



HAL
open science

Modélisation physique de la propagation des feux de forêts : effets des caractéristiques physiques du combustible et de son hétérogénéité

François Pimont

► **To cite this version:**

François Pimont. Modélisation physique de la propagation des feux de forêts : effets des caractéristiques physiques du combustible et de son hétérogénéité. Sciences du Vivant [q-bio]. Université de la Méditerranée (Aix Marseille 2), 2008. Français. NNT : . tel-02821301

HAL Id: tel-02821301

<https://hal.inrae.fr/tel-02821301>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Université de la Méditerranée – Aix Marseille II
Ecole Doctorale Sciences de l'Environnement

THESE

Pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de la Méditerranée – Aix Marseille II
Spécialité : Sciences de l'Environnement
Option : Environnement Terrestre

Modélisation physique de la propagation des feux de forêts :

Effets des caractéristiques physiques du combustible et de son hétérogénéité

Par

François PIMONT

Soutenue le 7 avril 2008 devant la commission d'examen :

Mme E. Richard	Directeur de Recherche, CNRS, Toulouse	Rapporteur
MM J. L. Torero	Professeur, Université d'Edimburg (Scotland)	Rapporteur
D. Morvan	Professeur, Université de la Méditerranée, Marseille	Directeur
J-L. Dupuy	Chargé de Recherche, INRA Avignon	Directeur Adjoint
J-H Balbi	Professeur, Université de Corte, Corse	Examineur
Y. Brunet	Directeur de Recherche, INRA Bordeaux	Examineur
P. Haldenwang	Professeur, Université de Provence, Marseille	Examineur
RR.Linn	Team leader, Los Alamos National Lab, (USA)	Invité

Institut National de la Recherche Agronomique
Département Ecologie des Forêts, Prairies et milieux Aquatiques
Ecologie des Forêts Méditerranéennes (UR629)
Site Agroparc, Domaine de Saint Paul
F-84914 Avignon Cedex 9

Contexte de la thèse

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre de ma Mise à Disposition par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, en tant qu'Ingénieur du Génie Rural des Eaux et des Forêts, à l'Institut National de la Recherche Agronomique, pour une durée d'environ trois ans à compter de janvier 2005. Cette mise à disposition s'inscrit dans le cadre particulier des Formations Complémentaires Par la Recherche (FCPR), du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, qui visent à former des spécialistes dans des domaines variés ; la thèse constitue la première étape de cette spécialisation. Ce dispositif encourage les thèses pluridisciplinaires, qui mêlent les objectifs théoriques et appliqués.

Mon projet s'inscrit dans le contexte de la Prévention des Incendies de Forêt, qui incombe au Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. L'INRA d'Avignon (Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes, Equipe Physique et Ecologie du feu (PEF)) s'investit dans la modélisation et la prévention du feu depuis de nombreuses années. Elle constituait donc une équipe d'accueil pertinente. Le développement du projet de FCPR a débuté dès 2002, lors de mon stage de fin d'étude de l'Ecole Polytechnique, déjà réalisé à l'INRA dans l'équipe PEF ; il a été initié avec Jean-Luc Dupuy (Chargé de recherches dans l'équipe PEF).

La thèse s'inscrit dans un projet de modélisation physique des incendies de forêts. Au cours du programme européen FIRESTAR (2002-2004), coordonné par l'INRA, l'Université de la Méditerranée (Dominique Morvan) a développé le modèle de propagation du feu du même nom, FIRESTAR. En 2005, l'INRA a également engagé une collaboration avec le Los Alamos National Laboratory (Earth and Environmental Science Division, Rodman Linn) pour le développement conjoint du modèle HIGRAD/FIRETEC, notamment dans le contexte de ma thèse. Mon travail, dont des développements importants se sont appuyés sur ce modèle, a aussi contribué à le faire évoluer.

Résumé

Les incendies de forêts se propagent au sein d'un combustible dont les caractéristiques physiques affectent le comportement, au même titre que les conditions atmosphériques et topographiques.

Après une présentation des caractéristiques de la propagation d'un feu et des différents modèles de propagation, nous étudions le comportement du feu dans des combustibles homogènes en fonction de leurs caractéristiques physiques avec le modèle FIRETEC. Cette étude met en évidence un impact significatif de la fraction volumique (qui exprime la densité du combustible) sur la vitesse de propagation et l'intensité du feu. La vitesse de propagation décroît avec la fraction volumique ; cette tendance est validée par quelques données expérimentales de feux de litières. Par ailleurs, le comportement du feu peut passer de « wind-driven » à « plume dominated » selon la fraction volumique. En présence de canopée, cette dernière pilote également le seuil de propagation entre « torching » et « crowning ». Son fort impact sur le comportement justifie la pertinence de notre interrogation concernant l'effet de l'hétérogénéité spatiale du combustible, qui se traduit par des variations spatiales de la fraction volumique.

Nous proposons ensuite une approche originale, inspirée de la bibliographie sur le rayonnement solaire dans les canopées, pour aborder les problèmes d'homogénéisation du combustible dans le calcul du transfert radiatif. Elle souligne l'influence de certaines caractéristiques du combustible (coefficient d'absorption local) et de l'hétérogénéité spatiale (recouvrement, taille des hétérogénéités) sur l'échauffement radiatif qui pilote une partie du comportement du feu. Lors de la propagation, les végétations les plus hétérogènes induisent une diminution de l'irradiance moyenne du combustible par rapport aux combustibles hétérogènes. Une distribution insuffisamment détaillée de la structure spatiale tend donc à augmenter la vitesse de propagation. Dans les canopées, une description de l'enveloppe des houppiers et la définition d'un coefficient d'agrégation à l'échelle de la pousse s'avèrent suffisantes pour une évaluation précise du transfert radiatif. Concernant les strates arbustives, une formule permet d'évaluer l'importance des effets attendus de l'hétérogénéité. Lorsque ceux-ci sont importants, une méthode d'homogénéisation est proposée.

Dans un troisième temps, le calcul des écoulements en présence de canopée est abordé sous la forme d'une résolution explicite de la turbulence (large eddy simulation). Un travail de validation du modèle est proposé, sur la base de données expérimentales recueillies dans la littérature. Ces résultats illustrent l'influence significative de grandes coupures de combustible sur la nature des écoulements. Une investigation systématique des effets de l'hétérogénéité de la végétation sur l'écoulement est ensuite conduite. Pour une biomasse donnée, les résultats obtenus mettent en évidence que l'hétérogénéité du combustible induit une augmentation de la vitesse de l'écoulement moyen par rapport aux configurations homogènes. Les effets obtenus sont d'autant plus importants que le recouvrement et la taille des hétérogénéités sont élevés et que les agrégats de végétation sont denses. Une description à l'échelle des houppiers s'avère suffisante pour reproduire les écoulements au sein des canopées ; elle n'est nécessaire que lorsque le recouvrement est inférieur à 50 %.

Enfin, nous étudions les effets de l'hétérogénéité de manière globale à l'échelle du paysage. Elle intègre l'ensemble des caractéristiques sur lesquelles l'hétérogénéité du combustible peut agir, y compris la source de chaleur. Elle confirme qu'une homogénéisation du combustible est à proscrire dans le cas des faibles recouvrements, alors que celle-ci ne pose pas de problème dans le cas de recouvrements élevés. Cependant, on observe une différence de comportement selon le type d'écosystème envisagé : dans le pin Maritime, l'homogénéisation se traduit par une augmentation de l'intensité et des dégâts, alors que c'est le contraire pour le pin d'Alep, qui est moins dense. Le recouvrement apparaît comme une grandeur cruciale pour la description du combustible à l'échelle de la parcelle. En effet, si une réduction du recouvrement de 75 à 50 % ne modifie pas significativement le comportement du feu, une réduction à 25 %, voire même à 0 % (suppression de la strate arborée) réduit très significativement les intensités prédites. Par ailleurs, la sévérité du feu diminue de manière importante lorsque l'on réduit le recouvrement. Cependant, les diminutions d'intensité et de sévérité s'accompagnent d'une inclinaison progressive du panache, qui induit des températures plus élevées en avant du front, qui peuvent être préjudiciables à la lutte. L'augmentation de la taille des hétérogénéités et des distances entre les agrégats induit une diminution de la sévérité du feu dans le cas de l'écosystème à pin maritime. D'autres résultats suggèrent que cette diminution pourrait être plus significative pour des recouvrements voisins de 50 %.

Le travail s'achève sur une courte synthèse des différents enseignements de notre travail présentant une utilité pour le gestionnaire. Elle inclut les études appliquées réalisées, qui mettent en évidence l'applicabilité des modèles physiques. Quelques préconisations quant aux échelles appropriées à la description du combustible sont fournies, selon le type de modèle. Certains résultats concernant les écoulements sur les coupures sont appliqués à la pratique du brûlage dirigé. Le document s'achève sur quelques recommandations quant à la réalisation des coupures de combustible.

Remerciements

Mes remerciements vont en premier lieu à Monsieur Jean-Luc Dupuy qui a accepté d'assurer la co-direction de cette thèse et son encadrement au quotidien. Il m'a encadré avec beaucoup de gentillesse et d'attention. J'ajoute qu'il a toujours fait preuve d'une grande disponibilité et que ça a été un plaisir de travailler avec lui durant ces trois années.

Je remercie également Dominique Morvan qui a assuré la direction de cette thèse. Il a suivi et évalué régulièrement la progression du travail. Je le remercie également pour ses critiques toujours constructives.

Je remercie ensuite Rodman Linn du Los Alamos National Lab (New Mexico, USA) pour l'accueil qu'il m'a réservé au sein de son équipe et pour ses encouragements. Je le remercie également pour la disponibilité dont il a fait preuve malgré ses responsabilités, que ce soit lors d'entretiens téléphoniques, lors de nos rencontres dans le cadre du programme européen FIRE PARADOX ou lors de mes séjours à Los Alamos.

J'exprime également ma gratitude à Madame Evelyne Richard et Monsieur José Luis Torero qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être les rapporteurs de mon travail et, en cette qualité, d'examiner les résultats de mes recherches. Leurs rapports très détaillés et ainsi que leurs nombreuses questions, m'ont permis d'élargir ma conception de mon sujet et de prendre du recul par rapport à mes travaux. Je remercie également Messieurs Yves Brunet et Pierre Haldenwang qui ont participé activement au comité de pilotage et qui ont accepté d'être membres du jury. Je remercie également Jacques-Henri Balbi d'avoir accepté d'être membre du jury et d'avoir présidé ce dernier. Je remercie l'ensemble du Jury pour l'attention qu'ils ont portée à mon travail et pour la qualité et le nombre de questions posées, car elles ont grandement contribué à sa mise en valeur.

Je tiens également à exprimer ma reconnaissance à Jean-Charles Valette et Eric Rigolot qui m'ont toujours soutenu et qui m'ont accordé leur confiance, que ce soit dans le cadre de ce travail ou dans la préparation de mon après-thèse.

Je remercie aussi les différents relecteurs du manuscrit, et notamment Oana Vigy et Jean-Charles Valette pour leur travail minutieux.

Concernant la préparation de la soutenance orale, je tenais à remercier, en sus des personnes pré-citées, Etienne Klein, Philippe Dreyfus et François Lefevre. Leurs contributions, ainsi que celles des autres collègues m'ont permis d'améliorer considérablement la fluidité, ainsi que le caractère synthétique de mon exposé. Concernant la soutenance finale, je tenais à remercier l'ensemble des participants pour la bonne ambiance dans laquelle elle s'est déroulée.

Je remercie l'ensemble des personnes de l'Unité Ecologie des Forêts Méditerranéennes qui m'ont témoigné leur sympathie et m'ont encouragé pendant toute la durée de la thèse.

Je remercie enfin Claude Millier, ancien directeur scientifique de l'ENGREF et François Houllier, ancien chef du département EFPA, pour leur contribution active à la mise en place de ma thèse.

Les travaux présentés dans cette thèse n'auraient pu être menés à bien sans l'aide financière apportée par les programmes européens EUFIRELAB et FIREPARADOX.

Table des matières

Introduction générale----- p. 13

Chapitre 0. Préliminaire : Modélisation du feu et du combustible

----- p. 25

1. Introduction

2. Mécanismes et caractéristiques de la propagation d'un feu

2.1. Mécanismes de la propagation du feu

2.2. Caractéristiques physiques d'un feu

2.3. Types de feu

3. Caractéristiques générales du combustible

3.1. Principales caractéristiques

3.2. Spatialisation du combustible et modèles de propagation

3.3. Méthodes de spatialisation du combustible

3.4. Réduction du combustible

4. Du modèle empirique aux modèles physiques

4.1. Modèles empiriques

4.2. Modèles semi-empiriques

4.3. Modèles physiques n'incluant pas le transport en phase gazeuse

4.4. Modèles physiques incluant le transport en phase gazeuse

4.5. HIGRAD/FIRETEC

Annexe 0.1. Méthode Architecturale pour la modélisation du pin d'Alep

Bibliographie

Chapitre 1. Sensibilité de FIRETEC aux caractéristiques physiques de combustibles homogènes

----- p. 63

1. Introduction

2. Cas des strates arbustives

2.1. Méthodes

2.2. Résultats

2.3. Discussion

3. Cas des canopées

3.1. Méthodes

3.2. Résultats

3.3. Discussion

4. Conclusion

Annexe 1.1. Mise en évidence sommaire du problème de calcul du code de rayonnement

Bibliographie

Chapitre 2. Hétérogénéité du combustible et transfert radiatif

----- p. 93

1. Introduction

2. Généralités sur le transfert radiatif

3. Transfert radiatif lumineux dans les canopées

3.1. Limites de l'hypothèse de distribution homogène de végétation

3.2. Prise en compte de l'hétérogénéité par raffinement de la description du combustible

3.3. Prise en compte de l'hétérogénéité au moyen d'un coefficient d'agrégation à l'échelle de la pousse (cas des conifères)

3.4. Bilan

4. Effets de l'hétérogénéité du combustible sur le transfert radiatif dans un feu de forêt

4.1. Introduction

4.2. Article IJWF (révision en cours)

5. Conclusion

Bibliographie

Chapitre 3. Hétérogénéité du combustible et écoulements

-----p. 139

1. Introduction

2. Ecoulements atmosphériques dans les canopées

2.1. Les écoulements atmosphériques et leur modélisation

2.2. La couche limite atmosphérique et l'interaction vent/végétation

3. Description de HIGRAD/FIRETEC et validation du modèle en conditions homogène et hétérogène (Article IJWF, révision en cours)

4. Ecoulements dans des canopées hétérogènes

4.1. Introduction

4.2. Description du protocole

4.3. Résultats

4.4. Discussion

5. Conclusion

Bibliographie

Chapitre 4. Comportement du feu dans des canopées hétérogènes avec FIRETEC

-----p. 221

1. Introduction

2. Description du protocole

- 2.1. Description du combustible
- 2.2. Caractéristiques des simulations
- 2.3. Sorties de calcul

3. Résultats pour le pin d'Alep

- 3.1. Comportement du feu dans le cas *PaHet75a* (témoin) : existence d'un régime permanent
- 3.2. Comportement du feu dans le cas *PaHet0a* : effet de la coupure
- 3.3. Impact du recouvrement
- 3.4. Impact de la structure du combustible (pour un recouvrement équivalent à 25 %)

4. Résultats pour le pin Maritime

- 4.1. Comportement du feu dans le cas *PmHet75a* (témoin) : existence d'un régime permanent
- 4.2. Comportement du feu dans le cas *PmHet0a* : effet de la coupure
- 4.3. Impact du recouvrement
- 4.4. Impact de la structure du combustible (pour un recouvrement équivalent à 25 %)

5. Discussion

6. Conclusion

Bibliographie

Chapitre 5. Recommandation aux gestionnaires

-----p. 291

1. Introduction

2. Quelques études concrètes réalisées au cours de la thèse

3. Echelle de description du combustible pour un modèle physique

4. Application au brûlage dirigé des études de l'écoulement

5. Effets des coupures de combustible

Bibliographie

Conclusion et perspectives-----p. 303

Annexe I. *Pinus halepensis* Architectural Analysis for Fuel Modelling. Par Caraglio, Pimont et Rigolot (Proceedings of MEDPINE 3, Bari 2005)

Introduction générale

Un système complexe

La propagation d'un incendie dans un écosystème est un phénomène biophysique complexe largement étudié depuis une soixantaine d'années. L'intérêt pour les feux provient naturellement de leur implication profonde dans la dynamique de l'environnement naturel et anthropisé. Sur le plan physique, on sait que le feu se propage selon deux modes de transfert thermique principaux, que sont le rayonnement¹ et la convection², qui participent à l'échauffement, puis au refroidissement de l'air et de la végétation. On pourra ajouter que la conduction thermique peut également jouer un rôle en particulier dans les feux de faible intensité, alors que le phénomène de saute de feu peut devenir très important dans les feux de forte intensité. Ces deux modes –rayonnement et convection– sont complexes et sont influencés par un nombre considérable de variables de l'environnement. On pourra citer parmi elles, la vitesse du vent et la teneur en eau du combustible qui sont les plus connues, mais également les caractéristiques du combustible, la stabilité atmosphérique, l'hygrométrie de l'air. A cela s'ajoutent les actions d'origine anthropique de type prévention (débroussaillage, élagage ou éclaircie) qui modifient les caractéristiques du combustible et les conditions de lutte. Nous sommes donc en présence d'un système complexe.

Modélisation de l'environnement et échelle spatiale

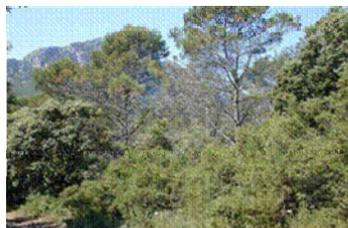
Dans le contexte des risques en sciences de l'environnement, la modélisation poursuit essentiellement deux objectifs, l'un appliqué et l'autre plus théorique. En premier lieu, la modélisation vise à fournir des prédictions pour l'action. Il s'agit d'anticiper le comportement du phénomène dans une situation donnée, de manière à proposer une évaluation des effets du phénomène. Cette prédiction des effets permet d'anticiper la lutte mais également d'évaluer l'efficacité d'une action de prévention. On trouvera de nombreux exemples de cette modélisation pour l'action dans des domaines variés comme les avalanches (Eckert *et al.* 2007), les tempêtes (Dupont & Brunet 2006), les inondations (Mignot *et al.* 2006), et bien sûr les incendies de forêts. Cet objectif finalisé nécessite la création d'outils permettant d'intégrer les principaux mécanismes pour aboutir à une représentation acceptable de la réalité.

Cependant, la construction de ce type d'outils constitue également un objectif scientifique et théorique à part entière. Il s'agit en effet de répondre à un certain nombre de questions scientifiques et de pallier les limites des mesures expérimentales dans les domaines où celles-ci sont délicates à conduire, comme c'est le cas pour les incendies de forêts. L'élaboration de ce type de modèles passe par l'application des principes fondamentaux de la physique aux phénomènes naturels, pour aboutir à un système d'équations qui peut être résolu numériquement. Cela nécessite de bien décrire les processus eux-mêmes et de réussir à les agréger à une échelle qui soit adaptée au problème. Les principes et lois de la physique sont établis pour des matériaux purs, auxquels correspondent les notions physiques de corps homogènes, parfaits, ou infiniment petits par exemple. Selon Campbell & Norman (1997), la complexité du milieu naturel impose au modélisateur d'adapter les principes ou de simplifier le système naturel afin de le rendre conforme aux hypothèses sous jacentes à l'usage des principes. Toujours selon ces auteurs, l'un des points clé est de déterminer si les hypothèses d'homogénéité demeurent adéquates et si le problème nécessite ou non d'intégrer une prise en compte spécifique de l'hétérogénéité. Ils insistent également sur la relation essentielle qui existe entre l'échelle spatiale de la prédiction ou du calcul et la taille de l'hétérogénéité spatiale.

¹ Ici, Mode de transfert de la chaleur sous forme d'ondes ou de particules par rayonnement électromagnétique.

² Ici, Mode de transfert de la chaleur transportée par la phase gazeuse vers le solide.

Echelle du peuplement



Echelle de la plante



Echelle de la plante



Echelle de la pousse



Fig. 1. Hétérogénéité de la végétation méditerranéenne à différentes échelles



Fig. 2. Hétérogénéité de la végétation sur des coupures de combustible

Hétérogénéité spatiale et feu

Dans le contexte de la modélisation du feu, la problématique de l'hétérogénéité du combustible s'inscrit à la fois dans l'objectif théorique et dans l'objectif appliqué. Du point de vue de la conception de l'outil théorique, la végétation qui constitue le vecteur des incendies de forêts, est généralement décrite comme un milieu fortement hétérogène à plusieurs échelles, de celle de la pousse à celle du paysage en passant par celle de l'arbre (**Fig. 1**). A cette hétérogénéité naturelle s'ajoute une hétérogénéité d'origine anthropique, au travers des ouvrages de prévention, qui introduisent des hétérogénéités au sein du paysage, mais aussi au niveau local au travers de l'élagage et des éclaircies pratiquées dans les coupures de combustible (**Fig. 2**). Cette hétérogénéité du milieu se doit donc d'être correctement prise en compte dans les modèles. Par ailleurs, des descriptions de la propagation du feu dans les configurations hétérogènes comme les ouvrages de prévention DFCI³ font partie des demandes des utilisateurs et sont cruciales par rapport à la conception et à l'évaluation de l'efficacité de ces ouvrages, aujourd'hui encore toutes deux réalisées à dire d'experts (Rigolot & Costa 2000). Une meilleure connaissance du comportement du feu sur ces structures constitue donc un objectif appliqué important.

Effets attendus de l'hétérogénéité

Les effets de cette hétérogénéité du vecteur du feu sont encore très mal connus. On sait cependant que la propagation du feu dépend du type, de la forme, de la composition et de l'arrangement des particules de combustible (Burrows 2001) et que la distance entre particules joue également un rôle (Fons 1946 ; Vogel & Williams 1970 ; Weber 1990 ; Bradstock & Gill 1993). La distance entre la strate basse et le bas des cimes est notamment un critère déterminant du passage du feu en cime (Van Wagner 1977). Par ailleurs, même en l'absence de feu, le bilan énergétique dans les forêts est fortement influencé par l'hétérogénéité de la canopée sur les transferts radiatifs (solaires) et turbulents (Hardy *et al.* 2004). C'est en effet la structure de la canopée qui détermine le microclimat de la canopée : vent, température, humidité (Weiss *et al.* 2004) ; ce micro-climat est également susceptible d'influencer la teneur en eau du combustible vivant, mais surtout du combustible mort qui est un paramètre clé de la propagation du feu (Fosberg & Deeming 1971 ; Nelson 2002). En définitive, il apparaît que la structure de la végétation influe sur les modes de transferts associés à la propagation du feu, mais que ces effets sont encore mal connus.

Niveau de description de l'hétérogénéité spatiale dans les modèles

L'hétérogénéité de la végétation se manifeste à quatre niveaux (**Fig. 1**). La plus petite échelle considérée est généralement celle de la pousse feuillée, lorsque les aiguilles ou les feuilles sont agrégées autour d'un rameau. La seconde échelle est celle de la branche, puisque les pousses sont agrégées autour d'une branche. La troisième échelle est celle de l'arbre ou du buisson, qui définissent les enveloppes de la végétation. La dernière échelle considérée est celle du peuplement, qui constitue la maille d'étude à l'échelle du paysage. Dans un certain nombre de modèles biophysiques, comme ceux de croissance des plantes ou d'interception de la lumière, la végétation est prise en compte de manière spatialement explicite à différents niveaux (Brunner 1998 ; Busing & Maily 2004). Dans le contexte de la modélisation des incendies, la prise en compte explicite de la végétation varie énormément selon les modèles. Une grande majorité de modèles ne fournissent pas de spatialisation explicite de la végétation. Nous classons ceux qui réalisent une telle spatialisation en trois catégories : catégorie *S* (*small*), de l'ordre de la dizaine de centimètres ; catégorie *M* (*medium*), de l'ordre du mètre et catégorie *L* (*large*) de l'ordre de la dizaine de mètres. Le simulateur FARSITE⁴ (Finney 1998) est à classer dans la catégorie *L*, puisqu'il ne prend en compte qu'une description grossière de la végétation à l'échelle d'une placette. Un certain nombre de modèles de propagation du feu dit physiques permettent de prendre en compte les motifs spatiaux présents dans la végétation au travers d'une représentation explicite de celle-ci.

