

Un simulateur de l'ignition et de la propagation initiale du feu aux interfaces route-végétation

Thomas Curt^a et Philippe Delcros^b

Chaque année, des milliers d'hectares sont dévastés par les flammes en région méditerranéenne. La majorité des départs de feux de forêt sont dus aux activités humaines et situés à proximité des zones urbanisées jouxtant les espaces naturels et forestiers. Dans un contexte d'extension de ces zones, il devient donc essentiel de réduire le nombre des départs de feux pour en diminuer les conséquences économiques et environnementales, mais aussi d'évaluer le risque d'incendie à des fins de prévention et d'aide à l'aménagement du territoire. Dans cet article, les auteurs nous présentent la conception d'un outil permettant de simuler l'ignition puis la propagation initiale du feu dans les interfaces route-forêt dans un grand nombre de situations existantes sur le terrain, mais aussi de tester l'effet de différentes options de gestion.

L'aléa d'éclosion des feux aux interfaces route-forêt

En Europe du Sud, la plupart des départs de feux de forêts sont situés à proximité des secteurs à forte activité anthropique comme les habitations et les réseaux routiers ou électriques (source : base Prométhée). L'agrégation des départs de feux au bord des routes est liée au grand nombre de sources d'ignition potentielles représentées par les véhicules accidentés enflammés, les mégots de cigarettes projetés depuis les véhicules, les chantiers de travaux en bord de route, l'émission de particules incandescentes par les pots catalytiques ou lors du freinage (Alexandrian, 1995). Actuellement, on connaît mal la capacité de ces différentes sources d'ignition à générer un départ de feu ; celle-ci dépend de l'énergie produite par la source d'ignition, mais aussi des conditions externes (nature et humidité de la végétation, vent, relief, etc.). Ces données sont importantes pour les gestionnaires des emprises routières (DDE¹, conseil général, sociétés d'autoroutes) qui doivent notamment limiter le risque de départ de feu, comme pour ceux des espaces ruraux et forestiers (ONF², DDAF³) qui s'intéressent à l'aléa induit sur les forêts situées à proximité des routes. Actuellement, les gestionnaires d'emprise utilisent leur expérience pour limiter ce risque (DDE des Bouches du Rhône, 2006). Les méthodes les plus courantes sont la gestion de la végétation en période de risque (fauchage, débroussaillage, désherbage systématique des accotements routiers

traversant les massifs boisés), l'installation de dispositifs locaux visant à limiter la dispersion des sources d'ignition (par exemple les cunettes anti-mégots), et la création de zones tampon entre la route et la forêt. Ces zones caractérisées par une végétation peu inflammable et régulièrement entretenue doivent permettre de maîtriser les incendies naissants : c'est le cas des dépendances vertes créées dans des secteurs autoroutiers sensibles (ESCOTA⁴). L'efficacité de ces mesures préventives est encore mal connue du fait des restrictions en matière d'expérimentations sur les feux *in situ*, surtout en période de risque fort. Étant donné la longueur de linéaire routier et le coût des traitements préventifs, les gestionnaires sont intéressés par des méthodes permettant de moduler le niveau d'entretien par rapport au niveau de risque.

L'objectif de ce travail mené par le Cemagref est de fournir aux gestionnaires un outil permettant de simuler l'ignition puis la propagation initiale du feu dans les interfaces route-forêt dans un grand nombre de situations existantes sur le terrain, mais aussi de tester l'effet de différentes options de gestion. Il existe actuellement plusieurs familles de modèles simulant les feux de forêts (encadré 1), mais ceux-ci sont mal adaptés aux interfaces route-forêts qui présentent des caractéristiques très spécifiques :

– la végétation de ces interfaces présente généralement une composition, un cycle annuel de croissance et des niveaux d'humidité spécifiques,

1. Direction départementale de l'équipement.

2. Office national des forêts.

3. Direction départementale de l'agriculture et de la forêt.

4. Société des autoroutes Esterel, Côte d'Azur, Provence, Alpes.

Les contacts

a. Cemagref, UR Écosystèmes méditerranéens et risques, 3275 route Cézanne, CS 40061, 13182 Aix-en-Provence Cedex 5

b. Cemagref, UR Écosystèmes montagnards, 2 rue de la Papeterie, BP 76, 38402 Saint-Martin d'Hères Cedex

qui influent sur son inflammabilité. Les expérimentations d'inflammabilité sont peu nombreuses (Curt *et al.*, 2007) par comparaison avec celles qui

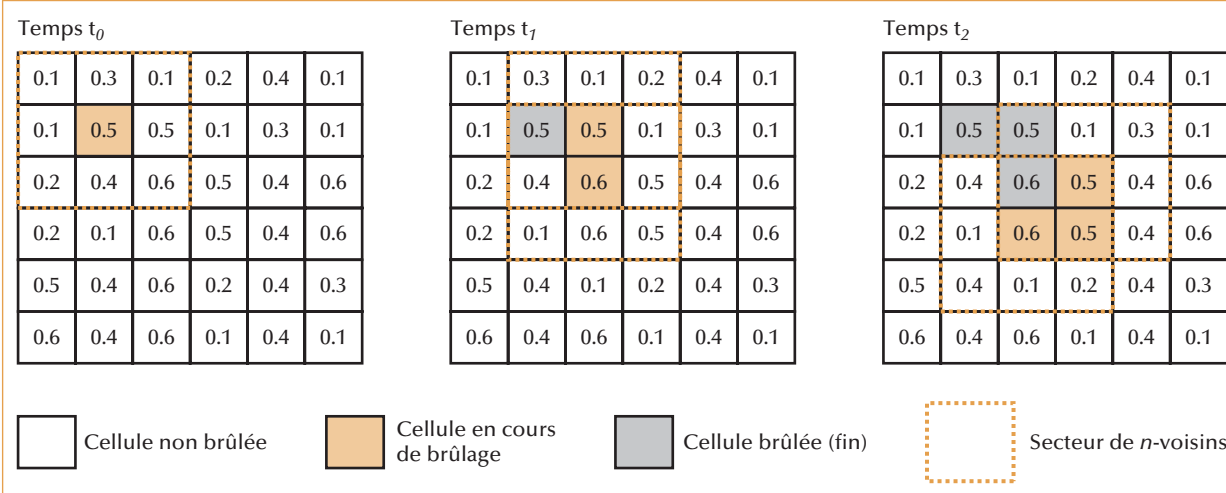
portent sur la végétation forestière (Guijarro *et al.*, 2001 ; Manzello *et al.*, 2006). Les faciès végétaux des interfaces présentent des caractéristiques

Encadré 1

Les modèles permettant de simuler le comportement des feux de forêts

La modélisation du comportement du feu est une préoccupation ancienne destinée à estimer la vitesse de propagation, l'énergie émise par le feu ou l'intensité d'un incendie de forêt. Cela permet notamment d'établir des cartes de risque ou de simuler la progression du feu pour localiser au mieux les moyens d'intervention. Les méthodes de simulation sont utiles dans la mesure où l'expérimentation *in situ* est fortement limitée par la réglementation pendant les périodes à risque qui constituent pourtant la période idéale d'étude.

