(M, t) \right] \cdot u(x_M, y_M, t) + \left[ \frac{L(M, t)}{\Delta h^2} - \frac{1}{2\Delta h} \cdot \frac{\partial L(M, t)}{\partial x} \right] \cdot u(x_M - \Delta h, y_M, t) + \left[ \frac{L(M, t)}{\Delta h^2} + \frac{1}{2\Delta h} \cdot \frac{\partial L(M, t)}{\partial y} \right] \cdot u(x_M, y_M + \Delta h, t) + \left[ \frac{L(M, t)}{\Delta h^2} - \frac{1}{2\Delta h} \cdot \frac{\partial L(M, t)}{\partial y} \right] \cdot u(x_M, y_M - \Delta h, t) \tag{5}$$

En égalisant les équations (3) et (5), on obtient les coefficients

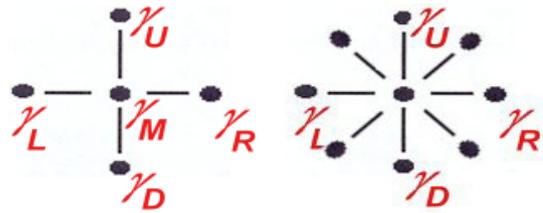


Figure 7 : a : Voisinage de Von Neumann (4 proches voisins) b : Voisinage de Moore (8 proches voisins)

En effet :

$$\gamma_M = \frac{-4L(M, t)}{\Delta h^2}$$

$$\gamma_R = \frac{L(M, t)}{\Delta h^2} + \frac{1}{2\Delta h} \cdot \frac{\partial L(M, t)}{\partial x}$$

$$\gamma_L = \frac{L(M, t)}{\Delta h^2} - \frac{1}{2\Delta h} \cdot \frac{\partial L(M, t)}{\partial x}$$

$$\gamma_U = \frac{L(M, t)}{\Delta h^2} + \frac{1}{2\Delta h} \cdot \frac{\partial L(M, t)}{\partial y}$$

$$\gamma_D = \frac{L(M, t)}{\Delta h^2} - \frac{1}{2\Delta h} \cdot \frac{\partial L(M, t)}{\partial y}$$

Ceci en ce qui concerne le voisinage de Von Neumann, qui correspond à la propagation du feu suivant quatre directions. Pour le voisinage de Moore (Figure 7b) qui correspond à la propagation du feu selon huit directions, les développements en différences finies ne présentent aucune difficulté, par souci de concision, ils sont omis. Notre logiciel LoSiFire traite ce voisinage.

**Modèle de simulation et logiciel élaboré LoSiFire**

Le logiciel LoSiFire que nous avons élaboré au cours de cette étude, montre que la forêt est simulée par un réseau n\*n (n=30, 40, 50, 60, 70). La densité d des arbres, le voisinage, la percolation p et le point de départ du feu et la dimension du réseau sont choisis en fonction de la structure de la forêt et selon le mode de propagation du feu. Ils sont des inputs de LoSiFire (Figure 8 ).



Figure 8 : Inputs du logiciel LoSiFire (nombre d'itération, densité, voisinage, départ du feu, saut du feu, percolation)

## RESULTATS ET DISCUSSION

L'étude nous a permis d'obtenir des résultats relatifs à la matrice « densité-percolation » (Tableau 3) et les seuils de percolation des différents types de voisinages (Figure 9, Figure 10).

La matrice (tableau 3) montre que la densité de la forêt est une grandeur caractéristique de celle-ci. Elle peut aussi être considérée comme un paramètre endogène de la percolation qui représente la structure globale de la forêt. La percolation est considérée comme une fonction multi-dimensionnelle qui dépend à la fois des paramètres physiques (relief, exposition,...) et des paramètres phyto-écologiques (essences forestières, ...) de la forêt. L'inter-relation « densité-percolation » prise en compte par notre logiciel LoSiFire a permis l'acquisition d'une matrice «densité-percolation » (Tableau 3). L'effet de cette inter- relation sur la simulation de la forêt détermine entre autres le nombre d'arbres que contient celle-ci.