³ Défense des Forêts Contre l'Incendie.

⁴ FARSITE fonctionne sur la base du célèbre modèle *BEHAVE* (Andrews 1986), pour lequel le combustible est non spatialisé, et des ellipses de Huygens, pour la forme du front.

La végétation est en effet spatialisée dans un maillage sur lequel sont résolues les équations de la physique (Albini 1985⁵ ; Morvan & Dupuy 2001 ; Linn *et al.* 2002).

Dans certains modèles, la maille de végétation peut être fine comme dans le modèle FIRETEC (Linn *et al.* 2002) que l'on classera dans la catégorie *M* avec sa maille de 1 à 2 m voir très fine comme FIRESTAR que l'on classera dans la catégorie *S* avec sa maille de 10 à 25 cm (Morvan & Dupuy 2001). En fonction du niveau de description, ces modèles seront plus ou moins à même de prendre en compte explicitement les hétérogénéités du combustible. Les modèles de type *S* permettent une spatialisation explicite de l'ensemble des hétérogénéités (à part celles à l'échelle de la pousse). La description de la végétation s'avère très lourde à ces échelles (Cohen *et al.* 2004). A l'inverse, des maillages même relativement fins comme celui de FIRETEC par exemple (de l'ordre de 1,5 à 2 m) ne permettent pas de prendre en compte toutes les hétérogénéités spatiales à l'échelle du buisson ou de l'agrégat de feuilles, qui sont susceptibles d'affecter la propagation du feu.

Influence de l'hétérogénéité spatiale dans les modèles

Dans les modèles dit physiques, les équations de conservation sont appliquées aux variables spatialisées de la végétation, afin de permettre une résolution de l'évolution temporelle des champs de variables qui représentent la propagation du feu. Les biomasses locales et les surfaces projetées locales de la végétation sont les principales variables décrivant la spatialisation de la végétation. Elles pilotent les transferts radiatif et convectif.

Le transfert radiatif est directement affecté par la végétation elle-même, puisque ce sont les trouées de la végétation qui permettent le transfert de l'énergie à distance et la surface exposée localement par la végétation qui détermine la part du flux absorbée. La plupart des modèles physiques de propagation du feu s'appuie sur l'approximation des milieux turbides qui considère la canopée comme un milieu constitué de particules planes infiniment fines et aléatoirement distribuées. C'est la surface projetée locale de la végétation qui détermine l'absorption de la luminance.

Le transfert convectif est associé aux différences de température entre phase gazeuse et végétation. Le processus de base qui pilote cet échange est la conduction à toute petite échelle, que l'on modélise généralement comme un processus macroscopique proportionnel à la surface exposée de la végétation et à un coefficient d'échange convectif (qui dépend du nombre de Reynolds). Toute variation spatiale des caractéristiques de la végétation peut affecter l'écoulement et donc le transfert convectif, que ce soit de manière directe (force de traînée, qui dépend de la surface projetée locale) ou à travers un coefficient d'échange. Un code comme FIRETEC simule la propagation d'incendies poussés par le vent, en résolvant les écoulements présents dans la basse couche de l'atmosphère (équation de Navier-Stokes, voir chapitre 0, paragraphe 4.5.4). Le transfert convectif en présence de vent résulte alors de l'interaction entre le vent incident et le panache dans la zone de convection.

Dans ce contexte, les écarts à une distribution de végétation aléatoire et ponctuelle peuvent être attribués à quatre causes principales :

- La densité de surface foliaire varie spatialement au sein de la canopée
- Les particules de végétation (feuille, aiguille) ne sont pas infiniment petites
- Ces particules présentent une forme d'agrégation à l'échelle de la pousse
- Les orientations foliaires ne sont pas aléatoires

Objectifs

Le travail qui suit vise à comprendre et à quantifier les effets des caractéristiques physiques du combustible (et en particulier sa distribution spatiale) sur le comportement du feu. Les principaux objectifs sont donc multiples. En premier lieu, il s'agira d'évaluer les effets de l'hétérogénéité de la végétation sur les transferts radiatifs et convectifs, à l'aide d'une modélisation adaptée. Dans un second temps, on pourra déduire de ces résultats des échelles de description adaptées ainsi que des recommandations quant aux échelles de travail des modèles de champs (taille de maille, taille de domaine) et éventuellement des modèles de sous-maille lorsque les effets de l'hétérogénéité en sous-maille sont significatifs. Enfin, dans le contexte de la prévention, il s'agira de mettre en évidence les effets induits par les structures hétérogènes et de fournir quelques recommandations pour la conception des ouvrages.

⁵ Dans ces travaux, la végétation reste homogène.

Démarche générale

L'étude des effets des hétérogénéités de la végétation passe par une comparaison entre des résultats de transferts thermiques ou des caractéristiques de la propagation obtenus avec des distributions de végétation détaillée, et ceux obtenus pour des distributions plus grossières, voire uniformes. Cette comparaison peut être faite au moyen de modèles travaillant à l'échelle la plus fine (S), c'est-à-dire capable d'intégrer explicitement l'ensemble des hétérogénéités spatiales présentes. Les modèles permettant une représentation explicite de la végétation à petite échelle sont principalement FIRESTAR (Morvan & Dupuy 2001 ; Morvan *et al.* 2006) et FIRETEC (Linn *et al.* 2002 ; Linn *et al.* 2006). FIRESTAR a été utilisé au début de la thèse compte tenu de sa haute résolution (Caraglio *et al.* 2006, Annexe I). Cependant, comme ce modèle est bi-dimensionnel, il n'est pas adapté à la représentation d'un combustible hétérogène sur le plan horizontal. De plus, l'importance des effets tri-dimensionnels observés dans les cas de propagation dans les canopées (dégâts en forme « de doigts de la main », *ie* fingerprint) nous a conduit à utiliser FIRETEC (catégorie M). FIRETEC ne permet pas de décrire les hétérogénéités les plus fines. Ce code a donc été utilisé pour traiter les hétérogénéités supérieures à 2 m. En cas d'effets significatifs, l'hétérogénéité peut être prise en compte en sous-maille. Une solution technique régulièrement utilisée en présence d'hétérogénéités ayant une importance significative consiste à définir un modèle de sous-maille, permettant de substituer le milieu hétérogène de sous-maille à un milieu homogène équivalent (coefficient effectif). Cette démarche, qui apparaît comme un cas particulier des méthodes d'homogénéisation (Sanchez-Hubert & Sanchez-Palencia 1992), s'appuie généralement sur des moyennes statistiques de milieux hétérogènes pour définir un milieu homogène (Campbell & Norman 1997).

Par ailleurs, le couplage très important qui existe entre les différents modes de transfert complique généralement l'analyse. Nous avons donc pris le parti, en plus des calculs réalisés avec FIRETEC et qui couplent l'ensemble des mécanismes, d'aborder de manière séparée les questions de transfert radiatif, et d'écoulement en l'absence de feu (qui participe au transfert convectif sous la forme d'écoulement incident sur le feu).

Plan de la thèse

Un chapitre préliminaire (chapitre 0) consitue un état de l'art en matière de modélisation de la propagation du feu et du combustible. Il décrit notamment la manière dont les différents modèles prennent en compte les caractéristiques physiques et spatiales du combustible. Elle permet ainsi de justifier nos choix en terme d'outils dans le cadre de notre travail (FIRETEC, modèle de rayonnement). Ce chapitre préliminaire contient également une description de la méthode architecturale du combustible qui a été utilisée dans cette thèse pour les descriptions les plus fines du combustible et un exemple d'application en 2D avec FIRESTAR reporté en annexe I (Caraglio *et al.* 2006).

Le chapitre 1 est une étude réalisée avec FIRETEC, de sensibilité aux caractéristiques moyennes de la végétation (densité de matière et finesse du combustible notamment). Il constitue un préliminaire à l'étude en condition hétérogène, qui permet à la fois de vérifier le bon comportement du modèle par rapport à des observations de feux réels et de déterminer les ordres de grandeurs des effets des paramètres moyens, avant d'envisager les effets liés à l'hétérogénéité. Elle comporte notamment une partie d'un travail présenté à l'ICFFR 2006⁶ (Pimont *et al.* 2006a). Cette étude met en évidence une influence significative des caractéristiques physiques de la végétation (fraction volumique en particulier) sur le comportement du feu. Ce premier résultat incite à examiner l'impact de la structure spatiale de ces caractéristiques physiques - et donc des hétérogénéités spatiales - sur le comportement du feu. Par ailleurs, ces travaux ont permis de mettre en évidence certaines faiblesses de FIRETEC concernant le rayonnement et les écoulements. Ces limites ont été corrigées, dans le cadre de la thèse pour ce qui concerne les écoulements (chapitre 3) et par des travaux en collaboration (rayonnement).

Le chapitre 2 traite des effets de l'hétérogénéité du combustible sur le transfert radiatif dans un feu de forêt. Cette étude découple volontairement l'étude du mode de transfert de la propagation elle-même, afin de prendre en compte des hétérogénéités relativement fines qui ont lieu à des échelles inférieures à celle de la maille de FIRETEC. Dans ce contexte, un code de calcul du transfert radiatif a été mis en œuvre afin d'aborder l'hétérogénéité en terme d'effet moyen sur le comportement du feu, sur la base d'une analyse statistique. Il est principalement constitué d'un projet d'article soumis à l'*International Journal of Wildland Fire* (Pimont *et al.* 2007b), mais est précédé par des généralités sur le transfert radiatif (en particulier dans les canopées) sur lequel s'appuie notre démarche. Une partie de ces résultats a également été présentée à l'ICFFR 2006 (Pimont *et al.* 2006b).

Le chapitre 3 traite des effets de l'hétérogénéité du combustible sur l'écoulement incident. Il est constitué d'études réalisées avec FIRETEC. Un travail significatif de validation du modèle a été réalisé et a fait l'objet d'un article soumis à l'*International Journal of Wildland Fire* (Pimont *et al.* 2007c) et partiellement présenté au CFM 2007⁷ (Pimont *et al.* 2007a). Il s'ensuit une étude des effets de l'hétérogénéité de la végétation sur une coupure sur les caractéristiques de l'écoulement. Cette étude permet donc d'évaluer l'impact de l'hétérogénéité spatiale sur l'écoulement en l'absence de feu. Ces simulations ont notamment permis des calculs de l'écoulement ambiant dans les zones d'études.

Le chapitre 4 traite des effets de l'hétérogénéité de canopées d'arbres sur la propagation du feu dans son ensemble (sur un ouvrage de type coupure de combustible). Les écoulements obtenus au chapitre 3 sont utilisés pour la définition de l'écoulement ambiant. Ce chapitre aborde à la fois les hétérogénéités à l'échelle du paysage (coupure de combustible), mais aussi les hétérogénéités au sein de la coupure. Il intègre à la fois les effets de l'hétérogénéité du combustible sur le transfert radiatif (chapitre 2), sur les écoulements incidents (chapitre 3), mais aussi le transfert convectif et sur la source de chaleur elle-même, à l'aide de FIRETEC. Le comportement du feu est ainsi analysé de manière globale, et ceci dans deux types d'écosystèmes (pin d'Alep et pin Maritime).

Enfin, un court chapitre synthétise les enseignements du travail de thèse à destination des gestionnaires, en matière de description du combustible, de description du comportement du feu et d'impact des traitements. S'y trouvent également résumé certaines études appliquées, réalisées en marge de la thèse.

La thèse s'achève sur une conclusion et les perspectives qui s'ouvrent à l'issue de ce travail.

⁶ International Conference on Forest Fire Research, Coimbra, Portugal.

⁷ Congrès Français de Mécanique, Grenoble.

Bibliographie

- Albini FA (1985) A Model for Fire Spread in Wildland Fuels by Radiation. *Combustion Science and Technology* **42**, 229-258.
- Andrews PL (1986) BEHAVE: Fire behaviour prediction and fuel modelling system – BURN subsystem, part 1. USDA Forest Service, Research paper INT-194. 130p.
- Bradstock RA, Gill AM (1993) Fire in semi-arid mallee shrublands: size of flames from discrete fuel arrays and their role in the spread of fire. *International Journal of Wildland Fire* **3**, 3-12.
- Brunner A (1998) A Light Model for Spatially Explicit Forest Stand Models. *Forest Ecology and Management*, **107**, 19-46.
- Burrows ND (2001). Flame residence times and rates of weight loss of eucalypt forest fuel particles. *International Journal of Wildland Fire* **10**, 137-143.
- Busing RT, Maily D (2004) Advances in spatial, individual-based modelling of forest dynamics. *Journal of Vegetation Science* **15**, 831–842.
- Campbell GS, Norman JM (1997) Introduction to environmental biophysics. Second edition. Springer.
- Caraglio Y, Pimont F, Rigolot E (2006) *Pinus halepensis* Architectural Analysis for Fuel Modelling. In: Proceedings, MEDPINE 3. International Workshop on Mediterranean Pines. Bari, 2005. To be published. 15 p.
- Cohen M, Rigolot E, Valette JC (2004). From the vegetation to the inputs of a fire model: fuel modelling for wildland-urban interface management. In: Warm International Workshop on “Forest Fires in the Wildland-Urban Interface and Rural Areas in Europe: an integral planning and management challenge”, Athens, May 2003. pp 113-120.
- Dupont S, Brunet Y (2006) Simulation of turbulent flow in an urban forested park damaged by a windstorm. *Boundary-Layer Meteorology* **120**, 133-161.
- Eckert N, Parent E, Naaïm M, Richard D (2007). Bayesian stochastic modelling for avalanche predetermination: from a general system framework to return period computations. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 10.1007/s00477-007-0107-4
- Finney MA (1998) FARSITE : Fire area simulator-model development and evaluation. USAD Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO. Research Paper, RMRS-RP-4.
- Fons WL (1946) Analysis of fire spread in light fuels. *Journal of Agricultural Research*. **72(3)**, 93-121.
- Fosberg MA, Deeming JE (1971) Derivation of the 1- and 10- hour timelag fuel moisture calculations for fire-danger rating. Research Note RM-207. Fort Collins, CO: USDA Forest Service, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station; 8p.
- Hardy JP, Melloh R, Koenig G, Marks D, Winstral A, Pomeroy JW, Link T (2004) Solar radiation transmission through conifer canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* **126**, 257-270.
- Linn RR, Reisner J, Colman JJ, Winterkamp J (2002) Studying wildfire behavior using FIRETEC. *International Journal of Wildland Fire* **11**, 233-246.
- Linn RR, Winterkamp J, Canfield J, Sauer J, Colman J, Reisner J, Edminster C, Pimont F, Dupuy JL, Cunningham P (2006) Versatility of FIRETEC, a physics-based wildfire model. *Forest Ecology and Management* **234S (S94)**, 11p.
- Mignot E, Paquier A, Haider S (2006) Modeling floods in a dense urban area using 2D shallow water equations. *Journal of Hydrology* **327**, 186-199.
- Morvan D, Dupuy JL (2001) Modeling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation. *Combustion and Flame* **127**, 1981-1994.
- Morvan D, Dupuy JL, Pimont F, Linn RR (2006) Numerical study of grassland fires behaviour using a physical multiphase formulation. *Forest Ecology and Management* **234S (S90)**, 13p.
- Nelson RM (2002) Prediction of diurnal change in 10-h fuel stick moisture content. *Canadian Journal of Forest Research* **30**, 1071-1087
- Pimont F, Dupuy JL, Scarella G, Caraglio Y, Morvan D (2006a) Effects of small scale heterogeneity of vegetation on radiative transfer in forest fire. *Forest Ecology and Management* **234S (S88)**, 16p.
- Pimont F, Linn RR, Dupuy JL, Morvan D (2006b) Effects of vegetation description parameters on forest fire behavior with FIRETEC. *Forest Ecology and Management* **234S (S120)**, 12p.
- Pimont F, Dupuy JL, Linn RR, Morvan D (2007a) Effects of vegetation description parameters on forest fire behavior simulated with FIRETEC. *Proceeding of 18ème Congrès Français de Mécanique*, 6p.
- Pimont F, Dupuy JL, Morvan D (2007b) Effect of vegetation heterogeneity on radiative transfer in forest fire. Soumis à *International Journal of Wildland Fire*.

- Pimont F, Dupuy JL, Linn RR, Dupont S (2007c) Wind-flows simulated with FIRETEC in a canopy and on a fuel-break. Soumis à *International Journal of Wildland Fire*.
- Rigolot E, Costa M (2000) 'Conception des coupures de combustible.' Réseau Coupures de Combustible RCC no. 4. (Editions de la Cardère : Morières, France)
- Sanchez-Hubert J, Sanchez-Palencia E (1992). Introduction aux méthodes asymptotiques et à l'homogénéisation. Masson, Paris. 266p.
- Van Wagner CE (1977) Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research* **7**, 23-24.
- Vogel M, Williams FA (1970) Flame Propagation Along Matchstick Arrays. *Combustion Science and Technology* **1**, 429-436.
- Weber RO (1990) A Model for Flame Propagation through Arrays. *Mathematical and Computer Modelling* **13**, 95-102.
- Weiss M, Baret F, Smith GJ, Jonckheere I, Coppin P (2004) Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology* **121**, 37-53.

Chapitre 0. Modélisation du feu et du combustible

1. Introduction

Un objectif commun à tous les modèles de propagation du feu est de prédire la *vitesse de propagation* du feu (*ROS*, rate of spread). Celle-ci peut dépendre des conditions atmosphériques, de la teneur en eau du combustible, de la structure et de la quantité de combustible et de la topographie. La plupart des modèles présupposent l'existence d'un état de propagation quasi-stationnaire, au travers d'un combustible uniforme.

Les modèles décrits seront de trois natures, selon la classification de Weber (1991) : *statistique*, *empirique* ou *physique*.

Pour chaque type de modèle, nous préciserons leur niveau de description du combustible (variables utilisées et résolution spatiale). Nous verrons que les modèles de type physique à eux seuls couvrent une large gamme de modèles. Parmi eux, nous proposons de faire une différence entre ceux qui calculent le transport en phase gazeuse. Ils sont susceptibles de résoudre des problèmes instationnaires, dans lesquels le combustible peut varier spatialement. Nous introduirons pour ces modèles le niveau d'échelle de description de type *S* (quelques dizaines de cm), *M* (1 à 2 m), *L* (plus de 10 m). Compte tenu de notre intérêt pour les configurations hétérogènes, ce type d'outils peut apporter un certain nombre de réponses à nos questions.

L'accent sera mis sur la description de FIRETEC, largement utilisé dans la thèse (Linn 1997). Dans la description de ce dernier, le rôle des paramètres liés à la description de la végétation sera particulièrement mis en avant.



Fig. 0.1. Le mécanisme de la propagation du feu

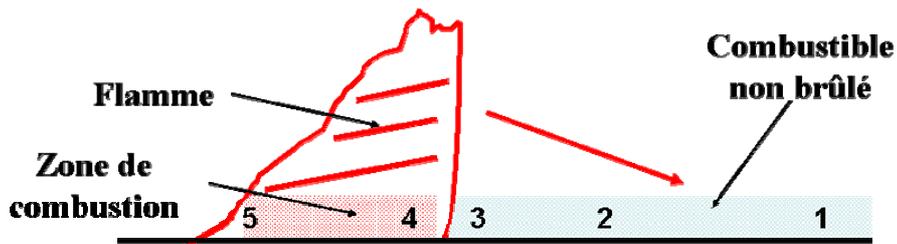


Fig. 0.2. Détails du mécanisme de la propagation du feu

- 1- Echauffement radiatif
- 2- Vaporisation de l'eau
- 3- Echauffement convectif
- 4- Pyrolyse rapide du combustible – combustion en phase gazeuse
- 5- Combustion des charbons

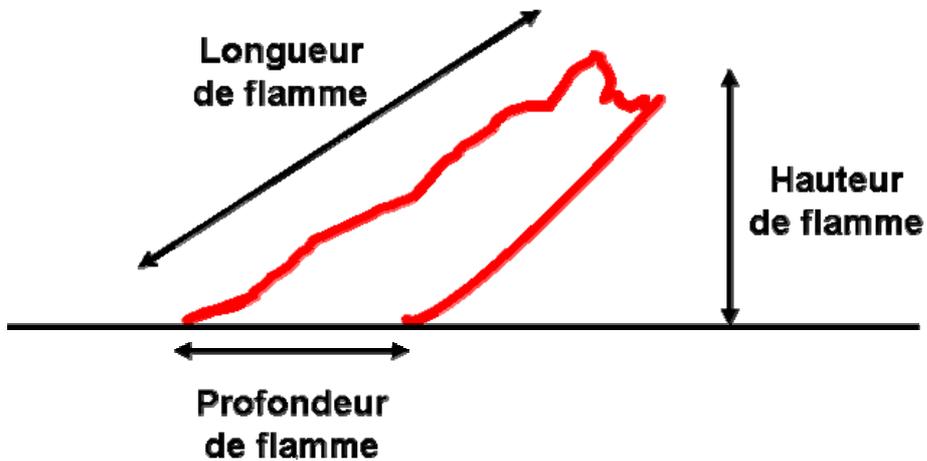


Fig. 0.3. Caractéristiques dimensionnelles d'une flamme

2. Mécanismes et caractéristiques de la propagation d'un feu

2.1. Mécanismes de la propagation du feu (Dupuy 1997)

La propagation du feu résulte de la combinaison de trois processus principaux qui se déroulent simultanément (**Fig. 0.1**):

- i) la *combustion* de particules solides, qui dégage de la chaleur
- ii) le *transfert* d'une partie de cette chaleur émise et son absorption par le combustible non brûlé
- iii) l'*inflammation* de ce combustible non brûlé

Un quatrième processus, le *transport de brandons* peut être impliqué dans la propagation par *sautes de feu*.

La combustion des particules solides se produit en deux temps (**Fig. 0.2**). Elle débute par une *pyrolyse* qui engendre des produits volatils et des résidus charbonneux (4). L'essentiel des produits de pyrolyse inflammables sont libérés autour de 600 K. Ces produits volatils réagissent en phase gazeuse avec l'oxygène pour libérer de la chaleur. Une partie des résidus charbonneux fins est entraînée dans les gaz chauds (*suies*) alors que l'autre partie entre dans une phase de combustion lente à très haute température (1000 K) : ce sont les *braises* (5). La flamme est composée par les gaz chauds qui remontent par flottabilité et par les suies. Elle est le siège de réactions chimiques exothermiques entre produits de pyrolyse et oxygène, ainsi que de la formation de suies en phase gazeuse.

L'ensemble de ces phases solides et gazeuses chaudes échauffent le combustible imbrûlé selon trois modes : *conduction*, *convection* (1) et *rayonnement* (3). La conduction au sein de la phase solide correspond au transfert de chaleur de proche en proche dans le solide dont la température n'est pas homogène. Elle est généralement considérée comme négligeable, au sens où les échanges solide/gaz (convection, rayonnement) sont largement dominants par rapport aux échanges solide/solide par conduction. La convection correspond à l'échange de chaleur entre le gaz en mouvement et le solide. Elle est proportionnelle au gradient de température entre les deux phases, à la racine de la vitesse de l'écoulement et à la surface exposée par le combustible (loi de Fourier et nombres de Nusselt et de Reynolds). Les sources de rayonnement que sont les phases solides et gazeuses (qui contiennent des suies) induisent un transfert radiatif de l'énergie vers le combustible imbrûlé qui absorbe cette énergie. Comme nous le verrons, le *coefficient d'absorption* est proportionnel à la surface projetée du combustible. Le rayonnement et la convection induisent l'échauffement du combustible avant le passage du feu, puis son refroidissement, pendant les phases de combustion et de refroidissement qui suivent.