On distingue classiquement trois grands types de modèles : les modèles empiriques, semi-empiriques (exemple BehavePlus : Andrews *et al.*, 2004) et physiques (Simeoni *et al.*, 2006). L'objectif commun est de prédire l'ignition du feu, mais surtout sa propagation. Celle-ci s'opère en fonction des caractéristiques du combustible (composition, biomasse, masse volumique) et de facteurs externes comme le vent, le relief ou l'humidité du combustible. Les modèles à base physique constituent des outils précis en termes de comportement physique du feu (énergie émise, vitesse de propagation, etc.), mais leur construction et leur utilisation sont complexes. Parmi les modèles empiriques, les automates cellulaires permettent de simuler la propagation du feu de manière probabiliste. La littérature a démontré qu'ils peuvent être des outils simples, fiables et performants pour des feux se développant sur des distances limitées (par exemple : Karafydidis et Thanailakis, 1997 ; Berjak et Hearne, 2002 ; Encinas *et al.*, 2007). Ils sont basés sur une discrétisation de l'espace en cellules de taille adaptée à l'échelle du phénomène étudié. La simulation de l'ignition (= départ du feu) est effectuée en fonction des caractéristiques de la cellule dans laquelle se situe le point d'ignition, puis sa propagation suit des lois de contagion ou de percolation en fonction des caractéristiques des n -cellules voisines (figure 1). Lors des simulations, les caractéristiques de chaque cellule sont réactualisées à chaque pas de temps de la simulation : chaque cellule peut ainsi être non brûlée, en cours de brûlage, ou brûlée. Ces modèles présentent cependant deux inconvénients : (i) ils présentent un comportement de criticité auto-organisée (Malamud *et al.*, 1998) ; (ii) le résultat des simulations est très sensible aux valeurs d'ignition et de propagation attribuées à chaque type de cellule ; (iii) le comportement du feu ne varie pas d'une cellule à l'autre, alors que c'est le cas dans la réalité.

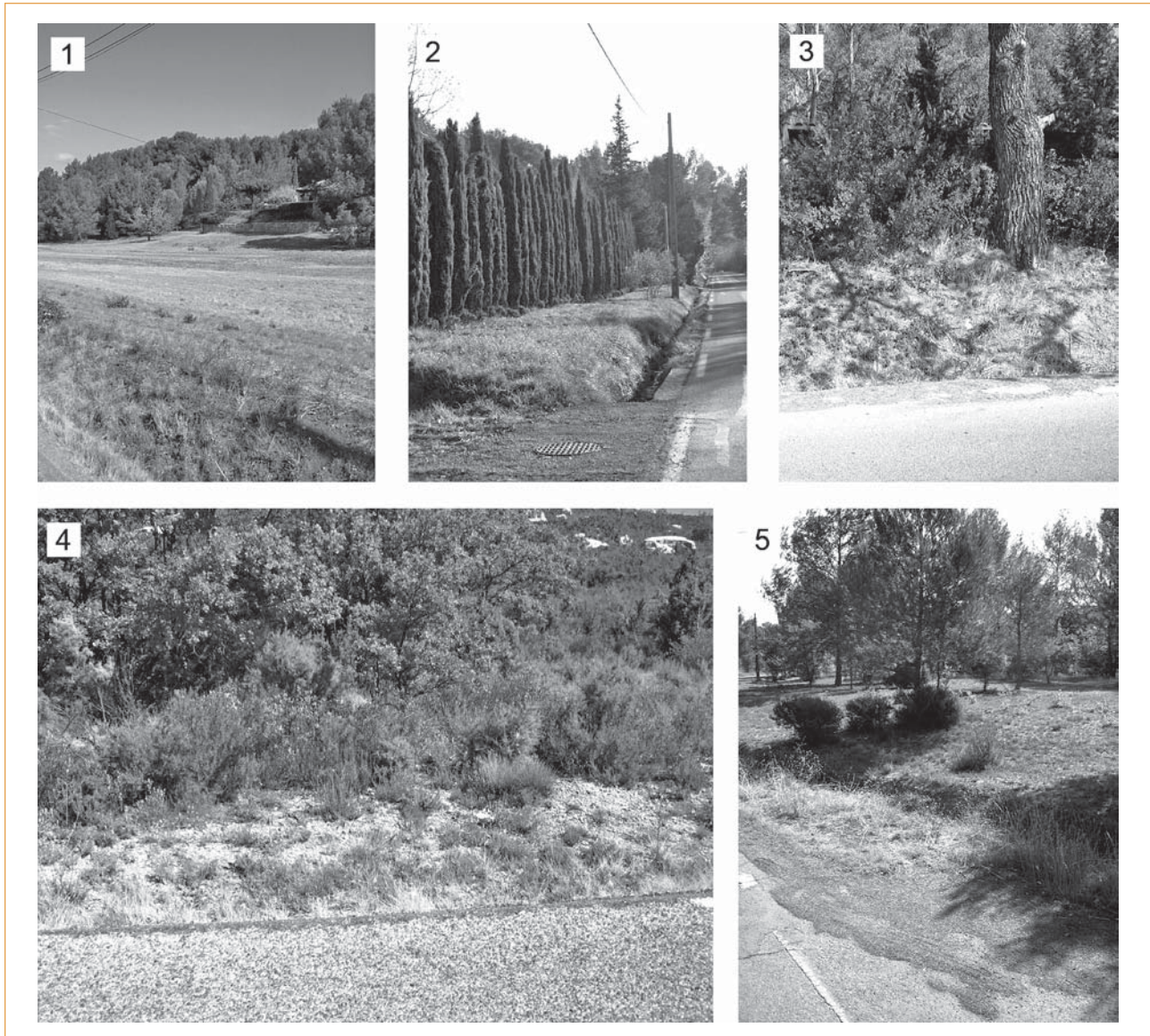


▲ Figure 1 – Exemple de fonctionnement de l'automate cellulaire pour l'ignition et la propagation du feu. Chaque cellule de l'espace a une probabilité d'ignition (P_i) et de propagation du feu (P_p), qui dépend de ses caractéristiques propres (végétation, humidité, etc.) : ici les valeurs de propagation s'échelonnent de 0,1 à 0,6. Au temps t_0 (à gauche), un brandon initial est localisé dans une cellule de départ : celle-ci s'enflamme ou non suivant sa probabilité d'ignition. Au temps t_1 , les huit cellules voisines de cette cellule initiale vont s'enflammer ou non en fonction de leur probabilité d'ignition et de propagation. Ce processus est répété à chaque pas de temps : le feu peut ainsi progresser (ou non) de proche en proche par un phénomène de contagion (dit de « percolation »).

spécifiques : abondance des espèces herbacées, mélange entre des combustibles morts (litières issues des forêts voisines) et la végétation vivante composée d'herbacées et de ligneux bas (photos 1 à 5). Certaines espèces végétales exotiques, dont l'inflammabilité n'a pas été testée, sont même semées ou plantées dans un objectif de

stabilité des accotements, ou paysager. De plus, cette végétation est périodiquement modifiée par les pratiques d'entretien comme le fauchage et le débroussaillage ;

– les interfaces route-forêt peuvent être constituées de plusieurs composants (accotement, talus, fossé) de taille variable, et qui diffèrent par la compo-



▲ Photos 1 à 5 – Les principaux types d'interface route-forêt étudiés.

1 : Restanque (ancienne terrasse agricole) à couvert végétal dominé par des graminées ; 2 : Prairie (faciès végétal dominé par des herbacées dicotylédones) ; 3 : Lisière caractérisée par un mélange de graminées, de litière de pin et de ligneux bas.

Les faciès de végétation de ces interfaces montrent souvent une forte variabilité spatiale à une échelle fine : par exemple alternance d'herbacées, de ligneux bas et de sol nu (photo 4), ou alternance d'herbacées et de litière de pin (photo 5).

sition de leur végétation et leur mode de gestion (figure 3 ; photos 1 à 5). On peut faire l'hypothèse que les dimensions, la gestion de la végétation et l'organisation spatiale de ces composants influent sur le départ de feu et sur sa propagation. Par exemple, l'aléa est supposé plus faible dans le cas de la présence d'un fossé constitué d'espèces herbacées peu inflammables ou d'une bande de débroussaillage en bordure de route.

