

**LES APPORTS POSSIBLES DE LA PHYSIQUE DU FEU
A LA CONCEPTION ET A L'ENTRETIEN DES
COUPURES DE COMBUSTIBLE**

**Jean-Luc DUPUY
INRA, Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes
Equipe de Prévention des Incendies de Forêt, Avignon**

Sommaire

1	Introduction	1
2	Mécanismes physiques de base (aspects qualitatifs)	1
2.1	La description du milieu combustible	1
2.2	La description des mécanismes.....	1
2.3	Effet du vent (Figure 1).....	2
2.4	Effet de la pente (Figure 1).....	2
2.5	Les principes de conservation	2
2.6	La complexité des phénomènes	2
2.7	Les enseignements de l'analyse physique du feu	2
3	Modélisation prédictive (aspects quantitatifs).....	3
3.1	Les modèles physiques complets	3
3.2	Les modèles empiriques.....	4
3.3	Cas des modèles « de flamme »	4
3.4	Les modèles physiques simplifiés.....	5
4	Répartition du combustible sur la coupure et difficulté des prédictions – généralités	5
4.1	Strate basse continue.....	5
4.2	Strate basse continue et strate arborée continue	5
4.3	Strate basse continue et strate arborée discontinue.....	5
4.4	Strate basse continue et strate arbustive discontinue	6
4.5	Strate basse continue, strate arbustive discontinue et présence d'arbres.....	6
5	Les apports immédiats de modèles simples – exemples de prédictions	6
5.1	Exemple 1 (Figure 2).....	6
5.2	Exemple 2.....	7
5.3	Exemple 3 (Figure 5).....	8
6	Les effets des instabilités et de la turbulence des écoulements.....	9
7	Conclusion	9
8	Références citées dans le texte.....	11

1 INTRODUCTION

La connaissance de la physique du feu est évidemment importante pour établir des règles de conception et d'entretien des coupures de combustible d'une manière suffisamment objective.

Les mécanismes physiques de base expliquant la propagation des feux de forêt sont présentés dans une première partie.

Pour mettre en oeuvre cette connaissance, il faut disposer d'outils qui permettent une évaluation quantitative d'au moins certains aspects du feu.

Ces outils sont généralement appelés modèles.

Ils sont rapidement présentés dans une deuxième partie.

A l'aide de modèles simples, les possibilités de répondre aujourd'hui ou à court terme à certaines questions posées par les gestionnaires sont examinées dans une troisième partie.

Des exemples concrets sont pris pour illustrer ces possibilités et aussi montrer les limites actuelles.

2 MECANISMES PHYSIQUES DE BASE (aspects qualitatifs)

2.1 La description du milieu combustible

D'un point de vue physique, la végétation est vue comme un ensemble de particules solides réparties dans l'air ambiant.

On peut classer ces particules en familles, une famille regroupant donc des particules qui présentent un comportement au feu similaire.

Les particules d'une même famille ont des propriétés physiques et chimiques similaires : forme de la particule, taille caractéristique (diamètre, épaisseur), densité du matériau, teneur en eau, ...

La taille caractéristique de la particule permet en particulier d'estimer la surface qu'elle expose à l'air ambiant par unité de son volume.

Plus une particule est d'épaisseur ou de diamètre faible, plus cette surface exposée par unité de volume de matière est élevée.

Ce paramètre, appelé rapport surface-volume de la particule, est essentiel puisque tous les échanges entre les particules et le gaz, mécanismes essentiels de la propagation du feu, lui sont proportionnels.

En pratique, on attache donc beaucoup d'importance aux particules les plus fines (moins de 2 mm de diamètre : feuilles, aiguilles, rameaux fins), même si des particules de plus grand diamètre contribuent par exemple à la libération d'énergie thermique.

Une fois les familles de particules constituées, il faut en décrire la distribution à l'échelle de la strate de végétation.

Cela suppose d'estimer la masse de particules présente en moyenne dans un volume "unitaire" entourant chaque "point" de la strate, et ce par famille.

On en déduit alors connaissant la densité de la particule le taux de présence volumique de chaque famille en chaque point de l'espace. A nouveau, tous les échanges entre particules et gaz seront proportionnels à ce taux.

2.2 La description des mécanismes

On considère un feu se propageant principalement dans la direction x à travers une strate de végétation.

Pour décrire les mécanismes de base, on peut "suivre" l'évolution d'un petit volume contenant du combustible au fur et à mesure qu'on l'approche du foyer, puis dans le foyer, et enfin derrière le foyer.

Loin en avant du foyer, le combustible reçoit de l'énergie par rayonnement, donc s'échauffe.

Etant plus chaud que l'air ambiant, il perd une partie de cette énergie vers le milieu ambiant, par convection et par rayonnement.

Parvenu à une température de 100°C, l'eau (libre) s'est complètement évaporée.

Le combustible continue d'être échauffé.

Au voisinage du front de feu, le combustible reçoit de l'énergie par rayonnement et aussi par des phénomènes convectifs complexes (gaz chauds issus du foyer).

Sa température croît alors brutalement et lorsqu'elle dépasse environ 300°C, une dégradation très rapide du matériau solide a lieu : c'est la pyrolyse, qui libère des gaz combustibles.

Ces gaz combustibles, en contact avec l'oxygène, sont alors enflammés et les réactions chimiques de combustion libèrent de l'énergie en quantité considérable, qui permet d'entretenir l'ensemble du processus de propagation (transferts thermiques vers le combustible imbrûlé).

La pyrolyse se poursuit au sein du foyer, une partie du matériau solide reste à l'état solide : ce sont les résidus charbonneux.

En arrière du front, là où l'oxygène est suffisamment présent, la combustion de ces résidus charbonneux a lieu (braises).

Enfin, le matériau restant évolue vers l'état de cendres.

L'énergie libérée par la combustion des produits de pyrolyse provoque un échauffement considérable du mélange gazeux dans le foyer (plus de 1000°C juste au-dessus du foyer).

Ces gaz se dilatent donc considérablement et leur densité étant très inférieure à la densité de l'air ambiant, ils sont mis en mouvement par les forces de flottabilité (équivalent de la poussée d'Archimède).

Ces gaz chauds ont donc un mouvement ascendant.

Cette mise en mouvement s'accompagne d'une "aspiration" d'air "frais" dans le plan horizontal qui conduit au refroidissement progressif des gaz chauds au fur et à mesure qu'ils s'élèvent.

Cet apport d'air frais constitue surtout un apport d'oxygène indispensable à la combustion au sein du foyer.

De plus, cette situation où les gaz chauds sont produits "en-dessous" de l'air ambiant frais crée des instabilités dans les écoulements d'air et de gaz (les gaz frais descendent tandis que les gaz chauds montent).

Ces écoulements deviennent turbulents à partir d'une certaine hauteur au-dessus du sol.

Ce qu'on dénomme couramment la flamme est en fait la partie visible de ces gaz chauds.

Suite à la pyrolyse, des particules très fines et très riches en carbone (suies) se forment dans le milieu gazeux.

Ces particules, qui sont à une température de l'ordre de celle des gaz, émettent une grande quantité d'énergie radiative et rayonnent dans un spectre qui va jusqu'aux longueurs d'onde du visible.

Ces particules contribuent fortement au rayonnement de la flamme.

2.3 Effet du vent (Figure 1)

Les mouvements de gaz et d'air ambiant se produisent forcément, même en absence d'un vent ambiant imposé.

Lorsqu'un tel vent est imposé, à une certaine distance du feu, il modifie les écoulements naturellement engendrés par la combustion (ou à l'inverse, on peut dire que le feu modifie les écoulements ambiants).

Il participe évidemment à l'apport d'air frais, donc d'oxygène.

Mais surtout il change l'orientation des écoulements de gaz.

En particulier, si le vent est dans la direction de propagation du feu (c'est généralement ce qui se produit en cas d'incendie !), les gaz chauds pourront s'écouler vers l'avant du front de feu, jusqu'à une distance qui pourra croître avec la force du vent.

Ceci amplifie donc l'advection de chaleur en direction de la végétation encore imbrûlée, accélérant son échauffement (échanges convectifs).

2.4 Effet de la pente (Figure 1)

Pour un feu montant une pente, les forces de flottabilité s'exercent dans une direction (la verticale) qui forme un angle d'autant plus fermé avec la direction de propagation, que la pente est forte.

De manière analogue à l'effet du vent, on pourra ainsi observer des écoulements de gaz chauds depuis le foyer vers la végétation encore imbrûlée, ceci jusqu'à une certaine distance en avant du front qui doit s'accroître avec la pente.

Là aussi, les échanges convectifs sont accrus.