La matrice, nous a permis aussi d'obtenir une base de données, constituée de simulations correspondantes à différentes structures forestières selon un réseau donné. De cette matrice on a sélectionné des combinaisons «densité-percolation» réalistes, c'est-à-dire celles qui n'entraînent pas une disparition totale de la forêt par le feu. Les percolations très élevées correspondraient à des forêts très denses (forêts idéales) dont les structures faciliteraient leur destruction totale par le feu. Elles aboutiraient à des amas infinis. Par conséquent, on ne s'intéressera qu'aux combinaisons inférieures à la diagonale principale.

Le nombre d'itérations (durée du feu) ne commence

à devenir perceptible qu'au dessus de la percolation  $p=0,60=p_c$  pour le voisinage de Von Neumann (Figure 9). Pour le voisinage de Moore (Figure 10), le seuil correspond à une percolation  $p_c = 0,24$ . Par conséquent, le voisinage de Moore facilite la propagation du feu même pour des percolations très faibles. Contrairement, au voisinage de Von Neumann qui nécessite des percolations élevées pour que le feu percole dans la forêt. Pour les valeurs de percolation  $p$  inférieures aux seuils  $p_c$  (pour les deux types de voisinage), le feu reste confiné sur quelques bosquets ou s'éteint rapidement. Le feu n'a pas de facilité pour se propager dans la forêt (état de non percolation)

L'analyse des incendies de forêt se base sur la surface ravagée, qualifiée d'indicateur d'efficacité du système d'alerte, de lutte et du dommage causé. Notre logiciel LoSiFire permet un suivi de l'évolution du feu via le comptage des arbres brûlés à chaque itération.

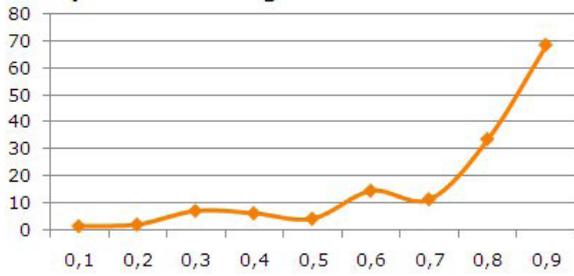
En effet, l'évolution du feu (Figure11) et le Tableau 4 montre qu'à l'étape 12, celui-ci a ravagé 81 arbres alors qu'à l'étape 23, il a ravagé 63 arbres (144 est un total cumulé). Ceci traduit bien l'hétérogénéité de la structure de la forêt. En effet, jusqu'à la douzième étape le feu a connu une accélération et puis après un ralentissement. Ceci trouve son explication dans le passage du feu d'une aire boisée homogène facilitant la propagation de l'incendie à un transit dans une aire moins percolante.

Ainsi, l'étude de la nature de la mosaïque écologique de la forêt et son importance sur l'évolution de l'incendie sont possibles. Une cartographie du risque est aussi plausible. La proposition de procédures

