

Stage long du Magistère Interuniversitaire de Physique
Réalisé au Laboratoire d'Ecologie de l'Ecole Normale Supérieure

De l'influence de l'urbanisation sur le régime des feux de forêt.

Etude de la modification des propriétés de percolation du feu par la modification du paysage de combustible dûe à la présence de constructions en zone forestière.

Encadré par :

Patrick BOURGERON du Laboratoire d'Ecologie de l'ENS

Leticia CUGLIANDOLO du Laboratoire de Physique Théorique de l'ENS

Michael GHIL du Laboratoire de Météorologie Dynamique de l'ENS

RÉSUMÉ	4
A- POSITION DU PROBLÈME	5
1-Contextes historique, écologique, géographique	5
1-1-Contexte géographique	5
1-2-Rôle des feux dans l'évolution d'un écosystème forestier	5
1-3-Régime des feux dans le Front Range	6
2-Plusieurs influences de l'urbanisation sur le régime des feux:	6
2-1-Influences sur chaque feu	6
2-2-Influences à plus grande échelle de temps	7
B- MÉTHODES	8
1-But, intérêt et méthode de la présente étude	8
2-Utilisation de l'outil modélisation	9
2-1-Intérêts et dangers des modèles	9
2-2-Plusieurs types de modèles	10
2-3-Manque d'études concernant l'influence des maisons en tant que combustible particulier	10
3-Fondements de l'hypothèse de base du présent modèle	10
4-Construction du modèle	11
C- RÉSULTATS	13
1-Sans maisons	13
1-1-Evolution des tailles moyennes	13
1-2-Evolution des distributions de taille des feux	14
2-Avec maisons	15
2-1-Evolution des tailles moyennes	15
2-2-Evolution des distributions de taille	17
2-3-Comparaison des distributions de taille avec et sans maisons	19
3-Avec effet maison atténué	19
D- ETUDE DE SENSIBILITÉ	21
1-Stabilité statistique des résultats	21
2-Influence du choix du paramètre de sortie	21
3-Effets de taille finie	22
4-Influence du choix du nombre de voisins	22
E- DISCUSSION	23
1-Densité de cases non brûlées	23
2-Evaluation des valeurs de p réalistes	24

3-Evaluation des valeurs de d réalistes	24
4- Paysages en mosaïque, suppression des feux et présence d'habitations	25
G- LIMITES DE L'ÉTUDE	26
1-Limites du modèle	26
2-Robustesse des résultats, complexité du phénomène, fiabilité des conclusions et des conseils de gestion	26
H-PERSPECTIVES	28

Résumé

Cette étude se propose d'analyser et de comprendre les interactions entre les dynamiques environnementales et socio-économiques au cœur des interfaces entre milieux naturels et urbains. Nous nous intéresserons en particulier aux transformations rapides qu'ont fait subir les développements urbains et périurbains à la structure et au fonctionnement des écosystèmes forestiers, via le régime des feux.

La réelle dynamique d'urbanisation a lieu en périphérie des villes, qui sont de moins en moins compactes et adoptent des configurations ramifiées, de type dendritique, ce qui augmente d'autant plus les interfaces avec les milieux naturels ou ruraux.

Les feux de forêt font intégralement partie du fonctionnement des écosystèmes forestiers et adoptent, en conditions naturelles, un comportement auto-régulé [He and Mladenoff 1999]. Ils jouent en particulier un rôle fondamental dans l'hétérogénéité spatiale des paysages et la diversité des espèces [Baker 1992, Turner 1999].

Avec la progression urbaine en zone forestière, les humains peu discrets imposent leur présence et leur organisation à l'organisation naturelle de la forêt. La construction de routes, d'habitations et l'installation des habitants provoquent en particulier des changements perceptibles dans le régime des feux. La présence d'habitants en zone forestière est ainsi inévitablement accompagnée d'une politique de suppression des feux dans le but d'assurer la sécurité de ces personnes et de leurs biens. Ceci est tout à fait compréhensible mais il apparaît maintenant que cette suppression frustrer la forêt de son besoin de feux ce qui aurait tendance à favoriser les feux rares, mais intenses au détriment de feux plus réguliers mais peu sévères. Une éradication absolue des feux de forêt n'est ni possible, ni souhaitable [Holling, 2001].

Les maisons peuvent par ailleurs plus facilement se protéger de feux rapides et peu intenses que de feux extrêmement intenses, même rares. On peut, en appliquant des règles simples de construction en zone potentiellement inflammable, accepter la cohabitation tout en protégeant autant que possible les vies des personnes et les biens [Cohen]. Une maison mal construite est par contre très réactive au contact de feux même peu sévères, les critères sont essentiellement l'état de la végétation dans la zone immédiatement voisine (périmètre de 30/40 mètres autour de la maison), les matériaux constitutifs de la maison [Cohen] et l'intensité locale du feu.

Dans les forêts de conifères du Colorado, les maisons sont malgré tout construites le plus souvent en bois, au contact direct des grands arbres et sans protection particulière du toit. Or, la combustion des habitations peut augmenter l'intensité locale du feu via une température de flamme élevée, une colonne de chaleur puissante entraînant au loin les débris enflammés et des flammes hautes pouvant transformer un feu de surface en feu de cimes.

Nous allons dans cette étude construire un modèle simple permettant d'évaluer l'influence relative de deux types de combustible: la végétation constituant le fond du paysage et les constructions ponctuellement disséminées dans ce paysage, facilitant localement la propagation du feu. Nous concluerons sur l'éventuelle pertinence de la prise en compte des habitations en tant que combustible particulier dans l'étude de la perturbation anthropique du régime des feux.

A- Position du problème

1-Contextes historique, écologique, géographique

1-1-Contexte géographique

Nous nous consacrerons dans cette étude à la zone Est des montagnes rocheuses, plus précisément au Colorado Front Range dans la région de Boulder aux Etats-Unis.

(voir ANNEXE 1)

Les écosystèmes de la pente Est du Colorado Front Range sont dominés par le *ponderosa pine*. La structure de ces écosystèmes varie avec l'altitude, de forêts ouvertes en dessous de 1800m jusqu'à des états denses et mixtes où *Ponderosa pine*, *Lodgepole pine* et *Douglas fir* (respectivement *Pinus ponderosa*, *Pinus contorta* et *Pseudotsiga menziesii*) se partagent le terrain, au-delà de 2500m.[Veblen et al 2002] (voir ANNEXE 2)

Les Rocheuses jouant le rôle d'une barrière vis à vis des nuages venant de l'Est, cette région est sujette à de nombreux orages. Les forêts couvertes de résineux brûlent donc régulièrement depuis toujours.

1-2-Rôle des feux dans l'évolution d'un écosystème forestier

Ami ou ennemi ? Tout dépend du point de vue, mais le feu n'est désormais plus perçu comme phénomène uniquement destructeur. Bien qu'il figure encore dans la catégorie « catastrophes naturelles » de la plupart des compagnies d'assurance, les scientifiques défendent depuis plusieurs décennies son action utile et nécessaire au bon fonctionnement de certains écosystèmes. Les feux n'agissent en effet pas aveuglément dans une forêt. Les zones composées d'arbres plutôt vieux ou malades brûlent plus facilement, facilitant la propagation des feux dans ces zones là et permettant de « nettoyer » la forêt de nombre de maladies et parasites. Les feux agissent comme des moteurs de l'entretien et de la régénération de la forêt.

Les incendies superficiels, habituellement rapides et moins dangereux, ne brûlent que la première couche de végétation située à la surface du sol. Les arbres adultes, ainsi que la banque de graines sont donc ainsi préservés. En revanche, les incendies dits « de la couronne » sont beaucoup plus dévastateurs. Les paysages après un feu sont désolés, il traîne une atmosphère lunaire, une atmosphère de mort. Pourtant peu de temps après, ceux-ci reverdissent et de nombreuses formes de vie réinvestissent le lieu¹ [Turner,1997]. Les cendres issues du passage du feu constituent en effet un engrais naturel composé des produits de la combustion des tissus ligneux et des débris végétaux, apportant les minéraux essentiels à la croissance : azote, potassium phosphore etc... En brûlant la litière et l'humus, le feu modifie également les composants et processus physico-chimiques et biologiques du sol. Il stabilise par exemple le pH du sol en refermant le cycle des ions Ca^{2+} et Mg^{2+} qui, pompés du sol et coincés dans les troncs rendaient le sol acide par leur absence. Par ailleurs certaines plantes typiques du Colorado sont particulièrement bien adaptées à la cohabitation avec ce voisin dangereux. Le feu est ainsi un facteur stimulant pour la germination des graines du *Lodgepole pine*, présent dans cette région du Colorado, ce qui permet à cette espèce d'être parmi les premières à réinvestir cette niche écologique libérée. Le pin jaune, *Ponderosa pine*, résiste

¹ A ce propos, un exemple en Allemagne. Une forêt dévastée par une tempête. Les gestionnaires décident de tester deux types de gestion différents: une moitié est laissée libre à l'autorégénération plus ou moins anarchique alors que l'autre moitié est gérée par l'homme. L'agitation règne, des hommes déplacent les arbres tombés, coupent les arbres morts. D'autres hommes plantent d'autres arbres. Dix ans plus tard la différence est nette, la moitié de forêt laissée à l'abandon foisonne d'une vie plus épanouie, diverse et riche que la moitié organisée de main d'homme.

bien au passage d'un feu de surface grâce à son épaisse écorce protectrice et à l'absence de branches basses.

Tout comme un remède peut se transformer en poison, tout est ici question d'équilibre entre processus. Alors que le manque de feux peut créer une forêt vieillissante, abîmée ou envahie de parasites, des incendies trop fréquents ne permettent plus qu'à une végétation herbacée de pousser voire peuvent réduire suffisamment le couvert végétal pour déclencher le cercle vicieux de l'érosion. De nombreuses régions méditerranéennes sont ainsi le lieu d'incendies trop nombreux rendant de nombreux versants de collines stériles et désolées.

1-3-Régime des feux dans le Front Range

Passons à l'analyse du régime des feux dans les écosystèmes spécifiques à la zone étudiée.

Avant la suppression des feux moderne, les forêts ouvertes de basse altitude étaient caractérisées par de fréquents feux de surface, un même site subissant le passage d'un tel feu tous les moins de 10 ans en moyenne. En haute altitude, les feux étaient plus rares, tous les plus de 30 ans en moyenne, mais associaient feux de surface et feux de couronne très étendus [Veblen et al 2002].

Les feux peuvent être initiés par un éclair ou par une main humaine. Pour favoriser la venue des bisons, les Indiens utilisaient le feu comme fertilisant pour les prairies bien avant l'arrivée des colons européens. La ruée vers l'ouest a fait augmenter nettement le nombre de feux au milieu du XIX^e siècle. Le début du XX^e siècle a vu une diminution drastique de la fréquence des incendies suite à la création de réserves forestières nationales en 1905, associée à une politique efficace de suppression des feux dans les années 1920 [Veblen et al 2002].

Plus encore qu'aux activités humaines, le régime des feux est fortement corrélé aux conditions climatiques, qui influent à la fois sur la croissance de la végétation, et sur son état de sécheresse. L'oscillation Australe El Nino/La Nina (ENSO) joue en particulier un rôle important. A la phase chaude de l'ENSO, El Nino, est associée une forte humidité printanière, ce qui favorise la croissance des arbres. La Nina suit de quelques années El Nino. Ses printemps chauds et secs assèchent la végétation, ce qui crée des conditions idéales pour la propagation des feux. Des études de données historiques [Veblen et al 2000] mettent en évidence avec une très bonne corrélation un cycle de deux à trois oscillations australes entre les années à feux.

2-Plusieurs influences de l'urbanisation sur le régime des feux:

2-1-Influences sur chaque feu

L'urbanisation en zone forestière implique un certain nombre de modifications à l'organisation de la forêt. Voici les principales influences que nous avons recensées :

La proximité d'humains implique tout d'abord une augmentation importante du nombre de départs de feux. Ces feux peuvent être initiés soit par négligence, soit volontairement.