2.5 Les principes de conservation

L'ensemble des mécanismes décrits plus haut n'agissent évidemment pas au hasard, mais au contraire sont très étroitement liés ; on dit qu'ils sont couplés.

L'état physique du milieu, que ce soit le gaz ou les particules solides, est complètement décrit en chaque point et à chaque instant par des variables thermo-dynamiques (pression, température, densité, composition chimique, vitesse).

L'évolution dans le temps et dans l'espace des valeurs prises par ces variables thermo-dynamiques est *déterminée* par des principes de conservation appliqués à : la masse totale, la masse de chaque entité chimique (ex. oxygène), la quantité de mouvement et l'énergie.

Ces principes de conservation établissent le lien entre les mécanismes décrits plus hauts et leur effet sur les variables thermo-dynamiques.

2.6 La complexité des phénomènes

La complexité des phénomènes réside dans l'existence de nombreux mécanismes physiques et chimiques de base qui sont fortement couplés.

La conséquence immédiate de ce fait est qu'il n'est pas toujours possible de prévoir *d'une manière générale* l'effet de la variation d'un paramètre influant sur le feu.

Ainsi, même si on peut constater que le vent, lorsqu'il souffle dans la direction de la propagation du feu, est un facteur aggravant du phénomène, il peut se produire dans certaines conditions que son accroissement ne produise plus d'effet perceptible sur la vitesse de propagation au-delà d'un certain seuil de vent.

De plus, certains phénomènes importants concourent à cette complexité et font encore l'objet de recherches fondamentales spécifiques (ex. la turbulence des écoulements, les propriétés radiatives de milieux complexes telles les flammes) ?

2.7 Les enseignements de l'analyse physique du feu

L'analyse qualitative de la physique du feu peut donner des éléments de réflexion pour des questions du type : que se passe-t-il si on modifie tel ou tel paramètre (scénario de vent, réduction du combustible, ...).

Néanmoins, ces éléments conduisent plutôt à des décisions de bon sens qui sont évidemment déjà prises par les gestionnaires lorsque les autres contraintes le permettent (contraintes non liées aux caractéristiques du feu attendu sur une coupure).

On peut prendre l'exemple suivant : maintenir ou ne pas maintenir d'arbres sur la coupure. Les éléments d'analyse à prendre en compte qui sont strictement liés au feu sont les suivants :

- la présence de cimes d'arbres diminue la vitesse moyenne d'un vent ambiant au niveau du sol, à cause des forces exercées par le feuillage et les rameaux des arbres, comparée à une situation où ces cimes sont absentes,
- elle diminue aussi les effets de la turbulence des écoulements à l'intérieur de la strate de végétation, qui sont des effets favorables à la propagation du feu (augmentation des transferts de masse et d'énergie),
- en revanche, elle donne évidemment au feu la *possibilité* de se propager dans les cimes.

Autrement dit, la présence des cimes aura à coup sûr un effet positif sur l'efficacité de la coupure si on se réfère aux deux premiers éléments d'analyse, mais *pourra avoir* un effet négatif si on se réfère au troisième.

S'ajoutent ensuite à cette analyse des considérations liées à la présence de forces de lutte sur la coupure :

- la présence de cimes constitue un écran partiel au rayonnement provenant du front de feu (absorption d'énergie par les cimes),
- en revanche elle réduit la visibilité et constitue aussi un écran au jet d'eau.

Ces éléments ne permettent donc pas de prendre une décision *complètement objective* et souvent, le choix sera finalement déterminé par des critères non liés à l'efficacité de la coupure et par l'expérience des gestionnaires.

Un véritable apport au gestionnaire serait donc de lui fournir des éléments d'analyse *quantitatifs*.

Dans l'exemple précédent, cela reviendrait à quantifier chacun des effets positifs et négatifs de la présence des cimes et de prendre la décision en connaissance.

Cela peut peut-être conduire à un « juste milieu » consistant à laisser des arbres dont les cimes ne sont pas jointives (c'est parfois le choix du gestionnaire), mais les outils scientifiques ne permettent pas à ce jour de répondre à la question.

3 MODELISATION PREDICTIVE (aspects quantitatifs)

Le terme de propagation du feu sera considéré ici comme synonyme de comportement du feu.

En fait, l'aspect « propagation du feu » est souvent restreint à la propagation d'un foyer facilement identifiable dans une direction privilégiée et le problème est de déterminer la vitesse d'avancement du feu dans cette direction, ou vitesse de propagation.

Dans une végétation naturelle, donc non uniforme et pour des conditions non constantes, la propagation ne peut plus être vue aussi simplement si on se place à l'échelle du foyer.

Le feu peut par exemple se propager de la strate basse vers les cimes des arbres.

On parle alors plutôt de comportement du feu et le problème posé ne se résume pas à déterminer la vitesse d'avancement dans une direction privilégiée.

Les modèles de propagation du feu ont un sens à l'échelle de la strate de végétation (par exemple 10 fois sa hauteur ou de l'ordre de l'hectare,...).

En revanche, pour décrire et prédire la propagation d'un feu à plus grande échelle (ligne de feu avançant dans un massif forestier, ...), on utilise des modèles de contagion, qui ne seront pas présentés ici compte tenu de l'échelle spatiale caractéristique des coupures de combustible (segments de l'ordre de 1 ou 2 ha).

Pour « faire avancer le feu sur un fonds de carte », ces modèles de contagion peuvent utiliser des règles basées sur les prédictions locales d'un modèle de propagation.

3.1 Les modèles physiques complets

Les modèles physiques complets de propagation du feu sont fondés sur les mécanismes de base et les principes de conservation décrits plus haut.

La formulation mathématique de ces principes pour des milieux dits standards est disponible et utilisée depuis longtemps pour résoudre certains problèmes de mécanique des fluides et de combustion.

Le phénomène des feux de forêt, qui a beaucoup de points communs avec des problèmes classiques de mécanique des fluides et de combustion, présente cependant la particularité de se dérouler dans *un milieu non standard*, la strate de végétation.

Ce milieu, comme on l'a vu, est un ensemble de particules réparties dans l'air ambiant.

Ceci explique pour partie que la formulation rigoureuse et complète de ces principes physiques, adaptée aux particularités de ce milieu, n'est finalement qu'assez récente (Dupuy 1997, Giroud 1997, Larini 1998, Larini *et al.* 1998).

Ceci n'a pas empêché auparavant la construction de modèles physiques, mais beaucoup moins complets (ignorant de nombreux mécanismes).

La formulation mathématique de ces principes aboutit à des équations qui n'ont pas de solution « immédiate ».

Elles ne peuvent être résolues que par des calculs sur ordinateur (simulation numérique).

La méthode de résolution consiste en gros à découper l'espace en petits volumes et le temps en petits pas de temps, et partant de conditions initiales (conditions avant le feu et conditions d'allumage), à calculer progressivement comment évolue le phénomène dans l'espace et dans le temps.

L'important est qu'on ne peut pas prendre facilement de « raccourci » pour effectuer ces calculs.

La conséquence est que *les temps nécessaires pour réaliser ces calculs sont encore trop longs* (plusieurs heures à l'échelle du laboratoire) pour pouvoir présenter des solutions satisfaisantes à ces équations, c'est à dire des prédictions, à l'échelle d'une coupure de combustible.

Cela tient aux spécificités du phénomène feu de forêt.

Malgré cette contrainte, cette approche de modélisation offre des possibilités d'application importantes, pour trois raisons :

- elle permet de prédire toutes les variables qui sont nécessaires, dans un second temps, pour répondre à un problème concret (champs de température, de vitesse d'écoulement, de rayonnement, ...),
- elle ne dépend pas de paramètres liés à des observations de feux réels, de laboratoire ou de terrain, ou de paramètres d'ajustement quelque peu « empiriques »,
- elle peut être en grande partie validée à l'aide d'expériences de laboratoire.

Le premier point impose un travail d'interprétation des prédictions.

Le dernier point, qui fait souvent l'objet de débats justifiés, signifie qu'il n'est pas forcément nécessaire de valider les modèles aux échelles spatiales où leurs prédictions sont données (ex. conduire de vrais feux à l'échelle de la coupure si on veut faire des prédictions à cette échelle).

Mais dans la mesure où le modèle idéal n'existe pas, des validations sont quand même souhaitables (par analogie, il faut penser aux essais en matière de bombe atomique et aux simulations qui les ont peu à peu remplacées).

Il faut retenir que *plus le modèle aura un contenu physique solide, moins ces validations seront nécessaires.*

3.2 Les modèles empiriques

Au sens strict, ces modèles de propagation du feu sont la synthèse statistique d'observations de feux réels, de laboratoire et/ou de terrain, voire d'incendies.

