

# technique et forêt

## MODÉLISATION DE LA PROGRESSION DES FEUX DE FORÊT, PHÉNOMÈNE CHAOTIQUE

R.B. CHEVROU

---

*La Revue forestière française dans son numéro spécial 1990 « Espaces forestiers et incendies » a présenté, de façon générale, les moyens de l'informatique avancée pour une connaissance plus synthétique et plus complète des milieux menacés par le feu, faciliter leur gestion et préparer la lutte.*

*Au moment où de nombreuses recherches visant à modéliser les incendies de forêts se développent, R.B. Chevrou, ICGREF chargé de mission à la Direction de l'Espace rural et de la Forêt, nous fait part de ses réflexions sur les différentes approches possibles d'un phénomène aussi complexe et variable dans ses développements qu'un incendie de forêt.*

*L'urgence de disposer de résultats, même partiels, permettant d'évaluer rapidement les efficacités d'équipements et d'aménagements DFCl, d'alerter sur certaines contraintes stratégiques, conduit à ne négliger aucune démarche méthodologique.*

*L'article développe les schémas possibles, les principales variables à prendre en compte pour une construction progressive de modèles feu fonctionnels.*

---

P. DELABRAZE

La prévention des incendies de forêt, aussi bien que la lutte active, dépendent du comportement du feu dans les différents types de formations végétales, en fonction de la météorologie et du relief. La localisation et la taille des infrastructures destinées à ralentir ou arrêter le feu — pistes

DFCI<sup>(1)</sup>, pare-feu et coupures de combustible, grandes coupures<sup>(2)</sup>, points d'eau — sont conçues et réalisées en fonction de la puissance énergétique du feu, de sa vitesse de progression, de l'accessibilité du terrain, et des moyens de lutte.

Les chercheurs s'efforcent, aujourd'hui, de construire des modèles feu qui, en représentant le comportement du feu sur un territoire donné, permettront de définir les infrastructures et les moyens les plus appropriés à la prévention et à la lutte, dans le cadre d'investissements qui ne sont pas indéfiniment extensibles.

Le feu de forêt étant un phénomène dynamique fort complexe, il nous semble que des modèles feu opérationnels ne pourront pas être développés en suivant seulement les schémas réductionnistes de la science « classique » et que l'on pourrait trouver des éléments de réponses dans les développements récents de la théorie du chaos que nous nous proposons d'exposer succinctement.

## SIMULATION DE PHÉNOMÈNES DYNAMIQUES ET MODÈLES FEU

L'usage de l'ordinateur s'est répandu dans tous les domaines, ce qui a donné une nouvelle vigueur aux recherches visant à simuler l'évolution de phénomènes dynamiques de toutes natures, d'une part grâce à la puissance de calcul numérique ainsi fournie, et d'autre part grâce à la visualisation graphique des résultats sur l'écran de l'ordinateur, en deux ou trois dimensions et en couleurs, avec de multiples détails.

Le phénomène de la progression d'un feu de forêt est complexe puisqu'il dépend de la végétation (vivante et morte) qui constitue le carburant ou combustible, de l'atmosphère qui fournit le comburant (l'oxygène de l'air), dont la quantité disponible par unité de temps dépend de la force du vent (le soufflet de la forge), et du relief qui détermine localement la force et la direction du vent (voir *Revue forestière française*, vol. XLII, n° spécial « Espaces forestiers et incendies », 1990).

Ce phénomène est simulé en utilisant divers modèles mathématiques qui sont censés représenter : la végétation locale (ce sera, par exemple, une carte de la végétation évaluant les quantités et les structures du combustible), et son état hydrique dont dépend sa combustibilité, état hydrique lié à la réserve en eau du sol et qui résulte de la nature du sol et des conditions météorologiques cumulées des derniers jours, semaines ou mois ; le vent local, qui dépend du vent général sur la zone, de la stabilité de l'atmosphère, du relief local, voire de la rugosité du couvert végétal local ; le comportement du feu en fonction de la végétation et du vent (direction et vitesse de propagation du feu, énergie du feu, température sur le front du feu, etc...).

Il faut noter, ici, que les cartes (végétation, relief, sol), aussi bien que les modèles, doivent tout autant représenter la réalité que la simplifier ; il ne serait pas réaliste de prétendre représenter, ni de modéliser, l'extrême complexité du monde réel dans ses moindres détails.