La présence humaine est par ailleurs inévitablement associée à la lutte contre les incendies. Cette lutte est très efficace dans cette région et plus de 90% des feux sont éteints avant qu'ils ne prennent de l'ampleur.

Enfin, les habitations en zone forestière constituent un combustible particulier, différent de la végétation alentour ce qui influence le comportement des feux.

Par ailleurs, la densité et la répartition spatiale des habitations influencent également la répartition géographique de l'intensité des moyens mis en œuvre pour la lutte contre le feu, les priorités des pompiers étant la protection des personnes, puis de leurs biens, et enfin de la végétation. La lutte anti-feu a donc tendance à se concentrer au voisinage des maisons, ce qui pourrait éventuellement compenser l'intensification locale du feu autour de ces mêmes maisons.

De tous ces facteurs, la suppression des feux est celui dont l'influence est la plus importante, autant à l'échelle d'un feu qu'aux plus grandes échelles spatio-temporelles.

2-2-Influences à plus grande échelle de temps

La propagation d'un feu dépend fortement des propriétés, globales et locales, du paysage. Un feu monte par exemple beaucoup plus facilement les pentes qu'il ne les descend. Il est également très sensible aux conditions climatiques régnant durant l'incendie, température et humidité de l'air bien sûr, mais surtout intensité et direction du vent.

Après le passage d'un feu, on observe une mosaïque de zones brûlées plus ou moins intensément. Dépendant de tout un tas de facteurs, un feu peut brûler plus ou moins intensément, tuer toute la végétation présente dans certaines zones tout en laissant d'autres zones quasiment inaltérées. (figure 1a et b issues du « Hayman fire case study »)

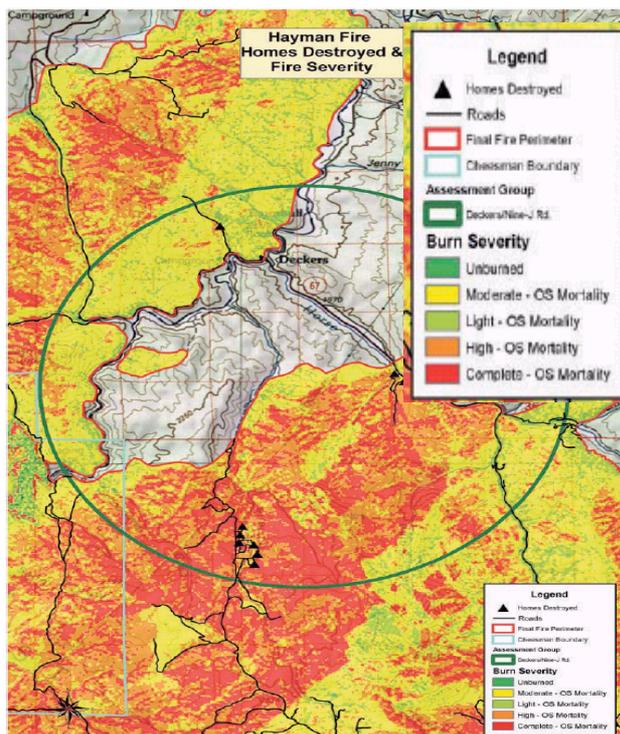


Figure 1a: carte de sévérite des feux d'une partie de la zone brûlée par le feu Hayman.

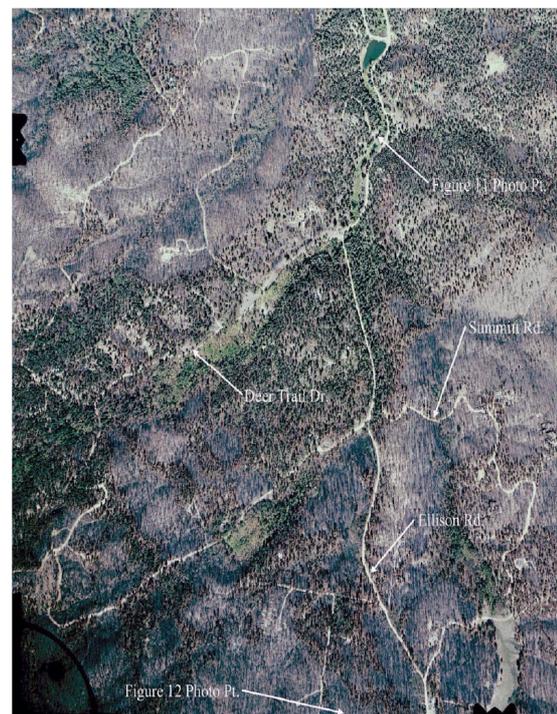


Figure 1b: Photo aérienne d'une partie de la zone brûlée par le feu Hayman

Peu de temps après le passage d'un feu, la végétation nouvelle est éparse, les arbres jeunes, verts et distants les uns des autres, ce qui diminue les chances qu'a un feu de traverser cette zone. Par contre, plus le temps passe plus la zone devient dense, à la fois horizontalement et verticalement. Les canopées grandissent jusqu'à se toucher, le sol se charge d'une grande quantité d'herbacées, arbustes et bois mort, et la zone intermédiaire entre le sol et les cimes se charge également d'arbres plus jeunes, de branches et d'espèces parasites ce qui crée une continuité de combustible entraînant des feux extrêmement intenses.

Les feux favorisent ainsi la création et le maintien d'un paysage en mosaïque, alternant zones jeunes et zones plus âgées, forêts ouvertes et fermées. Les feux se propagent préférentiellement dans les zones où il n'y a pas eu de feu depuis longtemps, et ils s'arrêtent en général devant les zones jeunes, peu inflammables.

Ces paysages en mosaïque permettent de contenir naturellement la taille des feux, qui viennent buter sur les zones ayant été brûlées il y a peu. Un exemple significatif dans le cas du feu Hayman, feu très intense et étendu qui a brûlé 557 km² en juin 2002. Le feu a brûlé durant trois semaines et a connu des phases d'activités alternativement très intenses, puis faible, puis intense à nouveau. Ces variations d'intensité dépendaient directement des conditions de vent et d'humidité relative de l'air. Le feu a rencontré sur sa route environ 85 km² de combustible modifié (zones brûlées il y a peu, barrières anti-feu sous forme de feux préventifs ou d'éclaircies préventives, zones de forêt exploitée...). Les scientifiques universitaires ou du Forest Service qui se sont penchés sur le Hayman Fire ont remarqué des comportements complexes des feux vis à vis de ces modifications de combustible, et aucune tendance nette n'a pu être mise en évidence. Lors des périodes de conditions climatiques modérées, ces efforts de prévention des feux ont été parfois efficaces, parfois non. Lors des périodes d'activité intense du feu, le feu se propageait à travers les défenses comme si de rien n'était. Les seules zones ayant réussi à « arrêter » le feu sont les zones ayant été brûlées il y a peu [Hayman Fire Case Study Analysis].

On comprend mieux maintenant pourquoi la suppression des feux, augmentant le temps entre chaque feu, augmente la combustibilité de chaque parcelle, ce qui favorise l'homogénéisation des paysages. Les feux peuvent en effet se propager sur de plus grandes distances rendant par conséquent les taches du patchwork plus étendues. La diminution de l'hétérogénéité spatiale des paysages réduit les capacités du feu à s'autoréguler[Hargrove, Turner, Gardner 2000].

Des politiques de suppression des feux trop radicales semblent donc favoriser des feux plus rares mais plus intenses, plus étendus et plus destructeurs.

B- Méthodes

1-But, intérêt et méthode de la présente étude

Le but de cette étude est l'étude de l'impact des constructions en tant que combustible particulier sur la dynamique d'un feu de forêt, afin d'évaluer la pertinence de ce paramètre en tant que perturbation du régime des feux.

Nous avons pour cela caricaturé l'influence de la combustion d'une maison sur l'intensité locale du feu, étudié l'influence de ces combustibles ponctuels sur le comportement global du feu.

L'intérêt principal de cette étude est sa simplicité de fonctionnement, et donc d'interprétation. Cette étude de première approximation ouvre la voie à l'évaluation plus fine de cet effet, et à son intégration dans des études socio-écologiques plus complètes.

2-Utilisation de l'outil modélisation

2-1-Intérêts et dangers des modèles

Les phénomènes réels sont TOUS d'une complexité infinie, et les sciences ne permettent d'en donner qu'une vision très partielle. Il est très important, tant pour les scientifiques qui créent cette science que pour les managers, ingénieurs et politiques qui l'utilisent, d'être conscients des limites inhérentes à l'approche scientifique sous peine de faire des erreurs aux conséquences non maîtrisées pouvant s'avérer catastrophiques. Ce débat, via le concept de principe de précaution, est en cours actuellement suite aux conséquences sanitaires imprévues et graves de certaines technologies « scientifiquement validées » et à l'observation de modifications notables de certains composants essentiels au fonctionnement de notre planète, tels que la forêt amazonienne, la couche d'ozone ou la composition chimique de notre atmosphère pour ne citer que quelques exemples.

La modélisation est l'essence même de l'approche scientifique, et elle permet une avancée notable de nos connaissances lorsqu'elle est bien utilisée. Elle consiste à mettre en évidence les phénomènes qui semblent essentiels pour expliquer un comportement observé, à approfondir notre compréhension de ces phénomènes jusqu'à les réduire à des interactions simples et intuitives d'agent à agent, puis à étudier un système n'évoluant que sous l'influence de ces interactions. Lorsque le comportement de ce « modèle » simplifié de la réalité correspond de façon satisfaisante au comportement de la réalité en question, on estime avoir pris en compte les phénomènes essentiels. Sinon, il est nécessaire de recommencer le processus, soit au niveau de la prise en compte des phénomènes essentiels, soit au niveau de la modélisation de chacun de ces phénomènes. Cet aller-retour entre théorie (mise en évidence et modélisation des phénomènes essentiels) et expérience (confrontation des hypothèses de fonctionnement aux faits réellement observés) est absolument nécessaire car il joue un rôle à la fois moteur, créateur et stabilisateur dans l'avancée des sciences.

Une fois les phénomènes convenablement compris et modélisés, on obtient un système modèle qui reproduit convenablement les comportements du système étudié dans la gamme de conditions ayant pu être testés. On peut alors entrer dans la phase de prédiction et de test de comportements sous certaines conditions et d'évaluation d'impacts de certains événements extérieurs.

Dans le cas de l'étude des systèmes socio-écologiques, étude du fonctionnement des écosystèmes intégrant les influences anthropiques et étude du fonctionnement de nos sociétés intégrant les évolutions de l'environnement, on peut tester par exemple l'effet de certaines politiques de gestion sur le comportement d'écosystèmes et mettre en évidence les comportements permettant le bon fonctionnement des systèmes couplés socio-écologiques, c'est à dire bénéfiques à l'évolution de chacune des parties. Il faut garder à l'esprit que les effets observés sont ceux du modèle en question, et ne sont que des comportements que le système réel POURRAIT avoir. Les modèles peuvent donc mettre en évidence des comportements possibles et mettre en garde les décideurs contre des choix qui semblent contraires aux effets souhaités, mais ils ne peuvent en aucun cas prévoir de façon certaine la trajectoire qui sera réellement suivie. **C'est ainsi que la plupart des décisions sont prises dans un contexte d'incertitude et de compréhension partielle des phénomènes, ce qui nécessite la plus grande prudence**, surtout lorsque ces décisions ont des conséquences à l'échelle planétaire.

2-2-Plusieurs types de modèles

Concernant les interactions forêt/feux, de nombreux modèles existent et poursuivent des buts différents.

Certains décrivent de façon précise la propagation d'un feu dans un paysage forestier donné, ils permettent de cartographier les zones à risque, voire de prévoir en temps réel les évolutions les plus probables d'un incendie. Ils sont utilisés comme outils d'aide à la décision par les forces de lutte anti-feu.