Le combustible imbrûlé échauffé se dégrade en trois temps : évaporation de l'eau (2), pyrolyse (4) et combustion des résidus charbonneux (5). L'inflammation débute dès la pyrolyse.

2.2. Caractéristiques physiques d'un feu

La vitesse de propagation du feu (ROS) est loin d'être la seule caractéristique pertinente dans la description d'un incendie. D'abord, celle-ci est susceptible d'être modifiée à grande échelle par la présence de *sautes de feu* (spotting), bien qu'un certain nombre de résultats expérimentaux montrent que la vitesse de propagation n'est que rarement significativement accrue par les sautes de feu (Résultats du Programme VESTA⁸ par exemple). Ensuite, d'autres caractéristiques sont également importantes.

⁸ <http://www.ffp.csiro.au/nfm/fbm/vesta/spotfire.html>

L'*intensité du feu* (fire intensity) est par définition le flux de chaleur par mètre de front de feu (kW.m^{-1}). La formule de Byram, largement utilisée par les gestionnaires fournit une manière simple de calculer l'intensité (kW.m^{-1}) :

$$I_B = H_c \times W \times R \quad (0.1)$$

H_c est la chaleur de combustion (18000 à 22000 kJ.kg^{-1}), W la charge de combustible consommé au passage du feu (kg.m^{-2}) et R la vitesse de propagation (m.s^{-1}). Une ambiguïté subsiste cependant sur la notion de passage du feu, notamment en présence de gros diamètres dont la combustion peut être très lente (Deeming *et al.* 1977).

La *hauteur de flamme*, la *longueur de flamme* et la *profondeur de flamme* sont également des caractéristiques importantes de la propagation (**Fig. 0.3**).

Les dégâts générés par le passage du feu sur l'écosystème sont réunis sous le terme de *sévérité* (fire severity). La quantité de combustible consommé, les dégâts à l'écorce, le roussissement foliaire ou la mortalité des arbres font partie de la sévérité du feu.

Ces différentes caractéristiques varient en fonction du *type de feu*.

2.3. Types de feu

Les feux sont classés selon les caractéristiques de l'interaction vent/panache et selon le type de végétation brûlée au passage du feu (sol, surface, cime).

La classification des feux selon le type d'interaction vent/panache permet de distinguer les feux « *poussés par le vent* » (wind driven), de ceux « *dominés par le panache* » (plume dominated) (Nelson 2003). Les feux conduits par le vent interviennent généralement lorsque le vent augmente avec l'altitude. Ils sont généralement rapides et de forte intensité. On considère par ailleurs que leur comportement est assez prédictible (Rothermel 1991). Les feux dominés par le panache sont en général plus lents. Ils se produisent lorsque le combustible est sec et l'atmosphère instable. Une accélération est possible, avec un effondrement de la colonne de convection en cas de condensation de l'eau due à l'air froid (Nelson 2003). Le régime de propagation du feu dépend du rapport entre la puissance générée par le vent et celle générée par le panache. L'apparition de tel ou tel régime dépend donc de l'intensité du vent, mais également de la quantité de biomasse accumulée qui affectera la colonne de convection.

Le type de combustible brûlé au passage du feu permet d'introduire une seconde série de distinctions (Scott & Reinhardt 2001). On différencie :

- Les *feux de sol* (ground fire) : seul le combustible présent dans le sol (racine, débris enterré...) est brûlé.
- Les *feux de surface* (surface fire) : le feu brûle uniquement la végétation qui touche le sol (litière, strates herbacées et arbustives).
- Les *feux de cime* (crown fire) : le feu brûle des cimes ; parmi ces feux, on distingue les feux de cimes (Van Wagner 1977) :
 - *passifs* (torching, candling) : ont lieu notamment dans les sous-bois de conifères qui tolèrent l'ombre. Lors de l'inflammation d'une cime, le rayonnement vers la surface est accru ce qui augmente le ROS.
 - *actifs* (running, continuous) : présentent un embrasement continu des cimes. Cependant le feu de cime reste dépendant du feu de surface. Ce type de feu se traduit par une augmentation du rayonnement et des sautes de feu.
 - *indépendants* : sont rares et brefs. Ils ont lieu dans des conditions de pente forte, vent fort et faible teneur en eau, parfois en présence de lichen (Forestry Canada Fire Danger group 1992). Ils sont rarement documentés.

Tableau 0.1. Caractéristiques du combustible

	Variable associée	Symbole (unité SI)	Expression	Valeurs caractéristiques			
				Herbes	Feuilles/ Aiguilles	Rameaux	Tronc
Quantité de matière	<i>Charge</i>	M_s (kg.m ⁻² ou t/ha)	$\rho \cdot \alpha_s \cdot h$	4-10	5-15 t/ha (litière) 4-5 t/ha (buissons) 3-15 t/ha (arbres)	5-10 t/ha (buissons) 10-100 t/ha (arbres)	25-50 t/ha (buissons) 10-1000 t/ha (arbres)
	<i>Densité du combustible</i>	ρ_s (kg.m ⁻³)	$\rho \cdot \alpha_s$	0.1-0.4			
	<i>Fraction volumique</i>	α_s (m ³ .m ⁻³)	$\frac{V_s}{V_{tot}}$		0.01-0.05 (litière) 0.0005-0.003 (buissons) 0.0001-0.001 (arbres)		
Temps de combustion Vitesse d'échanges de masse et de matière	<i>Epaisseur</i>	l_s (mm)	$\frac{4}{\sigma_s}$ (*)	2	0.3-1	20	200
	<i>Rapport surface volume</i>	σ_s (m)	$\frac{S_s}{V_s}$	20000	4000-10000	200	20
Teneur en eau	<i>Teneur en eau</i>	MC (%)	$\frac{m_s(eau)}{m_s(sec)}$	5-40	50-100 (buissons) 80-200 (arbres)		

ρ désigne la masse volumique (ou densité) du bois (kg.m⁻³)

h désigne la hauteur de la strate de végétation (m)

V_s désigne le volume de végétation présent (m³) dans un volume total V_{tot} donné

S_s désigne la surface d'un élément de végétation (m²) de volume V_s

(*) Pour les longs cylindres (ie aiguilles)

Données Deeming et al. 1977 ; Trabaud 1977 ; Daligault & Moro 1991 ; Cohen et al. 2004.

Encadré 0.1. Niveau de description de la végétation

Pour une famille de particule i , la distribution spatiale peut être :

- Constante : $\rho_s^i(x, y, z) = \rho_s^i = \frac{M_s}{\rho \cdot h}$; on retrouve la notion de charge

- Stratifiée verticalement : $\rho_s^i(x, y, z) = \rho_s^i(z)$, constante par morceau, dans chaque strate

- Hétérogène horizontalement : $\rho_s^i(x, y, z) = \rho_s^i(x, y)$, constante par morceau, agrégat de taille d et de recouvrement C (%)

Il est naturellement possible de combiner les stratifications horizontales et verticales.

3. Caractéristiques générales du combustible

3.1. Principales caractéristiques

La description du combustible est en général basée sur les propriétés des particules (caractéristiques physiques, chimiques, thermiques) et de leur assemblage. Ces caractéristiques sont déterminées au niveau de l'élément de végétation (feuille, rameau fin, rameau grossier) et interviennent dans les mécanismes de la propagation du feu, notamment dans les transferts thermiques et la dégradation thermique. Ces notions sont déjà présentes chez Fons (1946), où les propriétés qui se dégagent sont la teneur en eau et la charge. Plusieurs variables permettent de quantifier la quantité de combustible présent : la charge, déjà évoquée, mais aussi la fraction volumique ou la densité de combustible. Le **Tableau 0.1** recense ces différentes définitions. A cela s'ajoute une caractérisation du temps de combustion du combustible (Deeming *et al.* 1977). Ces auteurs proposent une classification (combustible 1, 10, 100, 1000 heures), qui correspond en fait à des classes de diamètres des particules : 0-6 mm ; 0.6-2.5 cm ; 2.5-7.6 cm ; plus de 7.6 cm. Cette grandeur est inversement proportionnelle au rapport surface/volume qui permet de calculer les surfaces exposées et projetées du combustible ; ces dernières sont impliquées dans les transferts thermiques. Concernant les espèces méditerranéennes, on trouvera la majeure partie des caractéristiques des particules dans Daligault & Moro (1991).

Ces différentes caractéristiques sont bien illustrées par la notion de famille de combustible (Cohen *et al.* 2004). Un certain nombre de propriétés varient peu comme la densité (entre 500 et 700 kg.m⁻³), la composition (Cellulose 55%, Lignine 35%, Minéraux 2-4%, composés volatiles) ainsi que la chaleur spécifique (1.4 J.g⁻¹.°K).

Les éléments de végétation sont structurés selon une hiérarchie de niveaux de complexité croissante qui va de la particule de combustible au complexe de combustibles (McCaw 1991). La notion de complexe correspond à un mélange de familles de combustible spatialisé. Un objectif peut alors être de classer les végétations en comportement de feu potentiel similaire (Chuvieco & Riano 2002) ou modèles de combustibles (comme les 13 modèles NFFL de BEHAVE, Anderson *et al.* 1982). Cette classification doit alors se faire sur la base des distributions et accumulations réelles, qui peuvent être très variables (Brown & Bevins 1986), et très dépendantes du type de végétation, de l'histoire et du régime de perturbation (Keane *et al.* 2001). Il a été clairement établi que le type de combustible à lui seul était insuffisant pour une classification suffisamment précise (Pyne *et al.* 1996).

3.2. Spatialisation du combustible et modèles de propagation

L'approche la plus générale concernant la description du combustible consiste à définir une *scène de végétation*⁹ donnée, pour chaque famille i , caractérisée par σ_s^i et MC_s^i , une distribution spatiale de la biomasse, par exemple au moyen de la fonction $\rho_s^i(x, y, z)$, dont la résolution peut être variable (**Encadré 0.1**). Un certain nombre de modèles (physiques) sont capables de prendre en compte les variations spatiales de cette fonction. Cette variation spatiale est prise en compte au moyen d'une interpolation sur un maillage, qui peut être mono, bi ou tridimensionnel. La maille de description peut alors être variable ou fixe.

⁹ Zone bi ou tri dimensionnelle de l'espace physique contenant la description du combustible.

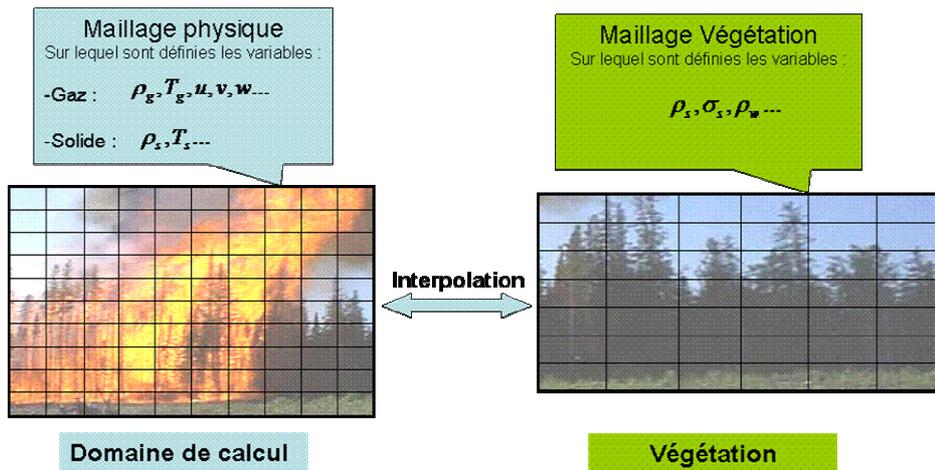


Fig. 0.4. Domaine de calcul et Terrain sont définis sur deux maillages différents, répondant aux nécessités du calcul pour l'un et aux données de terrain pour l'autre

Encadré 0.2. Approche architecturale de la modélisation des plantes (Voir Annexe 0.1 et I)

Ce type de modélisation permet de fournir des spatialisations détaillées, que ce soit pour la modélisation de transfert radiatif solaire dans les canopées (Sinoquet *et al.* 2005 ; Nilson & Ross 1997 ; Cescatti 1997 ; Gower *et al.* 1999 ; Rochdi *et al.* 2006) ou la modélisation du combustible (Caraglio *et al.* 1996 ; Caraglio *et al.* 2006 ; Pimont *et al.* 2007b). D'autres approches s'appuient sur des arbres fractals (Nackaerts *et al.* 1999 ; Parsons 2006). Enfin, on trouve également quelques descriptions exhaustives : digitalisation (Sinoquet *et al.* 1998), vectorisation (Fournier *et al.* 1996), mais qui demeurent extrêmement lourdes. Derrière le terme de démarche architecturale, on trouve au moins deux approches très différentes. La première (Gower *et al.* 1999 ; Cescatti 1997) consiste à décrire la canopée sous forme d'enveloppes asymétriques qui dépendent des paramètres suivants : hauteur maximum, hauteur du bas de la couronne, rayons de la couronne dans 4 directions et coefficients de forme pour le profil vertical. Dans une couronne, la densité et l'orientation foliaires sont modélisées en utilisant les distributions β ou de Weibull (Goels & Strebel 1984 ; Wang & Jarvis 1990 ; Mori & Hagihara 1991). Les effets du profil spatial de la surface foliaire sont pris en compte en simulant des distributions aléatoires, régulières ou agrégées.

Une seconde approche s'appuie sur une description analytique de l'architecture. Elle vise à décrire les schémas de branchement pour reproduire les plantes en 3 dimensions. Elle est développée notamment au CIRAD AMAP (Montpellier) et nous la décrivons plus en détails ici.

Principe de la méthode

L'analyse architecturale (Barthélémy *et al.* 1989 ; Hallé *et al.* 1978) permet d'aborder la croissance des plantes sur leur fonctionnement et leur dynamique. Il s'agit en fait d'analyser la succession des principaux événements morphologiques qui se déroulent au cours du développement de la plante, depuis sa germination jusqu'à sa mort. Le logiciel d'architecture des plantes AMAPsim vise à fournir une description à la fois qualitative et quantitative de l'architecture des arbres (Barczi *et al.* 1997). Son utilisation permet d'obtenir des maquettes tridimensionnelles réalistes des arbres qui peuvent être utilisées pour la caractérisation de la biomasse combustible. Il est en effet possible d'extraire des maquettes 3D la biomasse spatialisée au moyen d'un petit utilitaire baptisé Feu. AMAPsim peut par ailleurs être couplé à la plate-forme CAPSIS¹⁰, en imposant aux arbres simulés des contraintes en terme de croissance issues de la présence des autres arbres du peuplement simulé sous CAPSIS. Dans le contexte spécifique à la modélisation du combustible, la grandeur qu'il s'agit de simuler avec précision est la biomasse foliaire.

(suite page 34)

¹⁰ Croissance d'Arbres en Peuplement et Simulation d'Interventions Sylvicoles, <http://capsis.free.fr> : cette plate-forme de simulation maintenant développée par l'INRA à Montpellier (AMAP) intègre la plupart des modèles français (et certains modèles étrangers) de croissance ou de dynamique forestière.

Il apparaît donc qu'il y a deux échelles : celle de la description de terrain et celle du modèle feu (**Fig. 0.4**). Lorsque la description de la végétation est plus fine que celle du modèle feu, on est conduit à homogénéiser cette végétation. C'est notamment le cas avec FIRETEC lorsque l'on modélise des strates qui sont plus basses que la première maille du modèle (1.5 m). A l'inverse, la description de la végétation peut être plus grossière que la résolution du modèle. Par exemple, il arrive que l'on ne connaisse qu'une valeur moyenne de charge sur la scène et la hauteur de combustible ; on utilise alors une densité de combustible moyenne au sein de la maille.

L'un des objectifs est de tester des représentations d'arbres à différentes échelles, de la plus précise permettant de prendre en compte l'ensemble de l'hétérogénéité, à des représentations dégradées, en spatialisant par exemple uniquement les houppiers (valeur de fraction volumique constante au sein d'un houppier), ou même une représentation encore plus dégradée où la canopée n'est représentée que comme une strate homogène. La comparaison des différents modes de transferts sur ces représentations plus ou moins dégradées permettra d'évaluer l'impact de l'échelle de description et l'échelle nécessaire pour décrire correctement les principaux phénomènes.

3.3. Méthodes de spatialisation du combustible

Des modèles de végétation spatialement explicites ont été développés pour un certain nombre d'applications, comme l'interception de la lumière ou la croissance des plantes (par exemple, Brunner 1998 ; Busing & Mailly 2004). C'est aussi le cas dans le domaine des incendies de forêts avec des approches destructives et des approches par modélisation.

Dans les strates arbustives, la description de combustibles spatialisés s'appuie en général sur des mesures destructives qui prennent en compte ou non la stratification verticale et l'hétérogénéité spatiale (Brown 1981 ; Rundel & Parsons 1979 ; Countryman 1982 ; Papio & Trabaud 1991 ; Rego *et al.* 1994 ; Scott & Hungerford 1997 ; Hely & Forgeard 1998). Dans les canopées, un certain nombre de travaux s'appuient également sur une approche destructive (Brown 1978 ; Lopez Serrano *et al.* 2000 ; Mitsopoulos & Dimitrakopoulos 2007) et fournissent la stratification verticale de la végétation. Etant donnée sa lourdeur, cette méthode sert en général à calibrer une méthode allométrique, issue de l'étude de la croissance dans les peuplements (Johnson *et al.* 1989 ; Porté *et al.* 2000) ou d'hypothèses sur la forme des houppiers permettant de calculer des biovolume et d'utiliser des allométries biovolume/biomasse (Maréchal 1990 ; Etienne *et al.* 1991 ; Armand *et al.* 1993). La hauteur entre la strate basse et la base du houppier apparaît comme un paramètre clé qui est pris en compte dans la plupart des modèles. Certains intègrent même le recouvrement comme paramètre (Fernandes & Rego 1998).

Une approche de modélisation radicalement différente est la méthode proposée par Caraglio *et al.* (1996). Elle consiste à modéliser la croissance des plantes sur la base d'une analyse architecturale pour ensuite simuler la croissance de cette plante (Barczi *et al.* 1997). Il est alors possible d'extraire la biomasse dans des voxels à partir de la maquette simulée. Ces techniques ont été développées et utilisées dans le travail de thèse (Caraglio *et al.* 2006 ; Pimont *et al.* 2007b). On pourra consulter l'**Encadré 0.2**, ainsi que les annexes 0.1 (en fin de chapitre) et I (en fin de document) pour plus de détails sur l'approche. L'USDA Forest Service a également développé des maquettes d'arbres fractals (Parsons 2006).

Encadré 0.2. Approche architecturale de la modélisation des plantes (suite de la page 32)

Les différentes étapes permettant d'extraire des données de biomasse avec la méthode architecturale sont :

- i. Analyse morphologique et architecturale de la plante
- ii. Echantillonnage et mesure des grandeurs adaptées
- iii. Modélisation des plantes et extraction dans des voxels
- iv. Validation

Les paramètres susceptibles d'affecter la prédiction du nombre d'aiguilles sont :

- i. la longueur des pousses annuelles et de de leur nombre (polycyclisme éventuel), qui permettent de déterminer la longueur des parties feuillées de l'année. Ces grandeurs sont calculées par le modèle.
- ii. la longueur de l'entre-noeud, qui permet de déterminer le nombre d'aiguilles, lorsque l'on connaît la longueur des parties feuillées. Ce paramètre est très important pour la prédiction
- iii. l'ordre de ramification et la longueur des pousses en fonction de leur positionnement dans l'arbre et de leur âge. Ceci détermine la spatialisation du combustible
- iv. la durée de vie des aiguilles, qui détermine la vitesse de chute des aiguilles. Ce paramètre est important pour connaître le nombre d'aiguilles encore présentes.

Dans le contexte de la modélisation du combustible forestier, il s'agira donc d'évaluer avec précision ces paramètres du modèle.

Application au pin d'Alep et au pin Maritime

Cette démarche a été partiellement appliquée au chêne kermès (*Quercus Coccifera*) (Pimont 2004). Cependant, c'est vraiment dans les canopées que cette démarche est la plus intéressante, car elle permet de limiter les relevés de terrain dans des conditions où ceux-ci deviennent très lourds, notamment pour le pin d'Alep (*Pinus halepensis*) l'une des essences dominantes des écosystèmes méditerranéens.

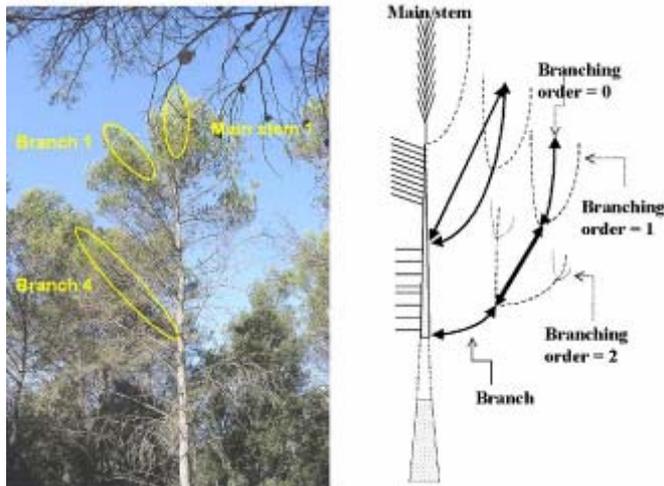


Fig. 0.5. (a) Echantillonnage des différentes parties de l'arbre (b) Description de l'ordre de ramification du système (D'après Caraglio et al. 2006)



Fig. 0.6. Architecture de la couronne du pin d'Alep à 10 ans (gauche) et 30 ans (droite) (D'après Caraglio et al. 2006)

Les paramètres de la maquette existante conçue à partir de données issues de différents sites (Martinez 1993) ont donc été affinés dans la perspective de la prédiction de la biomasse (voir annexes 0.1 et I).

Enfin, l'approche par télédétection (Chuvienco 2003) constitue une piste d'avenir très sérieuse : les photographies aériennes, les images satellites et la spectroscopie (par exemple, Falkowski *et al.* 2005) constituent des approches intéressantes, mais c'est surtout le *LIDAR* (*Light Detection And Ranging*) qui semble le plus prometteur. Ce système de mesure utilise les ondes électromagnétiques, à la manière d'un laser. Cependant, les bandes spectrales utilisées sont celles du visible et non celles des ondes radio. Le LIDAR peut être utilisé de manière aéroporté (Harding *et al.* 2001; Riano *et al.* 2003; Andersen *et al.* 2005) et permet alors de représenter l'enveloppe des houppiers. Les hauteurs des arbres et de la base des houppiers peuvent généralement être obtenues avec une bonne précision. Il est également possible de déterminer la quantité de biomasse (Riano *et al.* 2004), directement ou en utilisant des corrélations avec des échantillonnages au sol. Le LIDAR terrestre permet d'accéder à un niveau d'information beaucoup plus détaillé, puisqu'il permet de mesurer des hauteurs de tiges et de branches (Henning & Radtke 2006), des diamètres de couronnes (Popescu *et al.* 2003).

3.4. Réduction du combustible

La principale méthode de prévention des incendies consiste à agir sur le combustible. Elle passe en général par des coupures de combustible, qui constituent de larges bandes débroussaillées, parcourues par des pistes qui permettent un cloisonnement du massif (**Fig. 0.8.** Rigolot & Costa 2000). On attend de la suppression du combustible qu'elle permette une réduction du combustible consommé par le feu, et par la même une réduction de l'intensité du feu (Equation 0.1). Par ailleurs, l'élitage et le morcellement du paysage vont favoriser le retour du feu en surface, beaucoup plus facile à contrôler que les feux de cimes.

La réduction du combustible introduit cependant un paradoxe : en effet, elle limite le combustible potentiellement consommé par le feu, mais elle augmente la porosité du couvert, ce qui a pour objet de faire accélérer le vent sur la coupure. La vitesse de propagation du feu peut donc s'en trouver accrue et induire une augmentation de l'intensité.