Pendant l'incendie, végétation et vent interagissent assez peu ; par contre, le feu agit sur la végétation et sur le vent : par convection et par radiation, l'énergie du feu dessèche la

---

(1) DFCI : Défense des forêts contre l'incendie.

(2) Afin de mieux contrôler la propagation des feux et pour servir d'appui dans la lutte contre les incendies, la végétation est profondément modifiée par l'homme sur des portions des territoires sensibles. On doit distinguer :

— le pare-feu, bande de faible largeur, débarrassée de tous combustibles, entretenue mécaniquement et (ou) chimiquement, susceptible d'arrêter un petit feu courant,

— la coupure de combustible, large zone débroussaillée, souvent faiblement arborée, implantée à proximité d'habitations et de part et d'autre de pistes, de routes...

— la « grande coupure », « coupure stratégique »... actuellement à l'étude, de largeur variable supérieure à 100 m, occupée par l'agriculture, un cadre réglementaire assurant sa pérennité (procédure d'utilité publique, conventions...).

végétation située à l'avant du front du feu, et cette dessiccation est augmentée, ou réduite, selon la force du vent, ce qui accroît, ou diminue selon le cas, l'énergie et la vitesse de propagation du feu ; l'énergie du feu peut entraîner des phénomènes d'ascendances (l'air chaud ayant tendance à s'élever), plus ou moins importants selon la stabilité verticale de l'atmosphère et la force du vent zonal, ce qui peut accélérer ou ralentir le vent local, voire, dans certaines conditions, créer un vent local opposé au vent zonal (phénomène utilisé dans la mise en œuvre des contre-feux), aussi bien que favoriser la projection de brandons très en avant du front du feu pour créer de nouveaux feux au-delà des pare-feu et des grandes coupures.

Les modèles feu existants, développés en Amérique du Nord, sont, à la fois, simples et complexes ; simples parce qu'ils simplifient excessivement le phénomène quant à l'état de l'atmosphère et à la structure spatiale de la végétation, le relief étant, lui, beaucoup trop négligé ; complexes parce qu'ils mettent en œuvre des fonctions complexes (bien souvent sous une forme trop simplifiée) donnant l'énergie de la combustion et la progression du feu, en fonction de la nature et des quantités du carburant et du comburant, et l'état hydrique du carburant ; complexes aussi parce que les variables entrant dans ces fonctions sont difficiles à mesurer et qu'elles doivent, trop souvent, être estimées grossièrement sur le terrain, ou qu'elles sont estimées en laboratoire dans des conditions difficilement transposables.

On peut toutefois remarquer qu'on utilise implicitement des modèles simples, et cependant opérationnels, dans notre pays : les services de la Météorologie nationale fournissent par petites zones, d'une part des données et des prévisions sur le vent, et d'autre part des estimations de l'état hydrique de la végétation : les services locaux de la Sécurité civile estiment l'extension du feu et la position du front de l'incendie dans les prochaines heures, les positions successives étant représentées par exemple par des ellipses dont les dimensions dépendent du vent et de la végétation « moyenne ». On ne parle pas de modèles, sans doute parce que les opérations sont effectuées dans l'espace mental de l'expert ou « à la main » sur le papier (tracé des ellipses sur la carte DFCI) ; le seraient-elles sur un ordinateur que ces modestes outils seraient alors élevés au noble rang de modèles !

Il nous semble que des modèles à peine plus élaborés seraient rapidement opérationnels. Ils consisteraient à modéliser séparément : la végétation (carte), et son état hydrique en fonction de la nature du sol et de la météorologie cumulée ; le vent local en fonction du relief et de la rugosité de la végétation ; le comportement du feu en fonction du vent local et de la végétation.

### UTILISATION D'UN MODÈLE FEU

Imaginons que l'on dispose de cartes détaillées de la topographie, du relief et de la végétation combustible, sur supports informatiques, et d'un modèle feu de forêt.

On pourrait les utiliser pour étudier l'implantation d'un ensemble d'infrastructures destinées à la prévention et la lutte contre des incendies de forêt selon un schéma comme le suivant.

D'abord, pour une zone donnée du territoire, on suppose certaines conditions météorologiques favorables au feu (conditions moyennes en été, ou conditions extrêmes par exemple) : sens et force du vent, sécheresse, température et humidité de l'air. On modifiera, ensuite, ces hypothèses pour couvrir tous les cas possibles, fréquents ou rares.