D'autres ne tentent pas de décrire l'évolution précise d'un feu, mais s'intéressent aux comportements statistiques du feu en tant que phénomène naturel, en mettant par exemple en évidence des lois de puissance fréquence d'occurrence de feux / taille des feux. Ces études tendent à décrire les feux comme des phénomènes critiques auto-régulés (« self-organized criticality ») [Malamud and Turcotte 98]

D'autres enfin, tel le modèle EMBYR [Hargrove et al 2000] qui nous sera utile dans la suite de cette étude, sont des modèles complets et spatialisés de forêt, décrivant l'évolution temporelle des paysages. Ils décrivent différentes espèces et différents stades structuraux pour chaque espèce. Les feux se propagent à travers le paysage suivant les propriétés locales du combustible dépendant de l'espèce, du stade structural, de l'humidité du bois, de la direction et de l'intensité du vent.

Ce type de modèle a permis de mettre en évidence les relations entre le comportement des feux et l'hétérogénéité spatiale des combustibles à l'échelle d'un paysage. Ces études ont en particulier mis en évidence le rôle des feux aux temps longs pour la création et le maintien de l'hétérogénéité spatiale des paysages forestiers, cette hétérogénéité permettant en retour de contenir naturellement la taille des feux.[Hargrove, Gardner and Turner 2000]

2-3-Manque d'études concernant l'influence des maisons en tant que combustible particulier

Concernant les influences anthropiques, certaines études ont mis en évidence le danger de politiques de suppression des feux trop absolues[Turner et al 1997, Hargrove, Gardner and Turner 2000], mais aucune étude n'a encore été réalisée sur le changement direct du paysage de combustible lié à la présence de constructions très inflammables en zone forestière.

Afin d'étudier cette influence nouvelle, nous avons tenu à l'isoler en simplifiant à l'extrême, sans atteindre un comportement trivial, le phénomène étudié. Après réflexion, nous sommes arrivés à reformuler le problème de la façon suivante : « Etudier l'influence relative de deux types de combustible différents, un combustible de type fond uniforme et un combustible très inflammable ponctuel distribué aléatoirement, analogue à des points fragiles ponctuels facilitant localement la propagation du feu ».

Il faudra ensuite étudier l'influence de la densité et de la distribution spatiale des maisons sur la percolation d'un feu en paysage hétérogène de type mosaïque. Cette étude sera réalisée l'année prochaine par la même équipe en intégrant l'effet maison ainsi qu'un module de suppression des feux au modèle EMBYR.

3-Fondements de l'hypothèse de base du présent modèle

Ce modèle se base sur l'hypothèse que la combustion d'une maison favorise la propagation du feu. Ceci n'est pas toujours vrai, et il est important de spécifier ici les limites de validité de cette hypothèse.

La probabilité qu'une maison prenne feu ne dépend tout d'abord pas du feu dans son ensemble, mais essentiellement des conditions locales caractérisant la « zone d'ignition » de la construction [J. Cohen, 2003]. Les éléments déterminants sont les matériaux utilisés pour la construction de la maison, l'éventuel traitement anti-feu du toit, la présence d'éléments inflammables (voitures, bouteilles de gaz, constructions légères en bois) à proximité de la construction, la proximité, le type et la taille de la végétation immédiatement voisine ainsi que l'intensité locale du feu.

Des règles simples, connues des personnes habituées à la présence du feu, permettent de prémunir sa maison contre la plupart des incendies. Il est en particulier important d'isoler sa maison du feu éventuel en laissant un périmètre de sécurité d'une vingtaine de mètres sans combustible, en y mettant par exemple de la pelouse, des graviers ou une piscine. Les toits devraient par ailleurs être traités anti-feu afin d'éviter de prendre feu lorsque les inévitables branches enflammées tombent dessus. Par ailleurs, il est souhaitable d'avoir une réserve d'eau disponible à proximité.

Or, il semble que le mode majoritaire de construction des maisons dans le Colorado Front Range est tel que ces maisons sont mal protégées du feu et ont tendance à favoriser l'intensification locale du feu. En effet, ces constructions appartiennent pour la plupart à de riches citadins à la poursuite du mythe de l'Ouest américain. Elles sont donc souvent construites en bois, en pleine forêt c'est à dire au contact direct des arbres, sans périmètre de sécurité. Par ailleurs, les deux à trois voitures garées à proximité ainsi que les divers cabanons de jardin créent un gradient de combustible amenant directement le feu aux portes de la maison. Les règles de base de construction d'une habitation en zone forestière ne sont que rarement respectées dans cette région¹, ce qui entraîne un nombre important de constructions détruites lors du passage d'un incendie.

Lorsqu'une maison en bois prend feu, la température est en général plus élevée que le même feu sans la maison. Cela génère une colonne de chaleur au-dessus de la maison qui entraîne des débris enflammés plus haut, et donc plus loin. Par ailleurs, la combustion d'une maison peut permettre aux cimes proches de s'enflammer, transformant ainsi un feu de surface en feu de couronne, plus intense et plus dévastateur. On comprend ainsi que la combustion d'une maison favorise localement la propagation du feu.

4-Construction du modèle

L'étude de cette influence nouvelle nécessitait un modèle simple, comprenant un minimum de paramètres afin de bien distinguer l'influence relative de chacun. Le modèle a donc été construit aussi simple que possible sans pour autant atteindre des comportements triviaux.

Ce modèle, de type automate cellulaire [Gutowitz, 1991], est constitué d'une grille comprenant deux types de cases: la végétation et les maisons. Les maisons sont placées aléatoirement avec une densité d dans une végétation par ailleurs uniforme. Lorsqu'une case

¹ Faute de pouvoir aller sur place, j'ai obtenu ces informations lors de nombreuses discussions avec mon maître de stage Patrick Bourgeron qui a travaillé pendant plus de quinze ans à l'université de Boulder, ainsi qu'au National Forest Service. Il était donc directement confronté à la réalité du terrain dans cette région. J'espère pouvoir aller voir sur place l'année prochaine lors de la continuation de ce stage, afin de vérifier et de réellement m'approprier ses dires. Afin de faire confiance à mon propre travail, j'ai besoin de voir ces fameuses maisons de mes propres yeux et oreilles.

végétation brûle (voir figure 2-a), chacune des 8 cases voisines a une probabilité p de s'enflammer au pas de temps suivant. Lorsqu'une case maison brûle (voir figure 2-b), la probabilité de propagation du feu aux cases voisines vaut 1. Les cases s'éteignent après un pas de temps. Les bords de la grille sont constitués de cases non inflammables. Le feu démarre dans une case choisie aléatoirement, puis se propage à travers le paysage de proche en proche. Il s'éteint soit tout seul, soit lorsqu'il a atteint les bords de la grille. **Quelques exemples de feux sont représentés en ANNEXE X.**

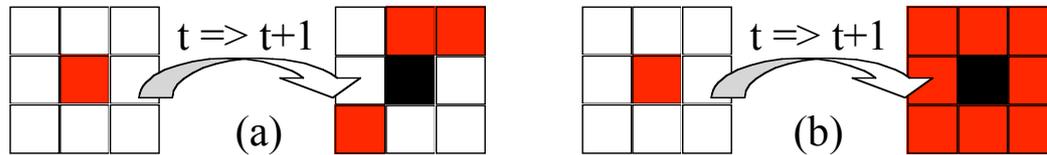


Figure2: Evolution après un pas de temps de la combustion d'une case.

Une case rouge est en feu, une noire a déjà brûlé et ne peut plus brûler, une blanche n'a pas encore brûlé. La case centrale est (a) une case végétation, (b) une case maison. Les cases voisines sont indifféremment des cases végétation ou maison.

Pour chaque couple de paramètres (p,d) , nous analysons la distribution de taille obtenue pour $N=1000$ réalisations.

Le pas du réseau a été fixé à $a=50m$, taille pertinente pour le phénomène étudié (propagation du feu, échelle caractéristique du patchwork de zones brûlées après un feu, taille caractéristique de la zone d'ignition d'une maison).

L'échantillon entier se limite, pour des raisons de rapidité d'obtention des résultats et de limitation du temps d'étude, à une grille carrée de longueur $L=50$ cases. Les bords de la grille étant non inflammables, il y a un total de $50*50-4*49=2304$ cases à brûler.

L'influence du choix des valeurs de L et N sur le comportement du modèle est analysée dans l'étude de sensibilité au paragraphe D.

Nous avons caricaturé l'influence de la combustion d'une maison sur la propagation locale du feu. Dans ce modèle, les maisons « attrapent » le feu comme la végétation locale (ce qui correspond à des maisons mal construites, matériau facilement inflammable et proche des arbres), le transmettent plus facilement (ce qui correspond à un feu intensifié, sauts de flamme augmentés par la plus haute température de combustion des maisons par rapport aux arbres).

En caricaturant ainsi l'effet des maisons, nous allons nous rendre compte si ces points fragiles ponctuels ont une influence non négligeable sur les propriétés globales du feu, plus généralement sur les propriétés de percolation du paysage. Plus précisément, on va voir à partir de quelle densité l'influence de ces fragilités devient non négligeable, et tenter de voir si ces valeurs de densité correspondent à des situations de densités de constructions réalistes dans la région étudiée. Si oui, nous ne pourrions toujours pas conclure sur l'influence réelle des maisons en tant que combustible. Par contre, nous aurons mis en évidence la nécessité d'une étude plus fine, en particulier une évaluation plus réaliste, à l'aide d'études sur le terrain, de l'influence de la combustion d'une maison sur l'intensité locale du feu.

C- Résultats

1-Sans maisons

1-1-Evolution des tailles moyennes

Le modèle sans maisons est un modèle de percolation avec 8 voisins naturels pour chaque case, au lieu des quatre voisins usuels dans l'étude de la percolation en mathématiques [G.Grimmett 1999 Percolation]. Le caractère fortement stochastique du modèle implique une variété de taille de feux obtenus pour chaque valeur de la probabilité de propagation du feu p .

L'évolution des tailles moyennes $\langle S \rangle$ avec p affiche un effet de seuil caractéristique des phénomènes de percolation¹ (voir figure 3).

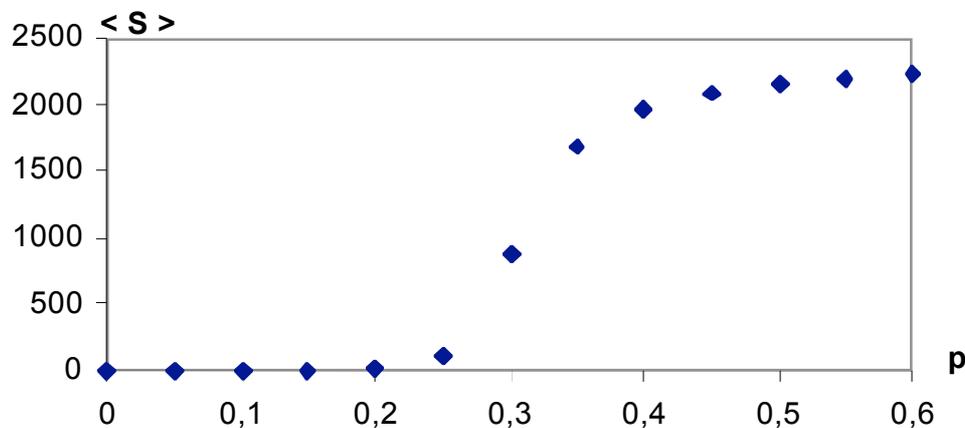


Figure3: Evolution des tailles moyennes avec p pour $d=0$ ¹
 $\langle S \rangle$ représente la taille moyenne des feux obtenue après 1000 réalisations du modèle dans un paysage caractérisé par p .
 p est la probabilité de propagation du feu.

La taille limitée ($L=50$) du domaine d'étude implique un problème pour la définition de la valeur précise du seuil critique de percolation, qui n'est critique que dans la limite L infini. Nous avons décidé d'appeler p_c le p tel que la taille moyenne des feux pour ce p dépasse 1000 cases, la nombre total de cases à brûler étant de 2304.