Dans ce contexte, les connaissances demeurent encore peu nombreuses. Un certain nombre de questions sont notamment posées par les gestionnaires, sur la manière d'élaborer les coupures : recouvrement, mise à distances des houppiers, etc. Ces questions appliquées s'inscrivent de manière claire dans notre problématique des effets des combustibles hétérogènes sur la propagation du feu.

Les modèles qui spatialisent explicitement et finement la végétation sont capables d'aborder ce type de problématique.

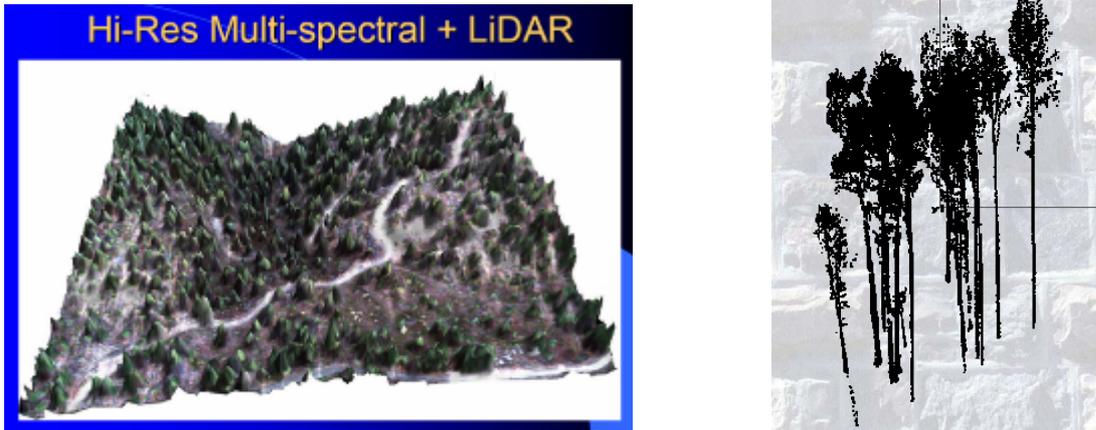


Fig. 0.7. Extraits des présentations de Evans et Radke, sur l'utilisation des LIDARs aéroportés et terrestres pour décrire le combustible (Conférence Silviscan 2005)



Fig. 0.8. Coupures de combustible

Encadré 0.3. Fonctionnement du modèle BEHAVE (Andrews 1986)

$$\text{Vitesse de propagation : } ROS = \frac{I_p}{Q_{ign}} \quad (0.2)$$

avec Q_{ign} la chaleur d'ignition et I_p le flux thermique reçu par le combustible. Le modèle suppose que ce flux est proportionnel au flux thermique dégagé par la combustion. Le coefficient de proportionnalité, le flux thermique dégagé et la chaleur d'ignition sont évalués sur la base de paramètres d'entrée (Chaleur de combustion, caractéristiques du combustible). Un facteur multiplicatif de cette vitesse intègre la vitesse du vent (à mi hauteur de la flamme) et la pente.

4. Du modèle empirique, aux modèles physiques

4.1. Modèles empiriques

Principe

Les modèles statistiques s'appuient uniquement sur les résultats de feux expérimentaux ou d'observations d'incendies et établissent des corrélations entre les caractéristiques de la propagation du feu (ROS en particulier) et les variables environnementales (en général vent, teneur en eau, charge). La pente est prise en compte au moyen d'une correction empirique. Un bon exemple de modèle empirique est le modèle de MacArthur, développé en Australie (McArthur 1966 pour des prairies sèches, Noble *et al.* 1980 pour la litière forestière). On pourra également consulter les travaux de Cheney *et al.* (1998) toujours sur des écosystèmes australiens, ainsi que ceux de Trabaud (1979), sur des garrigues à chêne kermès françaises, ceux de Fernandes *et al.* (2000) sur les garrigues du Portugal et enfin le modèle canadien (Fire Danger Group 1992) élaboré par le service forestier canadien.

Description du combustible

La hauteur et la charge du combustible ne sont généralement pas prises en compte dans les modèles de prairies. En revanche, les modèles de strates arbustives intègrent généralement la hauteur du combustible. Notons cependant qu'une version plus récente du modèle de McArthur, le MKV, intègre la charge de combustible comme paramètre d'entrée (Noble *et al.* 1980). Le modèle canadien intègre le type de combustible, supposé homogène en hauteur et de composition moyenne. Un certain nombre de ces écosystèmes types contiennent des arbres. La teneur en eau est intégrée au moyen d'un indice (Initial Spread Index ,ISI)

Intérêts et limites

Ces modèles sont très faciles à utiliser (peu de paramètres d'entrée, faciles à collecter, formulation simple, temps de calcul négligeable) et fournissent des références intéressantes pour la validation d'autres modèles plus sophistiqués. Cependant, ils sont peu ou pas exportables, reposent sur un domaine de validité limitée et nécessitent un grand nombre de données. De plus, ils ne sont adaptés qu'à de grands écosystèmes homogènes, ils ne permettent pas la prise en compte d'hétérogénéité à l'échelle du paysage et supposent un régime de propagation permanent. Ils fournissent en général uniquement les valeurs de vitesse de propagation et parfois des valeurs d'intensité, sur la base de la formule de Byram (Equation 0.1). Enfin, ils ne permettent pas de progression dans la compréhension de la physique. Clark *et al.* (1996a & b) proposent un couplage entre un modèle atmosphérique tri-dimensionnel et un modèle de combustion de combustible fondé sur le modèle de McArthur, incluant des équations décrivant la conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie dans l'atmosphère. Ce modèle permet d'examiner certaines interactions feu/atmosphère, notamment dans le contexte de profils de vitesse de vent non constants avec l'altitude qui peuvent générer un éclatement du front de feu (Clark *et al.* 1996b). Le couplage est analysé en terme de nombre de Froude :

$$F_c^2 = \frac{u^2}{g \frac{\langle \Delta \theta \rangle}{\theta} W_f} \quad (0.3)$$

où θ est la température potentielle, $\Delta \theta$ l'écart de température entre la zone échauffée et la température ambiante, et W_f la largeur de la zone chauffée.

4.2. Modèles semi-empiriques

Principe

Ces modèles s'appuient sur une courte analyse physique de la propagation du feu et une sélection d'un certain nombre de paramètres pertinents. La combinaison des deux leur permet d'aboutir à une formulation mathématique, dont les paramètres inconnus sont estimés sur la base de données expérimentales. Ils sont en général basés sur la conservation de l'énergie, mais ne distinguent pas les différents modes de transfert thermique. Les modèles de Frandsen (1971) ou Rothermel & Anderson (1966) décrivent l'énergie associée à la flamme, mais pas son mécanisme de production. Un certain nombre d'expériences de laboratoire (Rothermel *et al.* 1966) ont permis de calibrer ce modèle avec différentes pentes, vents et types de combustible et ont servi de base à la construction du modèle BEHAVE (Rothermel 1972). Dans Clark *et al.* (2004), le modèle de McArthur, qui régissait le déplacement de la source de chaleur représentant le front d'incendie, a été remplacé par les équations du modèle BEHAVE.

Le modèle de Nelson & Adkins (1988) s'appuie sur l'analyse dimensionnelle des forces (vent/flottabilité, nombre de Froude), énergie (convection/flottabilité) et temps (combustion/temps caractéristique de la flamme) qui sont déterminées par des valeurs expérimentales. La formulation est la suivante :

$$ROS = \frac{k \times w \times U}{tr} \quad (0.4)$$

avec w le combustible disponible, U la vitesse du vent, tr le temps de combustion (qui demeure une variable du modèle) et k un paramètre numérique ajusté sur des expériences de laboratoire.

Description du combustible

BEHAVE prend en compte la charge en combustible, sa densité, la profondeur du lit de combustible, le rapport surface/volume des particules et la teneur en eau. Il est possible de prendre en compte plusieurs types de combustible, en effectuant des moyennes pondérées pour chacun des paramètres. En pratique, un certain nombre de modèles types de combustible sont prédéfinis dans FARSITE (13 NFFL ; Anderson *et al.* 1982). La prise en compte de la végétation dans le modèle de Nelson se limite à la charge de combustible disponible au feu (charge du combustible fin).

Intérêt et limites

Ces modèles prennent un compte un bilan énergétique, et même des interactions vent flottabilité (pour Nelson et Adkins). Cependant, ils posent des problèmes par rapport à leurs paramètres d'entrée (vitesse du vent à mi hauteur de la flamme, teneur en eau d'extinction... et surtout durée de combustion dans le cas du modèle de Nelson et Adkins). De plus, ils ne dépassent pas certaines limites des modèles empiriques dans la description du combustible (qui demeure uniforme), d'autant que des expériences en milieu hétérogène (mélange de combustibles différents) ont montré les limites de l'approche (Catchpole *et al.* 1993). Une autre limitation de ces modèles est qu'une grande partie des expériences de calibration des paramètres a été réalisée à petite échelle, en soufflerie. En l'absence de conditions de similitude, il est difficile a priori d'extrapoler ces résultats à plus grande échelle.

4.3. Modèles physiques n'incluant pas le transport en phase gazeuse

Principe

Ces modèles s'appuient sur l'équation de bilan d'énergie, à la manière du modèle de Rothermel. Cependant, ils modélisent un ou plusieurs des différents transferts thermiques (convection ou rayonnement). La source de chaleur est également modélisée comme une source de rayonnement de caractéristiques connues (géométrie, émittance). Enfin, ils décrivent une propagation en régime permanent et s'appuient sur une équation de réaction diffusion.

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = D \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + A f(x, y) - h a_s T \quad (0.5)$$

Le terme de diffusion et son coefficient D modélisent la diffusion de la chaleur, par échauffement convectif et dans certains modèles, par transfert radiatif. Cependant, le transfert radiatif est plus généralement inclus dans le terme source $A f(x, y)$. Le terme $-h a_s T$ modélise les pertes de chaleur par convection (refroidissement du solide par les gaz frais incident). h est le coefficient de transfert convectif et a_s la surface d'échange (surface exposée par le combustible). Les modèles de Fons (1946) et de Emmons (1963) introduisent l'absorption exponentielle du rayonnement, mais n'introduisent pas le terme de diffusion. Le modèle de Hottel *et al.* (1965) ajoute une convection turbulente (vue uniquement comme un refroidissement). Pagni & Peterson (1973) conduisent une analyse plus détaillée des différents mécanismes qui régissent l'évolution du lit de combustible (poreux et thermiquement fin). Ils introduisent notamment le fait que le feu est piloté par rayonnement par vent faible et par convection par vent fort. Albin (1985) développe un premier modèle 2D piloté par le rayonnement, mais qu'il modifie en 1986 en ajoutant un terme de refroidissement par convection, car il surestime les distances d'échauffement. Ce modèle ne contient pas le terme de diffusion. Grishin *et al.* (1983) proposent un modèle 1D de feu poussé par le vent dans lequel la cinétique chimique est assez développée.

Description du combustible

Du point de vue de la physique, la végétation est une collection de particules macroscopiques solides (feuilles, aiguilles, rameaux, branches) réparties au sein d'une couche entre le sol et une hauteur au dessus du sol. Chez Albin (1985), la densité du combustible (ou fraction volumique) est considérée comme homogène, mais elle pourrait être spatialisée sur le maillage bi dimensionnel du modèle.

Intérêts et limites

La plupart de ces modèles sont des outils de recherche, qui permettent de conduire certaines analyses, mais qui font souvent des approximations et qui utilisent des hypothèses fortes (Dupuy 2000a). Les sources sont souvent décrites de manières très succinctes.

Ils sont en général délicat à utiliser, mais les temps calculs sont très rapides. Ils ne présentent pas d'intérêt opérationnel. Les applications potentielles sont par exemple le calcul de distance de sécurité (Dupuy 2000b). Ils demeurent cependant incapable de décrire les feux de cimes et les cas où le combustible est complexe.

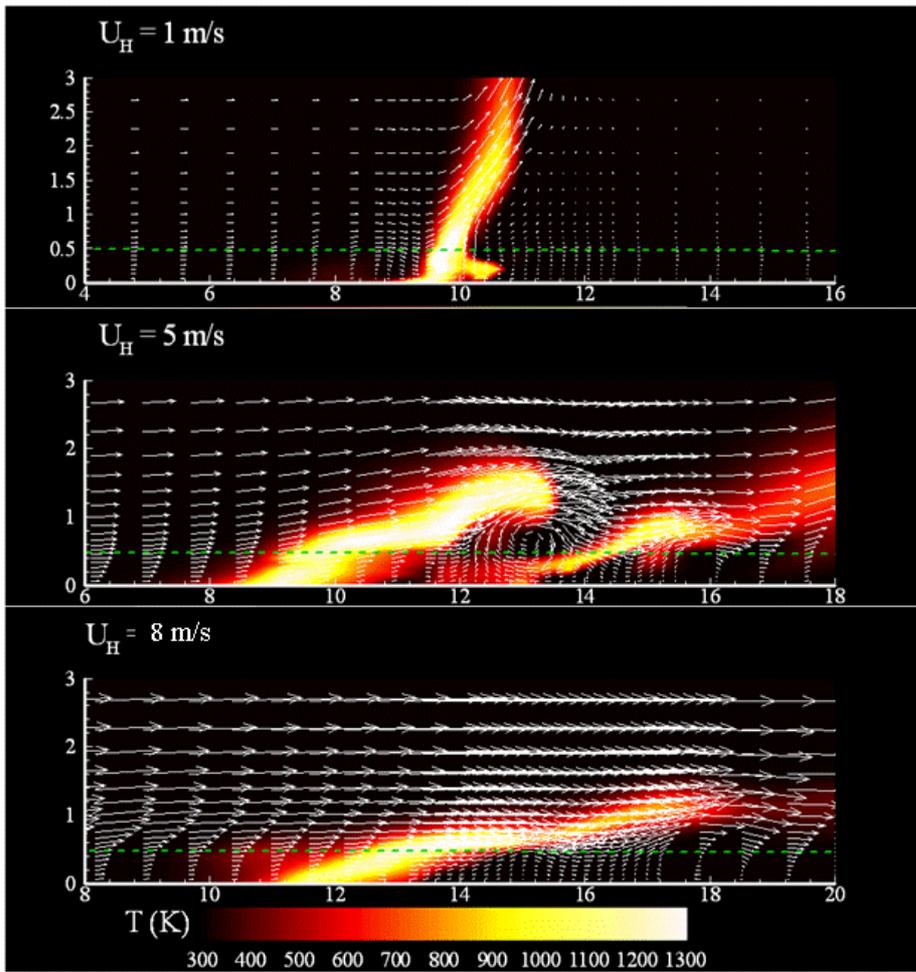


Fig. 0.9. Simulation de propagation du feu avec FIRESTAR dans des garrigues à chêne kermès pour trois vitesses de vent.

4.4. Modèles physiques incluant le transport en phase gazeuse

Principe

Un certain nombre d'auteurs ont proposé une formulation dite « complète » du problème de la propagation du feu (Grishin 1997 ; Linn 1997 ; Larini *et al.* 1998). Les travaux de Larini *et al.* (1998) donnent notamment naissance à un modèle simplifié prenant en compte le transport en phase gazeuse et une source de chaleur (Dupuy & Larini 1999). Il a été appliqué à des cas de feu en pente, sans vent. Ce type de formulation a permis la naissance de code comme FIRESTAR, ainsi que les premières comparaisons entre des simulations numériques et des feux de laboratoire (Morvan & Dupuy 2001 ; **Fig. 0.9**). Celles-ci se sont poursuivies avec des premières simulations dans des garrigues (Morvan & Dupuy 2004) et dans les cimes d'arbres (Dupuy & Morvan 2005).

FIRESTAR est un modèle bidimensionnel, qui résout les équations sur un maillage typique de 25 cm et des domaines allant jusqu'à 250 mètres de long (pour 60 mètres de haut). Le calcul du rayonnement s'appuie sur la méthode des ordonnées discrètes. Le modèle de turbulence est un modèle K- ϵ RNG (voir chapitre 3). Les processus qui décrivent la dégradation thermique sont assez détaillés (pyrolyse et combustion des charbons sont séparées). La résolution numérique s'appuie sur une méthode implicite de volumes finis dans le contexte de l'approximation des écoulements faiblement compressibles (faible nombre de Mach et résolution couplée de l'équation de Poisson).

Le NIST (National Institute of Standards and Technology) a développé récemment un modèle physique tridimensionnel du feu baptisé WFDS et spécialement dédié à l'étude des interfaces forêts/habitats (Mell *et al.* 2007). Il dérive du modèle FDS, développé dans le contexte des feux de bâtiments. Il s'appuie sur un certain nombre d'hypothèses permettant de résoudre la physique sur un maillage moins fin que celui de FIRESTAR par exemple, mais qui fonctionne en trois dimensions et est particulièrement peu gourmand en terme de temps de calcul. Cependant parmi les limitations actuelles du modèle, on notera que les écoulements ne sont pas résolus au sein de la végétation, mais uniquement au dessus de celle-ci ; les échanges d'énergie ont lieu au niveau d'une interface végétation/atmosphère. Il n'est donc pas encore adapté à la prise en compte de canopée.

En parallèle aux approches décrites ici, le Los Alamos National Laboratory a également développé un modèle de propagation du feu (FIRETEC) et s'est inscrit comme l'un des acteurs majeur de cette démarche au niveau mondial (Linn *et al.* 2006). Compte tenu de l'importance de ce modèle dans le travail de thèse, sa description fait l'objet de la partie 4.5 du présent chapitre.

Description du combustible

Du point de vue de la physique, la végétation est une collection de particules macroscopiques solides (feuilles, aiguilles, rameaux, branches) réparties au sein d'une couche entre le sol et une hauteur au dessus du sol. Les particules sont classées en familles et la densité du combustible (ou fraction volumique) est spatialisée sur un maillage. Pour FIRESTAR, un modèle basé sur des automates cellulaires et des campagnes de mesures de terrain permet de générer sur une grille de 25 m de long un paysage 2D typique de la végétation méditerranéenne (Cohen *et al.* 2002) sur un maillage de 25 cm pour plusieurs familles de particules. Les relevés de terrain comprennent des mesures simples de la distribution de combustible et de cartographie de la végétation (Etienne & Rigolot 2001) et des données détaillées sur les distributions des familles. L'utilisation de maquettes architecturales (Caraglio *et al.* 2006) a permis de simuler le combustible arboré sur ce même maillage de 25 cm, pour simuler des propagations de feux (voir annexe I).

Des approches similaires ont été réalisées avec d'autres codes de calcul, comme pour WFDS. Parsons (2006) a élaboré pendant sa thèse un programme baptisé *Fuel3-D* qui permet de générer des arbres au format WFDS.

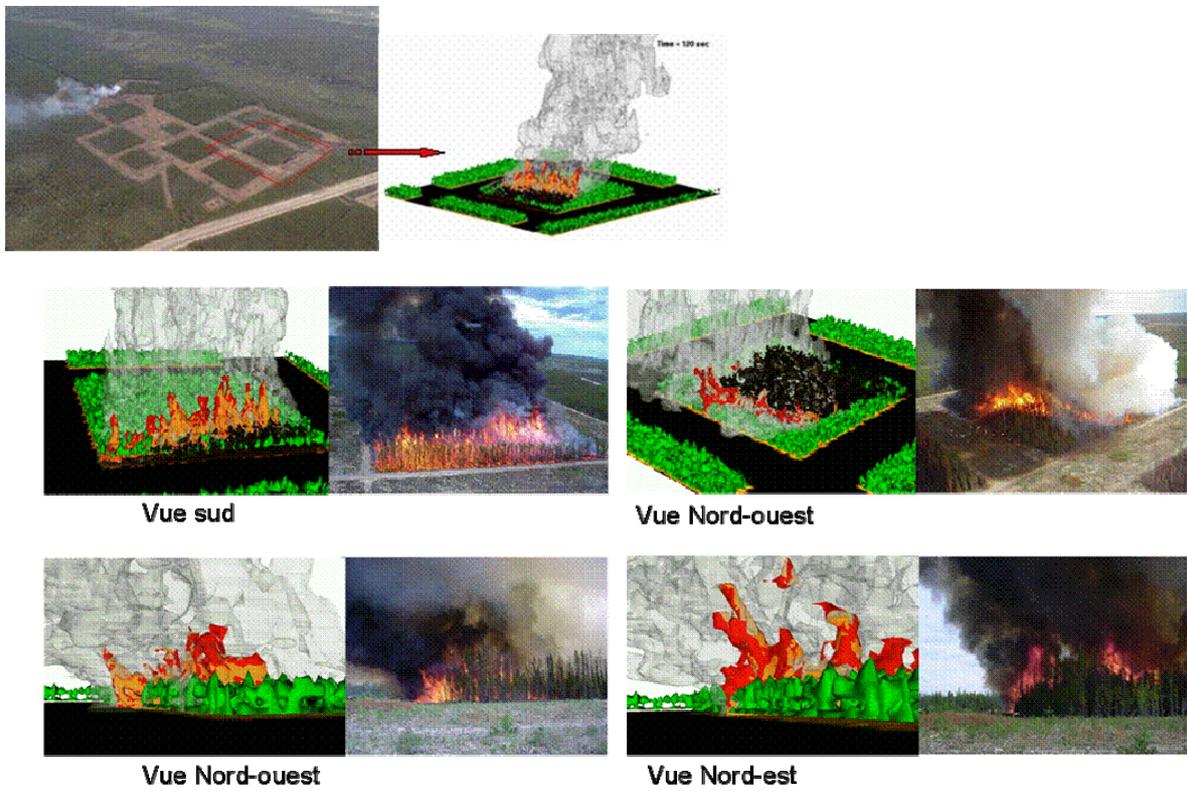


Fig. 0.10. Comparaison Modèle/Expérience sur les feux de cime du Canada (ICFME)

4.5. HIGRAD/FIRETEC

4.5.1. Généralités

FIRETEC est un modèle physique, développé par Rodman Linn durant sa thèse (Linn 1997). Il est couplé depuis 2000 au code tridimensionnel d'écoulements atmosphériques HIGRAD (Reisner *et al.* 2000). HIGRAD est un code d'écoulements atmosphériques *compressibles*, utilisé pour prédire l'évolution de phénomènes atmosphériques pour des écoulements à très haute résolution (<1 m à 100 m) ou à l'échelle mésoscopique (de 100 m à 1000 m). Ce modèle est précis *au second ordre en espace et en temps* dans un système de *coordonnées généralisées* (qui suivent le modèle numérique de terrain). Il a été conçu pour pouvoir prendre en compte de forts gradients de vitesse (HIGRAD est l'acronyme pour High GRADient), ce qui permet de réaliser des calculs dans le contexte de variation du terrain et au voisinage d'une source de chaleur importante. Il a été utilisé dans des domaines aussi variés que la dispersion de polluant, l'étude de la formation d'ouragans et la propagation des feux de forêts.

Le couplage entre HIGRAD et FIRETEC permet de décrire la dynamique d'un feu selon des conditions météorologiques arbitraires, notamment des variations de terrains (effet de la pente), de type de végétation, de stabilité atmosphérique (Linn *et al.* 2002 ; Linn *et al.* 2005a ; Pimont *et al.* 2006 ; Canfield *et al.* 2005). FIRETEC introduit dans HIGRAD une phase solide, sous forme d'une ou plusieurs familles de particules sur lesquelles sont résolues les équations de conservation de masse et d'énergie. Il permet de calculer les termes d'interactions entre la phase gazeuse et la phase solide (transferts convectifs et radiatifs notamment). FIRETEC inclut également un modèle de turbulence, basée sur une technique de MRA¹¹ (moyenne d'ensemble) qui vise à déterminer le comportement le plus probable du feu. Comme nous le verrons, ce code peut être utilisé de manière instationnaire en LES (*Large Eddy Simulation*), ce qui permet de résoudre les principaux tourbillons. Ceux-ci sont générés par le feu (flottabilité), ainsi que par les interactions vent/végétation (traînée) et vent/relief. Le contenu du modèle sera décrit dans cette partie avec des compléments dans les chapitres 3 et 4.