Pour tenir compte de ces contraintes, notre choix s'est porté sur un modèle probabiliste spatialement explicite de type « automate cellulaire » ; il présente l'avantage de permettre des simulations assez rapides et adaptées à nos hypothèses, à notre échelle de travail et à nos données expérimentales (encadré 1). À l'aide de nombreuses simulations sur des situations réelles ou modifiées, nous avons testé l'hypothèse que la probabilité de propagation d'un feu jusqu'à une forêt voisine (dénommée ici P_{FR}) est influencée par différentes variables : les caractéristiques propres de la végétation de l'interface (composition, humidité), des facteurs externes (vent et mode d'ignition), la localisation du point de départ de feu, et l'organisation spatiale de l'interface. Ce travail doit nous permettre de vérifier que l'aléa peut différer entre des interfaces de même structure mais de végétation différente, ou des interfaces de même végétation mais de structure différente. Les résultats de simulation sont validés partiellement, par comparaison avec des données de la littérature et des simulations utilisant un

modèle de feux de forêts communément utilisé par les forestiers (BehavePlus).

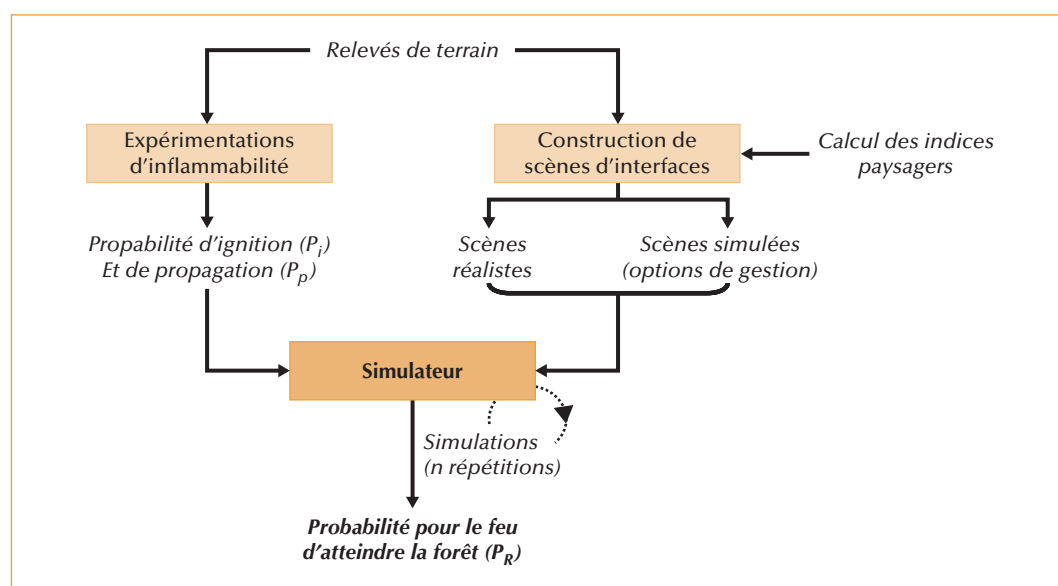
Description de la méthode

La démarche de travail a été structurée en trois étapes (figure 2) : l'acquisition de données expérimentales sur l'inflammabilité de la végétation, la construction de scènes représentant des types d'interfaces, puis la simulation de l'ignition et de la propagation du feu dans ces scènes.

Acquisition de données expérimentales sur l'inflammabilité de la végétation

Il existe sur le terrain un grand nombre de combinaisons entre les faciès de végétation et leurs modes de gestion. Pour sélectionner des types représentatifs, nous avons étudié la végétation le long de routes nationales et départementales dans le secteur d'Aix-en-Provence. Ce travail a abouti à la sélection et à la description détaillée de trois types d'interfaces prédominants (tableau 1) caractérisés par leur faciès de végétation et leur organisation spatiale. Dans chacun de ces types d'interfaces, nous avons collecté des échantillons de végétation non perturbés, entre avril et octobre 2006. Chaque faciès de végétation a été prélevé avant et après passage du traitement préventif contre les feux, qui peut être le fauchage des herbacées ou le débroussaillage de ligneux bas. Tous les échantillons ont été soumis à un même protocole standardisé d'étude de l'inflammabilité (encadré 2).

► Figure 2 – Présentation schématique de la démarche de travail.



Type d'interface	Prairie	Restanque	Lisière forestière
<i>Végétation</i>	Herbacées dicotylédones (80 %), graminées (10 %), litière de pin (5 %), ligneux bas (5 %)	Herbacées dicotylédones (10 %), graminées (60 %), litière de pin (10 %), ligneux bas (20 %)	Graminées (60 %), litière de pin (20 %), ligneux bas (20 %)
<i>Indices paysagers</i>			
Indice de contiguïté *	0,10	0,29	0,24
Indice de contagion *	92,9	92,5	88,5
Indice d'interspersion/juxtaposition *	46,0	12,1	6,7
Indice de cohésion *	99,5	99,0	98,9
Indice de diversité de Shannon *	0,32	0,64	0,48
Indice d'agrégation **	98,9	91,7	84,5

Les interfaces ont une surface de 40 × 30 mètres. Les indices de mesure paysagère ont été calculés à l'aide du logiciel FragStat™ * et de He *et al.* (2000)**.

▲ Tableau 1 – Caractéristiques des trois types d'interface étudiés.

Encadré 2

Les expérimentations d'inflammabilité de la végétation

Nous avons collecté des échantillons de végétation non perturbés (20 × 20 cm) entre avril et octobre 2006. Chaque faciès de végétation a été prélevé avant et après passage du traitement (fauchage ou débroussaillage). L'humidité des échantillons a été fixée à trois niveaux mimant la gamme croissante des valeurs pouvant exister pendant la saison estivale :

- à l'état frais : les échantillons prélevés le matin sur le terrain ont été mis en sac étanche puis brûlés en moins de deux heures ;
- « sec à l'air » : les échantillons ont été séchés au laboratoire pendant deux jours sans convection forcée ;
- anhydre : les échantillons ont été séchés 48 heures en étuve ventilée à 60 °C pour atteindre leur humidité minimale.

L'ignition a été opérée à l'aide d'un cube de bois de pin standard (1,9 × 1,9 × 1,0 cm). Dans la moitié des essais, le cube a été utilisé enflammé, et dans l'autre moitié incandescent, selon un protocole standard établi par Guijarro *et al.* (2001). Le cube est enflammé à l'aide d'un épiradiateur et posé sur l'échantillon soit enflammé (soit 45 secondes après ignition sur l'épiradiateur), soit incandescent après arrêt des flammes. Nous avons simulé deux vitesses de vent au niveau du sol : un vent « faible » (environ 3 km/h ~ 1 m/s avec une précision de ± 0,1 km/h) et un vent « fort » (environ 10 km/h ~ 3 m/s). Un vent oblique (45°) a été généré par un ventilateur domestique soufflant de l'air chaud pour éviter de refroidir le dispositif de brûlage et pour mimer les conditions estivales. Afin d'assurer la répétabilité et la robustesse du modèle, chaque modalité correspondant à un type de végétation, un niveau d'humidité, une vitesse de vent et un mode d'ignition a fait l'objet de 20 répétitions. Le nombre total d'essais était d'environ 900.

Lors de chaque essai, nous avons relevé les variables suivantes d'inflammabilité :

- (i) le délai d'ignition correspondant au temps (en secondes) entre la pose du cube enflammé ou incandescent et l'apparition d'une flamme dans l'échantillon. L'ignition est considérée comme réussie si une flamme se maintient de manière continue pendant au moins 10 secondes ;
- (ii) la durée d'ignition correspondant au temps pendant lequel des flammes se maintiennent dans l'échantillon (en secondes), en notant la présence d'incandescence de la végétation dans le cas de flammes irrégulières ;
- (iii) le nombre de côtés atteints par des flammes se propageant dans l'échantillon (côtés gauche, droite, avant et arrière). La probabilité d'ignition P_i (%) pour une modalité a été calculée comme le rapport entre le nombre d'ignitions réussies sur le nombre d'essais. La probabilité de propagation P_p a été estimée par le nombre de côtés atteints par les flammes (au maximum 4). Ces données sont présentées en détail dans Curt *et al.* (2007).