Pour $d=0$, nous estimons p_c à 0.305.²

¹ Cette courbe a été obtenue en déterminant $\langle S \rangle$ pour des valeurs de p allant de 0 à 1 par pas de 0.05.

² Cette valeur est obtenue par interpolation linéaire entre les valeurs de p proportionnelles à 0.05 immédiatement inférieure et supérieure à p_c .

1-2-Evolution des distributions de taille des feux

Nous obtenons après 1000 réalisations la distribution de taille des feux pour un paysage de percolation caractérisé par p .

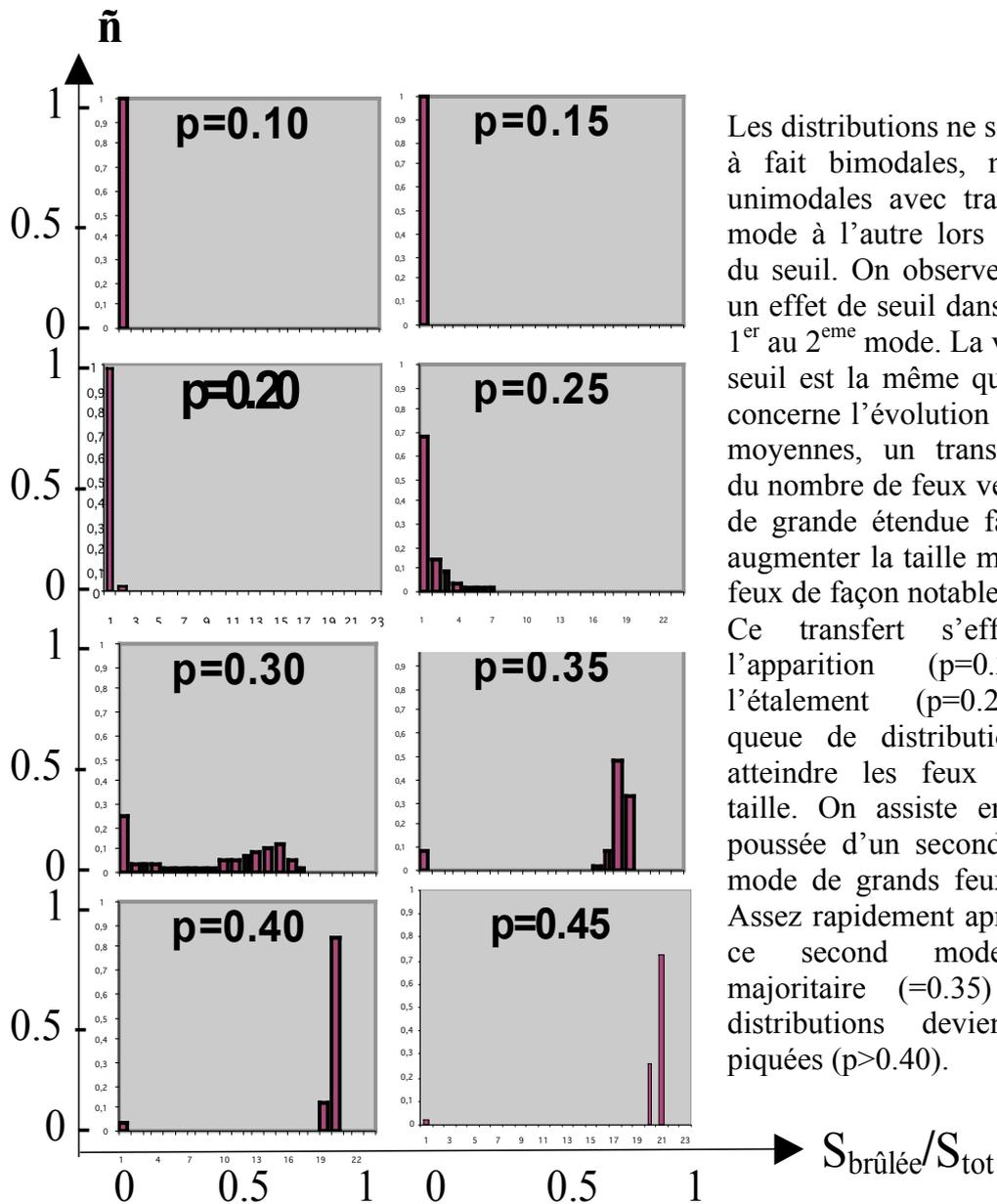


Figure4 : Evolution avec p des distributions de taille des feux.

\tilde{n} est la probabilité d'occurrence d'un feu de taille $S_{brûlée}$ dans un paysage de taille $S_{tot}=2304$. p est la probabilité de propagation du feu.

Pour $p=0.40$, quasiment tous les feux de taille non nulle ont une taille comprise entre 1950 et 2050 cases. La zone brûlée atteint quasiment à chaque fois les bords du paysage (voir exemple de feu pour $p=0.35$ en annexe 4). La proportion non nulle de feux de taille nulle est due à la probabilité non nulle ($P=(1-p)^8$) que la case d'ignition ne transmette le feu à aucun de ses voisins. Le fait que $S_{brûlée} < S_{totale}$ est dû à une densité non nulle de cases non brûlées à l'intérieur de la zone brûlée. Le fait que les distributions soient très piquées signifie que cette

densité est quasiment la même pour chaque feu. La quasi non stochasticité du phénomène est remarquable. (voir E-1 densité de cases non brûlées).

Nous verrons au paragraphe E-2 que les valeurs de p réalistes pour la végétation typique de la zone étudiée varient de 0 à 0.4 suivant l'espèce, le stade structural de la portion de forêt, le taux d'humidité du bois etc... D'une façon générale, p augmente avec l'âge des portions de forêts, la fermeture des canopées et l'état de sécheresse du bois. On observe que la valeur de p_{crit} se situe à l'intérieur de la gamme des p réalistes ce qui est tout à fait satisfaisant. En effet, un départ de feu au sein d'une forêt de grands conifères au sous bois dense, dans des conditions climatiques très sèches, ce qui correspond à un p de l'ordre de 0.4, entraînera la plupart du temps un feu de grande étendue (voir figure4 $p=0.4$ et annexe 4 exemple de feu pour $p=0.35$) alors qu'un feu dans une forêt jeune peu dense et relativement humide, correspondant à des p de l'ordre de 0.05 ou 0.1, ne se propagera que sur une étendue minimale (voir figure4 $p<0.2$). Pour des forêts caractérisées par un p proche de p_{crit} , la variabilité des tailles et intensités est grande. Les feux dans des forêts de conifères en saison sèche (p compris entre 0.25 et 0.35) peuvent être aussi bien de petite envergure et facilement maîtrisés par les pompiers, qu'extrêmement intenses, dévastateurs et incontrôlables, ce qui se traduit dans notre modèle par un spectre de tailles large à tendance bimodale.

2-Avec maisons

2-1-Evolution des tailles moyennes

Pour chaque valeur de d la densité de constructions, on obtient une courbe $\langle S \rangle = f_d(p)$ avec un effet de seuil. d tire les courbes vers les feux plus grands, ce qui est naturel. (figures 5 et 6)

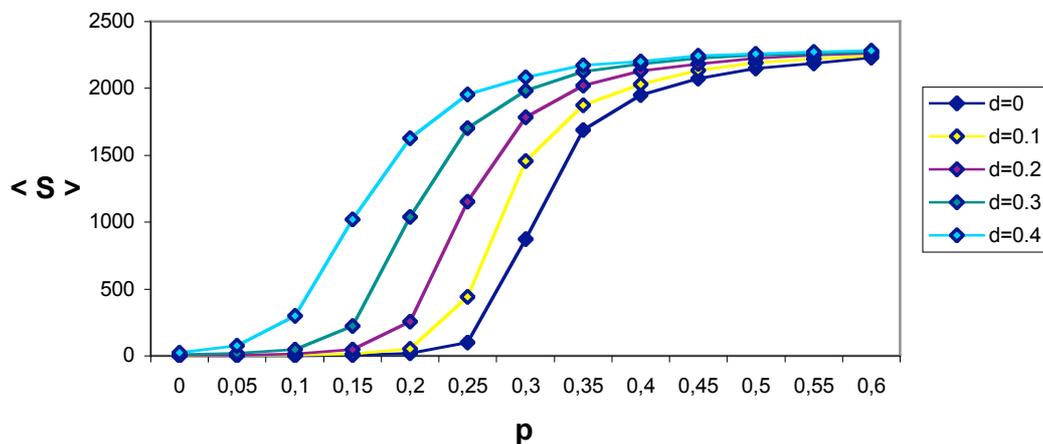


Figure5: Evolution avec d des courbes $\langle S \rangle = f_d(p)$. Chaque courbe de couleur est obtenue comme dans la figure3, mais dans un paysage caractérisé par une densité de maisons d et une probabilité de propagation du feu p .

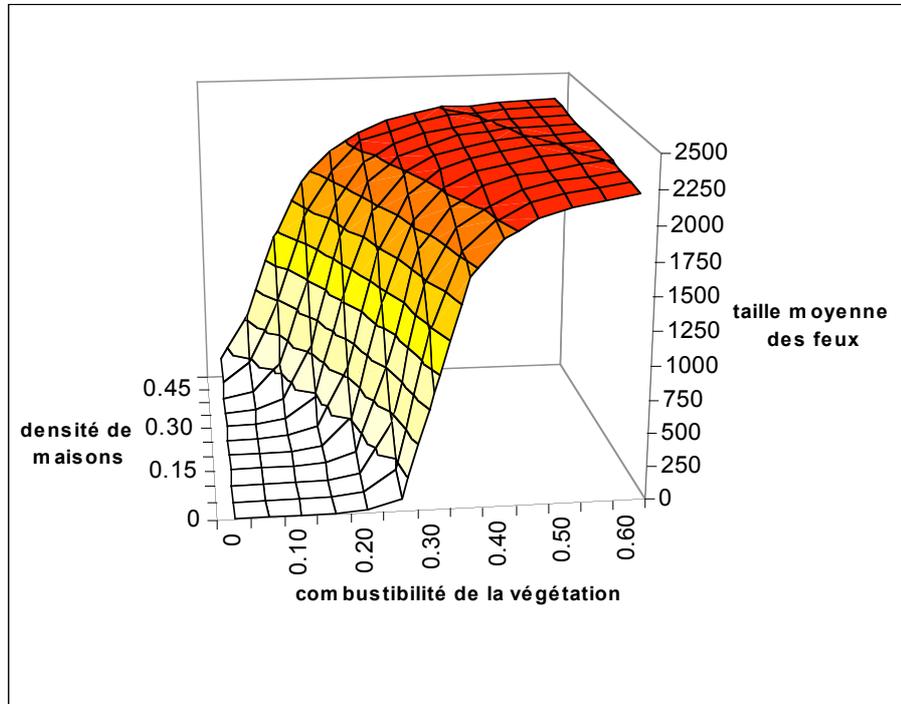


Figure6: Tailles moyennes des feux fonction des caractéristiques du paysage

Il est intéressant de remarquer que, au niveau d'approximation où l'on se place, la transition se déplace de façon linéaire¹ avec d. (voir figure 7)

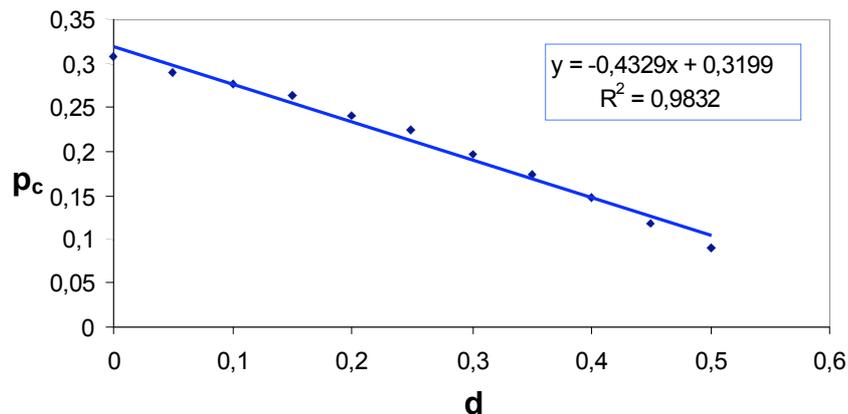


Figure7: Evolution des seuils critiques avec d. p_c est le seuil de percolation critique défini au C-1-1, il décroît linéairement avec d.