Le feu partant d'un point donné, le modèle feu montre, sur un écran d'ordinateur affichant les cartes, comment le feu se propage, avec les délais, l'énergie du feu, etc... compte tenu de la végétation, de sa biomasse, de son état hydrique, du relief, des obstacles, etc... On répètera l'étude pour d'autres points de la zone de façon à couvrir tous les cas possibles de départ du feu.

On peut alors simuler l'implantation des pistes, pare-feu et grandes coupures en divers endroits et voir comment le feu y sera ralenti ou arrêté ; en quels endroits l'énergie du feu pourrait créer de fortes ascendances ; si des lignes EDF, routes, voies ferrées, bâtiments, villages, industries, peuplements forestiers, peuvent être exposés au feu, et dans quels délais.

On peut estimer les temps d'accès au front du feu des divers centres de secours proches et lointains, et les temps d'accès et de rotation des camions aux points d'eau ; les conditions de travail sur telle piste ou tel pare-feu (en fonction de la température sur le front du feu, par exemple).

Tous ces éléments combinés, on pourrait alors déterminer la nature et localiser l'implantation des infrastructures les plus efficaces et les moins onéreuses. Des systèmes-expert, à créer, pourraient faciliter les choix.

L'informatique permet d'effectuer une telle simulation en un temps très court (quelques minutes pour un cas donné), ce qui permet de faire une étude complète (diverses hypothèses météorologiques, divers points de départ du feu) en quelques heures ou quelques jours.

L'expert chargé d'un tel travail, actuellement sans l'aide d'un ordinateur, doit consulter simultanément plusieurs cartes et plusieurs documents, combiner les effets conjoints des diverses variables (nature de la végétation, conditions météorologiques, relief, obstacles, problèmes d'accès, zones à risques, infrastructures à protéger, etc...) et prévoir quelle sera la progression du feu. On peut aisément imaginer combien l'informatique faciliterait le travail de l'expert, et encore plus celui du technicien non expert.

Ces cartes informatiques et des modèles feu pourraient aussi permettre de former les hommes chargés de la prévention et de la lutte, tant en matière de stratégie que de tactique.

Ils pourraient aider, en temps réel, les responsables de la lutte, notamment pour les choix stratégiques en cas de feux multiples dans un département, ou dans les départements couverts par un même CIRCOSC<sup>(3)</sup>.



Front de flamme. Incendie de Villemagne (Hérault), 1986.



Zone brûlée. Plantation expérimentale d'*Eucalyptus dalrympleana* à Collobrières (Var), 1990.

Photos P. DELABRAZE

(3) CIRCOSC : Centre interrégional de Coordination des Opérations de Sécurité civile.

On peut, ici, observer que le choix de la nature et de la localisation des infrastructures de prévention et de lutte dépend, en grande partie, des choix stratégiques et tactiques de lutte ; inversement, ces derniers dépendent des infrastructures présentes, et il pourrait être utile de définir des stratégies et tactiques tenant compte de ces infrastructures, ainsi que d'autres, optimales, qui permettraient de les compléter judicieusement. L'analyse critique systématique des feux observés permettrait, sans doute, d'optimiser modèles, infrastructures, moyens, stratégie et tactique, pour le bénéfice de tous les intervenants, et pour limiter l'ampleur des dégâts.

Bien entendu, la cartographie informatique a de nombreux autres usages, notamment pour l'analyse spatiale (typologie et zonage des divers risques, problèmes liés à l'accès, au relief, aux obstacles, aux infrastructures à protéger, etc...) aussi bien que pour la gestion des projets.

## **LES MODÈLES FEU NORD-AMÉRICAINS**

J.-L. Dupuy (1991) classe les modèles feu nord-américains en modèles déterministes semi-empiriques et modèles statistiques.

### **Modèles feu déterministes semi-empiriques**

Ces modèles sont issus des lois et des relations physiques et chimiques concernant la chaleur et la combustion. Bien que nombre de ces lois et ces relations soient de type non linéaire, avec les conséquences exposées plus loin (voir paragraphe « la théorie du chaos », p.441), ces modèles sont de nature linéaire, donc des approximations locales pour un domaine de validité mal défini, et ils intègrent de nombreuses variables, certaines mesurées en laboratoire, d'autres grossièrement estimées d'après l'idée que l'on peut se faire des conditions de terrain.

Une approximation linéaire locale ne traduit pas le phénomène réel sur l'ensemble du domaine de variation des variables concernées, et il faut introduire des seuils (traduisant des « effets de seuil »), c'est-à-dire utiliser des fonctions différentes selon que l'on se trouve en deçà ou au delà d'un seuil.