4.5.2. Validation du modèle

Ce modèle a été validé en terme de comportement global du feu sur des cas simples et d'autres plus complexes. L'exemple des feux de prairies d'Australie (Cheney *et al.* 1998) a été utilisé pour valider l'influence de la vitesse du vent sur la vitesse de propagation (Linn & Cunningham 2005). La réponse du modèle à la vitesse du vent s'est avérée très satisfaisante. En outre, le modèle a été capable de rendre compte de l'augmentation de la vitesse de propagation du feu avec la taille du front de feu (longueur de la ligne d'allumage), tel qu'observé au cours de ces mêmes expériences. Une situation plus complexe a été examinée en comparant les résultats de simulation à une série d'expérience des feux de cimes au Canada (Stocks *et al.* 2004). L'utilisation de FIRETEC a mis en évidence que les phénomènes latéraux observés dans les expériences étaient dus à des aspirations latérales d'air frais et que les tranchées pare feu ainsi que la méthode d'allumage avaient un impact significatif sur le comportement du feu (Linn *et al.* 2005b ; **Fig. 0.10**).

¹¹ multiple realization average

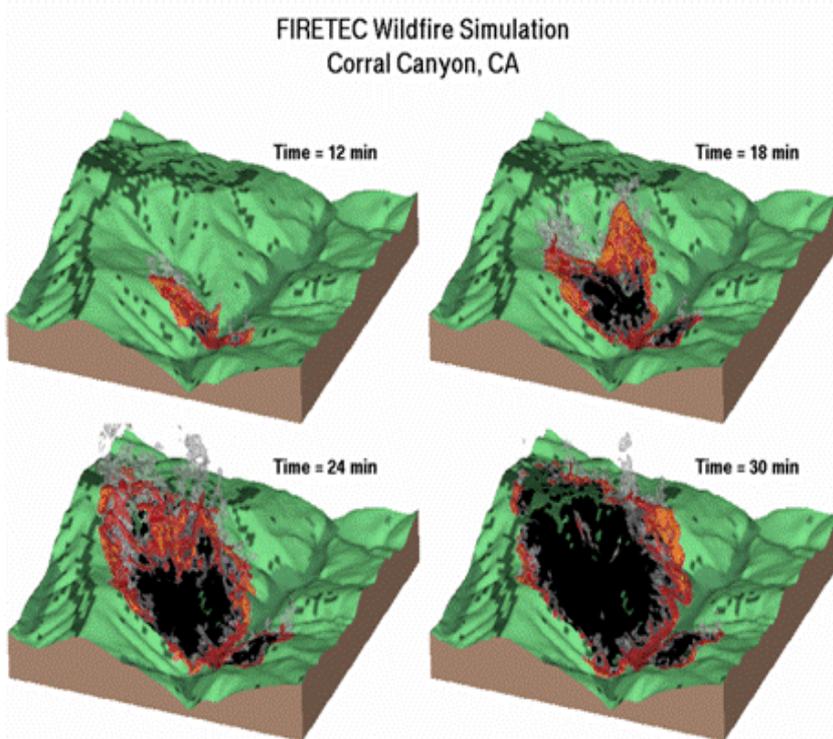


Fig. 0.11. Reconstitution par HIGRAD/FIRETEC du feu de Corral Canyon (Californie)

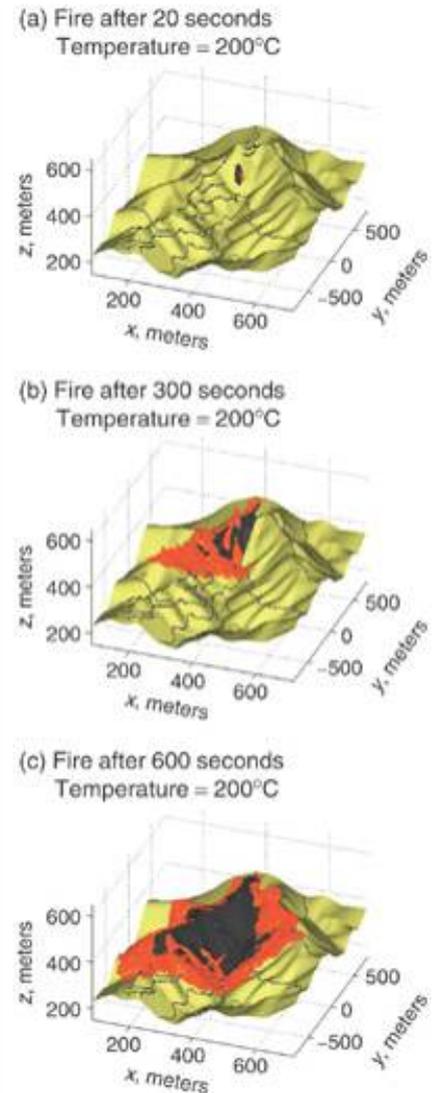


Fig. 0.12. Reconstitution par HIGRAD/FIRETEC du feu des collines d'Oakland et Berkeley (California, 1991)

Le comportement du modèle a également été validé à plus grande échelle (Bossert *et al.* 2000). Une reconstitution du feu de Corral Canyon qui se produit à Calabasas (Californie, 1996) a été réalisée (**Fig. 0.11**). Le feu s'est propagé lentement au fond du canyon dans la ripisylve, avant de monter brusquement selon une des pentes du canyon. Ce comportement a été très bien reproduit par le modèle avec un temps pour atteindre la crête de 28 minutes. Ce temps correspond à peu près à celui mis par le feu réel, alors qu'un modèle comme BEHAVE prédisait plus de 6 heures. Pour ce calcul, la résolution spatiale de FIRETEC a été dégradée à 10 mètres et l'environnement atmosphérique régional a été prescrit grâce au modèle RAMS (Regional Atmospheric Modeling System), initialement développé à l'Université du Colorado.

Une autre validation grande échelle a été conduite au Lawrence Livermore National Laboratory sur le feu d'Oakland (Californie, 1991) avec le même succès (Bradley 2002, **Fig. 0.12**). Pour ces simulations, le modèle méso-échelle COAMPS (Coupled Ocean-Atmosphere Mesoscale Prediction System) développé par l'U.S. Naval Research Laboratory (Monterey, Californie) et le National Atmospheric Release Advisory Center (NARAC) a été utilisé pour calculer l'environnement atmosphérique régional qui a servi pour les calculs avec HIGRAD/FIRETEC.

Ces résultats sont encourageants et montrent que les comportements globaux du modèle sont satisfaisants. Néanmoins, les données recueillies durant ces expériences ne permettent pas d'évaluer les grandeurs locales prédites par le modèle (densité, vitesse, température, flux radiatifs et convectifs). En effet, les données de ce type sont très rares. De plus, elles montrent une très forte variabilité (Alexander 1998 ; Cruz 2004). A cela s'ajoute le fait que les grandeurs sont calculées dans FIRETEC au moyen d'une distribution de probabilité (PDF¹²) à l'échelle de la maille dans un contexte où les mesures de terrains sont très ponctuelles. L'hypothèse d'ergodicité qui permet notamment de comparer des moyennes temporelles ponctuelles avec des moyennes spatiales dans les calculs d'écoulements paraît bien fragile dans le contexte de la physique du feu. Ainsi, de telles validations semblent donc vraiment difficiles à réaliser. Nous verrons qu'une autre approche est possible pour valider ce type de modèle. Il s'agit de la démarche qui consiste à valider des sous-modèles du modèle. Nous appliquerons cette démarche au modèle d'écoulement dans la végétation (y compris modèle de turbulence) ainsi qu'au modèle de rayonnement.

¹² Probability Distribution Function

4.5.3. Description du modèle

Dans ce paragraphe, seules les principales caractéristiques du modèle sont décrites. Pour une description plus détaillée du modèle, on pourra se référer à Linn (1997) ; Linn & Cunningham (2005) ; Pimont *et al.* (2007b) ; ou encore Reisner *et al.* (2000) pour HIGRAD.

4.5.4. HIGRAD

Equations résolues par HIGRAD

Le code HIGRAD résout les équations de Navier-Stokes compressibles en trois dimensions pour les composantes de la vitesse et les scalaires. Les équations sont :

$$\frac{\partial \rho u^i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^j u^i}{\partial x^j} = -\frac{\partial P}{\partial x^i} + \rho g^i - 2\varepsilon_{jk}^i \omega^j u^k + S_m^i + \alpha_m (\rho u^i - \rho u_e^i) \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \theta}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^j \theta}{\partial x^j} = S_\theta + \alpha_\theta (\rho \theta - \rho \theta_e) \quad (2)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u^j}{\partial x^j} = S_\rho \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho \chi_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho \chi_i u^j}{\partial x^j} = S_{\chi_i} + \alpha_{\chi_i} (\rho \chi_i - \rho \chi_i^e); \quad i = 1, 2, \dots, N_{scalar} \quad (4)$$

Les équations (1) à (4) sont respectivement les équations de conservation de la quantité de mouvement, de l'énergie, de la masse et d'espèces chimiques. u^i est la composante cartésienne de la vitesse dans la i ème direction spatiale (x, y, z). ρ est la densité du gaz dans une cellule du maillage. g^i est la composante du vecteur de l'accélération gravitationnelle. P est la pression atmosphérique dans une cellule. Le terme $2\varepsilon_{jk}^i \omega^j u^k$ représente les forces de Coriolis due à la rotation de la Terre ω . ε_{jk}^i est le tenseur anti-symétrique. La température potentielle θ est définie par $\theta = T(P_0/P)^{R_d/c_p}$ où P_0 est la pression de référence établie à 1000 mb, et T est la température. L'intérêt d'utiliser cette variable à la place de la température est qu'elle reste constante pour une expansion/compression isentropique. Enfin, x^i est la i ème direction sur la grille cartésienne et t est le temps.

L'équation de conservation pour les N_{scalar} constituants atmosphériques scalaires (vapeur d'eau, oxygène...) noté χ_i est incluse dans l'équation (4). Les termes sources/puits S_m^i , S_θ , S_ρ et S_{χ_i} sont dus aux processus physiques de sous-maillages calculés par le modèle FIRETEC qui prend en compte les réactions chimiques, les contraintes, la diffusion ainsi que les termes de production. L'équation d'état du gaz complète cet ensemble d'équations pour la phase gazeuse :

$$\frac{P}{P_0} = \left[\frac{\rho R_d \theta}{P_0} \right]^{c_v/c_p} \quad (5)$$

Dans l'équation (5), R_d est la constante pour l'air sec et c_v et c_p sont respectivement les capacités thermiques à volume et pression constants.

Conditions limites

Les conditions limites utilisées par le modèle peuvent être périodiques ou non. Elles peuvent varier dans le temps. Lorsque les conditions limites ne sont pas périodiques (notamment au toit du domaine), une relaxation des variables du modèle est utilisée (Damping de Rayleigh). Cette technique de relaxation vers un champ de variable ambiant est couramment utilisée dans les modèles atmosphériques (Jensen 1998). Elle permet d'appliquer des conditions limites ouvertes, sans pour autant avoir recours aux conditions de Neumann qui peuvent générer des solutions non physiques. Cette procédure revient en quelque sorte à éloigner artificiellement les parois du domaine, auxquelles on impose le champ ambiant.

Une procédure permet en effet d'établir une relaxation dans certaines zones du domaine de n'importe quelle variable du modèle χ (équations 1 à 4) à son état environnemental χ_e . Ce forçage s'écrit :

$$\frac{\partial \chi}{\partial t} \approx -\alpha_\chi (\chi - \chi_e), \quad (6)$$

où α_χ est le coefficient de relaxation.

L'équation (7) peut être résolue :

$$\chi^{n+1} = (1 - e^{-\alpha_\chi t}) \chi_e + e^{-\alpha_\chi t} \chi^* \quad (7)$$

où χ^* est l'état de la variable après itération des équations (1) à (4).

En pratique, toutes les variables du modèle sont relaxées à la même vitesse. Cette relaxation est découpée au sein de l'itération primaire du modèle, et est appliquée à la fin de chaque petit pas de temps.

Ce terme de relaxation, dont l'usage est classique dans la résolution des problèmes d'écoulements géophysiques, permet notamment l'emboîtement avec des modèles méso-échelles (paragraphe précédent).

Méthode des moyennes / Schéma numérique

Les écoulements modélisés par les équations de Navier-Stokes compressibles impliquent des échelles de temps très différentes. D'une manière générale, ils incluent le vent et l'ensemble des tourbillons résolus, la propagation des ondes de gravité et de pression. Il en résulte qu'une intégration stable et précise des équations tend à être limitée par les mouvements du fluide aux plus petites échelles. Dans le cas des écoulements atmosphériques, le phénomène limitant est la propagation d'ondes sonores. On peut résoudre explicitement ces phénomènes en conservant précision et stabilité, mais ceci impose de résoudre les équations avec des pas de temps de l'ordre de la milliseconde. Une alternative à cette solution est d'utiliser un schéma numérique qui minimise le coût et les effets de ces phénomènes afin d'utiliser des pas de temps plus importants. HIGRAD/FIRETEC utilise la « méthode des moyennes » (Nadiga *et al.* 1997; Reisner *et al.* 2000). Cette approche minimise le temps calcul nécessaire à la prise en compte des petites échelles de temps, en moyennant les forçages résultants sur des plus petits intervalles de temps, et en appliquant ces forçages moyennés à un schéma d'intégration d'ordre plus élevé, mais sur des pas de temps plus grands. HIGRAD/FIRETEC utilise le solver MPDATA (Smolarkiewicz & Grabowski 1990) comme schéma numérique d'advection à l'ordre élevé et un schéma d'advection « donor cell » à l'ordre le plus bas. Ceci résulte en un code précis au second ordre en temps et espace (Reisner *et al.* 2000).

4.5.5. FIRETEC

Le modèle FIRETEC itère les équations de conservation (sur les moyennes d'ensemble) de masse, de quantité de mouvement, d'énergie et d'espèces chimiques (Linn & Cunningham 2005). Le modèle consiste en deux ensembles d'équations pour les variables solides et gazeuses et d'une équation caractérisant la réaction du combustible. Ce modèle fournit donc les termes sources et puits à HIGRAD pour le calcul des variables de la phase gazeuse. Ceux-ci contribuent au schéma d'intégration de manière explicite et au premier ordre.

Dégradation du solide

Lorsqu'il est exposé à la chaleur, la dégradation du matériau se produit en quatre phases : vaporisation à 100°C, production de gaz non inflammables entre 200 et 280°C, production et pyrolyse des gaz inflammables entre 280 et 500°C. Elle se termine par une combustion des charbons entre 600 et 900 °C. L'inflammation des gaz autour de 600°K (~330°C). Cette chimie du feu est très complexe. FIRETEC la modélise de manière simplifiée par l'équation suivante :



$N_f=0.46$ et $N_o=0.54$ sont les coefficients stoechiométriques normalisés pour le combustible et l'oxygène ($N_f + N_o = 1$).

Equations de la phase solide

Les équations de la phase solide expriment la conservation de la masse pour le combustible et l'eau, ainsi que la conservation de l'énergie.

$$\frac{\partial \rho_f}{\partial t} = -N_f F_f \quad (9)$$

$$\frac{\partial \rho_w}{\partial t} = -F_w \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (c_p^{(f)} \rho_f + c_p^{(w)} \rho_w) \frac{\partial T_s}{\partial t} = & Q_{rad}^{solid} + h a_v (T_g - T_s) \\ & - F_w (H_w + c_p^{(w)} T_{vap}) + F_f (\Theta H_f - c_p^{(f)} T_{pyr} N_f) \end{aligned} \quad (11)$$

Dans ces équations, ρ_f et ρ_w sont les densités du combustible et de l'eau moyennées sur la grille. F_w est le taux de vaporisation de l'eau au sein de la phase solide, F_f est le taux de réaction de l'équation (8) ; il dépend notamment de la quantité d'oxygène présente dans la maille, du niveau de turbulence (vitesse de mélange), des proportions des réactifs et de la part du combustible en combustion (issue de la PDF et de la température de pyrolyse T_{pyr}). Q_{rad}^{solid} est l'irradiance du combustible. h est le coefficient convectif du combustible (qui dépend notamment du nombre de Reynolds) et a_v est l'aire efficace des éléments solides. T_g et T_s sont respectivement les températures des phases gazeuses et solides, T_{vap} est la température de l'évaporation de l'eau (373K) et T_{pyr} la température de pyrolyse du combustible (600K). H_f et H_w sont respectivement les énergies de vaporisation pour le combustible et l'eau (respectivement 8900 kJ/kg et 2300 J/kg). $c_p^{(f)}$ et $c_p^{(w)}$ sont respectivement les chaleurs spécifiques à pression constante pour le combustible et l'eau (respectivement 1400 et 4200 J/K/kg). Enfin, Θ est une fonction empirique qui répartit l'énergie produite par la réaction (8) entre le combustible et l'air.

Termes sources et puits des équations de Navier-Stokes (HIGRAD)

$$S_p = N_f F_f + F_w \quad (12)$$

$$S_m^i = -\frac{\partial R^{ij}}{\partial x^j} - \rho C_D a_v |u| u^i \quad (13)$$

$$S_\theta = \frac{\partial}{\partial x^j} \left(\sigma \frac{\partial \theta}{\partial x^j} \right) + \left(\frac{\theta}{c_p T_g} \right) \left[Q_{rad}^{gas} + h a_v (T_s - T_g) + (1 - \Theta) F_f H_f \right] \quad (14)$$

$$S_{scalar} = \frac{\partial}{\partial x^j} \left(\sigma \frac{\partial \rho \psi_{scalar}}{\partial x^j} \right) - N_{scalar} F_{scalar} \quad (15)$$

R^{ij} est le tenseur de Reynolds. Les termes visqueux du tenseur des contraintes ont ici été négligés devant la diffusion turbulente. La formulation du tenseur de Reynolds est décrite dans le paragraphe qui suit.

Représentation de la turbulence

Dans FIRETEC, la turbulence modélisée est la somme du spectre de la turbulence à trois échelles différentes (notée A , B et C). Les composantes du tenseur de Reynolds s'expriment sous la forme :

$$R^{ij} = R_A^{ij} + R_B^{ij} + R_C^{ij} \quad (16)$$

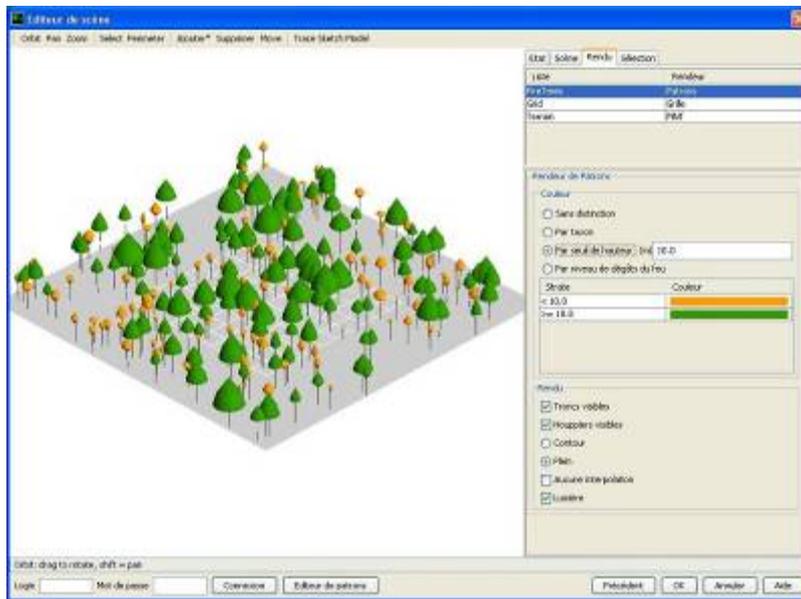
Ainsi, la turbulence modélisée est représentée par :

$$K = K_A + K_B + K_C \quad (17)$$

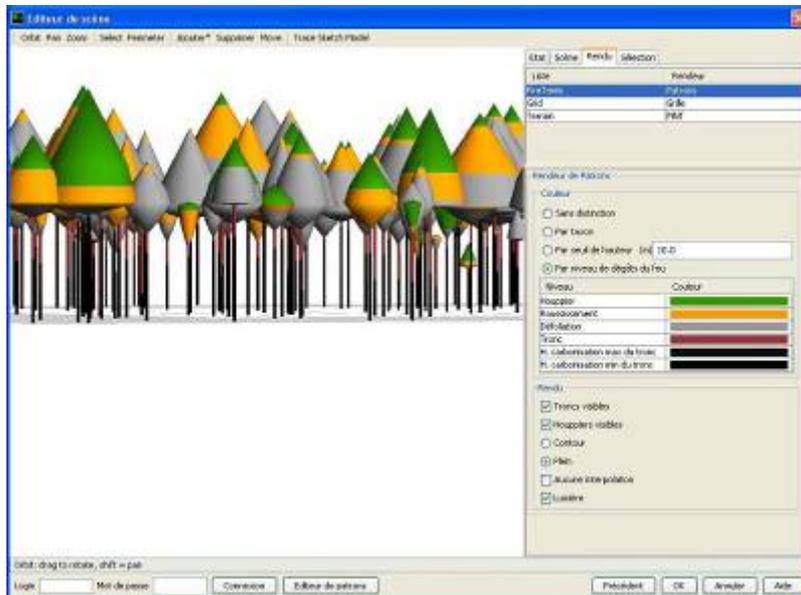
Selon l'approximation de Boussinesq, le tenseur de Reynolds au trois échelles s'exprime :

$$R_{\alpha}^{ij} = -\rho \nu_t^{\alpha} \left(\frac{\partial u^i}{\partial x^j} + \frac{\partial u^j}{\partial x^i} \right) + \frac{2}{3} \delta^{ij} \rho \left(\nu_t^{\alpha} \frac{\partial u^k}{\partial x^k} + K_{\alpha} \right) \quad (18)$$

Une description plus détaillée du modèle de turbulence est fournie dans le chapitre 3.



a) Editeur de scène



b) Visualisation des effets du feu sur les arbres

Fig. 0.13. Manager de combustible de FIREPARADOX

4.5.6. Transfert convectif et Transfert radiatif

Convection

Le transfert convectif est modélisé sous sa forme usuelle $h a_v (T_g - T_s)$ (Eq. 11), où h est le coefficient de transfert. h est calculé en fonction du nombre de Nusselt (Nu), lui-même corrélé au nombre de Reynolds. Il est donc fonction de u , de l'épaisseur de la particule et de Nu . L'écoulement transporte de la chaleur par advection (mouvement moyen) et diffusion turbulente (tourbillons de petite taille). Toute modification de ces processus a donc un effet sur le transfert convectif.

Rayonnement

Le transfert radiatif résulte de la résolution de l'Equation de Transfert Radiatif (ETR, voir chapitre 3). Dans FIRETEC, la méthode de résolution traditionnelle utilise une P1 approximation, résolue implicitement au moyen d'un solveur utilisant la méthode de résidu conjugué (Smolarkiewicz & Margolin 1994). Compte tenu de certaines limites observées avec cette méthode dans les végétations denses notamment, une méthode de MonteCarlo parallélisée a été développée dans le cadre de cette thèse en collaboration avec Gilles Scarella.

4.5.7. La végétation dans FIRETEC

La végétation dans FIRETEC est décrite au moyen de quatre fichiers correspondant à des tableaux spatialisés en trois dimensions. Les tableaux contiennent les variations spatiales dans la scène de :

- i) la densité de combustible fin (*rho_f*)
- ii) l'épaisseur du combustible fin (*ss*)
- iii) la teneur en eau du combustible fin (*moisture*)
- iv) la hauteur réelle de végétation dans la maille (*actualfueldepth*).