¹ On remarque malgré tout une certaine concavité de la courbe au second ordre. La linéarité du seuil et cette concavité sont présentes même si l'on change la définition de p_c : p_c comme p tel que la valeur moyenne dépasse 1000, 1500 ou 500. De même si l'on étudie la proportion de grands feux plutôt que les valeurs moyennes.

Ce résultat peut s'avérer utile dans l'étude de la fracture des matériaux. En effet, le modèle étudie l'influence de points fragiles sur les propriétés de percolation d'un paysage. Il peut s'appliquer aussi bien à l'étude de l'influence de maisons mal construites en zone forestière sur les propriétés de percolation du feu qu'à l'étude de l'influence de défauts dans un matériau sur la solidité de ce matériau vis à vis de fractures.

2-2-Evolution des distributions de taille

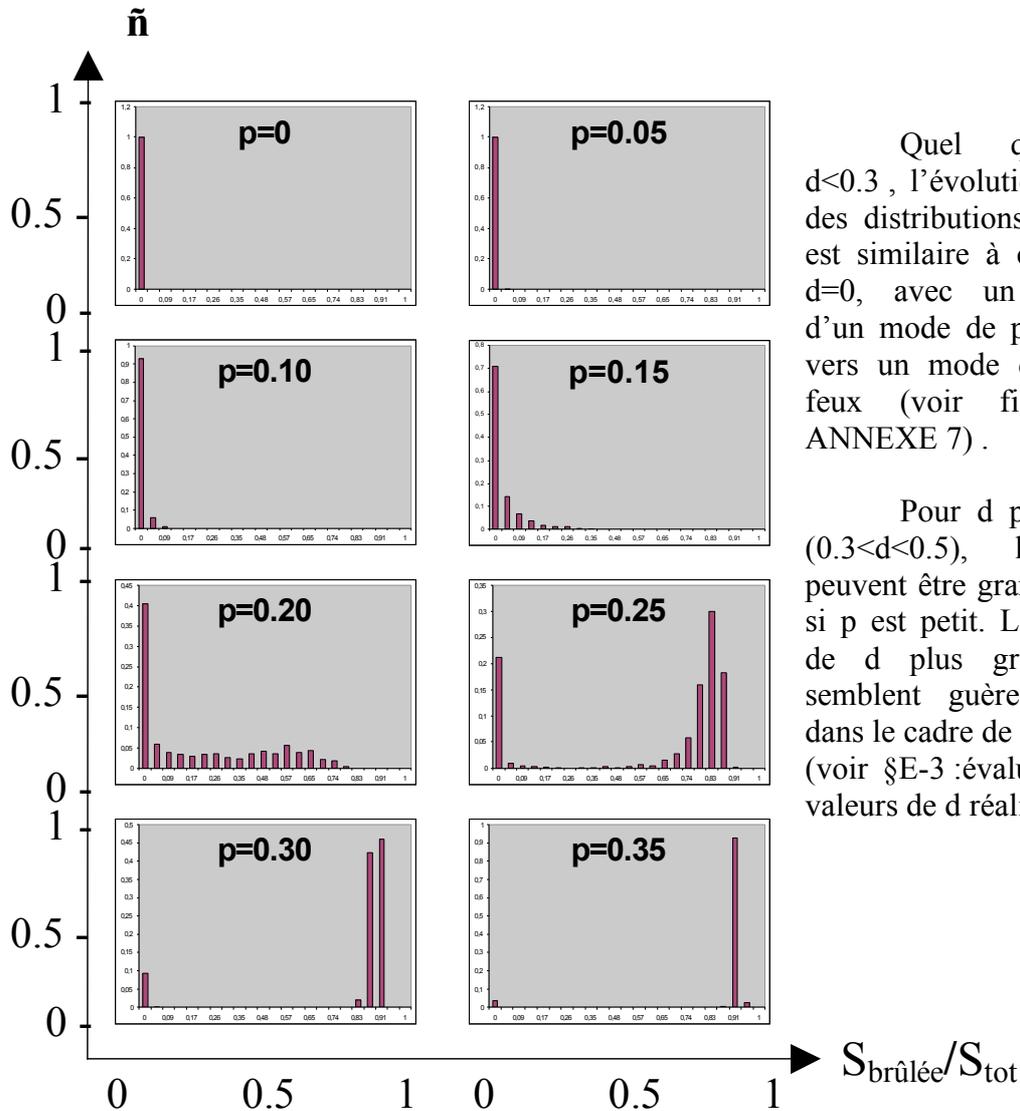
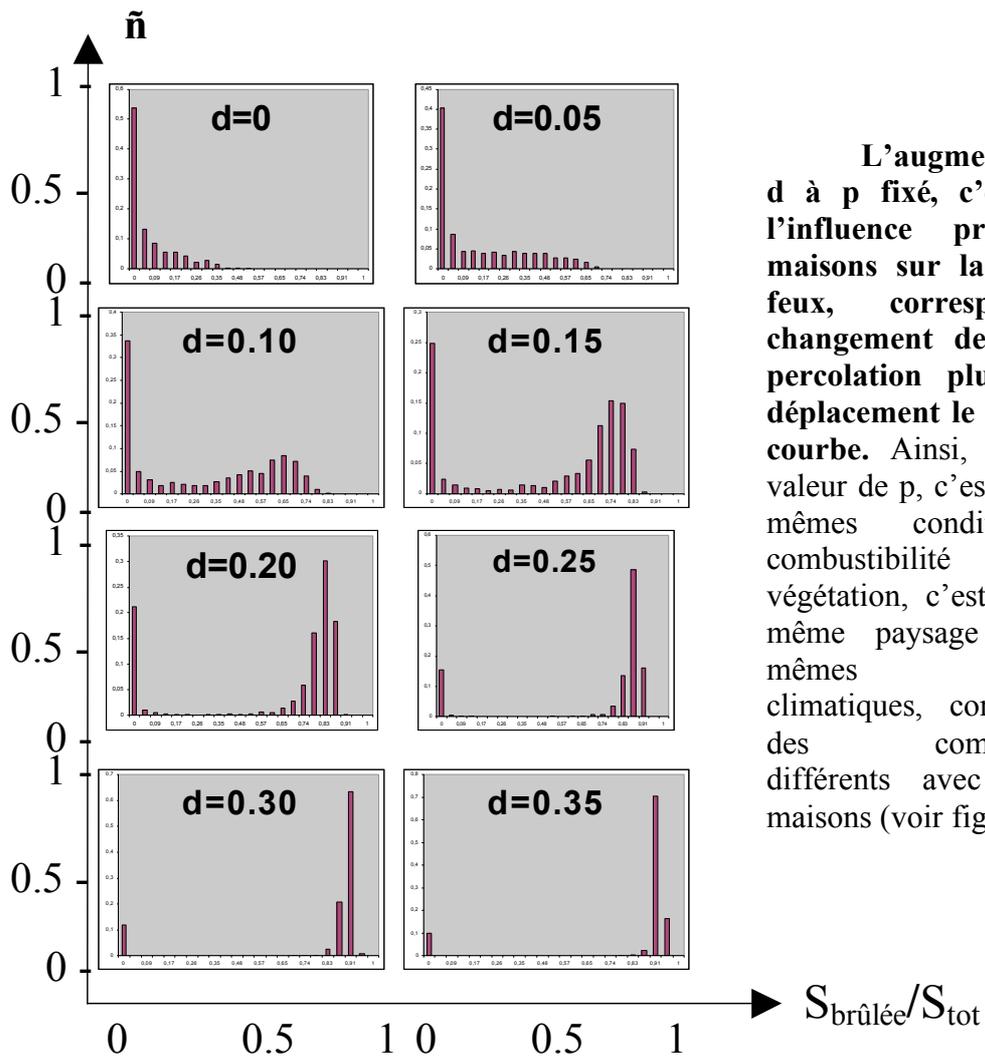


Figure 8 : Evolution avec p des distributions de taille des feux pour $d=0.25$. p est la probabilité d'occurrence d'un feu de taille $S_{brûlée}$ dans un paysage de taille $S_{tot}=2304$. p est la probabilité de propagation du feu.



L'augmentation de d à p fixé, c'est à dire l'influence propre des maisons sur la taille des feux, correspond au changement de courbe de percolation plutôt qu'au déplacement le long d'une courbe. Ainsi, une même valeur de p , c'est à dire des mêmes conditions de combustibilité de la végétation, c'est à dire un même paysage dans les mêmes conditions climatiques, correspond à des comportements différents avec ou sans maisons (voir figure9).

Figure9 : Evolution avec p des distributions de taille des feux pour $d=0.25$. p est la probabilité d'occurrence d'un feu de taille $S_{\text{brûlée}}$ dans un paysage de taille $S_{\text{tot}}=2304$. p est la probabilité de propagation du feu.

2-3-Comparaison des distributions de taille avec et sans maisons

L'influence des maisons se fait sentir lorsque l'on compare les distributions avec ou sans maisons :

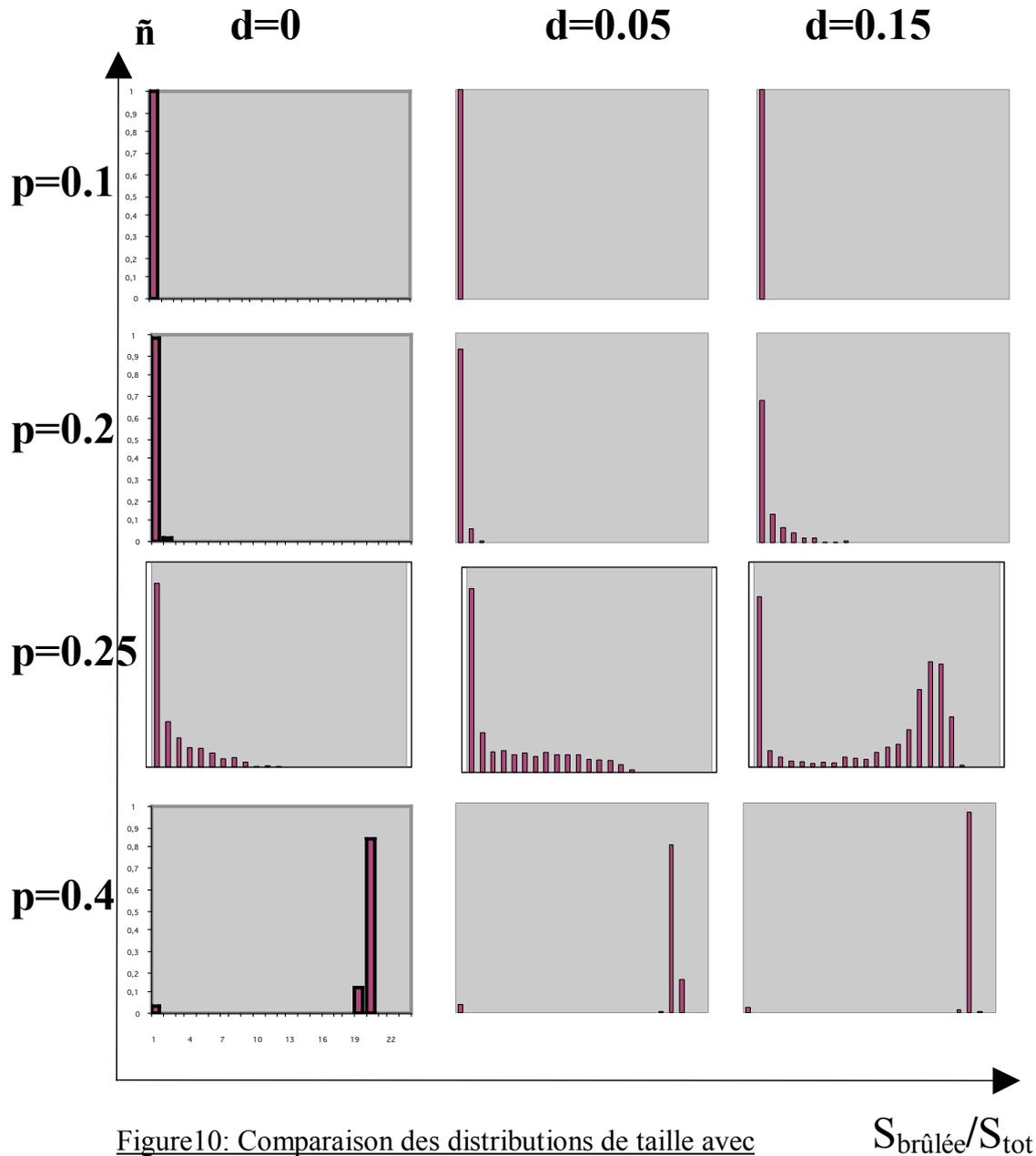


Figure10: Comparaison des distributions de taille avec et sans maisons, suivant la combustibilité de la végétation