Ils relient des variables décrivant le comportement du feu (essentiellement sa vitesse de propagation, mais aussi la géométrie de la flamme) aux variables décrivant les conditions de propagation (pente, vent, certaines caractéristiques du combustible végétal) à l'aide de relations simples établies statistiquement sur les feux observés.

Dans certains cas, ces modèles prennent en compte dans leur formulation un nombre réduit de principes physiques.

C'est l'exemple très connu du modèle de Rothermel (1972), modèle de propagation employé dans le système de prédiction américain BEHAVE (première version en 1976) et depuis très utilisé dans d'autres systèmes de prédiction plus élaborés (FARSITE aux Etats-Unis, CARDIN en Espagne).

Le principal atout de ces modèles sont *les temps de calcul insignifiants et la simplicité de ces calculs.* Mais ils ont des limites très contraignantes :

- les variables prédites sont peu nombreuses (vitesse de propagation, parfois géométrie de la flamme),
- le domaine de validité est limité aux conditions expérimentales (de laboratoire ou de terrain) dans lesquelles les observations ont été recueillies.
- le domaine de validité est en particulier limité à des végétations continues (la végétation peut être considérée continue à certaines échelles d'espace et pas à d'autres).

C'est pourquoi si on reprend l'exemple du système BEHAVE, qui a été très utile au développement du brûlage dirigé aux Etats-Unis, le modèle qui en est le moteur ne peut que rarement nous permettre de répondre aux questions qui peuvent se poser sur les coupures de combustible.

3.3 Cas des modèles « de flamme »

Il existe des modèles permettant de donner *une estimation des caractéristiques géométriques de la flamme (hauteur, angle)* si on connaît ou suppose la puissance du front de feu (puissance disponible pour l'échauffement des gaz par mètre de front de feu).

Ces modèles sont en fait des corrélations établies entre géométrie de la flamme et puissance du feu (et vent s'il y en a) à partir d'expérimentations, souvent de laboratoire.

Mais ils sont construits sur une analyse dite dimensionnelle des phénomènes fondée sur une analyse physique de la combustion et de la flamme qui en résulte.

On peut donc considérer que *leur validité s'étend au-delà des échelles spatiales du laboratoire, à condition de respecter les hypothèses physiques de base* (similaire à la validité des modèles physiques complets).

Ces modèles peuvent être très utiles pour donner des ordres de grandeur des dimensions et de l'inclinaison d'une flamme.

Ces propriétés peuvent par exemple servir à estimer les caractéristiques d'un feu incident sur une coupure de combustible afin ensuite de calculer avec d'autres modèles son effet sur la coupure (rayonnement).

3.4 Les modèles physiques simplifiés

Ces modèles de propagation du feu peuvent être établis par une simplification des modèles physiques complets.

L'objectif est principalement de réduire le temps de calcul, mais sans altérer trop profondément la nature physique du modèle initial.

Ceci doit permettre de réaliser des simulations à des échelles plus grandes (que le laboratoire).

Un autre objectif est de fournir une compréhension plus immédiate de certains phénomènes (effet du vent, effet de la pente), même si les prédictions ne sont pas précises.

Cela peut être utile au praticien dans un sens pédagogique, mais c'est aussi très utile au chercheur.

De nombreux modèles physiques de ce type ont été développés par le passé, et même bien avant l'apparition des modèles physiques complets (revues de Weber 1991, chapitre IV dans Dupuy 1997).

Aujourd'hui, plusieurs voies sont explorées pour construire ces modèles simplifiés (qui parfois restent quand même assez compliqués !).

Ceci conduit à une diversité importante dont il n'est pas possible de rendre compte ici.

L'important est que ces modèles, selon les hypothèses simplificatrices qui les différencient, ne sont adaptés qu'à certaines conditions de propagation (ex. vent très fort, ou pas de vent, ou pas de pente....).

Ceci implique qu'ils doivent être utilisés dans ces conditions là et aussi qu'ils nécessitent a priori davantage d'être validés aux échelles de prédiction souhaitées (feu sur la coupure) que les modèles complets.

La partie qui suit essaie de hiérarchiser les situations de propagation en fonction de la capacité des modèles physiques simplifiés actuels, et à venir à court terme (moins de deux ans), à prédire un feu dans ces conditions.

Puis des exemples de prédiction sont donnés.

Enfin, une description qualitative des effets des instabilités et de la turbulence des écoulements sur la propagation du feu est présentée afin de faire sentir les limites actuelles des possibilités de prédiction.

4 REPARTITION DU COMBUSTIBLE SUR LA COUPURE ET DIFFICULTE DES PREDICTIONS – GENERALITES

Pour réduire le nombre de situations possibles, on considère un segment de coupure de combustible dont la végétation peut être la combinaison de trois strates :

- une strate basse (typiquement herbacée, et/ou couverture morte, et/ou broyat)
- une strate arbustive,
- une strate arborée.

La strate arbustive est toujours en contact avec la strate basse, elle n'est jamais en contact avec la strate arborée (hauteur inférieure à la hauteur des premières branches feuillées).

Cette coupure est environnée par une végétation non traitée qui forme une strate continue dans toutes les directions et contiguë au sol.

Les différents cas sont alors définis par le nombre de strates présentes sur la coupure et les discontinuités horizontales au sein de chaque strate.

4.1 Strate basse continue

C'est *a priori* le cas le plus simple à modéliser.

En effet, une représentation en 2 dimensions d'espace est possible, et loin de l'interface avec la coupure, la propagation peut être traitée en régime stationnaire si les conditions de vent sont constantes.

Le fait que la strate soit unique permet de plus de « moyenniser » les phénomènes sur son épaisseur, ce qui permet l'utilisation de modèles plus simples.

4.2 Strate basse continue et strate arborée continue

On s'intéresse surtout à la possibilité que le feu se propage effectivement dans les cimes, jusqu'à une certaine distance à l'intérieur de la coupure.

Pour prédire cette situation, des modèles encore relativement simples peuvent être employés.

Ceci est lié à la continuité de la strate arborée et au fait que les interactions avec le feu de strate basse sont faibles.

4.3 Strate basse continue et strate arborée discontinue

La question est la même que précédemment.

Les modèles nécessaires pour y répondre sont a priori plus complexes et ce type de situation nécessite des recherches spécifiques.

On peut remarquer cependant que si dans le cas précédent (2), la conclusion est que le feu a très peu de chance de se propager dans les cimes, cette conclusion sera renforcée ici puisque les cimes présentent des ruptures.

4.4 Strate basse continue et strate arbustive discontinue

Des îlots de végétation arbustive subsistent sur la coupure. Les types de questions posées sont :

- quelle taille d'îlot (hauteur - diamètre) et quelle distance entre îlots voisins faut-il établir pour que la propagation du feu directement d'îlot à îlot soit impossible (peu probable) ? La question conserve un sens si la strate basse continue n'existe pas.
- si la propagation d'îlot à îlot est jugée impossible (peu probable), l'inflammation des îlots par le feu de strate basse est-elle possible ? quelles sont les conséquences pour des pompiers luttant sur la coupure si ces inflammations se produisent ?

Pour répondre à court terme à la première question, on peut considérer des paires d'îlots et leur appliquer des modèles de combustion et de transfert thermique plus ou moins compliqués.

L'hypothèse sera que les interactions avec les autres îlots sont faibles.

Si on souhaite prendre en compte ces interactions et donc réaliser une prédiction à l'échelle de la coupure (et non plus de deux îlots voisins), les modèles à mettre en œuvre seront plus complexes, en particulier ils devront prendre en compte les 3 dimensions d'espace et ne pourront pas être stationnaires.

Des recherches spécifiques sont nécessaires.

Pour répondre à la deuxième question, il n'est pas possible de négliger les « interactions » entre îlots.

4.5 Strate basse continue, strate arbustive discontinue et présence d'arbres

C'est *a priori* la situation la plus complexe.

Par rapport à la situation précédente, on s'intéressera en plus à la possibilité d'inflammation isolée d'arbres, voire à la possibilité d'un feu total sur la coupure.

Des raisonnements similaires à ceux du cas précédent peuvent être appliqués à une paire îlot arbustif – arbre.

Mais une fois encore, si on souhaite une prédiction à l'échelle de la coupure, les modèles à mettre en œuvre seront plus complexes et des recherches spécifiques seront nécessaires.

5 LES APPORTS IMMEDIATS DE MODELES SIMPLES – EXEMPLES DE PREDICTIONS

5.1 Exemple 1 (Figure 2)

Prenons l'exemple d'une coupure de combustible environnée d'une pinède dense avec une strate arbustive abondante.