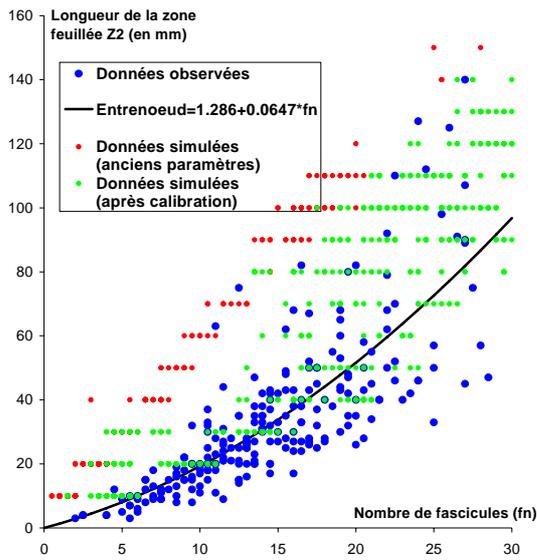
Ce dernier paramètre est utilisé dans le code pour intégrer le fait que le combustible n'occupe pas nécessairement l'intégralité de la première maille. Celle-ci mesure en général de l'ordre de 1.5 m. Lorsque la hauteur du combustible de la strate arbustive est inférieure à la hauteur de la maille, un calcul de sous-maille est réalisé. Il permet une évaluation séparée de l'écoulement au sein de la strate arbustive et au dessus de celle-ci. Ce calcul permet d'intégrer le fait que l'écoulement est moins rapide dans une strate arbustive compacte et basse, que dans une strate arbustive aérée et haute. Le code prend en compte cette vitesse effective au sein du combustible pour le calcul du transfert convectif. Une version encore en développement de la méthode de MonteCarlo vise à intégrer le même type de modélisation en sous-maille pour le transfert radiatif.

Un code FORTRAN permet de spatialiser des arbres (forme de paraboloïde, Linn *et al.* 2005a) et du combustible au sol. Celui-ci a été largement repris dans le contexte de cette thèse afin de pouvoir simuler des végétations homogènes ou hétérogènes de recouvrement et de taille d'hétérogénéités variable, ainsi que des représentations homogénéisées de celles-ci. Ce code permet également d'intégrer des arbres générés par AMAPsim.

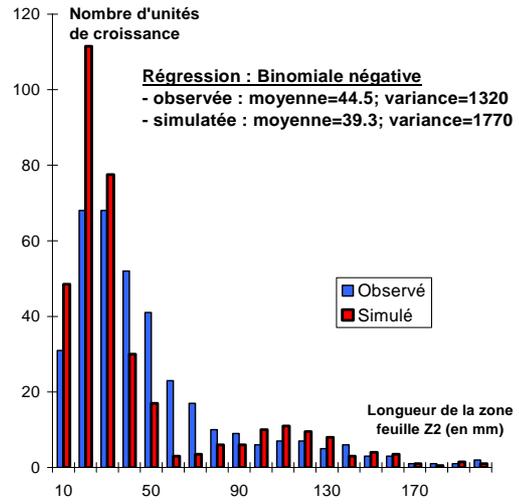
Dans le cadre de FIREPARADOX, un éditeur de combustible générique et tridimensionnel, couplé à la plate-forme de simulation CAPSIS¹³ (Coligny *et al.* 2004) est réalisé. Il permet notamment de fournir des fichiers de végétation au format de FIRETEC. Il permet notamment une visualisation des dégâts occasionnés par le feu (**Fig. 0.13**).

Enfin, il faut noter qu'une version multi-familles du code a été développée ; un travail de Jeremy Sauer (LANL) est actuellement en préparation.

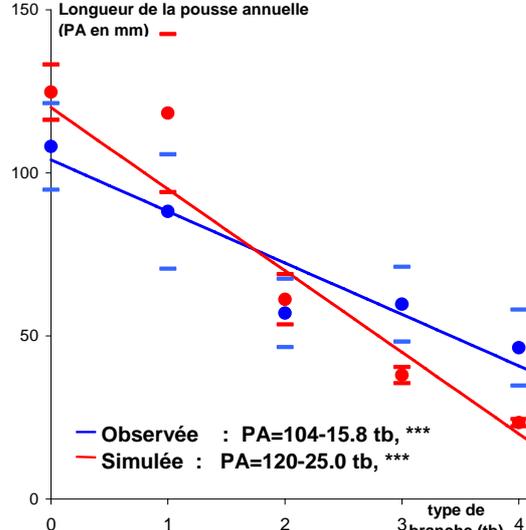
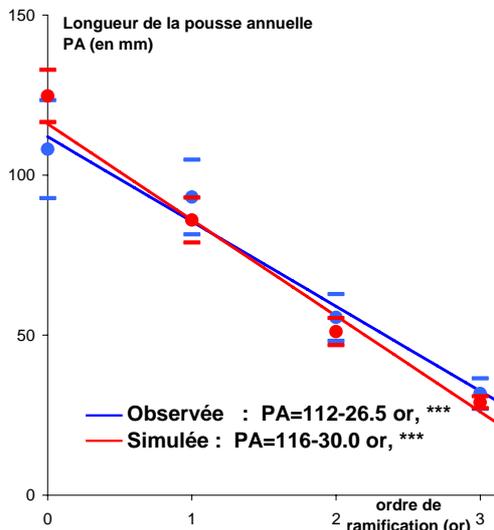
¹³ Croissance d'Arbres en Peuplement et Simulation d'Interventions Sylvicoles, <http://capsis.free.fr> : cette plate-forme de simulation maintenant développée par l'INRA à Montpellier (AMAP) intègre la plupart des modèles français (et certains modèles étrangers) de croissance ou de dynamique forestière.



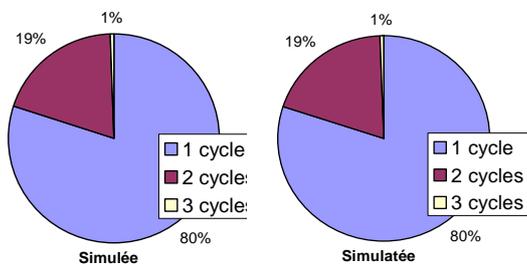
a) Calibration de l'entrenoed



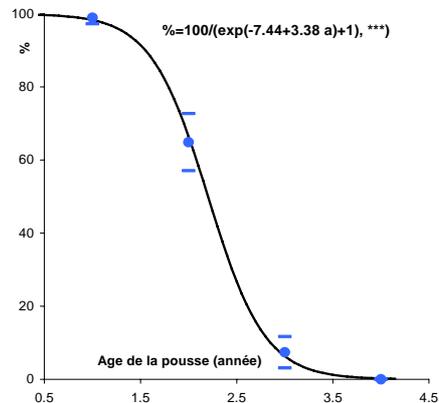
b) Distribution des unités de croissance



c) et d) Longueur de pousse en fonction de l'ordre de ramification et du type de branche



e) Fréquence du polycyclisme



f) Présence des aiguilles en fonction de leur âge

Fig.0.14. Bilan des mesures de calibration/validation effectuées lors des mesures au Pic Saint Loup de Février 2005

Annexe 0.1. Modélisation du pin d'Alep par méthode architecturale

Des mesures complémentaires ont été réalisées par CIRAD-AMAP et INRA-URFM-PIF en janvier 2005.

Calibration de la maquette pin d'Alep

La comparaison des données simulées et mesurées a permis de mettre en évidence le fait que la longueur de l'entrenoed était surestimée. En effet la longueur des parties feuillées (Z2) était trop longue par rapport au nombre de nœuds d'une pousse. Une calibration a permis d'améliorer les prédictions (a). Les autres comparaisons ont permis de conclure que le modèle était correctement paramétré. En effet, la distribution de la longueur des pousses annuelles (b), la longueur des pousses en fonction de l'ordre de ramification (c) et du type de branche (d), la fréquence du polycyclisme (e) et la durée de vie des aiguilles (f) obtenus à partir des simulations se sont révélées compatibles avec les données mesurées.

Pour valider de manière globale les données de fraction volumique extraites du modèle *AMAPsim* avec le nouveau jeu de paramètres, des données existantes dans la littérature ont été utilisées pour vérifier que l'ordre de grandeur de la biomasse totale prédite par le modèle était satisfaisant. Nous avons effectué ce travail pour le pin d'Alep (à partir des données de Lopez-Serrano *et al.* 2000 et Porté & Huc 2000), ainsi que pour la maquette du pin Maritime.

Ces données sont également conformes en terme d'ordre de grandeur avec celles obtenues par d'autres auteurs pour d'autres pins (Fournier *et al.* 1996 notamment ; Fractions volumiques moyennes pour les *Pinus resinosa Ait.* (0.0011), *Pinus banksiana Lamb.* (0.00062) et *Picea glauca* (0.0027))

Bibliographie

- Albini FA (1985) A model for fire spread in wildland fuels by radiation. *Combustion Science and Technology* **42**, 229-258.
- Alexander ME (1998) 'Crown fire thresholds in exotic plantations of Australasia'. Ph.D. Thesis, Australian National University, Canberra, Australia. 228p.
- Allgöwer B, Calogine D, Camia A, Cuinas P, Fernandes P, Francesetti A, Hernando C, Kötz B, Koutsias N, Lindberg H, Molina D, Morsdorf F, Ribeiro LM, Rigolot E, Séro-Guillaume O (2004) Methods for Wildland Fuel Description and Modelling : a state of the art. Programme européen EUFIRELAB. D-02-01. 51pp.
- Anderson DH, Catchpole EA, De Mestre NJ, Parks T (1982) Modelling the spread of grass fires. *Journal of Australian Math Soc. (Ser. B.) Journal* **23**, 451-466.
- Andersen HE, McGaughey RJ, Reutebuch SE (2005) Estimating forest canopy fuel parameters using LIDAR data. *Remote Sensing of Environment* **94**, 441-449.
- Andrews PL (1986) BEHAVE: Fire behaviour prediction and fuel modelling system – BURN subsystem, part 1, USDA Forest Service, Research paper INT-194. 130p.
- Armand D, Etienne M, Legrand C, Marechal J, Valette, JC (1993) Phytovolume, phytomasse et relations structurales chez quelques arbustes méditerranéens. *Annales des Sciences Forestières* **50**, 79-89.
- Barzi JF, De Reffye P, Caraglio Y (1997) Essai sur l'identification et la mise en œuvre des paramètres nécessaires à la simulation d'une architecture végétale. Le logiciel AMAPsim. Modélisation et simulation d'une architecture des végétaux, In : J. Bouchon, P. de Reffye and D. Barthelemy (Editors), Science update, INRA Editions 205-254 pp.
- Barthélémy D, Edelin C, Hallé F (1989) Architectural concepts for tropical trees. In : *Tropical Forests: Botanical dynamics, speciation and diversity*, L.B. Holm-Nielsen and H. Baslev (Eds.), Academic Press, London, pp.89-100.
- Bossert JE, Linn RR, Reisner J, Winterkamp J, Dennison P, Roberts D (2000). Coupled atmosphere-fire behaviour model sensitivity to spatial fuels characterisation. In Third Symposium on fire and Forest Meteorology, 9-14 January 2000, Long Beach, California., pages 21-26. American Meteorological Society.
- Bradley M (2002) This model can take the heat. *Science and Technology Review*. <http://www.llnl.gov/str/November02/Bradley.html>
- Brown JK (1978) Weight and density of crowns of Rocky Mountain conifers. Research Paper INT-197. Odgen, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 56p.
- Brown JK (1981) Bulk densities of non uniform surface fuels and their application to fire modelling. *Forest Science* **27(4)**, 667-683.
- Brown JK, Bevins CD (1986) Surface fuel loadings and predicted fire behavior for vegetation types in the northern Rocky Mountains. USDA Forest Service Intermountain Forest and Range Experiment Station, General Technical Report INT-358.
- Brunner A (1998) A light model for spatially explicit forest stand models. *Forest Ecology and Management* **107**, 19-46.
- Busing RT, Maily D (2004) Advances in spatial, individual-based modelling of forest dynamics. *Journal of Vegetation Science* **15**, 831-842.
- Canfield FM, Linn RR, Cunningham P, Goodrick SL (2005) 'Modelling effects of atmospheric stability on wildfire behaviour' In the Sixth symposium on fire and forest meteorology. Canmore, AB, Canada. 25-27 october 2005.
- Caraglio Y, Lagarde I, Blaise F (1996) Modélisation des peuplements combustibles : une nouvelle approche dans la prévention des incendies. *Forêt Méditerranéenne* **XVII(4)**, 324-328.
- Caraglio Y, Pimont F, Rigolot E (2006) *Pinus halepensis* Architectural Analysis for Fuel Modelling. In: Proceedings, MEDPINE 3. International Workshop on Mediterranean Pines. Bari, 2005. 15 p.
- Catchpole EA, Catchpole WR, Rothermel, RC (1993) Fire Behavior Experiments in Mixed Fuel Complexes. 1993. *International Journal of Wildland Fire* **3 (1)**, 45-57.
- Catchpole WR, Catchpole EA, Butler BW, Rothermel RC, Morris CA, Latham DJ (1998) Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel. *Combustion Science and Technology* **131**, 1-37.
- Cescatti A (1997) Modelling the radiative transfer in discontinuous canopies of asymmetric crowns. I. Model structure and algorithms. *Ecological Modelling* **101**, 263-274
- Cheney NP, Gould JS, Catchpole WR (1998) Prediction of fire spread in grasslands. *International Journal of Wildland Fire* **8 (1)**, 1-13.

- Chuvieco E (2003) Wildland fire danger estimation and mapping - The role of remote sensing data. World Scientific.
- Chuvieco ED, Riano D, *et al.* (2002) Estimation of fuel moisture content from multitemporal analysis of Landsat Thematic Mapper reflectance data: applications in fire danger assessment. *International Journal of Remote Sensing* **23(11)**, 2145-2162.
- Clark TL, Jenkins MA, Coen J, Packham D (1996a) A coupled atmosphere-fire model : convective feedback on fire-line dynamics. *Journal of Applied Meteorology* **35**, 875-901.
- Clark TL, Jenkins MA, Coen J, Packham D (1996b) A coupled atmosphere-fire model : role of the convective Froude number and dynamic fingering at the fireline. *International Journal of Wildland Fire* **6**, 177-190.
- Clark TL, Coen JL, Latham D (2004) Description of a coupled atmosphere-fire model. *International Journal of Wildland Fire*, **13**, 49-63.
- Cohen M, Etienne M, Rigolot E (2002) Modelling fuel distribution with cellular-automata for fuel-break assessment. In : Viegas D.X. (ed.), Millpress, Rotterdam, Proceedings of the IVth International Conference on Forest Fire Research, Luson Coimbra, Portugal 2002/11/18-23. 9 p.
- Cohen M, Rigolot E, Valette JC (2004) From the vegetation to the inputs of a fire model: fuel modelling for wildland-urban interface management. In: Warm International Workshop on "Forest Fires in the Wildland-Urban Interface and Rural Areas in Europe: an integral planning and management challenge", Athens, May 2003. pp 113-120.
- Coligny F. de, Ancelin P, Cornu G, Courbaud B, Dreyfus P, Goreaud F, Gourlet-Fleury S, Meredieu C, Orazio C, Saint-André L (2004) CAPSIS : Computer-Aided Projection for Strategies in Silviculture : Open architecture for a shared forest-modelling platform. In Proceedings of the IUFRO Working Party S5.01-04 conference (September 2002, 8-15) Harrison Hot Springs Resort, British Columbia, Canada, pp. 371-380.
- Countryman CM (1982) Physical characteristics of some Northern California brush fuels. USDA Forest Service General Technical Report. PSW-61, Pacific Southwest Forest and Range Exp. Stn. Berkeley, California.
- Cruz MG (2004) Ignition of crown fuels above spreading surface fires. PhD Dissertation, University of Montana, Missoula. June 2004, 240 pp.
- Daligault O, Moro C (1991) Caractéristiques physiques des aiguilles de pin. Rapport interne de l'équipe Prévention des Incendies de Forêts. 17 p.
- Deeming JE, Lancaster JW, Fosberg MA, Furman WR, Schroeder MJ (1974) The National Fire- Danger Rating System. United States Department of Agriculture, Forest Service, Research Paper RM-84, Rocky Mountain Forest and Range Experiment Station, Fort Collins, Colorado. 165 pages.
- Dupuy J-L, Larini M (1999) Fire spread through a porous forest fuel bed: a radiative and convective model including fire-induced flow effects. *International Journal of Wildland Fire* **9(3)**, 157-172.
- Dupuy J-L (1997) Mieux comprendre et prédire la propagation des feux de forêts : expérimentation, test et proposition de modèles. Thèse de doctorat. Univ. Claude Bernard. Lyon. 274 pp.
- Dupuy J-L (2000a). Testing two radiative physical models for fire spread through porous forest fuel beds. *Combustion Science and Technology* **155(1)**, 149-180.
- Dupuy J-L (2000b). Les apports possibles de la physique du feu à la conception et à l'entretien des coupures de combustible. *Forêt Méditerranéenne* **XXI(4)**, 497-510.
- Dupuy J-L, Morvan D (2005) Numerical simulation of a crown fire spreading toward a fuel break using a multiphase formulation. *International Journal of Wildland Fire* **14**, 141-151.
- Emmons, H (1963) Fire in the forest. *Fire Research Abstracts and Reviews* **5(3)**, 163-178.
- Etienne M, Legrand C, Armand D (1991) Stratégies d'occupation de l'espace par les petites ligneux après débroussaillage en région méditerranéenne française. Exemple d'un réseau de pare-feu dans l'Esterel. *Annales des Sciences Forestières* **48**, 667-677.
- Etienne M, Rigolot E (2001) Méthodes de suivi des coupures de combustible. RCC n°1- Ed de la Cardère Morières, 63p.
- Falkowski MJ, Gessler PE, Morgan P, Hudak AT, Smith AMS (2005) Characterizing and mapping forest fire fuels using ASTER imagery and gradient modelling. *Forest Ecology and Management* **217**, 129-146.
- Fernandes PM, Rego FC (1998) Equations for estimating fuel load in shrub communities dominated by *Chamaespartium tridentatum* and *Erica umbellata*. Pp. 2553-2564 In Proc. 3rd International Conf. on Forest Fire Research & 14th Fire and Forest Meteorology Conf. (Ed. D.X. Viegas). ADAI, University of Coimbra.

- Fernandes PM, Catchpole WR, Rego FC (2000) Shrubland fire behaviour modelling with microplot data. *Canadian Journal of Forest Research* **30**, 889-899.
- Finney MA (1998) FARSITE : Fire area simulator-model development and evaluation. USAD Forest Service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, CO. Research Paper, RMRS-RP-4.
- Fons W (1946) Analysis of fire spread in light forest fuels, *Journal of Agricultural Resources*, **72 (93)**, 93-121.
- Forestry Canada Fire Danger Group (1992) Development and structure of the Canadian forest fire behaviour prediction system. Information report ST-X-3. Forestry Canada, Ottawa, 63p.
- Fournier RA, Landry R, August NM, Fedosejevs G, Gauthier RP (1996) Modelling light obstruction in three conifer forests using hemispherical photography and fine tree architecture. *Agricultural and Forest Meteorology* **82**, 47-72.
- Frandsen WH (1971) Fire spread through porous fuels from the conservation of energy. *Combustion and Flame Journal* **16**, 9-16.
- Goels NS, Strebel DE (1984) Simple beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies. *Agronomy Journal* **76**, 800-802.
- Gower ST, Kucharik CJ, Norman JM (1999) Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR and Net Primary Production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment* **70**, 29-51.
- Grishin AM, Gruzin A, Zverev V (1983) Mathematical modeling of the spreading of high-level forest fires. *Soviet Physics Doklady* **28(4)**, 328-330.
- Grishin AM (1997) A mathematical modelling of forest fires and new methods of fighting them. Publishing House of the Tomsk University, Tomsk, Russia, F. Albini (Eds.).
- Hallé F, Oldeman RAA, Tomlinson RB (1978) Tropical trees and forests. *Springer Verlag*, Berlin, 441 p.
- Harding DJ, Lefsky MA, Parker GG (2001) Laser altimetry canopy height profiles : method and validation for closed canopy, broadleaved forest. *Remote Sensing Environment* **76**, 283-297.
- Hely C, Forgeard F (1998) Hétérogénéité d'une lande haute à *Ulex europaeus* en relation avec la propagation du feu (Bretagne, France). *Canadian Journal of Botany* **76**, 804-817.
- Henning JG, Radtke PJ (2006) Detailed stem measurements of standing trees from ground-based scanning LIDAR. *Forest Science* **52 (1)**, 67-80.
- Hottel HC, Williams GC, Steward FR (1965) The modeling of fire spread through a fuel bed. In 'Proceedings of the Tenth Symposium (International) on combustion', The Combustion Institute: Pittsburgh, pp 997-1007.
- Jensen TG (1998) Open Boundary conditions in stratified ocean models. *Journal of Marine Systems* **16**, 297-322.
- Johnson AF, Woodward P, Titus S (1989) Lodgepole pine and white spruce crown fuel weights predicted from height and crown width. *Canadian Journal of Forest Research* **19**, 527-530.
- Keane R, Burgan R, Wagtenonk J (2001) Mapping wildland fuels for fire management across multiple scales: Integrating remote sensing, GIS, and biophysical modeling. *International Journal of Wildland Fire* **10**, 301-319.
- Larini M, Giroud F, Porterie B, Loraud JC (1998) A multiphase formulation for fire propagation in heterogeneous combustible media. *International Journal of Heat and Mass Transfer* **41**, 881-897.
- Linn RR (1997) A transport Model for Prediction of Wildfire Behavior. Sci. Rep. LA -13334-T, 195pp., Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.
- Linn RR, Reisner J, Colman JJ, Winterkamp J (2002) Studying wildfire behavior using FIRETEC. *International Journal of Wildland Fire* **11**, 233-246.
- Linn RR, Cunningham P (2005) Numerical simulations of grass fires using a coupled atmosphere-fire model: basic fire behavior and dependence on wind speed. *Journal of Geophysical Research* **110**. **D13107**. 19pp.
- Linn RR, Winterkamp J, Colman JJ, Edminster C, Bailey J (2005a) Modeling interactions between fire and atmosphere in discrete element fuel beds. *International Journal of Wildland Fire* **14**, 37-48.
- Linn RR, Canfield J, Winterkamp J, Cunningham P, Colman JJ, Edminster C, Goddrick SL (2005b) Numerical Simulations of Fires Similar to the International Crown Fire Modeling Experiment. In: Proceedings of the Sixth Symposium on Fire and Forest Meteorology, American Meteorological Society, Canmore, Alberta, 25-27 October.
- Linn RR, Winterkamp J, Canfield J, Sauer J, Colman J, Reisner J, Edminster C, Pimont F, Dupuy JL, Cunningham P (2006) Versatility of FIRETEC, a physics-based wildfire model. *Forest Ecology and Management* **234S (S94)**, 11p.