**Tableau 3 : Matrice« Densité-Percolation» (NI est le nombre d'arbres que contient la forêt simulée)**

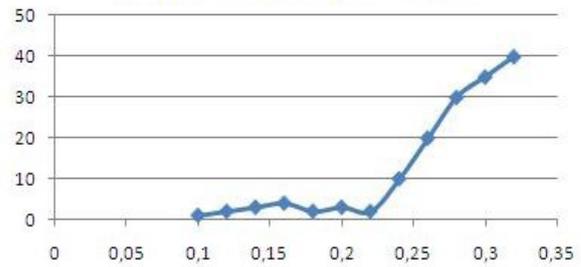
Percolation	d=5 NI	d=10 NI	d=15 NI	d=20 NI	d=25 NI	d=30 NI	d=35 NI	d=40 NI	d=45 NI	d=50 NI	d=55 NI	d=60 NI	d=65 NI	d=70 NI	d=75 NI	d=80 NI	d=85 NI
0,95	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589
0,90	1810	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589
0,85	1191	2394	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589
0,80	901	1753	2682	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589
0,75	726	1490	2115	2864	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589
0,70	609	1182	1767	2375	2995	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589
0,65	535	982	1514	2025	2542	3041	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589
0,60	443	865	1308	1721	2232	2677	3156	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589
0,55	401	844	1217	1557	1960	2377	2758	3180	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589
0,50	368	678	1107	1476	1724	2157	2511	2834	3229	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589
0,45	323	605	1003	1312	1634	2004	2347	2577	2914	3253	3589	3589	3589	3589	3589	3589	3589
0,40	322	581	884	1238	1491	1787	2026	2394	2721	2970	3322	3589	3589	3589	3589	3589	3589
0,35	290	501	851	1077	1411	1612	1943	2183	2437	2816	3045	3328	3589	3589	3589	3589	3589
0,30	260	527	789	1052	1246	1505	1808	2065	2290	2549	2845	3089	3304	3589	3589	3589	3589
0,25	239	507	722	947	1175	1481	1725	1935	2210	2345	2663	2877	3114	3354	3589	3589	3589
0,20	227	426	664	894	1104	1378	1576	1834	1968	2232	2488	2684	2900	3179	3368	3589	3589
0,15	221	415	646	821	1079	1251	1494	1727	1915	2117	2314	2535	2709	2939	3188	3374	3589