La hauteur moyenne de cette couche de végétation est de 8 m.

On suppose qu'un feu se propage dans cette végétation non traitée par vent fort (50 km/h au-dessus de la strate).

La tête de ce front de feu arrive perpendiculairement à l'interface avec la coupure à une vitesse de 1,8 km/h, sur une longueur de 50 m.

On peut estimer que la quantité de combustible fin (i.e. consommé dans le front de feu) est de l'ordre de 4 kg/m².

Dans ces conditions, le feu aura une puissance totale par unité de longueur de front de feu de l'ordre de 40 000 kW/m.

Il s'agit d'un feu très intense, mais pas exceptionnel (la limite se situe autour de 50 000 kW/m).

On suppose maintenant que la coupure est nue ou bien n'est couverte que d'une végétation très basse.

On se pose la question : à quelle distance minimale de l'interface coupure/peuplement les pompiers doivent-ils se tenir compte tenu des flux de chaleur reçus en avant du front ?

Pour cela on suppose que ces flux sont des flux radiatifs, c'est à dire proviennent du rayonnement du front de feu.

La littérature (nord-américaine) indique que le flux maximal supportable par des pompiers correctement équipés est de 7 kW/m² (Butler and Cohen 1998).

Pour situer le niveau de ces flux, il faut savoir que le rayonnement solaire à midi, en plein été, par temps clair et sous nos latitudes, atteint 1 kW/m².

Pour estimer les flux radiatifs en avant du front, on doit :

- estimer les propriétés radiatives du front de feu (décrire la source d'énergie),
- calculer la part de cette énergie qui sera émise et transférée en direction du pompier.

Le modèle le plus classique de calcul du rayonnement de la source est d'assimiler le front de feu à une surface plane de hauteur et d'inclinaison (par rapport à la verticale au sol) connues.

Pour cela, on peut utiliser des corrélations entre hauteur (ou longueur) de flamme, angle d'inclinaison, vent et puissance du feu.

Ces corrélations sont empiriques, mais leur forme est établie à partir d'une analyse physique de la combustion et des écoulements qu'elle crée.

Dans le cas présent, on obtient une hauteur de flamme de 8 m (au-dessus du toit de la végétation), soit 16 m au-dessus du sol, et un angle d'inclinaison moyen de l'ordre de 30° (45° au-dessus de la végétation).

Une fois définie la taille et la forme de la surface qui rayonne, on doit déterminer quelle puissance elle émet par unité de surface.

Une loi physique donne cette puissance en fonction de la température de la surface et de son émissivité.

Nous supposons ici que le front de feu est « très profond » (émissivité de l'ordre de 1, la surface est assimilée à un corps noir) et que la température de rayonnement est de l'ordre de 900 à 1000°C en moyenne.

Le rayonnement émis a alors une puissance de l'ordre de 120 kW/m².

Le calcul du flux reçu à une distance X du front de feu est alors effectué sur la base d'une équation de transfert radiatif.

Les approximations faites pour réaliser ce calcul peuvent être considérées comme bien faibles par rapport à celles faites précédemment pour estimer le rayonnement émis de la source.

Le résultat de ce calcul est que la distance minimale de sécurité, pour le front de feu de 50 m de long, est de l'ordre de 50 m.

Pour un front de feu d'une longueur de 25 m seulement (tête du feu étroite), cette distance est de 35 m.

Pour un front de feu d'une longueur de 100 m (tête de feu large), on obtient une distance de 60 m.

Pour un front de longueur infinie (cas limite), le calcul donne une distance de 90 m.

Les choix faits pour ce calcul ont volontairement conduit à maximiser ces valeurs de flux.

En particulier, sans être un feu catastrophe, le feu supposé est très intense.

Donc, **du point de vue du rayonnement**, la conclusion est que les coupures stratégiques quasi-nues dont les dimensions sont de l'ordre de 100 à 200 m, sont suffisamment larges pour que les forces de lutte y soient en sécurité.

L'application de ce calcul à différentes conditions de végétation permettrait de préciser les dimensions minimales des coupures, voire d'établir des règles de conception simples.

Aux Etats-Unis, on utilise comme largeur de coupure minimale 4 fois la hauteur de flamme, le problème étant ensuite de se donner des valeurs pertinentes de cette hauteur (Butler and Cohen 1998).

Le modèle de rayonnement permet de conforter cette règle.

5.2 Exemple 2

Le maintien d'une végétation haute sur la coupure a pour effet d'atténuer le rayonnement à une distance donnée.

Cet effet sera appréciable si le risque de propagation dans les cimes est très faible.

Pour examiner l'effet et le risque du maintien d'une végétation minimale sur la coupure, on reprend l'exemple précédent où on suppose qu'un îlot de végétation arborée, d'un diamètre de 20 m environ, est maintenu sur la coupure, à une distance D de l'interface avec le peuplement non traité (**Figure 3**).

Les cimes des arbres de l'îlot forment une strate continue entre 4 et 8 m au-dessus du sol.

On suppose que le feu de l'exemple précédent arrive sur la coupure avec une longueur de front de 50 m et que la puissance maximale est émise pendant une minute.

Un calcul du bilan d'énergie des aiguilles de pin montre que pour une distance D de 25 m, l'inflammation à distance des cimes par rayonnement ne peut pas se produire.

Pour effectuer ce calcul, l'énergie perdue par les aiguilles a été minimisée et leur teneur en eau (masse d'eau/masse de matière sèche) a été supposée égale à 0,8, valeur faible pour ces parties vivantes de la strate arborée.

On notera au passage que par un calcul analogue, une strate herbacée (donc éléments très secs et très fins) serait enflammée à cette même distance de 25 m.

Si on suppose maintenant qu'un pompier se tient à 50 m de l'interface, mais en arrière de l'îlot de végétation, il recevrait un flux de 4 kW/m² au lieu de 7 kW/m² (seuil limite) (**Figure 4**).

Ceci est dû au fait que les cimes de l'îlot absorbent la quasi-totalité du rayonnement qui provient du front et doit les traverser pour atteindre le pompier.

Le paramètre essentiel qui permet d'estimer cette atténuation est la surface exposée par les particules végétales par unité de volume de végétation (rapport surface-volume x fraction volumique).

Il permet de calculer l'épaisseur optique du milieu.

Pour un rayon traversant une distance de 5 fois l'épaisseur optique du milieu, 99% de l'énergie est absorbée.

Pour des cimes de pin, l'épaisseur optique est de l'ordre de 1 m.

Donc, **du point de vue du rayonnement**, il est avantageux de maintenir ces îlots de végétation, à condition de maintenir une distance suffisante avec l'interface coupure/peuplement et entre îlots.

L'exemple a porté sur la distance D au peuplement.

A priori, la distance entre îlots pourrait être plus faible que cette distance D.

On aboutit là à une situation plus complexe à modéliser comme indiqué plus haut, mais établir des règles de gestion simples semble encore possible.

Cependant, on a ignoré de considérer jusque là un mode de transfert thermique : les processus convectifs.

5.3 Exemple 3 (Figure 5)

On se place maintenant dans le cas où des îlots de végétation arbustive, ou arborés de type cèpée (combustible en contact avec le sol), sont maintenus sur la coupure.

On suppose qu'entre ces îlots, une distance d'au moins quatre fois leur hauteur a été maintenue ou de 8 mètres si ces îlots font moins de deux mètres de haut.

On suppose qu'un feu se propage sur la coupure à travers une strate basse et que ces îlots peuvent être enflammés et être à leur tour vecteur de la propagation du feu.

On veut savoir si cependant, la combustion d'un îlot peut provoquer l'inflammation d'un îlot voisin.

Deux processus peuvent causer cette inflammation à distance : le rayonnement (exemple 2) ou le transport de gaz chauds (convection).

Les gaz chauds s'écoulent en moyenne dans la direction de la flamme visible.

Cette direction est connue si on sait estimer l'angle de la flamme avec la verticale (ou le sol).

A partir de cette donnée, on peut évaluer à partir de quelle distance la flamme issue de la combustion d'un îlot ne peut pas « toucher » l'îlot voisin, supposé de même hauteur que le premier.

L'estimation de l'angle de la flamme peut être réalisée à l'aide de corrélations simples (déjà évoquées dans l'exemple 1).

En gros, ces corrélations sont basées sur un bilan des forces qui s'exercent sur les gaz chauds qui composent la flamme.

Les gaz chauds, de faible densité, subissent une force dirigée vers le haut (force de flottabilité ou « poussée d'Archimède »), qui donc a tendance à créer un mouvement vertical.

En absence de vent, le mouvement *moyen* des gaz chauds est vertical (la pente du support peut modifier cette situation).