5. Un brandon est un débris végétal (morceau de bois, cône de pin, herbacées, fragment d'écorce, etc.) enflammé ou incandescent, susceptible de provoquer l'ignition de la végétation.

Ces expérimentations nous ont fourni pour chaque type de végétation, de mode d'ignition, d'humidité et de vent, deux valeurs qui seront utilisées pour simuler l'ignition et le comportement du feu :

- la probabilité d'ignition (P_i) qui indique la fréquence à laquelle un type de végétation donné va s'enflammer dans des conditions données ;
- si l'échantillon s'enflamme, la probabilité de propagation des flammes (P_p) jusqu'aux bordures de l'échantillon.

Construction de scènes d'interfaces en vue des simulations

Les interfaces route-végétation sont définies comme des aires linéaires situées entre une route et la lisière de la végétation naturelle (forêt ou garrigue boisée) (figure 3). Lors des simulations (figure 4), chaque scène représentant une interface est constituée d'une matrice de cellules carrées, avec :

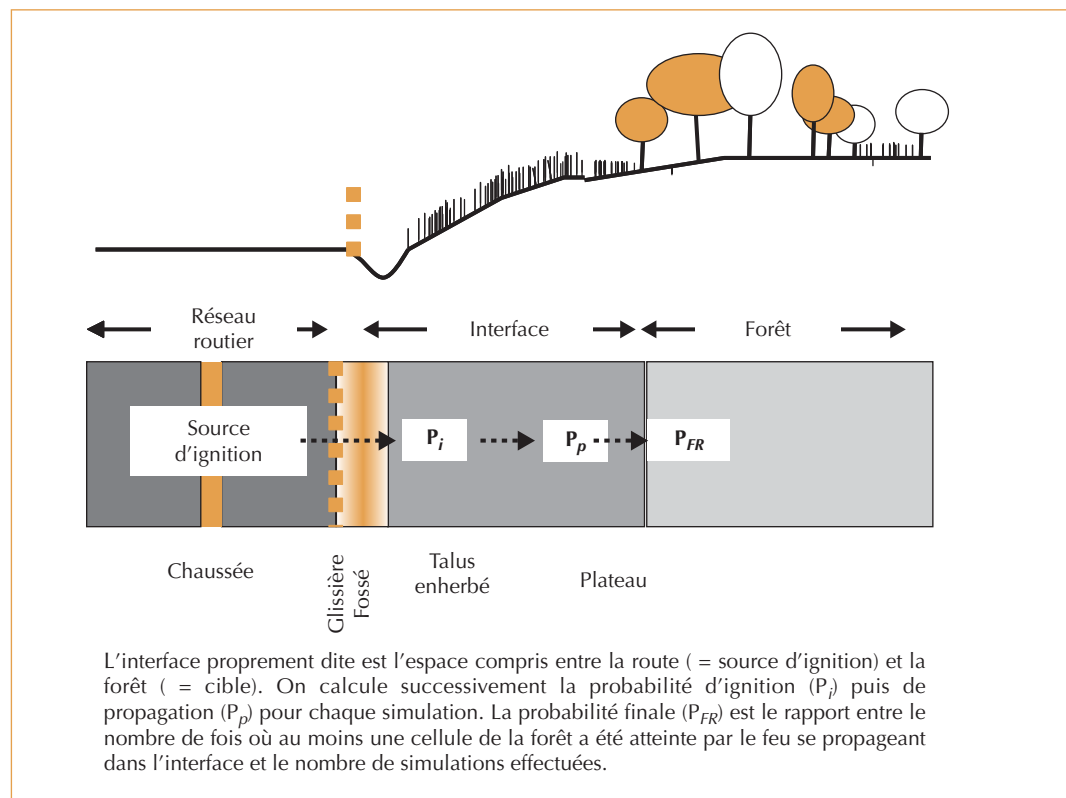
- (i) en haut, une ligne de cellules représentant la route à partir de laquelle sont émis les brandons⁵ pouvant produire l'ignition (zone source) ;

- (ii) au centre, l'interface *sensu stricto* ;

- (iii) en bas, une ligne de cellules constituant la lisière forestière (ou la « cible » pouvant être touchée par le feu).

Chaque type d'interface peut être constituée d'une ou de plusieurs composantes comme un talus ou un fossé. Chacune de ces composantes présente un faciès de végétation caractérisé par sa composition et son mode de gestion ; ces données sont issues des descriptions de terrain. Nous avons découpé l'ensemble en cellules carrées de 20 cm de côté, cette échelle étant cohérente avec l'échelle de variation de la végétation observée sur le terrain et celle des échantillons ayant servi aux expérimentations d'inflammabilité en laboratoire. À chaque cellule de la scène, on affecte donc les valeurs de probabilité d'ignition (P_i) et de propagation (P_p) qui sont issues des expérimentations d'inflammabilité. Lors des simulations, nous avons utilisé des interfaces de longueur fixe (30 mètres) mais de largeur variable (5 à 40 mètres) en fonction des cas observés sur le terrain et de leurs variantes les plus courantes.

► Figure 3 – Représentation schématique d'une interface route-forêt.



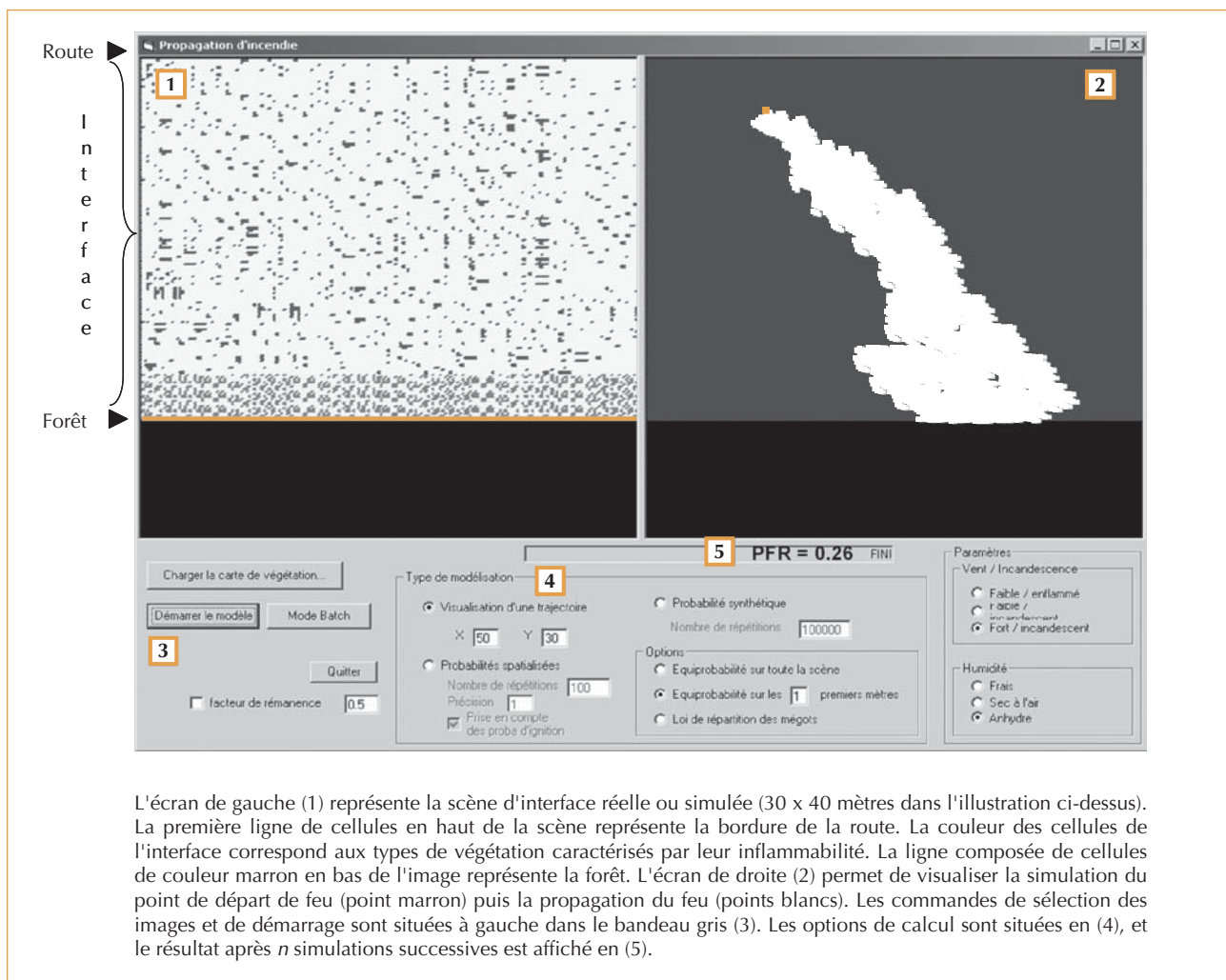
La bibliothèque de scènes principales est composée des trois principaux types interfaces (tableau 1). Des scènes complémentaires ont été constituées afin de tester l'effet de différents modes de gestion et de variantes observés sur le terrain :