Ces seuils sont plus ou moins nombreux selon la complexité et le degré de précision de la représentation des phénomènes réels, et les modèles utilisés.

Du fait que les variables prises en compte soient mesurées en laboratoire ou grossièrement estimées sur le terrain, les résultats calculés à partir des modèles sont très approximatifs, et il paraît donc approprié d'utiliser des modèles qui soient, eux-mêmes, approximatifs. Aussi, confrontés aux observations, ces modèles donnent des estimations (ou « prédictions ») convenables dans certains des domaines de variation des variables prises en compte, moyennes, voire très mauvaises, pour d'autres domaines de variation.

Ces modèles ne prennent que partiellement en compte les effets du relief sur la progression du feu.

### **Modèles feu statistiques**

La méthode statistique consiste à construire, par régression, des relations mathématiques entre les variables explicatives prises en compte (biomasse et état hydrique de la végétation, force du vent, etc...) et les résultats observés considérés (énergie et progression du feu). Ces relations sont paramétrées à partir d'observations pour lesquelles on connaît (ou l'on suppose connues) les valeurs des variables et les valeurs des résultats.

Les résultats obtenus à partir de tels modèles statistiques sont valides en moyenne : pour des valeurs données des variables considérées, ces modèles fournissent, non pas le résultat réel

exact, mais la valeur moyenne de tous les résultats possibles qui pourraient être obtenus ou observés pour ces mêmes valeurs des variables. La variabilité de ces divers résultats possibles, et la fiabilité de l'estimation du résultat réel, sont exprimées par la variance résiduelle qui traduit la probabilité de l'écart entre le résultat réel et la valeur moyenne des divers résultats possibles.

Cette approche statistique est, par nature, linéaire ou quasi linéaire, et elle entraîne les mêmes inconvénients que ceux relatifs à l'approche dite déterministe, avec l'obligation de définir des seuils et des relations différentes selon que l'on se situe en deçà ou au-delà d'un seuil.

Ce type de modèle statistique est encore peu fiable, et il semble qu'il ne puisse être beaucoup amélioré.

## UN MODÈLE OPÉRATIONNEL SIMPLE

Un modèle, ou plutôt un groupe de modèles, opérationnel et simple consisterait à représenter séparément la végétation, le vent local, et le comportement du feu, de façon à mettre en œuvre des paramètres et des variables clairement définis dont la signification soit évidente pour les utilisateurs de ce modèle.

La végétation est cartographiée au 1/25 000 ou au 1/50 000, pour fournir les types de formations végétales (par exemple les types adoptés par les services forestiers, avec des modifications adéquates en tant que de besoin), la densité de la végétation (taux de couvert, nombre de strates verticales), la hauteur du toit, etc... Les données existantes pourraient être rapidement complétées en utilisant l'imagerie satellitaire.

L'état hydrique de la végétation est modélisé en tenant compte de la réserve initiale en eau dans le sol (selon type de sol et type de peuplement), et de la météorologie cumulée (la sécheresse réduisant cette réserve et les précipitations la reconstituant).

Le vent local pourrait être modélisé en tenant compte du vent zonal moyen, du relief, et de la rugosité de la végétation. À défaut de modèles suffisamment précis, on pourrait, pour certaines zones à relief complexe, construire des cartes du vent local tenant compte de l'expérience des hommes de terrain et de mesures *in situ*.

Le comportement du feu en chaque point du périmètre de l'incendie (un point représentant, en pratique, un segment de 25 m, 50 m, 100 m ou etc... selon la précision souhaitée) dépend de la végétation (biomasse combustible et état hydrique) et du vent local (direction et force).

Ce comportement du feu pourrait être paramétré : soit à partir des résultats obtenus par l'étude des modèles complexes (types nord-américains et statistiques) mis en œuvre sur des zones expérimentales d'extension limitée, où l'on aurait pu réunir toutes les données nécessaires pour utiliser de tels modèles ; soit à partir de l'expérience des hommes de terrain, de façon empirique et comparative (par comparaison de feux qui se sont produits dans divers types de formation, sous diverses conditions de vent, etc...).

Ce paramétrage du modèle feu conduirait à déterminer l'énergie du feu, et ses effets directs sur le vent local (turbulences et ascendances), la température sur le front du feu, aussi bien que la vitesse de progression du feu.