En présence de vent, une force supplémentaire, essentiellement horizontale, s'applique à ces gaz.

Elle est directement liée à la vitesse du vent.

C'est le rapport entre ces deux forces qui permet de construire ces corrélations et de déterminer la direction *moyenne* des gaz chauds.

Les forces de flottabilité étant liées en fait à l'énergie de la combustion qui échauffe les gaz, ces corrélations s'expriment souvent à l'aide de la puissance du front de feu, qui elle aussi dépend du vent.

Les corrélations disponibles sont en fait applicables à un front de feu rectiligne suffisamment long (2D, front de feu beaucoup plus long que profond).

Nous les appliquerons malgré tout au cas des îlots de végétation dont le diamètre peut ne pas être suffisant par rapport à la profondeur du front de feu pour que cette hypothèse soit vérifiée.

En fait, cela revient à considérer qu'on a non plus un îlot de végétation de diamètre d , en combustion, séparé de l'îlot voisin distant de D , mais une bande de végétation en combustion de longueur grande devant la distance D séparant les îlots.

On revient en fait à la représentation 2D de l'exemple 1.

En faisant cette hypothèse, on maximise largement le risque d'inflammation à distance par convection.

L'utilisation de ces corrélations (Nelson and Adkins 1986, 1988) pour des strates de hauteur allant de 0.5 à 8 m et des vents atteignant 80 km/h conduit à la conclusion que la règle du type « 4 fois la hauteur ou au minimum 8 m » est suffisante pour qu'une inflammation à distance, par convection moyenne des gaz chauds soit impossible (**Figure 6**).

En fait, d'après ces estimations, cette règle pourrait être moins contraignante pour les strates les plus hautes.

On peut aussi noter que le seuil de 8 m (plus généralement, un seuil minimal) est nécessaire pour les strates les moins hautes (**Figure 7**).

La règle de 4 fois la hauteur conduirait par exemple à une distance de 2 m pour une strate de 0.5 m de haut, et l'îlot voisin pourrait être enflammé à partir de 80 km/h de vitesse de vent.

Pour la possibilité d'inflammation à distance par rayonnement, des calculs similaires à ceux effectués dans l'exemple 1 montrent que cette inflammation à distance n'est pas possible, à condition que les îlots aient un diamètre inférieur ou égal à la distance minimale qui les séparent.

Des conditions moins contraignantes sont même sans doute applicables dans de nombreux cas

L'application de ces modèles simples a été faite sous des hypothèses qui conduisent à maximiser les risques d'inflammation, en fait à favoriser les transferts thermiques à grande distance.

On voit que **la règle d'espacement appliquée est suffisante pour éviter des inflammations à distance d'un îlot par son voisin.**

Pour aboutir à cette conclusion, on a retenu deux modes de transfert thermique, **le rayonnement et le transport convectif moyen.**

6 LES EFFETS DES INSTABILITES ET DE LA TURBULENCE DES ECOULEMENTS

Pour traiter des exemples précédents, on a successivement considéré deux modes de transfert thermique majeurs : rayonnement et convection.

Les modèles simples utilisés pour la convection considéraient le transport convectif moyen.

Des modèles plus compliqués peuvent être utilisés pour traiter ces exemples.

Mais l'important est que **les effets de la turbulence n'ont pas été pris en compte** pour estimer dans quelle direction et jusqu'à quelle distance les gaz chauds sont transportés au cours du feu.

Ceci est actuellement **un problème de recherche**.

Il n'est pas possible d'entrer ici dans le détail de ces phénomènes complexes et encore incomplètement compris.

Au voisinage du front de feu, des poches de gaz chauds se forment qui dans un premier temps au moins ont tendance à monter (comme l'écoulement moyen).

Ces poches se forment car en fait, des gaz frais doivent à l'inverse descendre jusqu'à la base des flammes pour remplacer les gaz chauds.

Ces poches de gaz chauds sont animées d'un mouvement moyen, mais aussi de mouvements tourbillonnaires.

Contrairement aux gaz « pris » dans l'écoulement moyen ascendant au-dessus du foyer, ces poches de gaz chauds pourront être « détachées » du front et transportées en avant de celui-ci dans la direction horizontale (ou parallèle à la strate de végétation).

Il peut arriver alors que ces poches de gaz chauds soient transportées à une grande distance en avant du front de feu, juste au-dessus de la strate de végétation et cèdent ainsi l'énergie qu'elles contiennent au combustible situé dans la partie haute de la strate (ex. cimes).

Ces poches apparaissent d'une manière périodique, par « bouffées », ce qui conduit à parler de pulsation.

Ce sont ensuite des phénomènes de turbulence qui permettent leur transport dans le plan horizontal sur des distances importantes, juste au-dessus de la strate de végétation.

Ces poches de gaz chauds peuvent atteindre des dimensions de l'ordre de la hauteur de strate elle-même et bien davantage si elles s'élèvent dans l'atmosphère.

A l'intérieur de la végétation, les phénomènes turbulents sont moindres et le sont d'autant moins que la végétation est dense.

Mais des poches de plus petite taille peuvent se former au voisinage du front et être transportées en avant du front, sur des distances plus courtes, au sein de la végétation.

Elles contribueront donc à l'échauffement du combustible.

Des travaux récents de modélisation effectués par Rodman Linn (Los Alamos National Laboratory, Etats-Unis, 1998) ont permis de simuler ces phénomènes pour un feu se propageant dans une végétation réelle (comparable à une végétation arborée de nos régions).

Ces simulations numériques montrent que les poches de gaz chaud de « grande taille » peuvent être transportées jusqu'à des distances de plusieurs dizaines de mètres voire plus de cent mètres, provoquant donc un échauffement à distance de la partie haute de la strate de végétation.

Ce phénomène apparaît même pour un vent ambiant faible (quelques m/s).

Le phénomène engendre également une propagation non stationnaire du front de feu.

Les effets de ce transport à distance par les poches de gaz chaud sont accrus en pente ascendante et réduits en pente descendante.

Plus généralement, l'interaction du vent ambiant et du relief vont influencer sur ce transport.

Si ces résultats restent des résultats de simulation, il semble que l'expérience de beaucoup d'hommes de terrain les conforte.

Ce phénomène de transport est particulièrement difficile à prédire et nécessite de considérer les écoulements sur de grands domaines d'espace.

Pour réaliser les prédictions précédentes, un modèle de turbulence particulièrement sophistiqué a été utilisé, ainsi que des moyens de calcul exceptionnels.

Des modèles simples permettant ces prédictions ne semblent pas pour demain.

Pourtant, au travers des ordres de grandeurs cités plus haut, on voit bien que la prise en compte de ces phénomènes, qui ne sont pas exceptionnels, est nécessaire pour apporter un diagnostic complet de l'efficacité des mesures prises pour la conception et l'entretien des coupures de combustible.

On peut préconiser dans un premier temps, sur un plan qualitatif, d'examiner quels facteurs sont favorables ou défavorables d'une part à la naissance de ces poches de gaz chauds, d'autre part à leur transport au sein de la strate de végétation encore imbrûlée et juste au-dessus de cette strate.

7 CONCLUSION

Jusqu'à présent, les gestionnaires ont probablement établi les règles existantes de conception et d'entretien des coupures sans utiliser les modèles simples employés pour traiter les exemples précédents (modèles de rayonnement, corrélations).

Ceci dénote un problème de transfert des connaissances et des outils produits par la recherche vers leurs utilisateurs.

Ce problème est en grande partie lié à la validité des connaissances et des modèles produits.

La propagation des feux de forêt, on l'a vu, est un phénomène complexe et c'est aussi un phénomène dangereux.

Le chercheur doit donc évaluer le domaine de validité des connaissances et des outils qu'il propose au gestionnaire pour que leur usage ne conduise pas à des prédictions « trop fausses ».

C'est d'ailleurs pourquoi les exemples présentés plus haut l'ont été en maximisant à chaque fois l'intensité et les effets du feu (transferts thermiques à distance, risque d'inflammation).

Ceci peut conduire à des précautions telles que le gestionnaire se trouve alors devant des choix impossibles (coupure d'un kilomètre de large à cause des « poches de gaz » ou des sautes dues à des brandons, coupure complètement nue pour minimiser les risques sur la coupure, ...) et finalement, cela limite la contribution des connaissances scientifiques aux choix techniques de conception et d'entretien des coupures.

La question posée est donc : comment valider les connaissances et les modèles ?

On l'a vu, plus une approche du problème est fondée sur une analyse physique complète et rigoureuse du phénomène, moins il est nécessaire de valider ses prédictions sur le terrain, à condition que chaque « compartiment » du modèle ait lui-même été validé, ce qui se fait souvent au laboratoire.