**Nbre d'itération en fonction de la percolation pour le voisinage de Von Neumann**

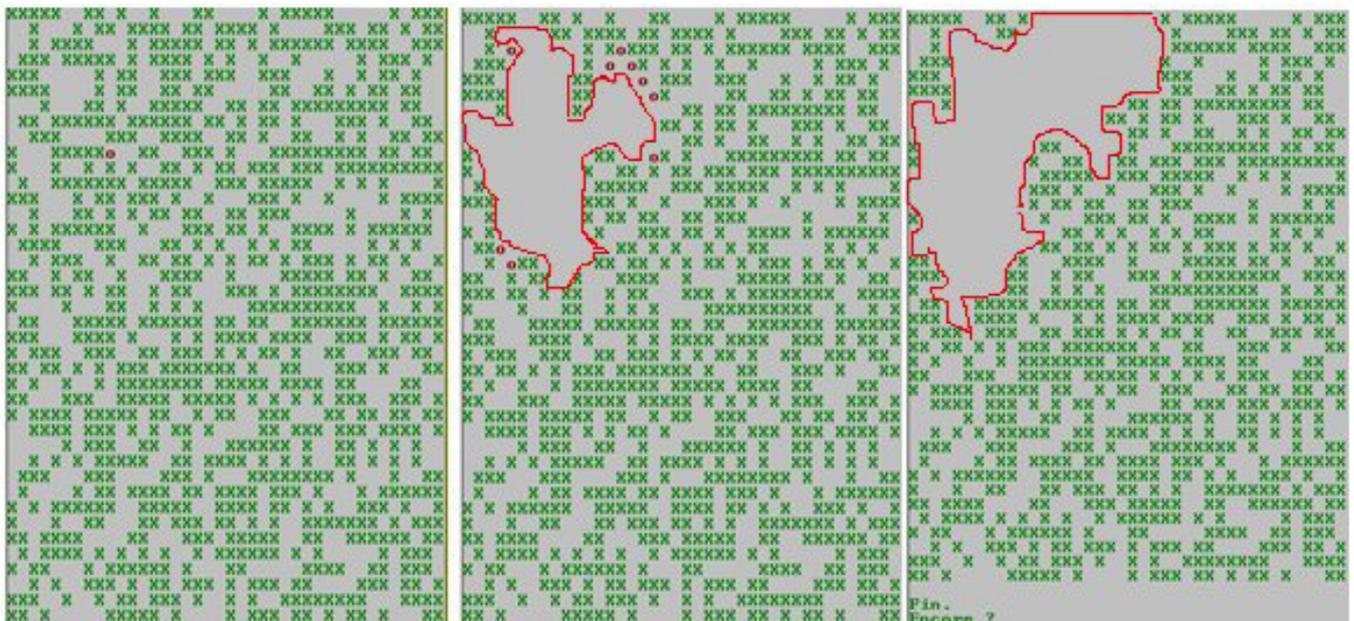


**Figure 9 : Seuil de percolation situé autour de 0,59 pour le voisinage V. N**

**Nbre d'itération en fonction de la percolation pour le voisinage de Moore**



**Figure 10 : Seuil de percolation situé autour de 0,22 pour le voisinage de Moore**



**Image a : Etape 0 avec déclenchement du feu**

**Image b : Etape 12**

**Image c : Etape 23 et finale**

**Figure 11 : Evolution des étapes d'évolution du feu, avec : -étape 0 : Image a, -étape 12 : Image b, -étape 23= extinction : Image c**

**Tableau 4 : Evolution du feu de l'étape 0 à l'étape 23 (extinction)**

Réseau 40*40, voisinage=4, densité=10, percolation = 0,83, départ du feu : point(10,10)			
Durée du feu (en étapes)	0	12	23
Nombre d'arbres brûlés	0	81	144

inhibitrices du feu lors d'un aménagement est également réalisable.

L'analyse de l'influence de la taille du réseau de simulation sur la durée du feu (en nombre d'étape) et sur le degré de consumer (nombre d'arbres brûlés) font l'objet de la Figure 12 et du Tableau 5.

A densité et percolation égales et au voisinage 4, les

différentes cartes (réseaux) se comportent de manière différente vis-à-vis de l'incendie. En effet, la taille du réseau influe sur la durée du feu et sur le degré de consumer, comme le montrent la Figure 12 et le Tableau 5. Par conséquent, la durée du feu ainsi que le nombre d'arbres brûlés augmentent avec la dimension du réseau.