Cette combinaison de paramètres issus de modèles complexes utilisables sur des zones limitées, et de paramètres issus de l'expérience des hommes de terrain sur l'ensemble du territoire, permettrait d'obtenir relativement rapidement un modèle opérationnel sur l'ensemble du terri-

toire, modèle qui serait, par la suite, continuellement amélioré par l'extension des travaux de recherche et par les observations des feux réels.

Ce modèle opérationnel pourrait n'être, dans un premier temps, que la traduction des « modèles très simples » utilisés aujourd'hui par des services chargés de la DFCI <sup>(4)</sup>.

Les cartes de la topographie, du relief, des peuplements forestiers, des sols, existent, pour la plupart, sur support informatique, ou elles sont en cours de saisie, parce qu'elles sont utiles, aux divers niveaux de décision, national, régional, départemental et communal, pour l'aménagement du territoire, l'urbanisme, l'environnement, la gestion des eaux, celle des réseaux (routes, voies ferrées, lignes EDF, etc...), l'agriculture, la politique forestière, etc... sans compter les besoins de la Défense nationale. Ainsi, la DFCI apparaît n'être qu'une application supplémentaire pouvant participer aux définitions et aux coûts de ces cartes.

## LA THÉORIE DU CHAOS (OU DE LA COMPLEXITÉ, OU DU DÉSORDRE)

L'approche scientifique classique est résolument réductionniste : elle consiste à réduire un phénomène complexe en éléments et processus élémentaires que l'on étudie séparément, en espérant que la compréhension des détails conduira à comprendre le phénomène global. Cette approche a réussi dans les nombreux cas où les processus élémentaires s'additionnent sans interactions rétroactives, c'est-à-dire pour tous les phénomènes de nature linéaire, pour lesquels une petite cause ne produit que de petits effets.

Toutefois, elle a échoué pour la compréhension globale de nombreux phénomènes physiques, chimiques, biologiques, etc... : ce sont ceux qui ne sont pas de nature linéaire, et notamment la turbulence. Pour de tels phénomènes, une petite cause peut produire de grands effets, et ils sont, à la fois, stables et instables, c'est-à-dire que, dans certaines circonstances, ils résistent à de petites perturbations, et, dans d'autres, ils y sont très sensibles.

Depuis une vingtaine d'années, un nouveau paradigme a permis d'aborder l'étude globale des phénomènes dynamiques non linéaires, des chercheurs ayant développé la théorie du chaos (ou désordre) et des méthodes adéquates.

Un exposé complet de cette théorie du chaos, son histoire, les domaines scientifiques concernés (tous en fait), sans développement théorique complexe, en a été fait par Gleick (1991). De nombreux ouvrages théoriques la décrivent pour divers domaines scientifiques particuliers (mathématiques, physique, chimie, biologie, etc...). Le numéro spécial de la revue *La Recherche* (n° 232, mai 1991) en donne des aperçus.

## UN MODÈLE CHAOTIQUE TRÈS SIMPLE

Pour illustrer un phénomène dynamique non linéaire, on peut considérer la fonction suivante, qui décrit l'évolution d'une population de taille  $x$ , exprimée en rapport à la taille maximum, ce qui fait varier  $x$  de 0 à 1 (taille maximum) :  $x$ -suivant =  $r x (1 - x)$

où :  $x$  est la taille de la population pour l'année courante ;  
 $x$ -suivant, la taille pour l'année suivante ;  
 $r$  un paramètre, dit « de contrôle », compris entre 1 et 4.

(4) Le lecteur peut se procurer un programme « feu de forêt » qui met en œuvre un tel modèle simplifié (non paramétré) ; adresser à l'auteur une disquette formatée standard (5"1/4, 360 Ko, ou 3"1/2, 1,44 Mo) pour PC/AT.

Cette fonction, utilisée en écologie, est le modèle logistique en temps discret. Elle détermine la taille d'une population d'une année à la suivante en tenant compte de la compétition entre individus et de l'espace vital disponible, par exemple le nombre de poissons dans un étang.

Lorsque  $x$  est très petit,  $x$ -suivant est supérieur à  $x$ , et, en itérant le calcul, on peut voir que la taille augmente avec les années (pour certaines valeurs de  $r < 3$  et pour un certain nombre d'années).

Lorsque  $x$  est très grand, proche de 1, il y a surpopulation, compétition, insuffisance de ressources, et  $x$ -suivant est inférieur à  $x$ ; en itérant, on peut voir que la taille décroît avec les années (pour certaines valeurs de  $r < 3$  et pour un certain nombre d'années).