Mais comme ces modèles « complets » ne sont pas encore directement applicables à des situations de terrain, avant tout pour des raisons de calcul, on doit opérer des simplifications importantes pour effectuer des prédictions.

Il reste alors deux possibilités pour évaluer la validité du modèle obtenu :

- comparer certaines de ses prédictions à ce que donneraient les modèles complets sur des cas simples (exemple : comment brûle un buisson isolé ou un arbre isolé ?),
- réaliser des feux expérimentaux de terrain y compris dans des conditions sévères,

Dans le but de déterminer les connaissances et le savoir-faire nécessaires pour mettre en œuvre ces solutions, une convention de recherche « Efficacité des Coupures de Combustible » a été signée en novembre 1998, pour trois ans entre :

- la Direction de l'Espace Rural et de la Forêt du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Paris
- l'Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes de l'Institut National de la Recherche Agronomique, Avignon

- et l'Institut Universitaire des Systèmes Thermiques Industriels de l'Université de Provence, Marseille

Dans un premier rapport d'étape, les équipes impliquées¹ décrivent les méthodes originales élaborées pour :

- décrire le combustible au voisinage et sur la coupure,
- modéliser le comportement du feu et prédire des grandeurs comme la vitesse de propagation, la taille des flammes, l'énergie dégagée, ...
- faire s'exprimer les experts sur l'efficacité de la coupure dans des scénarios prédéfinis (feu de face et feu de flanc, avec et sans vent).

Une troisième possibilité est l'observation de feux réels avec tout ce qu'elle comporte de difficultés pratiques et de problèmes d'interprétation.

Une description précise de la végétation en terme de combustible est également nécessaire et l'est d'autant plus qu'on adopte une démarche physique de modélisation.

Actuellement, pour faire des prédictions sur des cas concrets, il est nécessaire de multiplier les hypothèses sur la distribution du combustible au sein des strates, ou bien de considérer un cas moyen, ou encore un cas extrême.

Le projet de recherche cité plus haut comporte également un volet important de description du combustible sur des coupures réelles, classées par types.

L'objectif est de disposer d'une base de données qui permettra de réaliser des études de cas sur ces coupures réelles, en maîtrisant au mieux le facteur « combustible ».

Il reste aussi à « maîtriser » le facteur vent, c'est à dire se donner des scénarios cohérents selon la localisation et l'implantation de la coupure par rapport au relief.

En résumé, la recherche ne pourra pas, même à moyen terme, fournir un modèle de propagation du feu suffisamment général et capable de prédire le comportement du feu avec confiance dans toutes les situations possibles rencontrées sur les coupures de combustible.

¹ Outre les deux équipes indiquées, les équipes suivantes participent à ce projet

- le Pôle Cindyniques de l'Ecole des Mines de Paris à Sophia-Antipolis,
- la Section Technique Interrégionale de l'Office National des Forêt à Avignon,
- l'Unité d'Ecodéveloppement de l'Institut National de la Recherche Agronomique à Avignon

Il est donc nécessaire de réaliser des études de cas, qu'on ne peut pas multiplier à l'infini. Ceci suppose une typologie de situations combinant l'ensemble des facteurs agissant sur l'efficacité d'une coupure.

Compte tenu des limites des modèles, les chercheurs doivent s'impliquer dans ces études, ce qui suppose des moyens (humains).

Pour lever les nombreuses incertitudes qui demeurent en matière de prédiction du comportement des feux de forêt, des avancées plus fondamentales sont nécessaires et des données de validation doivent être recueillies en situation « réelle » (feux expérimentaux de terrain) afin d'estimer le niveau de confiance qu'on peut donner aux prédictions.

8 REFERENCES CITEES DANS LE TEXTE

- BUTLER B W and J D COHEN, 1988. Firefighter safety zones : a theoretical model based on radiative heating. *IJWF* 8(2) :73-77.
- DUPUY J L, 1997. Mieux comprendre et prédire la propagation des feux de forêt : expérimentation, test et proposition de modèles. Thèse de doctorat, Université Claude Bernard, Lyon I. 272 p.
- GIROUD F, 1997. Contribution à la modélisation de la propagation des feux. Approche multiphasique des feux de forêt. Développement d'un feu de propergol en milieu semi-confiné.
- Larini M, 1998. The Complete Physical Model. Course in 3rd International Conference on Forest Fire Research, Luso (Portugal), November 1998, 34 p.
- Larini M, F Giroud, B Porterie, and J C LORAUD, 1998. A multiphase formulation for fire propagation in heterogeneous combustible media. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 41(6-7):881-897.
- LINN R R, 1997. A transport model for prediction of wildfire behavior. PhD Dissertation, University of California. Report LA-13334-T, Los Alamos National Laboratory, NM. 195p.
- NELSON R M and C W ADKINS, 1986. Flame characteristics of wind-driven surface fires. *Can. J For. Res.* 16 : 1293-1300.
- NELSON R M and ADKINS C W, 1988. A dimensionless correlation for the spread rate of wind-driven fires, *Can. J. For Res.* 18 :391-397.
- ROTHERMEL R C, 1972. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels ; Res Pap INT-115. USDA, Intermountain Research Station, Ogden, UT.
- VALETTE J C, J L DUPUY, E RIGOLOT, M LARINI, D MORVAN, B PORTERIE, M ETIENNE, P BOURDENET et F GUARNIERI, 1999. Convention 61.21.05/98, rapport d'activité de l'année 1999. PIF1999-09, 12 p + annexes
- Weber R O, 1991. Modelling fire spread through fuel beds. *Progress in Energy and Combustion Science* 17:67-82.

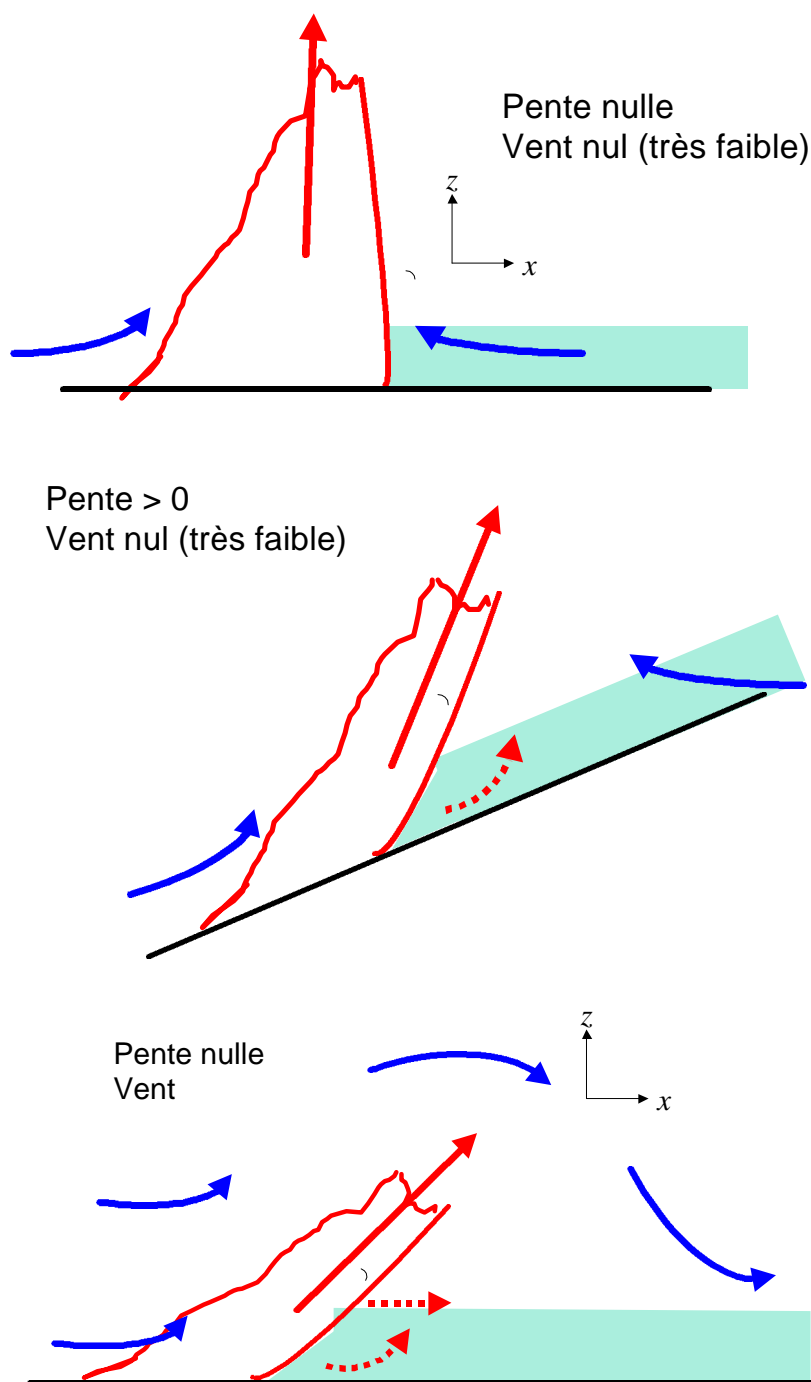


Figure 1 : Les écoulements induits par le front de feu – Vues de profil d'un front de feu avançant de gauche à droite. Les flèches symbolisent la direction des écoulements. En rouge, il s'agit de gaz chauds, en bleu de gaz frais (air). Les flèches pleines correspondent à un mouvement moyen du gaz. Les flèches en pointillés indiquent un écoulement plus complexe (poches de gaz chauds transportées de manière intermittente). Ces représentations sont purement qualitatives et sont des images figées de la réalité, qui elle est dynamique.