- certaines scènes incluent des secteurs de végétation très inflammable, constituée d'un mélange de graminées, de litière de pin et de ligneux bas. Nous avons comparé trois cas : dans le premier, cette végétation inflammable suit un gradient croissant vers la forêt. Dans le second cas, elle suit une répartition quelconque, et dans le dernier cas, elle suit un gradient décroissant vers la forêt ;
- les dernières scènes ont permis de tester l'efficacité de la largeur d'un talus limitant l'ignition

et la propagation du feu. Celui-ci est recouvert de 80 % d'herbacées faiblement inflammables et de 20 % de taches de sol nu. Selon les scènes, la largeur du talus varie entre 1 et 5.

Toutes les scènes ont été bâties avec une topographie plane, le simulateur ne prenant pas encore en compte l'effet de la pente sur la propagation. Pour chaque scène, nous avons calculé différents indices décrivant la structure spatiale, notamment la connectivité entre des zones de végétation comparable (figure 3, tableau 1). Ces indices sont susceptibles d'être corrélés avec le processus de propagation du feu par contagion, et peuvent être utilisés comme des indicateurs du niveau de risque. Ils ont été calculés avec le logiciel FragStats 3.3 (McGarigal *et al.*, 2002 ; He *et al.*, 2000).

▼ Figure 4 – Présentation du simulateur.



L'écran de gauche (1) représente la scène d'interface réelle ou simulée (30 x 40 mètres dans l'illustration ci-dessus). La première ligne de cellules en haut de la scène représente la bordure de la route. La couleur des cellules de l'interface correspond aux types de végétation caractérisés par leur inflammabilité. La ligne composée de cellules de couleur marron en bas de l'image représente la forêt. L'écran de droite (2) permet de visualiser la simulation du point de départ de feu (point marron) puis la propagation du feu (points blancs). Les commandes de sélection des images et de démarrage sont situées à gauche dans le bandeau gris (3). Les options de calcul sont situées en (4), et le résultat après n simulations successives est affiché en (5).

Simulation de l'ignition et de la propagation initiale

L'automate cellulaire qui permet de simuler la propagation du feu comme un phénomène de contagion (Bever *et al.*, 2004) (encadré 1 et figure 4). Pour chaque série de simulation, les données d'entrée sont constituées par la scène représentant l'interface sous la forme d'une matrice de données, chaque cellule étant caractérisée par ses valeurs P_i et P_p correspondant au faciès de végétation. Après chargement du fichier-scène, l'utilisateur sélectionne :

- une modalité d'humidité de la végétation (état frais, sec à l'air ou anhydre) ;
- une vitesse de vent (faible ≈ 3 km/h, ou fort ≈ 10 km/h) ;
- un mode d'ignition : brandon incandescent ou enflammé ;
- le mode de localisation du point initial d'ignition à l'intérieur de l'interface. Trois cas sont pris en compte : (i) une localisation totalement aléatoire dans la scène, qui correspondrait par exemple au comportement d'un promeneur jetant un mégot ; (ii) une localisation aléatoire sur une bande d'un mètre de largeur située en bord de route, qui correspondrait à la présence d'une barrière en bord de route limitant l'accès à l'interface ; (iii) une localisation suivant une courbe exponentielle négative par rapport à la distance à la route, ce qui correspondrait par exemple à des jets de mégots suivant une courbe balistique depuis la route. Cette équation a été bâtie en utilisant des données de la littérature (Berjak et Hearne, 2002).

En début de chaque phase de simulation, le simulateur calcule la probabilité d'ignition P_i pour la première cellule dans laquelle est localisé le point initial d'ignition (figure 4). Si l'ignition se produit, le feu peut se propager aux huit cellules voisines de la cellule centrale, en fonction de la probabilité de propagation P_p . Ce processus (ignition puis propagation) est répété à chaque pas de temps pour chaque nouvelle cellule adjacente à une cellule ayant brûlé. Une fois brûlée, une cellule ne peut évidemment plus être touchée de nouveau. Pour chaque scène et pour chaque phase de simulation, nous avons effectué 10 000 calculs successifs pour tenir compte de la nature stochastique de l'ignition et de la propagation du feu.

La principale donnée de sortie à la fin d'une phase de simulation est la probabilité qu'au moins une cellule de la forêt adjacente soit atteinte par le feu (P_{FR}). Cette valeur est obtenue en faisant le rapport entre le nombre de cas dans lesquels le feu s'est propagé jusqu'à la forêt et les 10 000 calculs effectués. Cette variable est très intégratrice puisqu'elle représente la somme d'un grand nombre de simulations : la valeur de P_{FR} permet ainsi une comparaison simple et robuste de scènes différentes. Le simulateur permet aussi de visualiser la probabilité moyenne affectée à chaque cellule à l'issue des simulations, et d'individualiser ainsi les secteurs présentant un fort risque potentiel au sein de la scène.

Tests de sensibilité du modèle et éléments de validation

Nous avons testé la sensibilité du modèle aux variations des principales variables, et son comportement s'est avéré stable. Nous avons confronté nos résultats à ceux obtenus avec le modèle semi-probabiliste de propagation de feu BehavePlus v. 3.0.1 (Andrews *et al.*, 2004) qui est très largement utilisé dans des écosystèmes forestiers. Nous avons aussi analysé les données de la littérature et demandé l'avis d'experts du comportement du feu pour détecter d'éventuelles valeurs aberrantes dans nos résultats.

Résultats des simulations

Simulations basées sur des scènes réelles

Nos résultats indiquent des différences importantes de probabilité que la forêt soit atteinte par le feu (P_{FR}) en fonction des trois principaux types d'interfaces étudiés ici (figure 5). Ils couvrent ainsi une large gamme de niveau de risque rencontrés en Provence :

- le risque est faible pour les interfaces de type « prairie » dominées par des herbacées peu inflammables, typiques des prairies fertilisées ou des bords de parcelles agricoles. Ce risque reste faible même quand l'interface contient jusqu'à 30 % de végétation fortement inflammable (mélange graminées/litière de pin/ligneux bas de type chêne kermès) ;
- le risque est intermédiaire pour les interfaces dominées par les graminées et comprenant une forte part de combustible mort (« restanque ») ;

– le risque est maximal pour les interfaces typiques des lisières de pinèdes, dominées par des mélanges de graminées, de litière de pin et de ligneux bas. La valeur de P_{FR} varie de 60 à 100 % quel que soit le niveau d'humidité de la végétation et la largeur de l'interface. Dans ces types d'interfaces, P_{FR} est faible uniquement quand la végétation est humide et que le point de départ du feu est localisé dans le premier mètre en bordure de route.