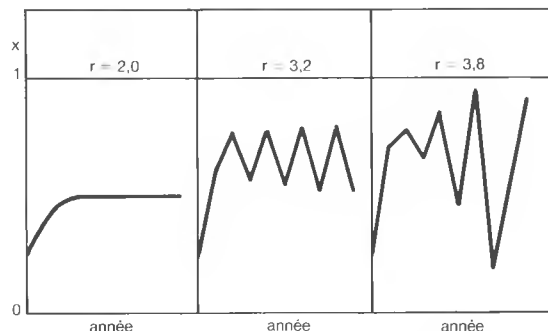
Pour des valeurs de  $r$  comprises entre 1 et 3, et pour une valeur initiale de  $x$ , notée  $x_0$ , différente de 0 et de 1, la suite des valeurs de  $x$  obtenue en itérant le calcul ( $x_1 = r x_0 (1 - x_0)$ ;  $x_2 = r x_1 (1 - x_1)$ , etc...), tend vers une valeur limite égale à  $1 - 1/r$ , telle que  $x$ -suivant =  $x = 1 - 1/r$ .

Pour des valeurs de  $r$  un peu supérieures à 3, la suite des valeurs de  $x$  tend vers deux valeurs limites, l'une prise une année, l'autre l'année suivante; puis, quand  $r$  augmente, la suite tend vers un cycle de quatre valeurs successives, puis 8, puis 16, etc...

On peut constater que, pour  $r$  proche de 4, les valeurs successives de la taille de la population données par ce modèle logistique fluctuent de façon désordonnée. On dit que ce modèle traduit alors un chaos (ou désordre) déterministe (voir tableau I et figure ci-dessous).

Tableau I **Modèle logistique en temps discret :  $x$ -suivant =  $r x (1 - x)$**   
Les calculs ont été faits avec 10 décimales

r	$x_0$	x-suivant								
2,0	0,25	0,38	0,47	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
3,2	0,25	0,60	0,77	0,57	0,78	0,54	0,79	0,52	0,80	0,52
3,8	0,25	0,71	0,78	0,66	0,86	0,46	0,94	0,20	0,60	0,91
3,8	0,26	0,73	0,75	0,72	0,77	0,67	0,83	0,53	0,95	0,19



Avec  $r$  proche de 4, pour une valeur initiale  $x_0$ , on obtient une suite de valeurs  $x_1...x_i$ , complètement déterminées par le modèle; pour une autre valeur initiale un peu différente de  $x_0$ , soit  $x'_0 = x_0 + \epsilon$ , on obtient une autre suite de valeurs  $x'_1...x'_i$ , totalement différente de la première suite, sauf, éventuellement, pour les  $k$  premières valeurs si  $\epsilon$  est très petit. On dit que ce modèle est sensible aux conditions initiales (voir tableau I, 3<sup>e</sup> et 4<sup>e</sup> lignes, avec  $r = 3,8$  et  $x_0$  respectivement égal à 0,25 et 0,26).



Il faut voir, aussi, que les calculs étant effectués avec un nombre de décimales limité (6 à 10 avec les moyens de calcul ordinaires), les valeurs intermédiaires  $x_j$  calculées ne sont pas des valeurs exactes, ce qui augmente d'autant les fluctuations inhérentes au modèle.

En pratique ni  $x_0$ , ni  $r$ , ne peuvent être exactement déterminés et, par suite, les erreurs d'estimation sur  $x_0$  et sur  $r$  interviendront sur la suite des valeurs  $x_j$  calculées, bien que le modèle soit très simple et de nature déterministe.

Le chaos (ou désordre) apparaît dans ce modèle très simple, et il apparaît dans la nature et dans la plupart des modèles non linéaires qui visent à la représenter, notamment dans ceux qui décrivent l'état de l'atmosphère et dans ceux qui décrivent tout phénomène turbulent, comme l'est un front de flammes d'un incendie de forêt.

### INVARIANCE D'ÉCHELLE ET GÉOMÉTRIE FRACTALE

La théorie du chaos concerne aussi l'invariance d'échelle, par exemple pour les mouvements turbulents, la turbulence existant quelle que soit l'échelle à laquelle on observe le phénomène. Cette invariance d'échelle conduit aussi à certains aspects de la géométrie fractale (Mandelbrot, 1989).