Les changements de direction des écoulements avec la pente et le vent expliquent pour une grande part les effets de ces facteurs sur la propagation du feu (accroissement de vitesse du feu avec le vent ou une pente positive). En effet, selon que des gaz chauds ou de l'air frais « traversent » le combustible imbrûlé, celui-ci est échauffé ou au contraire refroidi par convection (échange de chaleur entre particule solide et gaz).

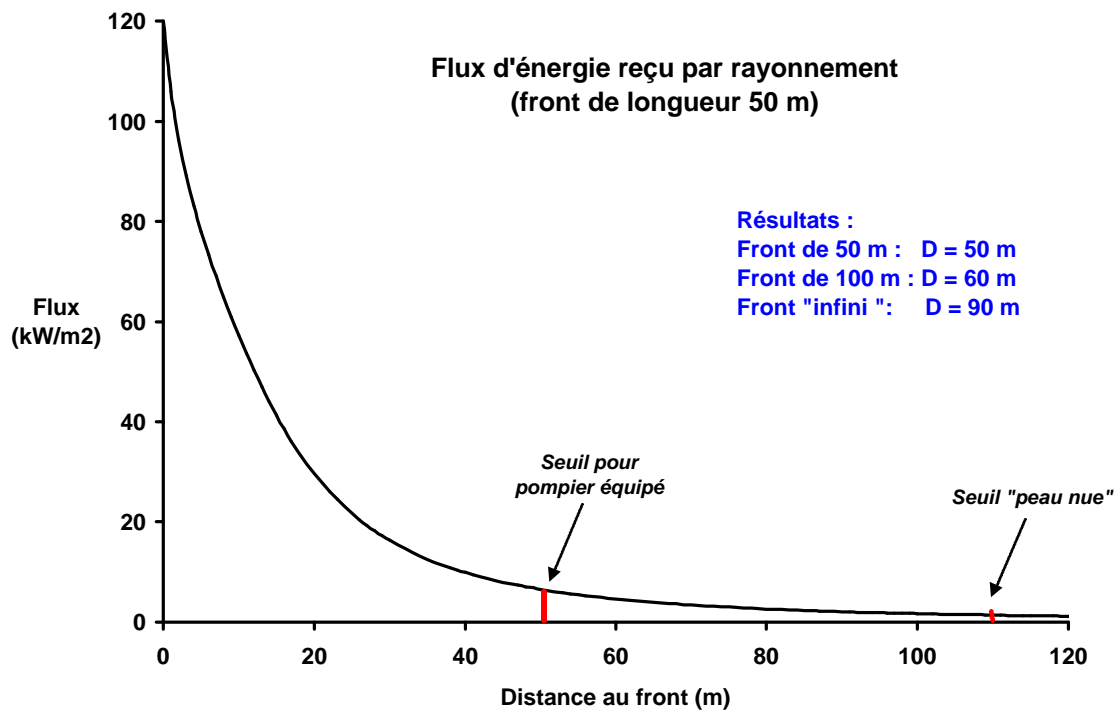
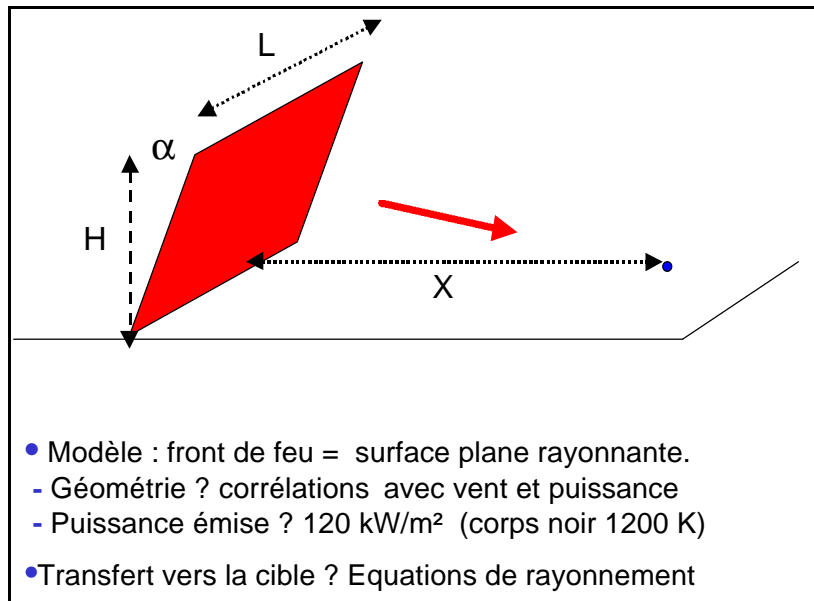


Figure 2 : Exemple 1 – Distance de sécurité et rayonnement.

La courbe représentée correspond à un front de feu de 50 m de longueur.

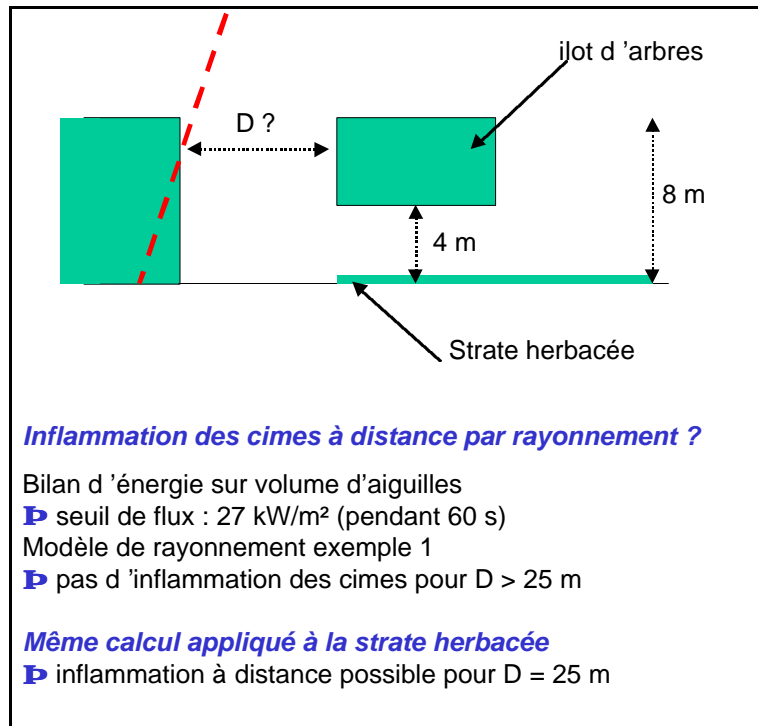


Figure 3 : Exemple 2 – Inflammation à distance et rayonnement.