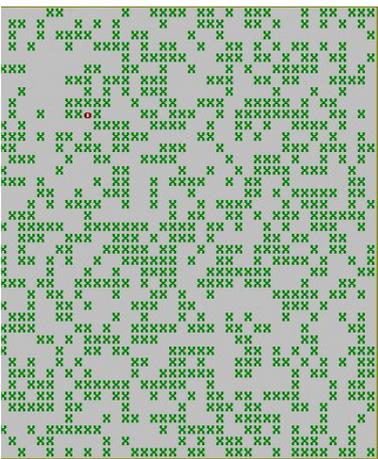
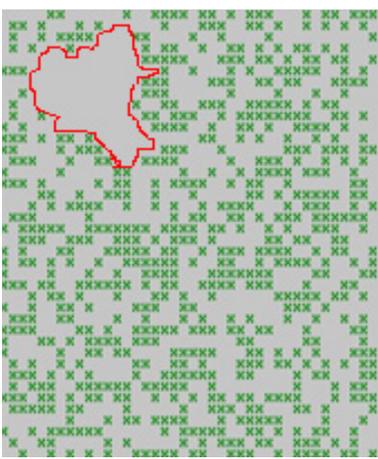
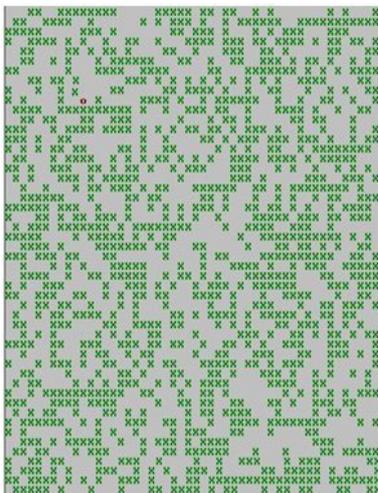
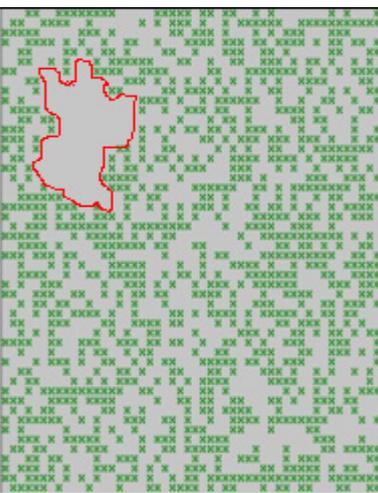
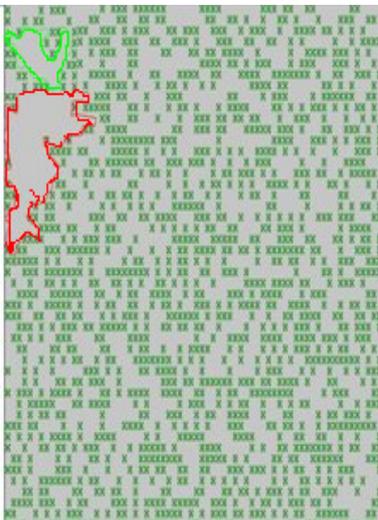
Cartes	Forêt à l'état initial	Forêt après extinction du feu	Analyse diachronique
40*40			densité=5, percolation=0,90 départ du feu : point (10,10) voisinage =4 la durée du feu est 14 étapes. Le nombre d'arbres brûlés est 39. La zone endommagée est délimitée.
50*50			densité=5 percolation=0.90 départ du feu : point(10,10) voisinage=4 la durée du feu est 23 étapes. Le nombre d'arbres brûlés est 56. La zone ravagée est délimitée.
70*70			densité=5 percolation=0,90 départ du feu : point (10,10) voisinage =4 La durée du feu est 20 étapes .Le nombre d'arbres brûlés est 62. La forêt présente une clairière (zone délimitée en vert). La partie ravagée par le feu est délimitée en rouge.

Figure 12 :Evolution du feu pour des réseaux de dimensions 40,50 et 70

Tableau 5 : Evolution du feu en fonction de la dimension du réseau

Densité=5	Percolation= 0,90	Voisinage=4		
Carte	40*40	50*50	70*70	
Durée du feu (unités)	14	23	30	
Nombre d'arbre brûlé	39	56	62	