Pour des forestiers, on peut illustrer l'invariance d'échelle et la géométrie fractale en considérant la forme d'un arbre : à l'échelle des aiguilles et des feuilles, on observe des groupes d'éléments formant une sorte de bouquet ; à l'échelle des rameaux, les éléments (les rameaux) forment un bouquet similaire au précédent ; à l'échelle des petites branches, puis ensuite à celle des grosses branches, on observe encore de tels bouquets. Il y a, en quelque sorte, auto-similarité à toute échelle d'observation, c'est-à-dire invariance d'échelle, ce qui est une caractéristique des formes géométriques dénommées fractales.

D'autres objets illustrent encore mieux la géométrie fractale : les poumons dont la surface développée (200 m<sup>2</sup>) couvrirait un court de tennis, alors qu'ils occupent un faible volume ; le réseau sanguin et le réseau nerveux ont des longueurs considérables (plus de 300 km pour le réseau veineux) dans le volume limité du corps, et ils y sont intimement mêlés ; certains coraux, un chou-fleur, un éboulis de rochers, une pelote de fil,...

Ces objets ont des longueurs, ou des surfaces, considérables eu égard aux volumes qu'ils occupent. Leurs dimensions semblent être supérieures à 1 (celle d'une ligne) ou à 2 (celle d'une surface) et inférieures à 3 (celle d'un volume) puisqu'ils n'occupent pas tout l'espace à trois dimensions, mais une grande partie cependant. On peut leur affecter une dimension fractale non entière qui les caractérise. Ainsi Zeide et Gresham (1991) ont montré que les arbres ont une dimension fractale comprise, en général, entre 2,45 et 2,75.

Une méthodologie appropriée a été développée pour étudier les objets et les phénomènes qui relèvent de la théorie du chaos et de la géométrie fractale, et des lois universelles ont été mises en évidence.

### FEU DE FORÊT ET CHAOS

En ce qui concerne les feux de forêt, on peut noter que l'espace combustible, formé par les arbres, arbustes, herbes, et la litière, est de nature fractale, dans l'espace à trois dimensions, aussi bien que dans deux dimensions (projection du couvert sur le sol) au moins pour certains

types de végétation méditerranéenne. Il a été montré que l'atmosphère suit des lois de nature chaotique. Le feu est un phénomène turbulent (certaines des fonctions liées à la combustion sont non linéaires et elles traduisent des phénomènes chaotiques). La combustion dépendrait du rapport de la surface du combustible sur son volume (par exemple surface des feuilles et des branches sur leur volume), rapport qui est ici de nature fractale.

Les conditions initiales, au départ d'un feu, aussi bien qu'en tout point du front du feu, sont mal déterminées (biomasse combustible, état hydrique, état de l'atmosphère, force du vent, effets dus au relief), et il est probable que le phénomène feu soit sensible aux conditions initiales.

Si l'on considère le comportement d'un petit feu comparé à celui de brasiers plus ou moins importants, on peut penser que le phénomène feu présente une invariance d'échelle.

Enfin, les seuils (voir paragraphe « les modèles nord-américains », p. 439) sont souvent des objets fractals, l'évolution d'un système dans un sens ou dans l'autre, à proximité du seuil et sur le seuil, apparaissant comme désordonné et « imprédictible »<sup>(5)</sup>. Ce peut être le cas de la limite entre deux types de formations végétales, relevant de deux modèles différents : sur le terrain, cette limite peut former une ligne très complexe de nature fractale.

On pourrait envisager de lisser le phénomène et de régulariser les variables et fonctions concernées, c'est-à-dire calculer leurs valeurs moyennes par unité de temps, de longueur, de surface, de volume : vitesse moyenne de propagation du feu, énergie moyenne, biomasse moyenne, combustibilité moyenne, etc... Cependant, on sait que de telles « moyennes » (quand elles sont définies) peuvent être chaotiques, ce qui ne résout pas toujours le problème de « l'imprédictibilité ».

L'aspect chaotique (ou désordonné) et « imprédictible » du phénomène et de l'énergie du feu de forêt se trouve particulièrement bien illustré par les précautions prises lors de brûlages dirigés : choix de conditions particulièrement favorables quant à l'état de la végétation et à la météorologie locale de façon à ce que l'énergie du feu reste limitée ; nombreuses précautions préventives pour le cas où le feu deviendrait incontrôlé. Ceci nous semble mettre en relief la crainte sous-jacente de voir un feu de faible énergie se transformer inopinément en feu catastrophique de forte énergie, et cette crainte semble être justifiée car, malgré toutes les précautions prises, il est arrivé que le feu ait débordé des personnels insuffisamment entraînés.