- Lopez-Serrano FR, Landete-Castillejos T, Martinez-Millan J, Cerro-Barja AD (2000) LAI estimation of natural pine forest using a non-standard sampling technique. *Agricultural and Forest Meteorology* **101**, 95-111.
- Marechal J (1990) Le phytovolume et la phytomasse des strates basses sur les coupures de combustible, en region mediterrannéene. INRA, Station de Sylviculture Méditerranéenne, Doc. PIF9012. Avignon.
- Martinez P (1993) Modélisation de la croissance et de l'architecture du pin d'Alep. Mémoire de D.E.A., Ecosystèmes continentaux, arides, méditerranéens et montagnards; Rapport d'Ingénieur Forestier, Spécialisation Recherche; ENGREF Nancy, Université des Sciences et Techniques de Saint-Jérôme Marseille, Agence MTDA, 39 pp.
- McArthur AG (1966) Weather and grassland fire behaviour. *Australian Forest and Timber Bureau Leaflet Journal* **100**.
- McCaw L (1991) Measurement of fuel quantity and structure for bushfire research and management. Pp. 147-155 In Proc. Conf. Bushfire Modelling and Fire Danger Rating Systems, Cheney, N.P., & A.M. Gill (Eds.), CSIRO Australia, Canberra.
- Mell WE, Jenkins MA, Gould J, Cheney P (2007). A physics-based approach to modelling grassland fires. *International Journal of Wildland Fire* **16(1)**, 1-22.
- Mitsopoulos ID, Dimitrakopoulos AP (2007) Canopy fuel characteristics and potential crown fire behaviour in Aleppo pine (*Pinus halapensis* Mill.) forests. *Annales of Forest Sciences* **64**, 287-299.
- Mori S, Hagihara A (1991) Crown profile of foliage area characterized with the Weibull distribution in ahinoki (*Chamaecyparis obtusa*) stand, *Trees* **5**, 149-152.
- Morvan D, Dupuy JL (2001) Modeling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation. *Combustion and Flame* **127**, 1981-1994.
- Morvan D, Dupuy JL (2004) Modeling the propagation of a wildfire through a Mediterranean shrub using a multiphase formulation. *Combustion and Flame* **138**, 199-210.
- Nackaerts K, Wagendorp T, Coppin P, Muys B, Gombeer R (1999) A correction of indirect LAI measurements for a non-random distribution of needles on shoots. Proceedings of ISSR 1999. USA, Nevada.
- Nadiga BT, Hecht MW, Margolin LG, Smolarkiewicz PK (1997) On simulating flows with multiple time scales using the method of averages. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics* **9**, 281-292.
- Nelson RM, Adkins CW (1988) A dimensionless correlation for the spread of wind-driven fires. *Canadian Journal of Forest Research* **18**, 391-397.
- Nelson RM (2003) Power of a fire - A thermodynamic analysis. *International Journal of Wildland Fire* **12**, 51-65.
- Nilson T, Ross J (1997) Modelling radiative transfer through forest canopies : implications for canopy photosynthesis and remote sensing. In The Use of Remote Sensing in the Modelling of Forest Productivity. Eds Gholz, HL. Nakane, K. Shimoda, H : p 23-60. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Noble IR, Bary GAV, Gill AM (1980) McArthur's fire danger meters expressed as equations. *Australian Journal of Ecology* **5**, 201-203.
- Pagni PJ, Peterson TG (1973) Flame spread through porous fuels. In 'Proceedings of the 14th International Symposium on Combustion'. The Combustion Institute: Pittsburgh, p 1099-1107
- Papió C, Trabaud L (1991) Comparative study of the aerial structure of five shrubs of Mediterranean shrub lands. *Forest Science* **7**, 146-159.
- Parsons RA (2006) Fuel3-D : A spatially explicit fractal fuel distribution model. In Andrews PL, Butler BW. 2006. Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings. 28-30 March 2006; Portland, OR. Proceedings RMRS-P-41 Fort Collins, CO: USDA, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Pimont F (2004) Modifications de l'architecture du Chêne kermès (*Quercus coccifera*, L.) en fonction de l'environnement de croissance. *Rapport de DEA BEE. Université de Montpellier II*, 63p.
- Pimont F, Linn RR, Dupuy JL, Morvan D (2006b) Effects of vegetation description parameters on forest fire behavior with FIRETEC. *Forest Ecology and Management* **234S (S120)**, 12p.
- Pimont F, Dupuy JL, Linn RR, Dupont S (2007a) Wind-flows simulated with FIRETEC in a canopy and on a fuel-break. Soumis à *International Journal of Wildland Fire*.
- Pimont F, Dupuy JL, Morvan D (2007b) Effect of vegetation heterogeneity on radiative transfer in forest fire. Soumis à *International Journal of Wildland Fire*.

- Popescu SC, Wynne RH, Nelson RF (2003) Measuring individual tree crown diameter with lidar and assessing its influence on estimating forest volume and biomass. *Canadian Journal of Forest Research* **29**, 167-180.
- Porté A, Bosc A, Champion I, Loustau D (2000) Estimating the foliage area of Maritime pine (*Pinus pinaster Ait*) branches and crowns with application to modelling the foliage area contribution in the crown. *Annales Forest Science* **57**, 73-86.
- Pyne SJ, Andrews PL, Laven RD (1996) Introduction to wildland fire, 2nd ed. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- Rego FC, Pereira J, Fernandes P, Almeida A (1994) Biomass and aerial structure characteristics of some Mediterranean shrub species. In Proc. 2nd Int. Conf. on Forest Fire Research. 21-24 Nov. 1994, Coimbra.
- Reisner JM, Wynne S, Margolin L, Linn RR (2000) Coupled Atmospheric-Fire Modeling Employing the Method of Averages. *Monthly Weather Review* **128**, 3683-3691.
- Riano D, Meier E, Allgöwer B, Chuvieco E, Ustin SL (2003) Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. *Remote Sensing of Environment* **86(2)**, 177-186.
- Riano D, Chuvieco E, Condes S, Gonzalez-Matesanz J, Ustin SL (2004) Generation of crown bulk density for *Pinus sylvestris* L. from lidar. *Remote Sensing of Environment* **92**, 345-352.
- Rigolot E, Costa M (2000) Conception des Coupures de combustible. RCC n°4- Ed de la Cardère Morières, 154p.
- Rochdi N, Fernandes R, Chelle M (2006) An assessment of needles clumping within shoots when modeling radiative transfer within homogeneous canopies. *Remote Sensing of Environment* **102 (1-2)**, 116-134.
- Rothermel RC, Anderson HE (1966) Fire spread characteristics determined in the laboratory. USDA For. Serv. Res. Pap. INT-30, Intermt. For. and Range Exp. Stn. Ogden, Utah.
- Rothermel RC (1991) Predicting behaviour and size of crown fires in the Northern Rocky Mountains. Intermountain Research Paper INT-438, USDA Forest Service. Ogden, UT.
- Rundel PW, Parsons DJ (1979) Structural changes in chamise (*Adenostoma fasciculatum*) along a fire-induced age gradient. *Journal of Range Management* **32(6)**, 462-466.
- Scott JH, Hungerford RD (1997) Characterizing a shrub fuel complex for fire behaviour modelling . In Proc. Symp. On Fire in California Ecosystems: Integrating Ecology, Prevention, and Management, San Diego, California.
- Scott JH, Reinhardt ED (2001) Assessing Crown Fire Potential by Linking Models of Surface and Crown Fire Behavior. USDA Research Paper RMRS-RP-29. Sept 2001.
- Sinoquet H, Thalissawanyangkura S, Mabrouk H, Kasemsap P (1998) Characterization of the light environment in canopies using 3D digitizing and image processing. *Annals of Botany* **82**, 203-212.
- Sinoquet H, Sonohat G, Phattaralerphong J, Godin C (2005) Foliage randomness and light interception in 3-D digitized trees: an analysis from multiscale discretization of the canopy. *Plant, Cell and Environment* **28 (9)**, 1158-1170.
- Smolarkiewicz PK, Grabowski WW (1990) The multidimensional positive definite advection transport algorithm: nonoscillatory option. *Journal of Computational Physics* **86**, 355-375.
- Smolarkiewicz PK, Margolin LG (1994) Variational solver for elliptic problems in atmospheric flows. *Applied Mathematical and Computational Sciences* **4**, 527-551.
- Stocks BJ, Alexander ME, Lanoville RA (2004) Overview of the International Crown Fire Modelling Experiment (ICFME). *Canadian Journal of Forest Research* **34 (8)**, 1543-1547.
- Trabaud L (1979) Etude du comportement du feu dans la garrigue à chêne kermès à partir des températures et des vitesses de propagation. *Annales de Sciences Forestières* **36**, 13-38.
- Van Wagner CE (1977) Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research* **7**, 23-24.
- Vigy O, Rigolot E, Valette JC (2005) Fire Star Wildland Fuel Structure: Model Results. FIRE STAR EVG1-CT-2001-00041. Deliverable D6-04.
- Weber R (1991) Modelling fire spread through fuel beds. *Progress in Energy and Combustion Science Journal* **17**, 67-82.
- Wang YP, Jarvis PG (1990) Description and validation of an array model . MAESTRO. *Agricultural and Forest Meteorology* **51**, 257-280.

Chapitre 1. Sensibilité de FIRETEC aux caractéristiques physiques de combustibles homogènes

1. Introduction

La propagation du feu dépend d'un certain nombre de caractéristiques de la végétation, comme la taille des particules, la hauteur de végétation, la fraction volumique, le rapport surface/volume ou la teneur en eau du combustible (Catchpole *et al.* 1993 ; Catchpole *et al.* 1998). Comme cela a été décrit au chapitre 0, les résultats des différents modèles dépendent généralement directement de la charge en combustible.

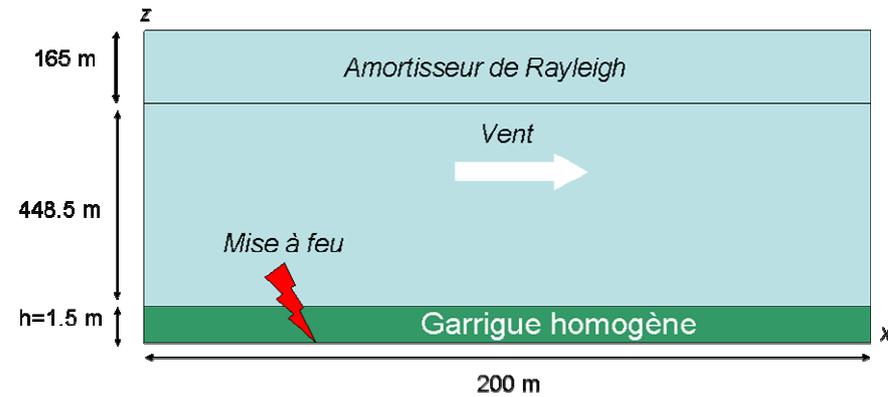
FIRETEC a déjà été utilisé pour évaluer les effets du vent sur la propagation et comparer les résultats à des expériences de terrain (Linn & Cunningham 2005). Le présent chapitre constitue une étude de sensibilité du modèle aux caractéristiques de la végétation (la fraction volumique et le rapport surface/volume). Il s'appuie sur des simulations réalisées en garrigue (dix-neuf simulations) et dans des écosystèmes arborés (sept simulations). Ici, un grand nombre de données quantitatives et qualitatives sont extraites des résultats du modèle, en particulier dans le cas des garrigues. Ces extractions permettent d'examiner en détail le comportement du feu prédit par le modèle et aussi de contrôler le fonctionnement de ce dernier. Les caractéristiques globales de la propagation du feu (vitesses de propagation et intensité) ont été calculées, et ont permis de comparer la sensibilité du modèle à la fraction volumique avec des données expérimentales et d'autres modèles. D'autres données qualitatives, comme la vitesse de l'écoulement ou les températures prédites ont été extraites et sont présentées.

Les calculs présentés ici ont été réalisés en deuxième année de thèse. Depuis, nous avons mis en évidence que le modèle de rayonnement pouvait ne pas converger, en particulier en sur-absorbant le flux radiatif lorsque le milieu était dense. Nous fournirons plus de détails sur cette divergence plus loin (notamment annexe 1.1). Les résultats que nous présentons ici ne sont que légèrement affectés par ces problèmes. En premier lieu, il faut noter qu'ils ne concernent que les calculs réalisés avec les fractions volumiques les plus élevées (supérieures à $1500 E^{-6}$). Ensuite, Gilles Scarella (post doc dans notre unité entre 2005 et 2007) a réalisé des calculs avec FIRETEC utilisant différents codes de rayonnement et a notamment comparé les résultats obtenus avec la version du rayonnement de la présente étude à ceux obtenus avec un code utilisant la méthode de MonteCarlo (méthode de référence), sans observer de différences qualitatives et quantitatives très significatives dans les résultats de simulation. Cette étude du comportement du modèle en conditions homogènes ne représentant pas l'objectif principal de la thèse, nous la présentons en l'état. Nous comptons cependant reprendre cette étude avec la méthode de MonteCarlo à l'issue de la thèse.

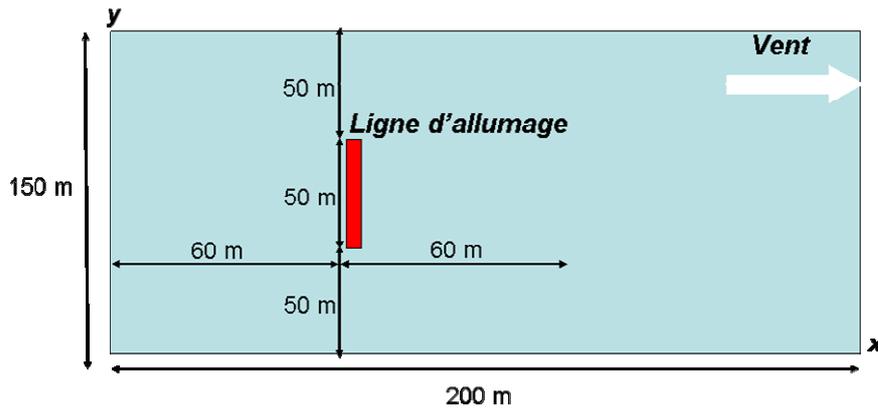
La partie 3 concerne la propagation du feu dans les canopées. Elle correspond à une partie d'une communication à l'International Conference on Forest Fire Research de Coimbra en 2006 (Pimont *et al.* 2006). On ne présente ici que les résultats concernant le combustible homogène, même si l'étude comportait également du combustible hétérogène. Une étude en condition hétérogène de beaucoup plus grande envergure a été réalisée (chapitre 4), notamment en pré-calculant les champs de vent ambiant (chapitre 3).

Tableau 1.1. Principales caractéristiques du combustible

	Fraction volumique α (E^{-6})	Rapport surface /volume σ (m^{-1})	Teneur en eau (%)	Hauteur (m)
Etude "Fraction volumique"	100-300-500-750-1000-1250-1500-2000-3000-5000	6000	70	1.5
Etude "rapport surface/volume"	300-750-1250	4000-6000-7000-10000	70	1.5



a) Vue de côté



b) Vue du ciel

Fig. 1.1 Caractéristiques du domaine de simulation

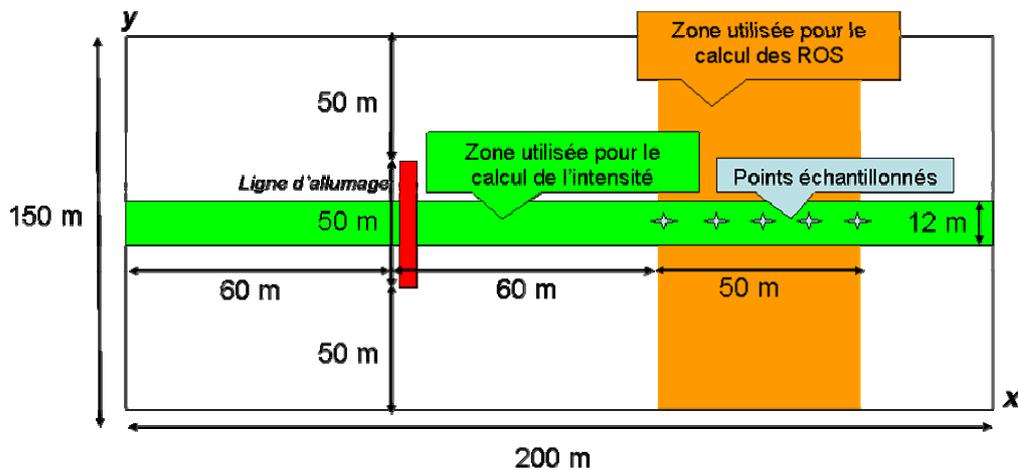


Fig. 1.2 Analyse des sorties de calculs : zone d'échantillonnage des données pour le calcul du ROS, de l'intensité du feu et des données ponctuelles

2. Cas des strates arbustives

2.1. Méthodes

Description du combustible

Dix végétations homogènes de type « maquis » de densité variable ont été définies (**Tableau 1.1**, sensibilité à la fraction volumique). Elles correspondent à des fractions volumiques variant de 10^{-4} à 5.10^{-3} . Afin de faciliter la lecture, les valeurs de fraction volumique seront exprimées en millièmes (10^{-4} et 5.10^{-3} , respectivement notés 100 E⁻⁶ et 5000 E⁻⁶). Les moins denses correspondent à des végétations très peu denses (valeur typique des canopées de pin d'Alep), alors que les plus denses correspondent à des densités proches de celles de litières (de l'ordre de 10^{-2}). La hauteur de végétation est de 1.5 m ; ceci a impliqué que la végétation occupe l'intégralité de la couche de cellules la plus voisine du sol ($k=1$). Dans ces cas, le rapport surface/volume σ a été choisi égal à 6000 m^{-1} (valeur moyenne typique). Par ailleurs, afin d'étudier l'effet du rapport surface/volume, neuf maquis supplémentaires ont été définis, pour compléter les simulations réalisées avec $\sigma = 6000 \text{ m}^{-1}$ (**Tableau 1.1**, sensibilité au rapport surface/volume) : trois valeurs de σ entre 4000 et 10000 m^{-1} , pour trois valeurs de fraction volumiques (faible, moyenne et élevée).

D'une manière générale, ces 19 combustibles permettent de balayer l'ensemble des valeurs que l'on rencontre dans les végétations réelles (Vigy *et al.* 2005).

Caractéristiques des simulations

Les dimensions horizontales du domaine pour ces séries de simulations sont $200 \text{ m} \times 150 \text{ m}$ (**Fig. 1.1.a et b**). La résolution horizontale est de deux mètres, alors que le maillage est dilaté selon l'axe des z , pour commencer à 1.5 m près du sol et finir à 615 m de haut (toit du domaine). Chaque simulation a été réalisée sur 12 processeurs. Un profil logarithmique a été utilisé pour l'initialisation du vent ambiant, soufflant selon l'axe des x . La vitesse du vent dans ces conditions ambiantes est de 6 m.s^{-1} à 10 m de haut. Le feu est allumé sur une ligne de 50 m de long, perpendiculaire au vent incident et débutant à 60 m du début du domaine (**Fig. 1.1.b**).

Sorties de calcul

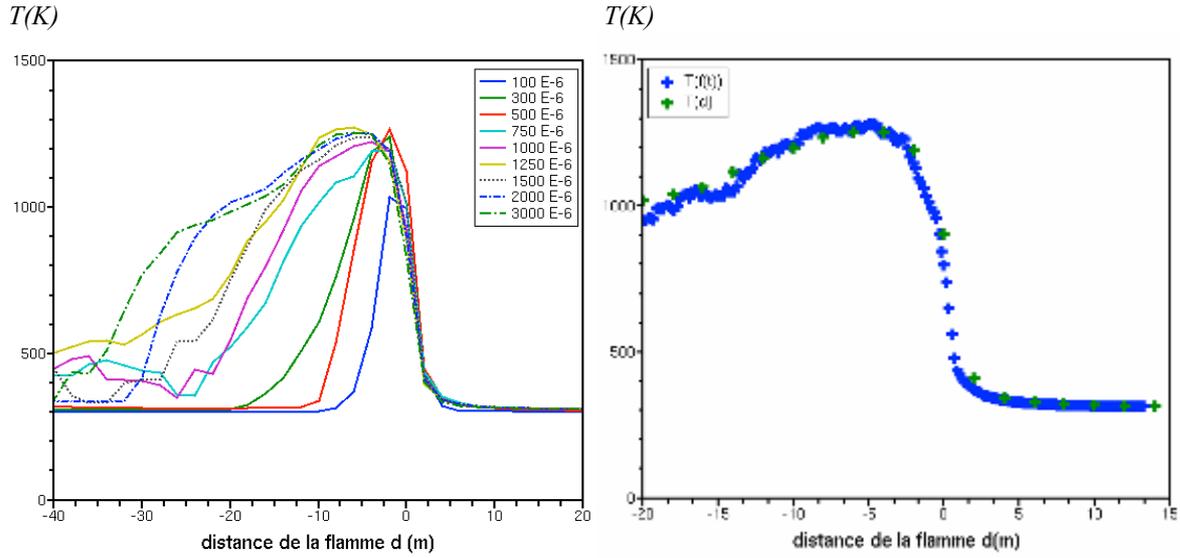
Le comportement des différents feux simulés a été déterminé à l'aide de plusieurs types de sorties de calcul. Sur la base des champs de variables tridimensionnels instantanés stockés toutes les secondes, nous avons extrait (**Fig. 1.2**) :

- les positions du front pour le calcul des ROS (avant, latéraux, arrière),
- le combustible consommé pour le calcul de l'intensité,
- des données en certains points échantillonnés,
- les champs tridimensionnels pour la température.

L'analyse de la position du front s'appuie sur une recherche des lieux du domaine où le champ de température atteint ou dépasse 600 K (température de référence pour la pyrolyse). Sur la base de ces positions, les vitesses de propagation ont été déterminées sur la base du temps mis par le feu pour parcourir 50 mètres (après avoir parcouru 60 mètres depuis l'allumage).

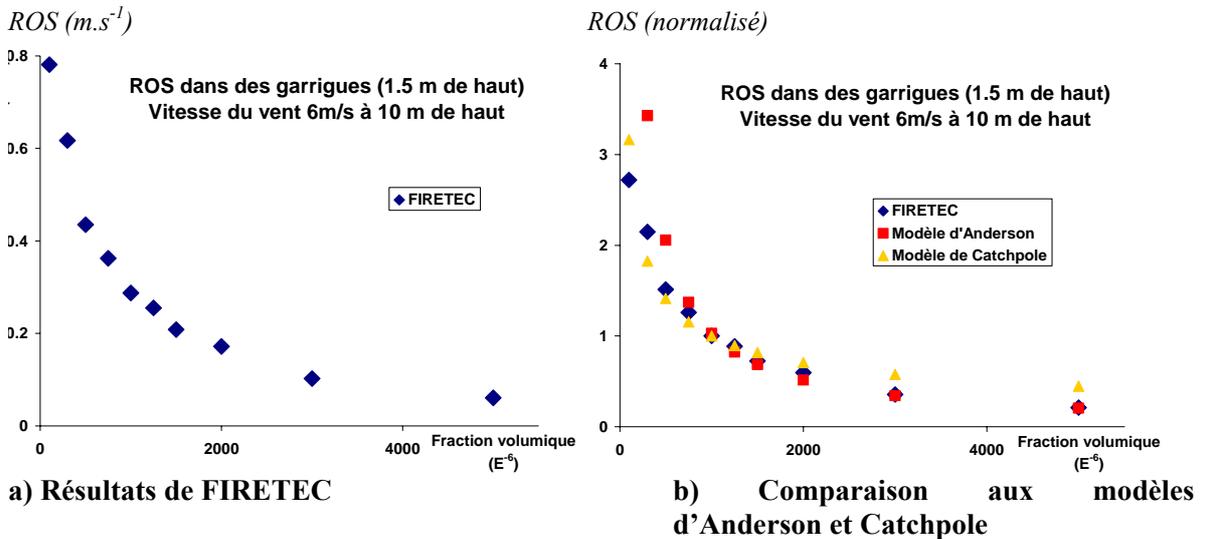
Le combustible consommé au passage du feu dans un rectangle de 200 mètres de long (la longueur du domaine) et 12 m de large (centré sur le milieu du domaine) permet de calculer l'intensité réelle du feu : $I = 18000 W_c$, avec W_c la masse de combustible consommé par unité de temps et de mètre linéaire de propagation.