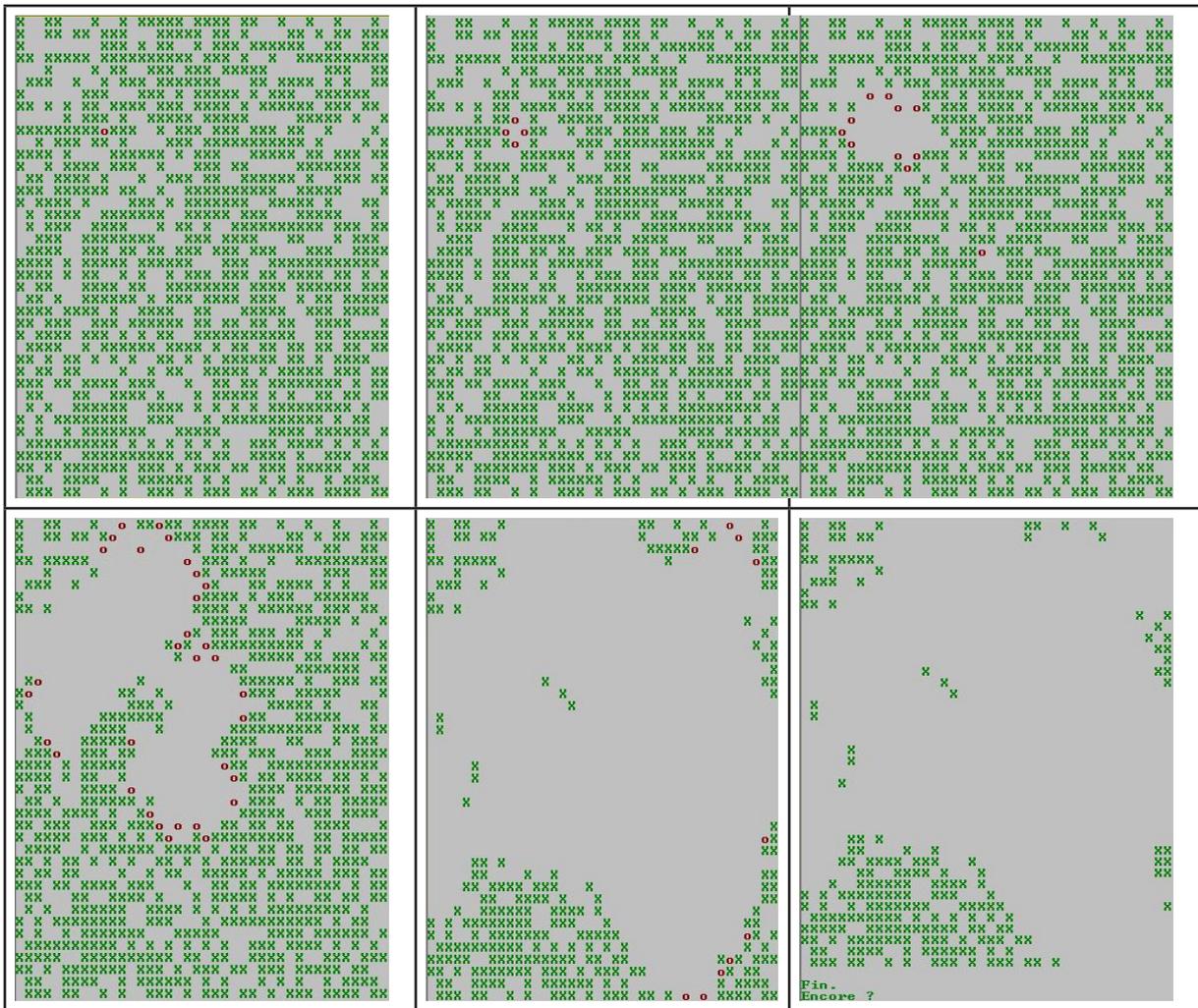


Figure 13 : Evolution et saut du feu

Tableau 6 : Evolution et saut de feu pour le voisinage 4

$R 40*40 \quad d=10, p=0.85 \quad v=4,$ départ feu(10,10) saut feu(20,20)	1 <sup>ère</sup> image	2 <sup>ème</sup> image	3 <sup>ème</sup> image	4 <sup>ème</sup> image	5 <sup>ème</sup> image	6 <sup>ème</sup> image
durée du feu en nombre d'étapes	0	1	5	15	39	51
Nombre d'arbres brûlés cumulés	0	4	21	198	771	838