3-Avec effet maison atténué

Afin de voir si les résultats obtenus dépendent de la façon dont on a modélisé la combustion des maisons, nous avons réitéré l'étude en atténuant l'influence des maisons. Lorsque celles-ci prennent feu, elles le transmettent désormais à leurs voisins avec une probabilité $p_m = p+0.2$ au lieu de $p_m=1$ comme précédemment.

La comparaison des tableaux donnant les tailles moyennes fonction des valeurs des paramètres p et d (voir tableaux 1 a et b) montre que le modèle est robuste à ce changement

d'hypothèse. Le comportement qualitatif est en effet le même, le seuil critique décroît linéairement avec la densité de maisons, la pente est simplement atténuée lorsque l'on atténue l'influence des maisons.

p d	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
0	1	1	2	6	18	100	871	1690	1952	>2000	>2000
0.05	1	2	4	9	29	193	1212	1789	>2000	>2000	>2000
0.10	1	3	6	14	52	443	1457	1874	>2000	>2000	>2000
0.15	2	4	9	24	106	755	1646	1949	>2000	>2000	>2000
0.20	3	7	14	51	257	1155	1784	2023	>2000	>2000	>2000
0.25	5	10	26	92	554	1464	1896	2084	>2000	>2000	>2000
0.30	8	17	51	224	1041	1705	1982	2125	>2000	>2000	>2000
0.35	13	31	113	551	1428	1864	2053	2124	>2000	>2000	>2000
0.40	25	77	300	1019	1629	1954	2082	2173	>2000	>2000	>2000
0.45	63	225	736	1437	1813	2059	2130	2194	>2000	>2000	>2000
0.50	163	539	1199	1662	1915	2053	2144	2209	>2000	>2000	>2000

Tableau 1 a: Tableau $\langle S \rangle = f(p,d)$ pour $p_m=1$

p d	0	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25	0.30	0.35	0.40	0.45	0.50
0	1	1	2	7	12	84	1010	1663	1996	>2000	>2000
0.05	1	1	2	7	15	136	1142	1784	>2000	>2000	>2000
0.10	1	2	3	8	39	269	1235	1855	>2000	>2000	>2000
0.15	1	2	4	10	45	278	1294	1866	>2000	>2000	>2000
0.20	1	2	4	12	75	524	1445	1900	>2000	>2000	>2000
0.25	1	3	5	14	100	575	1493	1919	>2000	>2000	>2000
0.30	1	3	7	15	129	790	1620	1977	>2000	>2000	>2000
0.35	1	3	7	22	180	879	1813	1995	>2000	>2000	>2000
0.40	1	4	7	31	215	1247	1875	>2000	>2000	>2000	>2000
0.45	2	4	16	31	276	1247	1907	>2000	>2000	>2000	>2000
0.50	3	4	16	59	525	1423	1931	>2000	>2000	>2000	>2000

Tableau 1 b: Tableau $\langle S \rangle = f(p,d)$ pour $p_m = p+0.2$

Tableaux 1 : tableaux donnant les tailles moyennes obtenues après 1000 essais de feux pour chaque couple de paramètre (p,d).

Le tableau 1 a est obtenu avec l'effet maison caricaturé, $p_m=1$

Le tableau 1 b est obtenu avec l'effet maison atténué, $p_m=p+0.2$

 : mise en évidence du moment de décollage : $\langle S \rangle > 50$ cases

 : mise en évidence du moment de saturation : $\langle S \rangle > 1500$ cases

D- Etude de sensibilité

1-Stabilité statistique des résultats

Nous avons commencé, afin de se faire une première impression du comportement du modèle, par effectuer seulement 50 essais de feu par couple de paramètres. Les effets qualitatifs étaient déjà clairs, mais les résultats n'étaient pas suffisamment stables d'un paquet de 50 essais à l'autre. Nous avons donc réitéré l'étude pour 1000 essais, et étudié la stabilité statistique des résultats en divisant le paquet de 1000 en cinq paquets de 200.

Les résultats de ces cinq paquets sont similaires à moins de 10% près, ce qui est suffisant pour mettre en évidence les effets qualitatifs. La moyenne sur 1000 essais semble donc a fortiori suffisante. Mais pour mettre en évidence des résultats plus quantitatifs, fondés sur une meilleure évaluation du comportement local du feu en présence de maisons et des valeurs des densités de maisons, il faudra augmenter le nombre d'essais afin d'améliorer la précision des résultats.

2-Influence du choix du paramètre de sortie

On peut se demander si le choix d'étudier les valeurs moyennes est le plus pertinent dans notre cas. Il serait en effet plus intéressant de regarder par exemple la probabilité qu'a le feu de percoler à travers le paysage. Par ailleurs, le changement de paramètre de sortie change-t-il l'existence d'un seuil? sinon, sa valeur? Pour répondre en partie à ces questions, nous avons également étudié la proportion de grands feux, c'est à dire la proportion de feux brûlant plus de 1000 cases, c'est à dire la proportion de feux brûlant une fraction significative du paysage. Les résultats sont tout à fait similaires (voir figure 11 a et b). On remarque malgré tout que la transition semble plus raide en ce qui concerne les proportions.

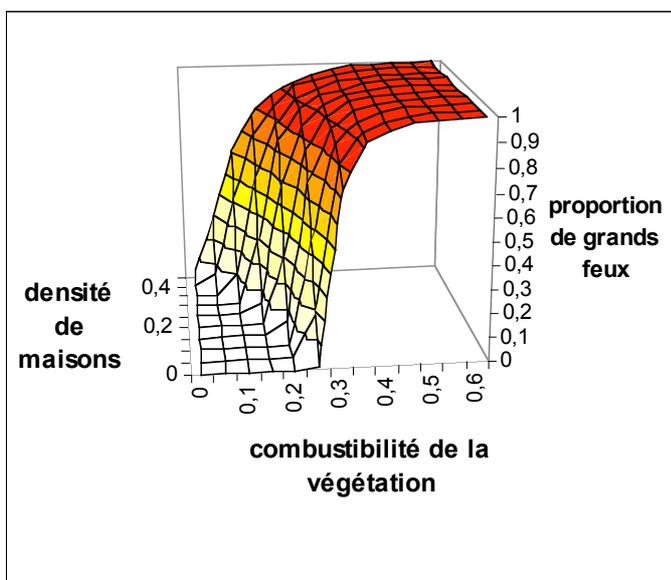


Figure 11 a: Proportion de grands feux en fonction des caractéristiques du paysage

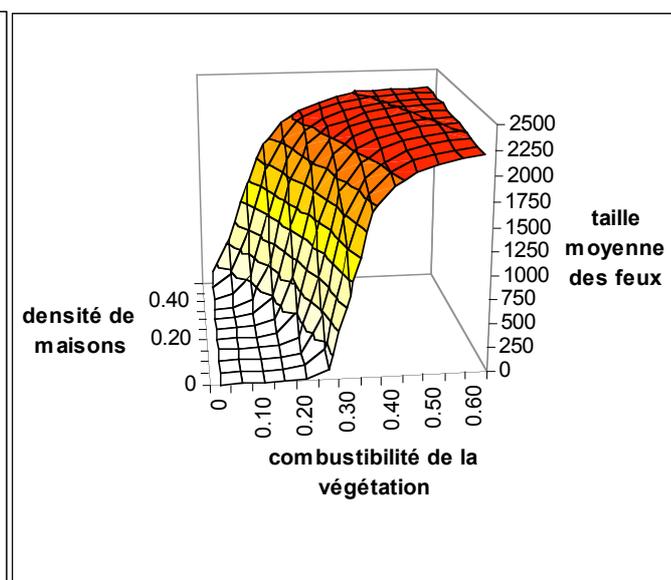


Figure 11 b : Taille moyenne des feux fonction des caractéristiques du paysage

Ici, nous avons comparé deux propriétés des distributions de taille. Les comportements étant similaires, le seuil critique semble être un seuil des distributions de taille, ce qui est confirmé en regardant les distributions "à l'œil". Par contre, il faudrait encore regarder d'autres comportements des feux du modèle, comportements autres que ceux des distributions de taille, pour conclure à la robustesse du modèle quant à un changement du choix du paramètre de sortie. On pourrait par exemple regarder la fraction de feux qui, partant d'un coin du paysage atteignent l'autre coin. Ceci serait d'ailleurs intéressant vis à vis du contexte écologique, car la probabilité qu'à un feu de percoler à travers un paysage est plus pertinent dans l'étude du rôle des feux que la taille moyenne des feux. Malgré tout, l'étude des distributions de taille présente un intérêt non nul en mettant évidence ces effets de seuil, c'est à dire des réactions non proportionnelles aux causes, ce qui mérite d'attirer l'attention dans le contexte actuel de forte influence anthropique sur les écosystèmes.

3-Effets de taille finie

La taille limitée ($L=50$) du domaine d'étude implique on l'a vu un problème pour la définition de la valeur précise du seuil de percolation, qui n'est critique que dans la limite L infini.

La probabilité critique au sens des transitions de phases en domaine infini correspond au moment où la taille des feux devient également infinie, afin que $\langle S_{\text{brûlée}} \rangle / S_{\text{tot}}$ soit non nul. Notre analyse se basant essentiellement sur l'analyse des distributions de taille et sur l'évolution qualitative des seuils avec la densité de constructions d , notre définition du seuil me semble suffisante au niveau d'approximation où l'on se place à condition que l'on reste cohérent et que l'on garde la même définition tout au long de l'étude.

Par contre, la taille limitée du domaine fausse légèrement les résultats au sens où les feux ne peuvent se propager au-delà des bords. La méthode usuellement utilisée en physique, les conditions aux bords périodiques, n'est pas applicable ici. Les feux pouvant se propager sur toute l'étendue du domaine, des conditions aux bords périodiques rendraient des résultats plus que surprenants. Or, cette gêne à la propagation des feux dépend de la distance de la case d'initiation au bord le plus proche, ce qui rajoute une variabilité artificielle à la variabilité étudiée. Pour y remédier, il faudrait faire partir tous les feux du même endroit, le centre du domaine ou l'un des bords par exemple.

L'augmentation de la taille du domaine d'étude aurait peu changé la zone « petits feux » des distributions. Par contre, les pics aux grands feux auraient sans doute été décalés vers les feux plus grands encore, et peut-être élargis.