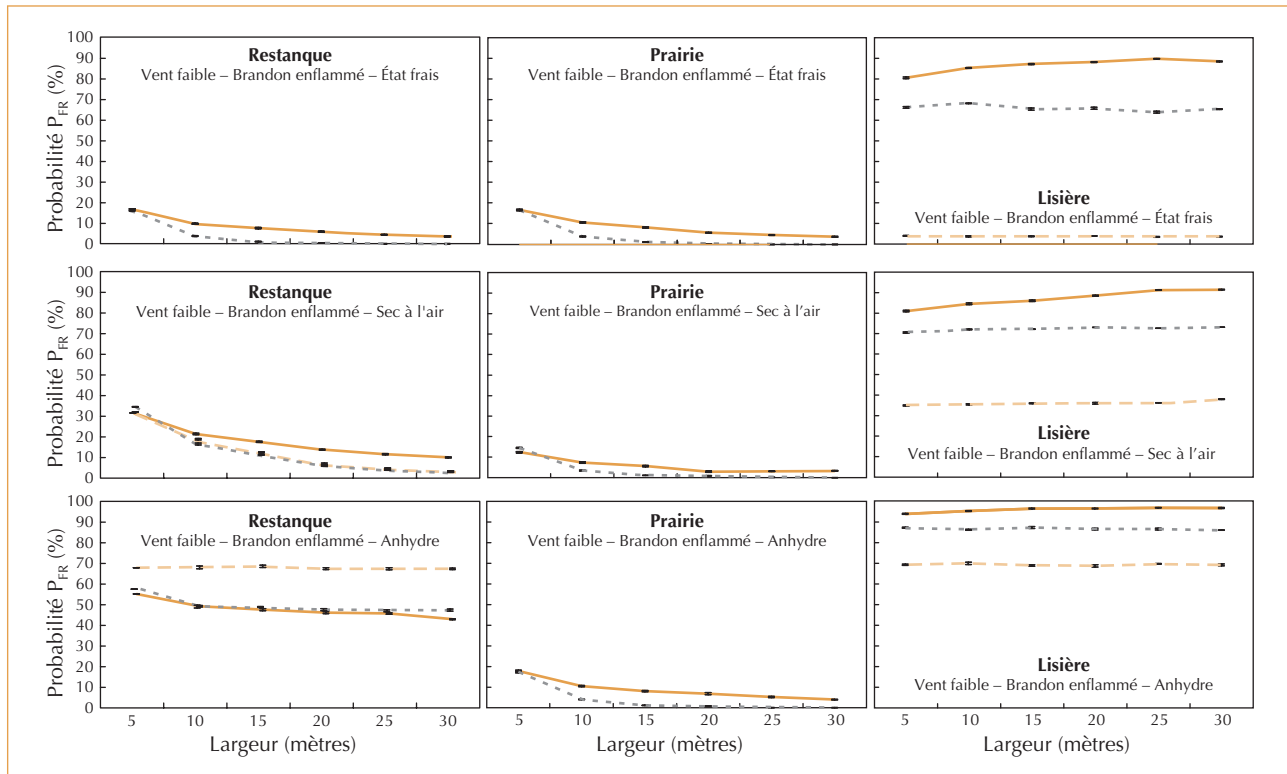
La probabilité que la forêt soit atteinte par le feu diminue généralement quand la largeur de l'interface augmente. Ce résultat suggère une tendance à l'« épuisement » du feu au-delà d'une certaine distance, ce qui est cohérent avec les observations de terrain dans ces végétations, dans des conditions climatiques moyennes. Par contre, la largeur a peu d'effet pour les « lisières » caractérisées par une végétation fortement inflammable. Par ailleurs, le niveau de risque augmente logique-

ment pour tous les types d'interfaces quand la végétation est anhydre (figure 5) comme lors des épisodes très secs de plein été.

La localisation du point de départ du feu a un effet très net sur le risque (figure 5) :

– le risque est maximal quand le départ de feu est situé aléatoirement dans l'interface, ce qui correspond par exemple au comportement d'un promeneur jetant un mégot. Dans ce cas, les différences entre interfaces deviennent faibles, du fait que le point d'ignition peut être situé à proximité immédiate de la forêt et propager un feu dans une végétation pourtant peu inflammable. Ce résultat confirme l'intérêt de mesures visant à limiter la fréquentation des forêts et de leur abords lors de périodes de risque élevé ;

– le risque est fort quand la localisation du départ de feu décroît selon la distance à la route, comme dans le cas d'un jet de mégot de cigarettes depuis



▲ Figure 5 – Comparaison de la probabilité que la forêt soit atteinte par un feu naissant dans l'interface (P_{FR}) pour les trois principaux types d'interfaces, trois niveaux d'humidité de la végétation et la largeur de l'interface. Dans chaque figure, les trois lignes correspondant à des modes différents de localisation du point d'ignition : les lignes continues de couleur marron représentent une localisation totalement aléatoire, les lignes brisées de couleur grise une ignition suivant une loi exponentielle négative, et les traits de couleur marron une répartition aléatoire dans le premier mètre en bord de route.

6. La charge limite de combustible est la biomasse minimale en-dessous de laquelle l'ignition et la propagation du feu sont pratiquement impossibles. Elle dépend du type de végétation et de son humidité, mais aussi des conditions externes comme le vent et le mode d'ignition.

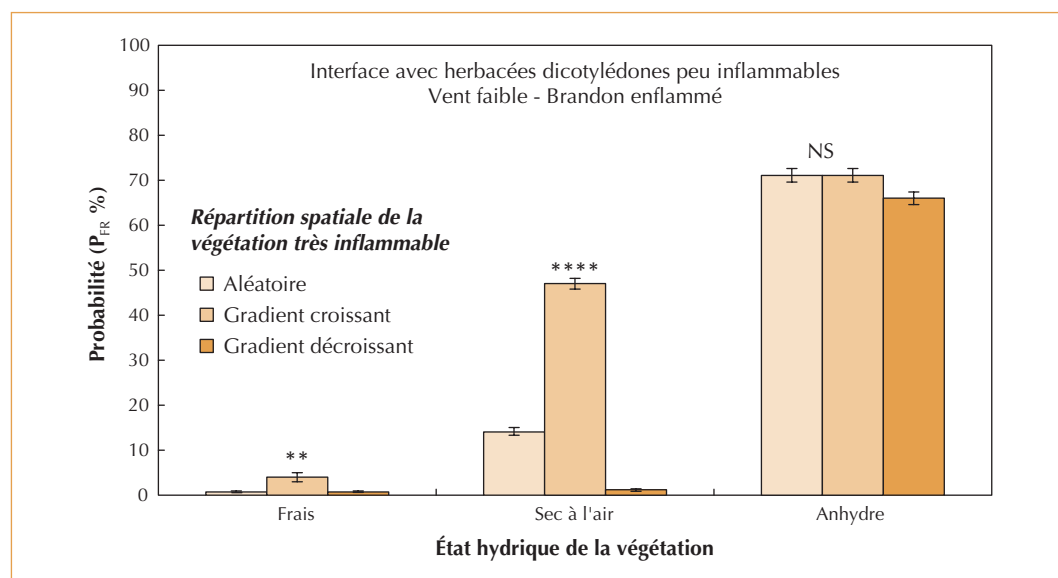
un véhicule circulant sur la route ; la plupart des mégots sont localisés en bord de route, mais une fraction poussée par le vent atterrit au-delà d'une quinzaine de mètres. Le mode de gestion le plus efficace pour limiter le risque dans ce cas serait d'opérer une gestion intensive d'une bande de végétation de plusieurs mètres de largeur à proximité de la forêt, ce qui réduirait le risque lié aux mégots dispersés le plus loin de la route ;