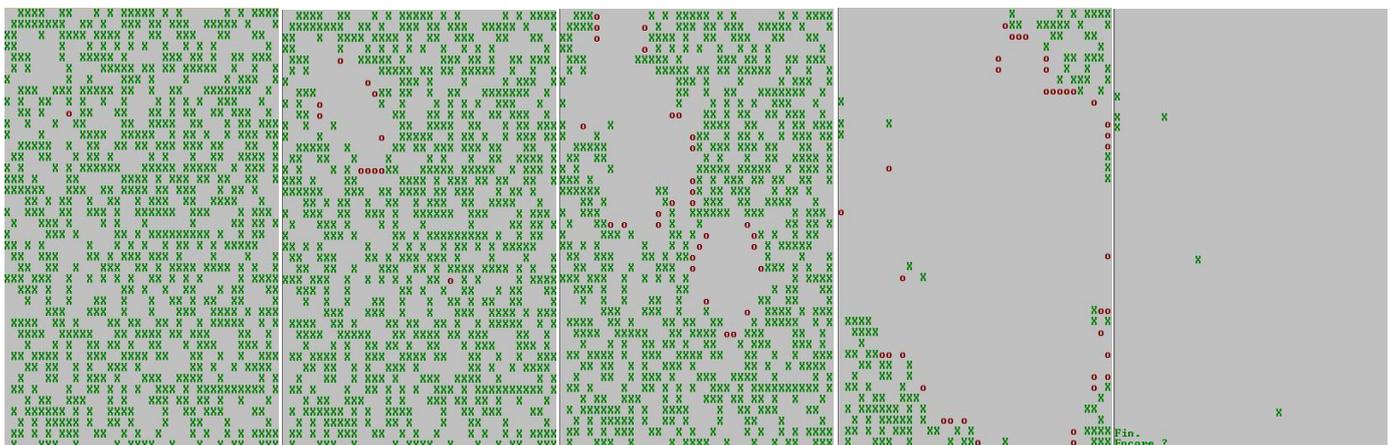


Figure 14 : Evolution et saut de feu pour le voisinage 8

Nous avons trouvé que les seuils de percolation diminuent avec le voisinage (Figures 9 et 10), c'est-à-dire que la propagation est facilitée lorsque l'on augmente le voisinage. En effet, le voisinage 8 (de Moore) qui correspond à la propagation du feu selon huit directions facilite l'évolution du feu et ne nécessite pas de percolation élevée. Les figures

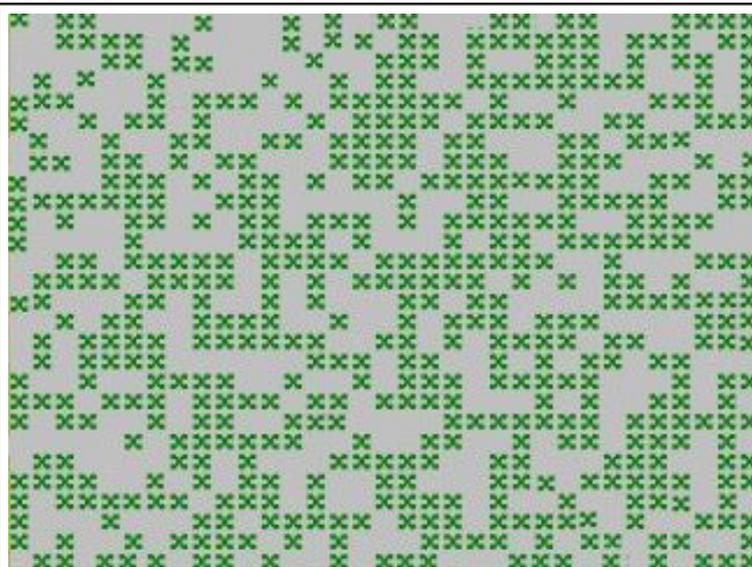
13 et 14 et les tableaux 6 et 7 montrent que la durée du feu correspondant au voisinage 4 (51 étapes) (propagation du feu selon 4 directions) est supérieure à celle correspondant au voisinage de 8 (33 étapes) (de Moore). Néanmoins le degré de dégradation relatif au voisinage 8 est beaucoup supérieur à celui relatif au voisinage 4.