4-Influence du choix du nombre de voisins

Nous avons fait le choix d'une propagation du feu équiprobable pour les huit voisins naturels de chaque case afin de ne pas favoriser la propagation suivant les axes de la structure carrée artificiellement imposée au paysage. Il est par contre clair que l'on ne peut pas paver le plan avec des octogones. Le nombre de voisins étant, tout comme la propagation du feu de proche en proche, une propriété locale, je ne pense pas que cela soit gênant de fixer le nombre de voisins à huit.

Quelle sont les conséquences du choix de cette structure sur l'existence, la valeur, et l'évolution avec d du seuil de percolation ? Le choix d'un pavage carré plutôt que pseudo octogonal aurait changé la valeur du seuil. Nous trouvons en effet un seuil à $p=0.31$ alors qu'un pavage carré donne un seuil à $p=0.5$ [Grimmett, 1999]. Il est naturel que la valeur du seuil diminue avec le nombre de voisins, la propagation étant facilitée lorsque l'on augmente

le nombre de voisins. Mais la valeur de ce seuil est écologiquement très importante. En effet, les valeurs de p réalistes varient entre 0 et 0.4 (voir E-2), et le fait que le seuil soit à l'intérieur ou à l'extérieur de cette gamme de valeurs réalistes change absolument tout. En réalité, on observe des feux de grande étendue lorsque les conditions de climat et de végétation sont favorables. On observe également que lorsque la forêt est trop humide, le feu s'éteint tout seul avant de pouvoir se propager. Le seuil critique se doit donc de se trouver à l'intérieur de la gamme de valeurs réalistes. Ceci confirme notre choix de huit voisins.

Par ailleurs, il est rassurant de voir que les personnes qui ont établi la table des valeurs de p réalistes ont également utilisé huit voisins pour leur modèle de feu EMBYR [Hargrove et al 2000]. Le choix de quatre voisins aurait sans doute, je l'espère, changé également la gamme de valeurs réalistes de p de façon à ce que le seuil critique $p=0.5$ se retrouve à l'intérieur.

La géométrie de la structure artificiellement imposée sur le paysage ne doit absolument pas intervenir dans les résultats et conclusions. Mais comment connaître l'influence sur les résultats dus, non seulement au choix de la structure artificielle mais au fait d'imposer une structure artificielle sur un paysage?

E- Discussion

1-Densité de cases non brûlées

Au-delà du seuil, la quasi-totalité des feux atteint les bords du réseau, mais la surface brûlée reste inférieure à la surface du réseau, le rapport $S_{\text{brûlée}}/S_{\text{tot}}$ est égal à la densité de cases brûlées au sein de la zone brûlée. Il est remarquable que cette densité soit quasiment la même pour tous les feux pour un paysage fixé. La variabilité due au caractère stochastique du modèle est ici faible, comme l'indique la forme très piquée du pic de la distribution de taille des feux. Ainsi, pour $p=0.40$, quasiment tous les feux de taille non nulle ont une taille comprise entre 1950 et 2050 cases.

Par contre cette densité évolue avec p , comme le montre l'avancée du pic lorsque $p>0,35$ augmente. Cette quasi non stochasticité de la valeur de la densité de cases non brûlées mérite je pense une étude plus approfondie.

Cette propriété du modèle trouve un analogue dans la réalité des feux de forêt. En effet, un paysage forestier après le passage d'un feu est caractérisé par un patchwork de zones brûlées plus ou moins intensément, suivant la sévérité du feu lorsqu'il est passé à cet endroit. Certaines zones sont entièrement épargnées par le feu bien qu'elles se trouvent à l'intérieur de la zone parcourue par le feu. Cette mosaïque de sévérité de dommages permet une régénération relativement rapide de la forêt après un feu [Turner, 1997]. En effet, les zones peu atteintes se remettent vite, car une partie de la végétation est blessée mais pas morte, et la banque de graines du sol est sauve. Par la suite, ces zones régénérées servent de réserve et de source de vie pour les zones plus sévèrement atteintes par l'incendie, et la vie se répand à nouveau dans les paysages.

Ceci illustre bien le double rôle que jouent les feux dans l'évolution des écosystèmes forestiers. Rôle de régénération, de création, de renouvellement de l'écosystème, via une destruction partielle de cet écosystème, destruction libérant de la place pour des plantes jeunes et éventuellement des espèces nouvelles. Ceci permet à la forêt de s'adapter de façon relativement continue aux changements extérieurs, les espèces s'installant dans cette niche écologique nouvellement libérée étant sélectionnées par les conditions environnementales actuelles, et plus par les conditions passées qui avaient sélectionné les espèces plus anciennes présentes à cet endroit avant le passage du feu.

Cette évolution créative ne se fait pas de façon anarchique, mais a une tendance naturelle à l'autorégulation. Les feux ne brûlent en effet en général pas plus de quelques centimètres de sol, les banques de graines sont ainsi en partie préservées. Ceci implique que la nouvelle organisation de cette niche écologique est fondée sur les réserves disponibles, sur une combinaison des restes de l'organisation précédente et des éventuels nouveaux arrivants. La répartition des espèces dans l'écosystème conserve ainsi une certaine stabilité. [Holling, 1999].

2-Evaluation des valeurs de p réalistes

Les tables suivantes ont été établies dans le cadre de la construction du modèle EMBYR [Hargrove et al 2000]. Cette étude a été réalisée à partir de données empiriques issues de l'analyse de la propagation de 235 feux moyennement sévères, combinées à l'observation systématique du comportement du feu par D.G.Despain et à la bonne connaissance du comportement dynamique des modèles de percolation. Bien qu'évidemment non exactes ni exhaustives, ces tables constituent notre meilleure estimation de la gamme de valeurs réalistes de p.

	LP0	LP1	LP2	LP3
LP0	.10	.15	.2	.25
LP1	.10	.20	.25	.30
LP2	.10	.20	.30	.35
LP3	.10	.20	.30	.40

Bois très sec

	LP0	LP1	LP2	LP3
LP0	.06	.07	.10	.16
LP1	.06	.08	.11	.17
LP2	.06	.08	.15	.20
LP3	.06	.08	.15	.26

Bois modérément sec

	LP0	LP1	LP2	LP3
LP0	.01	.03	.04	.06
LP1	.01	.04	.06	.07
LP2	.01	.04	.07	.09
LP3	.01	.04	.07	.10

Bois humide

Tableau2: Evaluation des valeurs de p réalistes.

Ces valeurs caractérisent, sous différentes conditions d'humidité, la probabilité de propagation du feu d'une classe de combustible à l'autre.

Les Lpi, i=0..3, représentent différents stades structuraux de la végétation, correspondant à différentes combustibilités. On se rend compte que plus la végétation est âgée (i augmente), plus elle est combustible via une fermeture des canopées entre autre.

Ces valeurs caractérisent la probabilité de propagation du feu entre différentes classes de végétation dans différentes conditions d'humidité. La végétation utilisée, typique du parc national du Yellowstone, est analogue à celle de la zone étudiée, c'est à dire des herbes et buissons associés aux différents stades structuraux du *lodgepole pine*, variant du stade structural « LP0 », constitué d'arbres jeunes (<40 ans) à la canopée encore ouverte, le sol couvert d'herbes et buissons favorisant la propagation rapide d'un feu de surface peu intense jusqu'au stade structural « LP3 », le plus ancien (>250 ans) et le plus combustible, constitué d'arbres vieux aux canopées très sèches et fermées (en contact les unes les autres, ce qui favorise extrêmement la propagation des feux de cimes), le sous bois dense d'arbres de tailles diverses et le sol recouvert d'une quantité de branches mortes, le tout constituant une progression continue du combustible du sol aux cimes, les feux se propageant alors à la fois facilement horizontalement et verticalement entraînant des feux extrêmement intenses et incontrôlables.

3-Evaluation des valeurs de d réalistes

La valeur de d est un paramètre important. En effet même si les maisons sont bien un facteur augmentant nettement l'intensité locale du feu, si la densité de maisons reste faible l'influence de celles-ci sur les propriétés globales du feu resteront minimales. Nous avons donc tenu à estimer une gamme de valeurs réalistes de d .

N'ayant pas réussi à construire une carte de la densité de constructions en zone forestière, avec une résolution spatiale satisfaisante, à savoir de l'ordre du kilomètre, nous nous sommes limités à évaluer la valeur de d en construisant une carte de la densité de constructions non urbaines, moyennée par comté (voir ANNEXE 7).

Les valeurs de d obtenues ainsi sont, pour la plupart, très faibles, de l'ordre de 0,005. Notre étude commence pour $d=0.05$, c'est à dire un ordre de grandeur de plus, et sauf dans les cas critiques, l'influence d'une densité de 0.05 est très faible voire nulle. Par contre certains comtés comme ceux de Boulder ou de Jefferson affichent une densité moyenne de 0,15.

Par ailleurs il faut souligner qu'une moyenne à l'échelle du comté diminue fortement la gamme de valeurs possibles par rapport à une moyenne par km^2 .

Il semble donc que dans certains cas les densités de maisons en zone forestière sont suffisantes pour influencer le comportement du feu si elles sont mal construites.

Par ailleurs des densités, dans le modèle, de l'ordre de 0.5 semblent absolument irréalistes, et de telles densités nécessitent une modélisation moins caricaturale. En effet si une case sur deux provoque la combustion immédiate des cases voisines, cela provoquera inévitablement une avalanche de combustion n'ayant rien à voir avec le comportement éventuel du feu dans cette zone là.

4- Paysages en mosaïque, suppression des feux et présence d'habitations

Comme nous l'avons vu, le fait d'ajouter des points de fragilité dans un paysage de percolation diminue la valeur du seuil critique. Or la végétation naturelle est déjà proche voire au-delà de ce seuil lors de conditions climatiques favorables à la propagation du feu. Par ailleurs, la suppression des feux augmente la combustibilité du paysage, le rapprochant de ce seuil. Ainsi, ces deux effets combinés peuvent créer une situation non habituelle, dans laquelle des feux d'étendue et d'intensité importantes surviendraient dans des conditions où les feux usuels n'auraient été que d'une gravité mineure.

Plus p est proche du seuil, plus l'influence des maisons se fait sentir, or les arbres du Colorado ont un p variant, suivant l'espèce, l'âge et l'humidité du bois, entre 0 et 0,4, c'est à dire allant de avant le seuil jusqu'à être bien engagé dans la pente montante. Dans ces conditions, l'influence de p peut s'avérer cruciale. Si la densité de maisons dans une zone légèrement sous le seuil est telle que cette valeur de p se retrouve au-dessus du nouveau seuil, alors le feu pourra traverser cette zone et se propager jusqu'à d'autres zones qui n'auraient peut-être pas été atteintes sans les maisons, et qui peuvent, elles, se trouver au-dessus du seuil. Ainsi, les maisons ont tendance à augmenter la connectivité du paysage de combustible, mais seulement pour des valeurs élevées de la densité de maisons.

A cet effet s'ajoute l'influence de la suppression des feux, qui augmente fortement la connectivité du paysage, via une augmentation des caractéristiques de percolation de chaque tache, une augmentation à plus long terme de la taille des taches.

Des facteurs climatiques, comme un renforcement de l'oscillation australe, peuvent également influencer en jouant sur la croissance de la végétation et l'humidité du bois.

Enfin la mise en évidence d'effets de seuil, c'est à dire de réactions non proportionnelles aux causes, mérite d'attirer l'attention dans le contexte actuel de forte influence anthropique sur les écosystèmes.

G- Limites de l'étude

1-Limites du modèle

Le modèle ne traduit absolument pas de façon réaliste la propagation d'un feu, qui dépend énormément des conditions locales, du type de végétation (espèce, stade structural, étagement de la végétation), du degré d'humidité du bois, de la géomorphologie locale (pente, barrières coupe-feu naturelles, rochers), du vent moyen, de l'écoulement turbulent du vent (ce qui dépend énormément de conditions globales et locales de relief, de climat, de météorologie, de végétation qui laisse ou pas des ouvertures pour le vent, des routes qui font des accès aux pompiers). De plus, on ne prend pas en compte les sautes de flamme qui jouent un rôle important :

Nos feux se propagent dans un paysage uniforme alors qu'il est en réalité très hétérogène, à toutes les échelles, des mosaïques à l'échelle du paysage jusqu'aux hétérogénéités locales sub-taille du pas du réseau pré-citées en passant par des hétérogénéités semi-locales d'une case à l'autre au sein d'une zone considérée comme homogène.