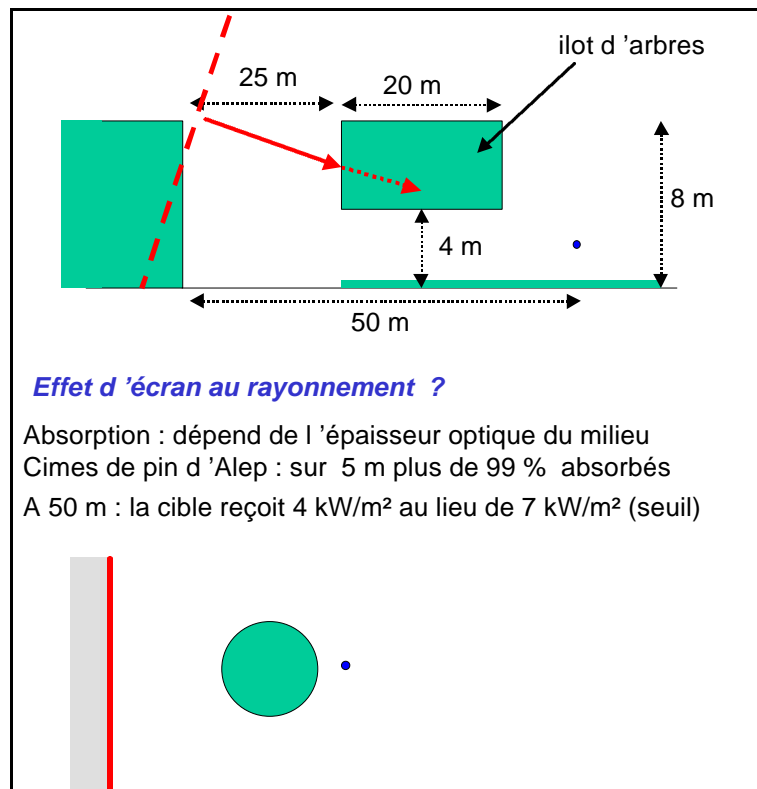


Figure 4 : Exemple 2- Effet d'écran au rayonnement.

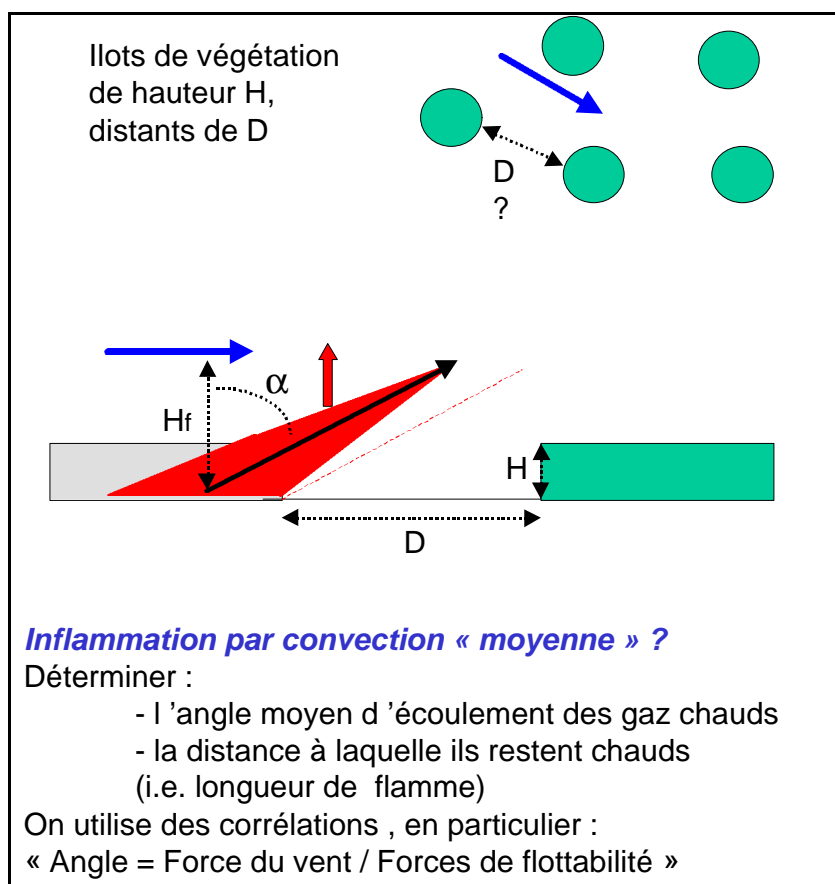


Figure 5 : Exemple 3 – Inflammation à distance et convection “ moyenne ”

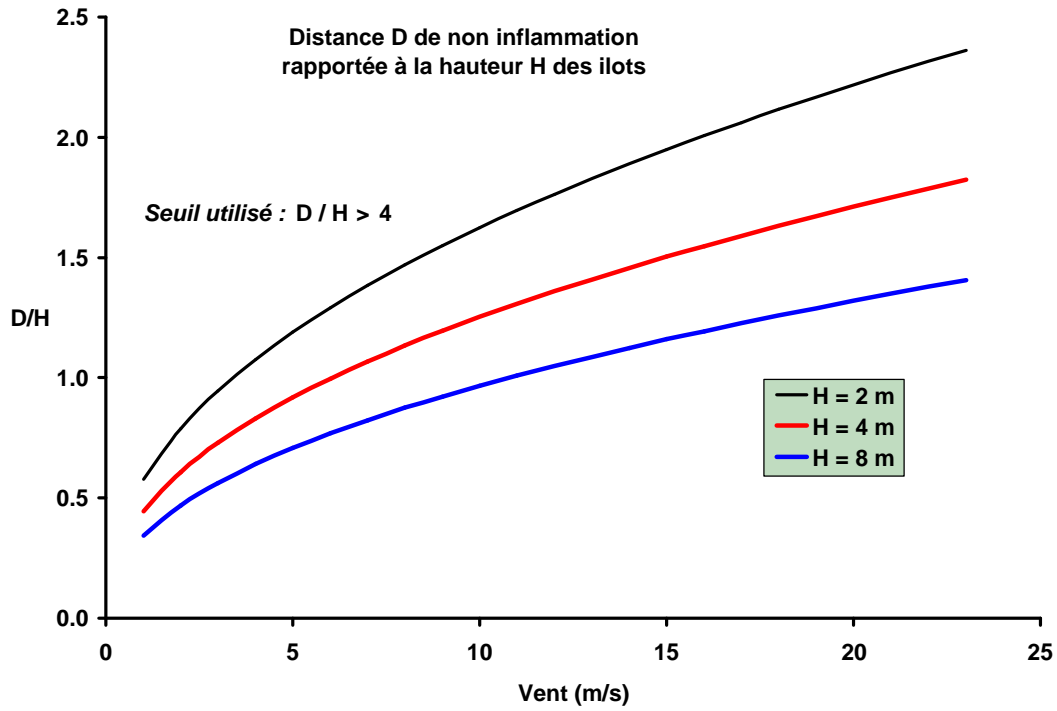


Figure 6 : Exemple 3 – Distance minimale d'inflammation par convection *moyenne* (strates de hauteur > 2 m)

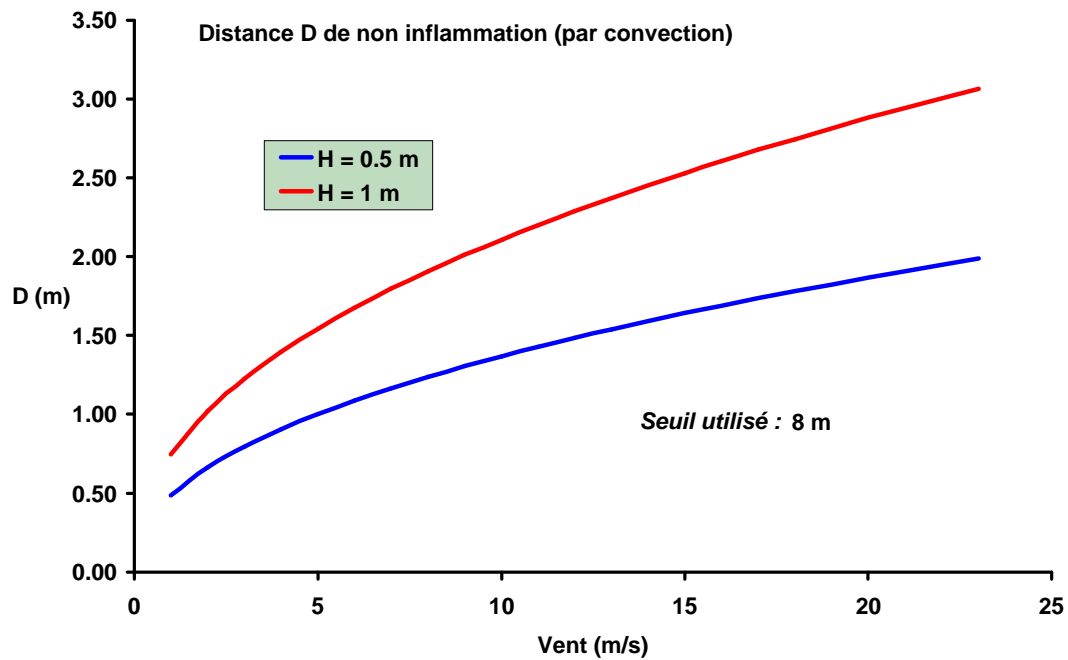


Figure 7 : Exemple 3 – Distance minimale d'inflammation par convection *moyenne* (strates de hauteur < 2 m)