– le risque est faible ou nul dans le cas d'une localisation du départ de feu dans le premier mètre en bord de route. Cette situation illustre le rôle important que peut jouer la gestion du talus routier pour limiter le risque. S'il est constitué de végétation peu inflammable (par exemple des herbacées rudérales qui restent humides pendant l'été) et de 20 % de sol nu, la valeur de P_{FR} peut diminuer de 5 à 10 fois. Ces simulations confirment l'expérience des services gestionnaires des emprises routières qui utilisent ces « lisières anti-feux » aux emplacements stratégiques : le choix d'espèces particulièrement peu inflammables et le fauchage régulier constituent une pratique généralisée en bordure des grands axes routiers

(Alexandrian, 1995 ; DDE des Bouches du Rhône, 2006 ; Escota, 2006). Selon la date de fauchage, son intensité et sa répétition lors de la saison estivale, cette pratique peut être très efficace. Un fauchage très soigné et assez précoce limite fortement le risque, notamment parce qu'il permet à la végétation de rester en-dessous du seuil de charge limite de combustible⁶. Nos résultats expérimentaux (Curt *et al.*, 2007) ont cependant montré que le fauchage tardif d'herbacées suivi d'une forte période de sécheresse conduit à la formation d'un tapis herbacé continu et très sec, qui peut favoriser l'ignition voire la propagation du feu lors de vents violents.

Simulation d'options de gestion

Les différences de comportement des trois principaux types d'interfaces étudiés proviennent non seulement de l'inflammabilité de la végétation prédominante, mais aussi de l'organisation spatiale des faciès de végétation dans l'interface. Par exemple, la localisation des zones de forte inflammabilité (mélanges graminées/litière de pin/ligneux bas) dans une interface peu



▲ Figure 6 – Effet du patron spatial de secteurs à végétation fortement inflammable sur la probabilité pour un feu d'atteindre la forêt (P_{FR}). La scène est constituée de 80 % de végétation peu inflammable et de 20 % de végétation très inflammable. Ces 20 % sont organisés soit aléatoirement, soit suivant un gradient croissant vers la forêt, soit suivant un gradient décroissant. Les barres verticales représentent la valeur moyenne (10 000 simulations) et les traits représentent l'écart type. Pour un même état hydrique de la végétation, le test statistique indique s'il existe des différences statistiquement significatives entre modalités de patron spatial (NS = non significatif ; ** $p < 0,01$; **** $p < 0,0001$).

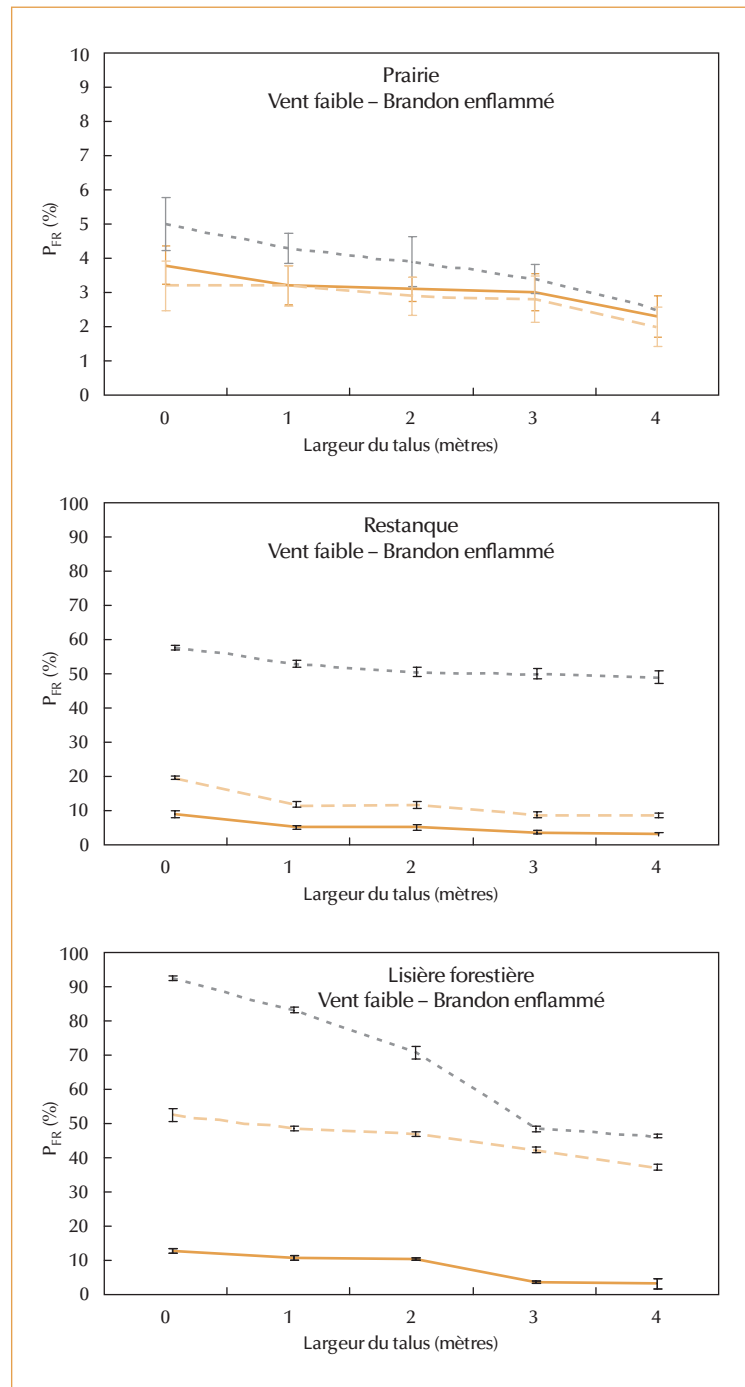
inflammable modifie fortement la probabilité de propager le feu vers la forêt (figure 6 ; photos 4 et 5). Pour une même proportion de végétation très inflammable, le risque augmente fortement dans le cas où cette végétation est disposée selon un gradient croissant vers la forêt ; il est minimal quand le gradient est décroissant et intermédiaire quand la répartition est aléatoire dans l'interface. Cela suggère que la gestion des zones de forte inflammabilité doit être particulièrement rigoureuse à proximité de la forêt. Ce résultat est surtout marqué dans des conditions d'humidité intermédiaires. Dans des conditions très sévères (végétation anhydre) le risque est équivalent quelle que soit la répartition spatiale de la végétation fortement inflammable.

Les résultats suggèrent qu'une manière efficace pour limiter le risque consiste à augmenter la largeur du talus de bord de route constitué d'une végétation peu inflammable et de sol nu, quel que soit le type d'interface (figure 7). Si la végétation reste assez humide en été (état « frais »), le risque est très fortement réduit.

La validation directe et complète des résultats de simulation n'est pas possible pour des raisons réglementaires et pratiques, notamment dans les conditions estivales qui seraient les plus intéressantes à étudier. Cependant, nos résultats sont cohérents avec ceux obtenus par le modèle BehavePlus, qui repose sur d'autres méthodes. Ce dernier modèle prévoit des probabilités d'ignition de 22 à 88 % selon l'humidité de la végétation, ce qui est conforme à nos résultats. Les vitesses de propagation prédites par BehavePlus sont faibles à nulles pour certains de nos faciès végétaux, ce qui correspond aussi à nos données. BehavePlus classe aussi les végétations mixtes (graminées + litière de pin + ligneux bas) comme les plus favorables à la propagation du feu.