Sans même tenir compte des interactions non linéaires entre feu, vent et végétation, on peut penser que le feu de forêt est un phénomène relevant de la théorie du chaos, et les modèles feu les plus élaborés devront, sans doute, être développés dans le cadre de cette nouvelle théorie ; et plus particulièrement ceux de ces modèles qui prétendent représenter l'évolution des feux tridimensionnels<sup>(6)</sup> à l'origine de la plupart des catastrophes.

Bien que le sujet traité ici concerne exclusivement la DFCI, on peut noter que la théorie du chaos et la géométrie fractale semblent pouvoir s'appliquer à divers autres phénomènes forestiers encore insuffisamment expliqués : irrégularité de la densité et de la répartition de la régénération naturelle, irrégularité de la croissance des arbres et des peuplements, forme des houppiers, distribution spatiale des tiges dans un peuplement, etc..., toutes choses que l'on attribue, peut-être à tort, aux seules lois du hasard.

(5) « imprédictible » : seulement en référence aux phénomènes de nature linéaire ; la théorie du chaos peut apporter des éléments utiles pour déterminer l'étendue de cette « imprédictibilité » et des moyens de la résoudre partiellement.

(6) On distingue les feux de sol (litière et premiers horizons du sol) qui rampent ; les feux de surface (strates basses de la végétation) qui marchent ou courent ; et les feux tridimensionnels (strates basses et hautes) qui volent et sautent (selon Colonel Maret, Sécurité civile).

## CONCLUSIONS

Aujourd'hui, la construction de modèles feu semble être de nature à fournir une aide utile aux experts et techniciens chargés de l'étude et de la création d'infrastructures DFCl propres à faciliter la lutte et à réduire les effets des feux de forêt, aussi bien qu'à ceux chargés de définir et de mettre en œuvre des stratégies et des tactiques de lutte encore plus efficaces compte tenu des moyens disponibles.

La recherche dans ce domaine est active et elle se développe même en dehors des milieux traditionnellement concernés par le problème des incendies de forêt.

Cependant, l'approche adoptée pour construire des modèles feu reste très classique et de type réductionniste. Cette approche unique et exclusive nous semble être inappropriée parce qu'elle a échoué dans de nombreux domaines en ce qui concerne la compréhension globale des phénomènes dynamiques non linéaires.

Il nous semble que l'approche scientifique classique ne puisse seule conduire à des résultats opérationnels, et que l'on doive en envisager d'autres, au moins en complément. Ceux qui se proposent de construire des modèles feu devraient s'orienter aussi vers une approche de la dynamique globale du phénomène, en utilisant les outils développés dans le cadre de la théorie du chaos. Il ne s'agit pas d'exclure toute approche réductionniste, mais d'essayer de la limiter au strict nécessaire en ce qui concerne l'étude et la construction de modèles feu opérationnels.

R.B. CHEVROU  
Chargé de mission  
à la Direction de l'Espace rural et de la Forêt  
DIRECTION DÉPARTEMENTALE  
DE L'AGRICULTURE ET DE LA FORÊT DE L'HÉRAULT  
Place Chaptal  
34076 MONTPELLIER CEDEX

## BIBLIOGRAPHIE

- DUPUY (J.-L.). — Modélisation prédictive de la propagation des incendies de forêt, rapport bibliographique. — Avignon : INRA - Laboratoire des Recherches forestières méditerranéennes - Unité de Recherches « Prévention des incendies de forêts », 1991. — 52 p. (Document PIF, 9103).
- Espaces forestiers et incendies. — *Revue forestière française*, vol. XLII, n° spécial, 1990, 380 p.
- GLEICK (J.). — La Théorie du chaos. — Paris : Flammarion, 1991. — 431 p. (Collection Champs).
- MANDELBROT (B.). — Les Objets fractals. — 3<sup>e</sup> édition. — Paris : Flammarion, 1989. — 268 p.
- La Recherche*, numéro spécial, n° 232, mai 1991.
- ZEIDE (B.), GRESHAM (C.A.). — Fractal dimensions of tree crowns in three loblolly pine plantations of coastal South Carolina. — *Canadian Journal of Forest Research*, vol. 21, 1991, pp. 1208-1212.