**Tableau 7 : Evolution et saut de feu pour le voisinage 8**

$R\ 40*40\ d=10, p=0.85\ v=8,$ <i>départ feu (10,10) saut feu (25,25)</i>	1 <sup>ère</sup> image	2 <sup>ème</sup> image	3 <sup>ème</sup> image	4 <sup>ème</sup> image	5 <sup>ème</sup> image
durée du feu en nombre d'étapes	0	5	10	22	33
Nombre d'arbres brûlés cumulés	0	22	114	622	784



Notre logiciel LoSiFire nous a permis de modéliser l'échantillon de la forêt de Maamora (Figure 15) par un réseau de dimension  $33*33$ . La percolation de l'échantillon simulé est 0,80 et sa densité est 12 arbres/unité de surface, comme le montre la figure ci-contre.



```

>>>LoSiFire 2018<<<
Reseau 33*33
voisinage de Von Neumann-4, Voisinage de Moore-8
densite = 12 i_feu = 10 j_feu = 10
voisinage = 8 probabilite = 0,80 percolation = 0,80 et pif_10
Etape = 0 Compteur = 0 ii = 15 jj = 15
dimension matrice : 33
arbre arbre initial = 0 arbre arbre brule = 0
  
```

**Figure 16 : Echantillon de la forêt Maamora simulé**

## CONCLUSION

Cette étude a abouti à l'élaboration d'un logiciel de simulation de feu de Forêt LoSiFire, qui d'une part réalise la projection de la forêt (trois dimensions) en deux dimensions et d'autre part permet de suivre l'évolution du feu de forêt et présente plusieurs scénarii du feu. Ce logiciel est élaboré sur la base du «jeu de la vie» et du modèle de percolation. LosiFire nous a permis de constater que la propagation du feu ne peut avoir lieu que si la percolation de la forêt est au dessus d'un certain seuil de percolation (percolation critique), qui à son tour dépend du voisinage; c'est à dire du mode de propagation du feu selon quatre ou huit directions. L'évolution du feu est fortement dépendante de la percolation (structure) de la forêt, de sa densité, du voisinage des arbres et de la dimension du réseau simulant la forêt.

LoSiFire permet aussi de connaître la structure (percolation) hétérogène et aléatoire de la forêt via le mode de propagation (accélération, ralentissement ou extinction) du feu au sein de celle-ci. LoSiFire envisage aussi le saut de feu lors de son évolution pour déclencher d'autres foyers de feu dans la forêt. La base de données (Matrice « densité-percolation »), acquise à partir de LoSiFire, offre la possibilité d'approcher les percolations des forêts naturelles, avec la possibilité d'éviter des percolations qui favorisent l'amplification de la destruction de la forêt par le feu. Ceci est rendu possible par l'adoption de procédures inhibitrices du feu afin de mettre la forêt dans un état de non percolation (forêt à percolation inférieure  $p_c$ ). En effet, les résultats obtenus via LoSiFire peuvent inspirer des recommandations pour des aménagements destinés à la forêt. Avec LoSiFire nous avons pu modéliser et simuler des échantillons de forêts naturelles.

## REMERCIEMENTS

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

## REFERENCES CITEES

- Assali F. & Rachdi S. Communication #1.4
- Vélez R. (ed.). Protection contre les incendies de forêt : principes et méthodes d'action. Zaragoza : CIHEAM, 1999. 118 p. (Options Méditerranéennes: Série B. Etudes et Recherches; n. 26).
- Rothermel R.C. (1972) A Mathematical Model for Predicting Fire Spread in Wild Land Fuels, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, Research Paper ,INT-115, Ogden, Utah.
- Porterie B et al (2005) Propagation in a 2D weighted local small world network, Physical Review E. Vol. 71
- Fatès N. (2006) Les automates cellulaires. Sciences, 1<sup>er</sup> trimestre. Université Paris I Sorbonne
- Gardner M. (1970), Scientific American, Vol. 223 (October), pp. 120-123
- Beffara V. (2011) SMF- Gazette-128, avril 2011
- Broadbent S.R & Hammersley J.M (1957) « Percolation processes, I and II », Proc. Cambridge Philo. Soc. 53 p.629-505
- Orlowska S. (2003) Thèse, Ecole doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique, Lyon
- Nougier J.P. (1993) Méthode de calcul numérique 3<sup>ème</sup> édition Masson Paris