Intérêt et perspectives de ce travail pour la gestion préventive des incendies de forêts

L'utilisation conjointe des données expérimentales d'inflammabilité et du simulateur a permis de différencier le niveau de risque entre quelques types d'interfaces et de tester l'effet des principales variables qui conditionnent l'ignition et la propagation du feu. L'utilisation d'un automate cellulaire semble bien adaptée à la simulation du comportement du feu aux interfaces route-végétation. L'intérêt de cette approche est d'obtenir



▲ Figure 7 – Effet de la largeur du talus à végétation faiblement inflammable (80 % herbacées dicotylédones et 20 % de sol nu) sur la probabilité pour un feu d'atteindre la forêt pour les trois types d'interfaces et trois niveaux d'humidité de la végétation. Lignes continues de couleur marron : végétation à l'état frais ; tiretées de couleur marron : végétation à l'état sec à l'air ; lignes pointillées de couleur grise : végétation anhydre. Les barres verticales représentent l'intervalle de confiance (test LSD, 95 %).

assez rapidement des probabilités à partir de scènes réelles, et de tester des options de gestion. L'étape de validation reste cependant incomplète, du fait de la difficulté d'expérimenter des feux de végétation en vraie grandeur pendant la période estivale. Par ailleurs, il est actuellement difficile de comparer ces résultats avec ceux de modèles physiques, qui sont très précis mais d'utilisation complexe et demandeurs en information. Il faut noter que si les automates cellulaires présentent des avantages indéniables pour l'objectif visé ici, ils sont très sensibles aux valeurs implémentées dans chaque cellule, qui conditionnent l'ignition et la propagation vers les cellules voisines. Une analyse de sensibilité plus poussée devrait permettre de tester dans quelle mesure des changements de ces valeurs pourraient affecter les résultats. Les automates cellulaires sont aussi très sensibles à la densité et à l'organisation spatiale des cellules ayant une probabilité très forte ou très faible. On sait ainsi que dans le cas de cellules ne pouvant prendre que les valeurs 0 (pas de propagation) ou 1 (propagation), il existe

ainsi un seuil de percolation théorique (p_c), de l'ordre de 0,59 (Beer, 1990). Cela signifie en pratique que la propagation du feu à toute la scène est très probable si plus de 59 % des cellules ont une valeur de 1.

La première perspective de ce travail est de mieux hiérarchiser – voire de cartographier – la probabilité d'ignition et de propagation des feux sur une large panoplie d'interfaces. Les simulations devront aussi inclure dans des conditions plus variées de vent, d'humidité et de pente. L'objectif final est de développer et de valider un outil de simulation utilisable par les gestionnaires de ces interfaces. Nos résultats actuels confirment les connaissances expertes des gestionnaires, par exemple l'intérêt de la création de bandes végétales peu inflammables en bord de route (Loehle, 2004 ; Bevers *et al.*, 2004). Les simulations futures visent ainsi à optimiser la gestion de la végétation et l'organisation des interfaces pour limiter le risque de propagation du feu vers la forêt. □

Résumé

La plupart des points de départ des incendies de forêts en région méditerranéenne française sont agrégés à proximité des activités humaines : réseaux routiers et habitations. Pourtant, l'inflammabilité de la végétation des interfaces route-forêt et la probabilité de propagation du feu vers les milieux boisés situés à proximité sont mal connus. L'automate cellulaire mis au point par le Cemagref permet de simuler l'ignition puis la propagation d'un feu dans ces types d'interfaces, à l'aide de données expérimentales d'inflammabilité acquises en laboratoire. Les résultats de simulation montrent l'importance relative des différents facteurs en jeu : faciès de végétation (composition, humidité, traitement préventifs éventuels comme le fauchage et le débroussaillage), facteurs externes (vent, mode d'ignition) et organisation spatiale de l'interface. Les perspectives de ce travail sont de hiérarchiser une large gamme d'interfaces suivant leur probabilité de propagation de feu, et d'aboutir à des recommandations de gestion de la végétation et d'organisation des interfaces pour limiter le risque.

Abstract

Most ignition points that propagate fires to French Mediterranean forests and woodlands are aggregated at the vicinity of roads networks and habitat. However, the flammability, ignitability and initial propagation specific to the road-forest interfaces are poorly known. We present here a cellular automaton which simulates the ignition and the spread of fires at road-forest interfaces, using data of burning experiments in laboratory. Our results demonstrate the relative impact of vegetation composition, management practices, and spatial patterning of the interface on the probability of fire to ignite and propagate towards the interface. The main perspectives of this study are to grade a wide range of interfaces according to their fire hazard level, and to test the effectiveness of different management options for reducing wildfire risk towards forests.

Bibliographie

- ALEXANDRIAN, D., 1995, Interventions anti-incendie nécessaires sur la section courante des autoroutes, *Options Méditerranéennes*, n° 25, p. 121-131.
- ANDREWS, P.-L., BEVINS, C.-D., SELI, R.-C., 2004, BehavePlus fire modeling system, version 3.0 : User's Guide, *Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-106WWW*, Ogden, UT : Dept. of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station, 132 p.
- BEER, T., 1990, Percolation theory and fire spread, *Combustion Sci. Technol.*, n° 72, p. 297-304.
- BERJAK, S.-G., HEARNE, J.-W., 2002, An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna ecosystem, *Ecological Modelling*, n° 148, p. 133-151.
- BEVERS, M, OMI, P.-N., HOF, J., 2004, Random location of fuel treatments in wildland community interfaces : a percolation approach, *Can. J. Forest Res.*, n° 34, p. 164-173.
- CURT, T., GANTEAUME, A., ALLEAUME, S., BORGNIE, L., CHANDIOUX, O., JAPPIOT, M., LAMPIN, C., MARTIN, W., 2007, Vegetation flammability and ignition potential at road-forest interfaces (southern France), *4th International Wildland Fire Conference*, Sevilla (Spain) 13-17 May 2007, 11 p.
- DDE DES BOUCHES DU RHONE, 2006, *Entretien et exploitation de la route dans les Bouches du Rhône. Définition des tâches*, Rapport interne, 58 p.
- ESCOTA, 2006, *La politique de prévention des feux de végétation ESCOTA*, Rapport interne, 20 p.
- GUIJARRO, M., HERNANDO, C., DIEZ, C., MARTINEZ, E., MADRIGAL, J., LAMPIN-CABARET, C., BLANC, L., COLIN, P.-Y., PÉREZ-GOROSTIAGA, P., VEGA, J.-A., FONTURBEL, M.-T., 2002, Flammability of some fuel beds common in the South-European ecosystems, *Forest Fire Research & Wildland Fire Safety*, Viegas (ed.), Millpress, Rotterdam.
- HE, H.-S., DEZONIA, B.-E., MLADENOFF, D.-J., 2000, An aggregation index (AI) to quantify spatial patterns of landscapes, *Landscape Ecology*, n° 15, p. 591-601.
- KARAFYDILLIS, I., THANAILAKIS, A., 1997, A model for predicting forest fire spreading using cellular automata, *Ecological Modelling*, n° 99, p. 87-97.
- LOEHLE, C, 2004, Applying landscape principles to fire hazard reduction, *Forest Ecology Management*, n° 198, p. 261-267.
- MCGARIGAL, K., CUSHMAN, S.-A., NEEL, M.-C., ENE, E., 2002, FRAGSTATS : Spatial Pattern Analysis Program for Categorical Maps. Computer software program produced by the authors at the University of Massachusetts, Amherst, <http://www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html>
- PROMETHEE, La banque de données sur les incendies de forêts en région Méditerranéenne en France, <http://www.promethee.com/>
- SIMENONI, A., ANDRE, J., CALOGINE, D., CUINAS, P., DUPUY, J.-L., FERNANDES, P., LARINI, M., MIRANDA, I., MORVAN, D., PINOL, J., SERO-GUILLAUME, O., 2006, Behaviour Modelling of Wildland Fires : Final version of the State of the Art, *EUFIRELAB D-03-09*, 47 p., <http://eufirelab.org>