La probabilité de propagation du feu ne dépend pas du temps, ni de l'évolution dans le temps de l'intensité locale du feu.

Les cases brûlent ou ne brûlent pas. Il manque une variable sévérité du feu qui permettrait de mettre en évidence des structures de zones plus ou moins profondément détruites, et d'évaluer l'éventuel aggravement de l'incendie en présence de maisons.

L'intérêt principal du modèle est l'étude de l'influence relative de deux types différents de combustible sur les propriétés de percolation du feu en paysage semi-homogène (cad en paysage homogène avec une distribution aléatoire de zones fortement inflammable ponctuelles). Il permet par ailleurs d'établir une analogie avec des défauts dans un matériau influant sur la propagation d'une fracture. fracture de type tache dendritique, comme du verre ou du plexiglas qui se brise sous l'impact d'un choc ponctuel (bris de glace par un caillou)

2-Robustesse des résultats, complexité du phénomène, fiabilité des conclusions et des conseils de gestion

Toute l'étude s'appuie sur l'hypothèse que la combustion des maisons augmente l'intensité locale du feu. Je suis à ce sujet partagé. Voici quelques arguments, certes pas absolus, mais suffisants pour me faire douter :

D'après l'étude du US Forest Service Rocky Mountain Research Station : « Hayman Fire Case Study Analysis », le feu Hayman s'est étendu sur une surface de 557km² touchant plusieurs comtés (Jefferson, Douglas, Park et Teller) dans lesquels il y a environ 10 constructions par km² en zone non urbaine (cf carte de l'annexe 7). Seuls 32% de cette surface a été brûlée sévèrement, soit 178km². Il y avait dans cette zone environ (ceci est une estimation personnelle) 178km²*10constructions par km²=1780 constructions. Sur les 600 constructions brûlées au total, 93%=558 ont brûlé dans les périodes d'extrême intensité du feu. Ainsi, dans une zone parcourue par un feu extrêmement intense, seule 558/1780= 1 construction sur 3 s'est enflammée. Quasiment aucun bâtiment (moins de 10) n'a été perdu

dans les zones de sévérité moindre. Pour ce qui concerne les maisons uniquement, 132 maisons sur un total de 794 furent détruites (valeur exacte cette fois), soit 1 sur 6.

D'après cette estimation sommaire, les maisons n'ont pas l'air si mal construites que ça.

Par ailleurs, nous avons supposé que la combustion d'une maison augmentait l'intensité locale du feu. On peut en effet trouver quelques arguments qui vont dans ce sens (voir paragraphe B-3), mais j'avoue ne pas être totalement convaincu que ceux-ci s'appliquent dans suffisamment de cas pour avoir une influence significative. Ainsi, Jack Cohen a réalisé une étude de terrain sur chacune des habitations détruites par le feu Hayman. Il en ressort toute une gamme de comportements divers (voir quelques exemples en ANNEXE 8): certaines maisons ont brûlé en présence d'un feu de surface, d'autres ont résisté à un feu de couronne très intense, d'autres encore ont brûlé dans un feu extrêmement intense détruisant toute la végétation alentour, alors que d'autres ont brûlé tout en laissant indemnes la plupart des arbres, même voisins [J. Cohen, Hayman Fire Case Study Analysis]. Il ne m'a semblé percevoir dans cette analyse de terrain aucune tendance nette à l'augmentation de l'intensité du feu due à la combustion des maisons.

Ensuite, même en supposant notre hypothèse valide, nous avons ici évalué l'influence des constructions en tant que combustible particulier, mais bien d'autres phénomènes liés à l'installation de maisons en zone forestière influencent la propagation des feux. A l'installation d'habitations est inévitablement rattachée la construction de routes qui peuvent jouer le rôle de barrières anti-feu sous certaines conditions (largeur de route, intensité du feu, hauteur des flammes, intensité du vent, saut de branches enflammées...). Ces routes facilitent par ailleurs la rapidité de mouvement des pompiers.

De plus, l'intensité de la lutte anti-feu est très liée à la densité et à la répartition des habitations. Les pompiers ont en effet des priorités fortes de protection: d'abord les personnes, puis les biens et enfin la végétation. La répartition et l'intensité des moyens de lutte anti-incendie sont donc très corrélées à la densité et la distribution spatiale des constructions. Le fait que certaines maisons favorisent la propagation locale du feu peut donc être compensé par la concentration des moyens de lutte anti-incendie autour des zones habitées. L'équilibre entre ces deux effets contraires dépend à priori de chaque situation: état de la zone d'ignition du bâtiment et mode de construction de la maison, accessibilité du bâtiment aux pompiers, quantité et disponibilité des moyens de lutte anti-feu suivant le type d'incendie, le nombre d'urgences pouvant dépasser les possibilités de lutte etc...

N'oublions pas pour finir que nous avons dans cette étude caricaturé l'effet maison, l'étude de l'influence réelle nécessite donc une étude plus fine de l'influence de la combustion d'une maison sur l'intensité locale du feu, dépendant du mode de construction de la maison ainsi que de l'état de la végétation alentour et de l'intensité locale du feu avant que la maison ne prenne feu.

La complexité du phénomène et la diversité des cas nécessitent donc une grande prudence dans nos conclusions. Des études plus fines et une observation de l'évolution réelle du régime des feux sont nécessaires à mon sens avant toute conclusion fiable.

Par contre l'influence de l'un des facteurs, sur lequel on peut influencer, me paraît claire: dans tous les cas une bonne construction des bâtiments, en respect des règles simples décrites plus haut, permet de créer des points forts, freins de la propagation des feux tout en protégeant efficacement les habitants contre le danger des feux. Il semble donc tout à fait bénéfique d'insister sur la nécessité de la mise en place et du respect de législations prenant en compte

ces critères à propos de la construction de bâtiments en zone forestière sensible aux feux de forêt.

H-Perspectives

Toutes choses égales par ailleurs, il est tout d'abord possible d'améliorer matériellement le présent modèle afin d'en faciliter l'exploitation:

-Pour augmenter la rapidité du modèle, on pourrait s'inspirer des travaux mathématiques sur la percolation, dans lesquels le paysage de percolation est déterminé une fois pour toute à $t=0$. On dirait que ça nous éloigne de la réalité des feux dans laquelle la probabilité de propagation dépend de l'intensité du feu et donc de ce qu'il s'est passé auparavant. Mais mon modèle ne prenant déjà pas en compte les différences locales d'intensité du feu ni des variations dans le temps des probabilités de propagation du feu, on pourrait créer le paysage de percolation à $t=0$ sans rien changer au comportement du modèle. Cela reviendrait simplement créer des passages possibles du feu pouvant ou non se réaliser suivant que ce passage et l'éclair font partie d'une même composante connexe du paysage de percolation.

-Il faut continuer l'étude de la robustesse du modèle :influence du nombre de voisins, de la géométrie artificiellement imposée par le réseau, du paramètre de sortie, de la façon dont on modélise les maisons etc...

-On pourrait par ailleurs chercher un fondement théorique au résultat numérique $p_c(d)$ linéaire, à l'aide des travaux déjà effectués sur la fracture dans les matériaux, et sur l'influence des défauts/points faibles sur la robustesse d'un matériau vis à vis des fractures.

-Comme nous sommes passés de $p_m=1$ à $p_m=p+0.2$, il faudrait réitérer l'étude avec $p_m=0$ pour voir si on peut utiliser les maisons comme coupe feu efficace si elles sont bien construites.

Ensuite, il sera nécessaire de valider de façon solide le cadre général de cette étude :

-La simplicité du présent modèle, ainsi que le fait d'avoir caricaturé et donc exagéré l'effet maison en tant que combustible, ne permet de mettre en évidence que des comportements qualitatifs, des tendances et des ordres de grandeur. Or le système étudié est complexe et le phénomène subtil. Une variation légère de la valeur des paramètres peut avoir une influence lourde sur le comportement du modèle, et donc sur les conclusions que l'on pourra tirer, **d'où la nécessité de mieux évaluer l'influence de la combustion d'une maison sur l'intensité locale du feu et de mieux mesurer les valeurs des densités de constructions en zone forestière ainsi que leur répartition spatiale dans le paysage de combustible.**

-Pour étudier l'influence de la densité et de la répartition spatiale des constructions sur la percolation d'un feu en paysage hétérogène de type mosaïque. Nous travaillerons à l'aide du modèle EMBYR [Hargrove et al 2000]. Le modèle EMBYR est un modèle très complet de feux dans une forêt avec succession végétale, prenant en compte la variation de combustibilité en fonction de l'espèce et de l'âge de l'arbre, de l'humidité du bois, prenant en compte l'existence de sauts de flammes, et possédant un module imitant le vent en biaisant la propagation du feu. **Afin d'étudier**

Bibliographie :

- W.L. Baker 1989
A review of models of landscape change
Landscape Ecology vol2 no2 : pp 111-133
- D.B. Botkin et al 1992
Forest response to climatic change-effects of parameter estimation and choice of weather patterns on the reliability of projections
Climatic change 20 : 87-111
- J. Cohen 2003
Hayman Fire Case Study, Chapter Home destruction
Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-114
- V.H. Dale et al 2000
The interplay between climate change, forests and disturbances
Science of the Total Environment 262 : pp 201-204
- M. Ghil, A. Saunders 2001
A boolean delay equation of ENSO variability
Physica D 160 : pp 54-78
- M. Ghil et al 2003
A boolean delay equation model of colliding cascades
Journal of statistical Physics 111 no3/4 : pp 815-861
- R.T. Graham 2003
Hayman Fire Case Study
Rocky Mountain Research Station, General Technical Report RMRS-GTR-114
- G. Grimm 1999
Percolation, Ed Springer
- H. Gutowitz 1991
Cellular automata : Theory and Experiment
MIT Press Cambridge
- W.W. Hargrove, R.H. Gardner, M.G. Turner, W.H. Romme, D.G. Despain 2000
Simulating fire pattern in heterogeneous landscapes
Ecological modelling 135 : pp 243-263
- H.S. He and D.J. Mladenoff 1999
Spatially explicit and stochastic simulation of forest landscape fire disturbance and succession
Ecology vol 80 no 1 : pp 81-99
- C.S. Holling 2001
Understanding the complexity of economic, ecological, and social systems
Ecosystems 4 : pp 390-405
- C.S. Holling and L. Gunderson 2001
Panarchy : understanding transformations in human and natural systems
Island Press
- B.D. Malamud, G. Morein, D.L. Turcotte 1998
Forest fires : an exemple of Self-Organized Critical Behavior
Science 281 : pp 1840-1842
- M.G. Turner, W.H. Romme, R.H. Gardner, W.W. Hargrove 1997
Effetcts of patch size and fire pattern on succession in Yellowstone National Park.
Ecological Monographs 67 : pp 411-433
- M.G. Turner et al 1999
Predicting forest fire effects at landscape scale
In D.J. Mladenoff and W.L. Baker Spatial modelling of forest Ecosystems
Springer Verlag, NY
- C.E. Van Daalen et al 2002
The roles of computer models in the envirenmental policy life cycle
- T.T. Veblen et al 2002
Inter hemispheric comparison of fire history : The Colorado Front Range, USA, and the Northern Patagonian Andes, Argentina
Plant Ecology 163 : pp 187-207
- T.T. Veblen et al 2000
Climatic and human influences on fire regimes in ponderosa pine forests in the Colorado Front Range
Ecological Applications 10 : pp 1178-1195
Environmental Science and Policy 5 : pp 221-231