Les données ponctuelles échantillonnées s'apparentent à des données que l'on pourrait mesurer au cours d'une expérience, à ceci près qu'elles correspondent à des valeurs moyennes dans des mailles de 2 mètres environ. Ce sont des séries temporelles qui représentent l'évolution des grandeurs physiques ponctuelles (température, combustible disponible, vitesse de l'écoulement, etc), en fonction du temps.



a) Température du solide b) Conversion temps/espace
Fig. 1.3. Séries temporelles ponctuelles en séries spatiales a) et comparaison avec la série spatiale dans le cas de la fraction volumique de 1500 E⁻⁶ b)

$T(d)$ représente la température du solide en fonction de la distance à la flamme, obtenue à partir des sorties de calcul (résolution 2 m), alors que $T(f(t))$ représente les données spatialisées issues de la série temporelle ponctuelle. La résolution est nettement meilleure (de l'ordre de $ROS \times 1 m$) et permet de calculer plus précisément des distances d'échauffement.



a) Résultats de FIRETEC b) Comparaison aux modèles d'Anderson et Catchpole
Fig. 1.4. Effet de la fraction volumique sur la vitesse de propagation du feu dans les garrigues. Les ROS sont normalisés par la vitesse de propagation prédite pour la fraction volumique de 10^{-3} (Valeur typique)

Tableau 1.3. Effet de la fraction volumique sur le ROS selon FIRETEC

Loi	Domaine de validité (fraction volumique)	R ²
$\frac{1}{\alpha^{0.95}}$	750-5000 E ⁻⁶	0.988
$\frac{1}{\alpha^{0.43}}$	100-1000 E ⁻⁶	0.938

Afin de s'abstraire des variations spatiales relativement importantes que l'on observe dans ces simulations, ces données ponctuelles sont en fait des moyennes du comportement en plusieurs points (en pratique, cinq), situés sur l'axe central de propagation du feu (**Fig. 1.2**). Pour chacune de ces séries temporelles ponctuelles, l'axe temporel a été modifié par translation de sorte d'imposer que la température 600 K (pyrolyse) soit franchie au temps $t=0$ s. Ces séries temporelles traduites ont ensuite été moyennées. Cet artifice permet d'examiner des comportements moyens, sans se laisser influencer dans l'analyse par des comportements locaux. Le même type de données a été échantillonné et analysé sur d'autres axes que l'axe central (en particulier sur les flancs du feu), sans donner des résultats qualitativement très différents ; pour cette raison, ces données ne seront pas présentées. Par ailleurs, nous avons utilisé la transformation, valable pour des conditions de propagation stationnaire, $f(t) = d = -ROS \times t$, avec t le temps et d la distance entre un point se trouvant en avant du front de feu et la flamme (lorsque d est négatif, le point a été dépassé par le front de feu). Cette transformation nous a permis de convertir des données temporelles à la résolution de la seconde, en des données spatiales ayant une bien meilleure résolution que les données spatiales produites par le code (2 m). La **Fig. 1.3** illustre qu'il est possible de reproduire le signal « spatial » sur la base du signal temporel. Le bon fonctionnement de cette transformation résulte en fait d'une grande stabilité dans la vitesse de propagation simulée par FIRETEC. Ces données spatiales « haute résolution » ont été utilisées pour le calcul de distance d'échauffement (qui nécessite l'intégration numérique de la courbe de température).

Les champs tridimensionnels n'ont été que peu utilisés dans cette étude, notamment puisque le comportement tridimensionnel n'est pas très marqué. Les champs ont été représentés avec AVS (*Advanced Visual Systems Inc. 1989-2005*). L'isosurface utilisée pour représenter les contours du feu est de 600 K.

2.2. Résultats

Vitesses de propagation

La **Fig. 1.4a** montre l'évolution de la vitesse de propagation du feu (tête du feu) en fonction de la fraction volumique. On observe une décroissance très régulière de cette vitesse de propagation depuis des vitesses de l'ordre du m.s^{-1} pour les fractions volumiques les plus faibles, à des vitesses de propagation de l'ordre du cm.s^{-1} pour les fractions volumiques les plus élevées.

Les modèles d'Anderson (Anderson 1969) et de Catchpole (Catchpole *et al.* 1993 & 1998) prédisent respectivement des vitesses de propagation décroissant en $\frac{1}{\alpha}$ et $\frac{1}{\sqrt{\alpha}}$, où α est la fraction

volumique. Le modèle d'Anderson est théorique, même si un certain nombre d'expériences le valide en partie (les fractions volumiques varient alors entre 10000 et 20000 E^{-6} ; expériences dans des litières). Le modèle de Catchpole est basé uniquement sur des expériences. Elles concernent des fractions volumiques élevées puisqu'il s'agit de litières (de 4500 E^{-6} à 33500 E^{-6}), qui sont significativement plus élevées que celles que nous avons utilisées, mais elles concernent des charges très peu importantes (le combustible n'excède pas 15 cm de haut) et des vitesses de vent assez limitées (2.7 m.s^{-1} maximum). La **Fig. 1.4b** compare les décroissances prédites par FIRETEC et celles des modèles d'Anderson et de Catchpole. Nous avons choisi de normaliser les résultats par la valeur de la vitesse de propagation prédite pour une fraction volumique de 1000 E^{-6} (valeur typique des garrigues).

On notera que la tendance prédite par FIRETEC est très proche du modèle de Catchpole pour les fractions volumiques élevées, alors qu'elle se rapproche de celui d'Anderson pour les fractions volumiques moyennes. Une régression valide quantitativement ces deux tendances (**Tableau 1.3**). En effet, les exposants obtenus à partir des simulations FIRETEC sont proches du -1 d'Anderson pour les fractions volumiques élevées et du -1/2 de Catchpole pour les fractions volumiques les plus faibles.

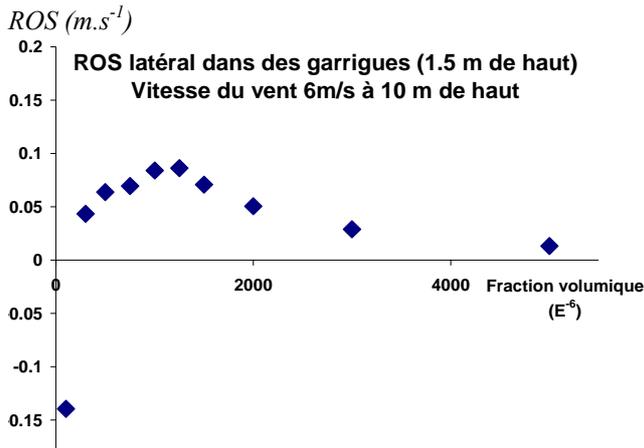


Fig. 1.5. Vitesse de propagation latérale du feu pour les différentes fractions volumiques

NB : une vitesse de propagation négative correspond à un feu dont la longueur de front diminue avec le temps. Il s'agit donc d'un feu qui finit par s'éteindre.

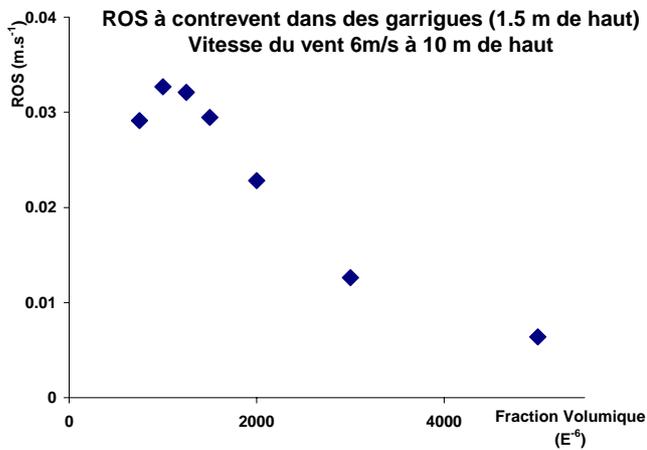
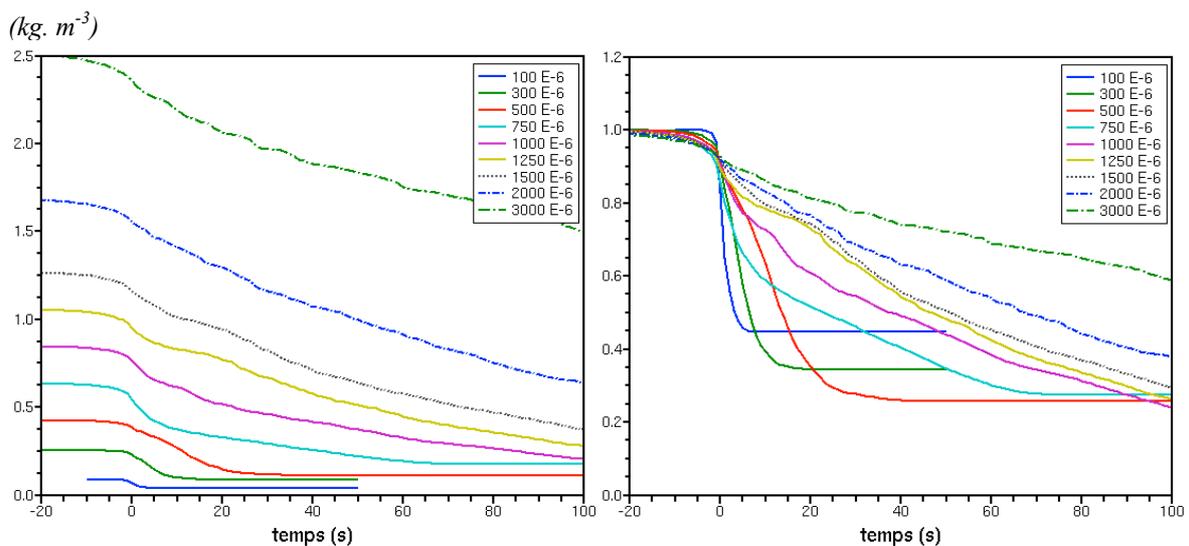


Fig. 1.6. Vitesse de propagation du feu à contrevent pour les différentes fractions volumiques

NB : Les valeurs de vitesses pour les fractions volumiques inférieures à $750 E^{-6}$ sont négatives, ce qui correspond à un feu incapable de se propager à contrevent. Il s'agit donc d'un feu dont la ligne arrière progresse dans le même sens que le vent.



a) Densité du combustible

b) Quantité de combustible (normalisée)

Fig. 1.7. Consommation du combustible au cours du temps, absolue (a) ou normalisée (b) par la quantité de combustible initiale, pour les données ponctuelles moyennées.

La **Fig. 1.5** montre la vitesse de propagation latérale du feu en fonction de la fraction volumique. Pour la valeur de 100 E^{-6} , cette vitesse est négative, ce qui veut dire que la longueur du front de feu décroît au cours du temps. Il s'agit donc d'un feu qui va s'éteindre. Pour les valeurs de fractions volumiques supérieures à 300 E^{-6} , le feu se propage latéralement avec des vitesses de propagation latérale généralement très inférieures à la vitesse de propagation sous le vent. On observe que la vitesse latérale passe par un maximum, pour une fraction volumique voisine de 1250 E^{-6} .

Le comportement du feu à contrevent (**Fig 1.6**) montre les mêmes tendances que celles des flancs latéraux, avec cependant des différences quantitatives importantes. On retrouve un seuil en deçà duquel la propagation à contrevent n'est pas possible, mais ce seuil est atteint pour des valeurs de fraction volumique de 750 E^{-6} et non de 300 E^{-6} . Une conséquence de ce décalage entre les seuils est que les feux correspondant aux combustibles entre 300 et 750 E^{-6} vont être capables de se propager sans s'éteindre (ils ont une propagation latérale positive), mais qu'ils vont être incapables d'évoluer à contrevent. On pourra noter que la vitesse des feux correspondant aux fractions volumiques 300 et 750 E^{-6} est voisine de -0.15 m.s^{-1} , alors que celle du feu de fraction volumique de 100 E^{-6} est de -0.75 m.s^{-1} .

Consommation du combustible et intensité du feu

La **Fig. 1.7** représente l'évolution temporelle ponctuelle moyennée sur cinq points (voir paragraphe « *sorties de calcul* ») de la quantité de combustible. La **Fig. 1.7a** montre que la consommation du combustible démarre légèrement avant $t=0$ s (qui correspond au temps où la cellule atteint la température de 600 K). Ceci s'explique par la présence de la PDF^{14} , qui suppose qu'une petite partie de la cellule est déjà en combustion. Le seuil de 600 K ($t=0$ s) s'accompagne d'une accélération brutale de la consommation (la pente est plus forte) au moment du passage du front et qui diminue ensuite. Ces profils sont qualitativement très proches de ceux obtenus par Catchpole *et al.* (1993) dans leurs expériences de laboratoire. La **Fig. 1.7b** présente la même variable, mais celle-ci est normalisée par la quantité de combustible initiale. Elle permet de constater que la consommation relative de combustible est plus forte pour les cas les moins denses (pentes plus élevées), ce qui se traduit par une propagation plus rapide. On note que le changement de comportement intervient pour des valeurs de fractions volumiques voisines de 750 E^{-6} .

Ces données de combustible consommé ponctuellement permettent de calculer le combustible consommé au passage du feu, afin d'estimer le paramètre W de la formule de Byram $I_B = H_c \times W \times ROS$, avec H_c la chaleur de combustion (18000 kJ.kg^{-1}), W la charge de combustible consommé au passage du feu (kg.m^{-2}) et ROS la vitesse de propagation (m.s^{-1}).

Dans la **Fig. 1.8**, nous comparons différentes manières d'évaluer l'intensité. L'intensité calculée selon la formule de Byram est présentée sous forme de ronds bleus. On observe que cette intensité augmente régulièrement avec la fraction volumique. Les vitesses de propagation étant très stables dans le temps, l'évaluation de l'intensité avec cette formule est très aisée. On peut également évaluer l'intensité sur la base de l'énergie libérée par le combustible consommé. On peut en effet calculer la quantité de combustible brûlé par le feu par mètre linéaire de front et par unité de temps W_c , pour en déduire l'intensité réelle du feu (diamants rouges). Il apparaît en pratique que l'évaluation d'une valeur moyenne de W_c est assez délicate car cette grandeur fluctue dans le temps. Ce résultat peut sembler paradoxal, puisque les vitesses de propagation sont très stables et suggèrent ainsi la présence d'un régime stationnaire. En fait, il apparaît que si le régime est stationnaire au niveau du front de feu, il ne l'est pas au niveau de l'arrière du feu, qui présente des extinctions et rallumage. En pratique, ceci veut dire que la profondeur du front n'est pas constante. Malgré ces difficultés d'évaluation, on observe que l'intensité réelle du feu est du même ordre de grandeur que celle calculée par la formule de Byram.

¹⁴ Probability Distribution Function, de la température dans une maille, voir chapitre 0

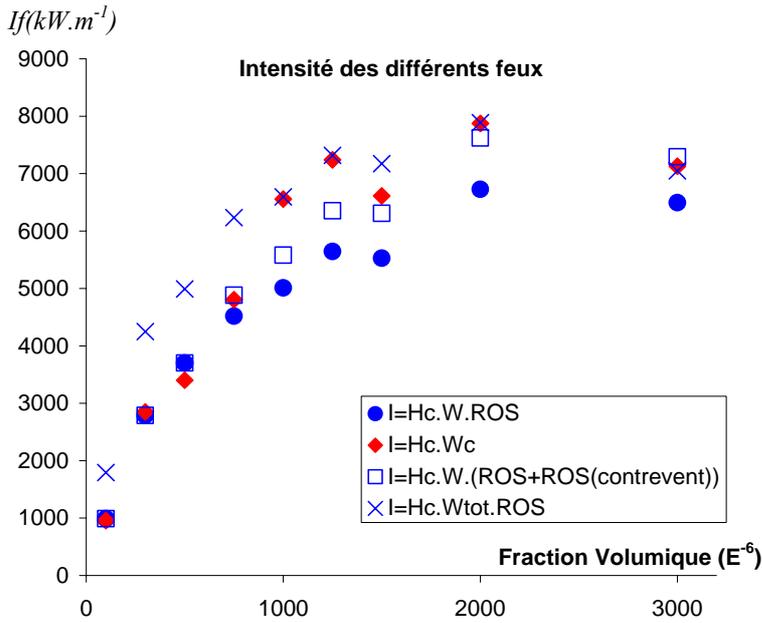


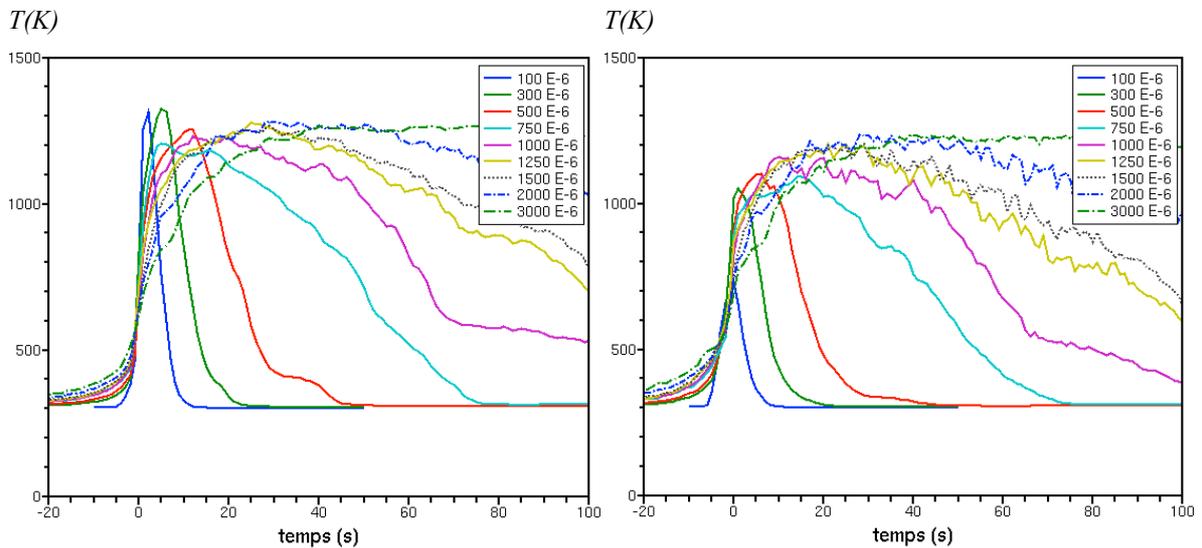
Fig. 1.8. Intensité du feu calculé à partir de FIRETEC

W représente le combustible consommé (kg.m^{-2}) par le feu durant son passage

W_{tot} représente la charge de combustible initiale (kg.m^{-2})

W_c représente le combustible consommé par le feu par mètre linéaire de front et par unité de temps ($\text{kg.m}^{-1}.s^{-1}$)

H_c est la chaleur de combustion du bois (18000 kJ.kg^{-1})



a) Température du solide

b) Température du gaz

Fig. 1.9. Températures des phases solide (a) et gazeuse (b) pour les données ponctuelles moyennées.

Une partie des différences observées entre ces deux méthodes de calcul a cependant une autre origine que la difficulté d'évaluation du W_c moyen. Elle s'explique par la présence de propagation à contrevent. En effet, compte tenu de la bande définie pour le calcul de l'intensité **Fig. 1.2**, il apparaît que la zone située en avant de la zone d'allumage va brûler lorsqu'il y a propagation à contrevent et donc être prise dans le calcul basé sur la consommation de combustible instantané (diamants rouges). Les valeurs obtenues avec cette méthode de calcul évaluent donc l'intensité des deux fronts (contrevent et sous le vent). Elles sont donc à rapprocher d'un calcul réalisé avec la formule de Byram en additionnant vitesse de propagation sous le vent et à contrevent (carrés creux bleus). Cette explication permet de compenser une partie des différences, même si celles-ci demeurent pour 1000 et 1250 E⁻⁶. La dernière série (croix bleues) montre les valeurs maximales obtenues avec la formule de Byram, c'est-à-dire lorsque l'on considère que l'intégralité du combustible est consommée au passage du feu.

Températures du solide et du gaz

Les **Fig. 1.9 a** et **b** présentent respectivement les températures ponctuelles moyennées du solide et du gaz. Elles traduisent une phase d'échauffement qui précède l'inflammation ($T < 600$ K) qui est d'autant plus lente que la fraction volumique est élevée (les pentes sont moins raides au fur et à mesure que la fraction volumique augmente). De plus, on observe que la durée de la combustion (période pendant laquelle les températures sont proches de leur valeur maximale) augmente elle aussi avec la quantité de combustible. Comme pour les vitesses de propagation à contrevent, on observe que le comportement des feux correspondant aux fractions volumiques inférieures à 750 E⁻⁶ diffère des feux correspondant aux fractions volumiques plus élevées. Les différences sont à la fois d'ordre quantitatif, puisque les pics de températures du solide sont plus étroits et de valeurs maximales plus élevées, et d'ordre qualitatif puisque les températures fluctuent beaucoup moins avec le temps.

Temps et distances caractéristiques de l'échauffement

Sur la base des profils de températures du solide obtenus **Fig. 1.9.a**, nous pouvons calculer un temps caractéristique de l'échauffement, selon la formule

$$\tau = \frac{\int_{-\infty}^0 T(s) ds}{600 - T_{amb}} \quad (1.1)$$

En pratique, comme nous ne disposons pas des valeurs de T entre $-\infty$ et 0, nous avons calculé numériquement l'intégrale entre $t(T = 315 \text{ K})$ et 0, et remplacé T_{amb} par 315 K.

Nous avons également calculé les distances caractéristiques de l'échauffement sur la base des profils de température spatialisés (voir le paragraphe « *sortie de calcul* »), par la formule :

$$D = \frac{\int_0^{\infty} T(x) dx}{600 - T_{amb}} \quad (1.2)$$

En pratique, comme nous ne disposons pas des valeurs de T entre 0 et ∞ , nous avons réalisé l'intégrale entre 0 et $d(T = 315 \text{ K})$, et remplacé T_{amb} par 315 K.

Ces données de temps et de distances caractéristiques sont représentées **Fig. 1.10**. Ces grandeurs intégrales sont utiles pour la comparaison modèle/expérience. Elles sont en effet utilisées pour caractériser certaines expériences de laboratoire (Dupuy *et al.* 2006) et pourraient être utilisées pour des expériences de terrain.

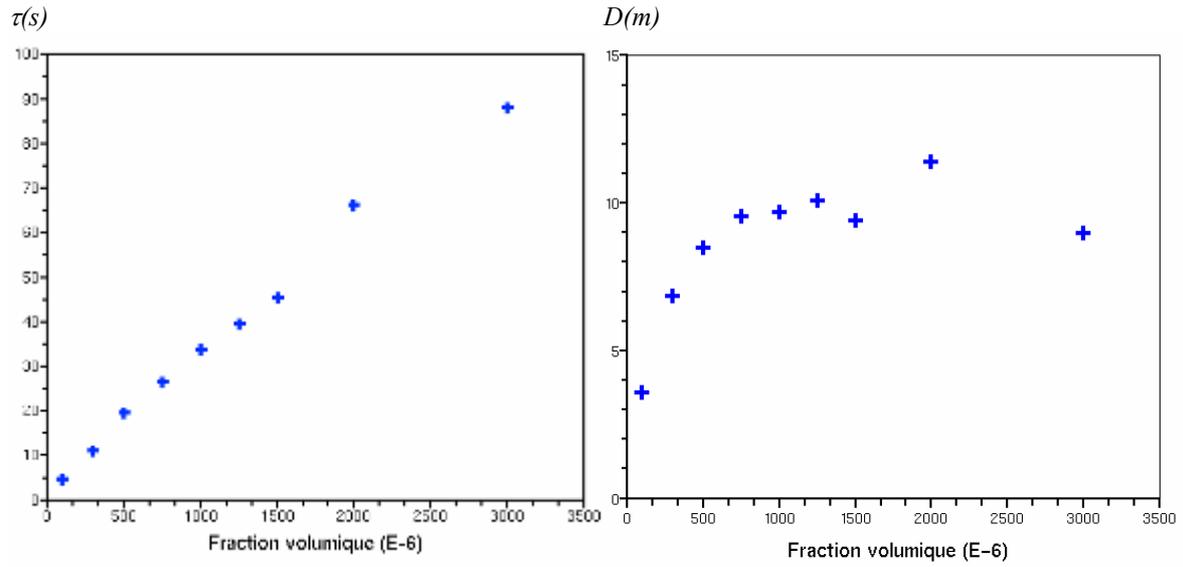
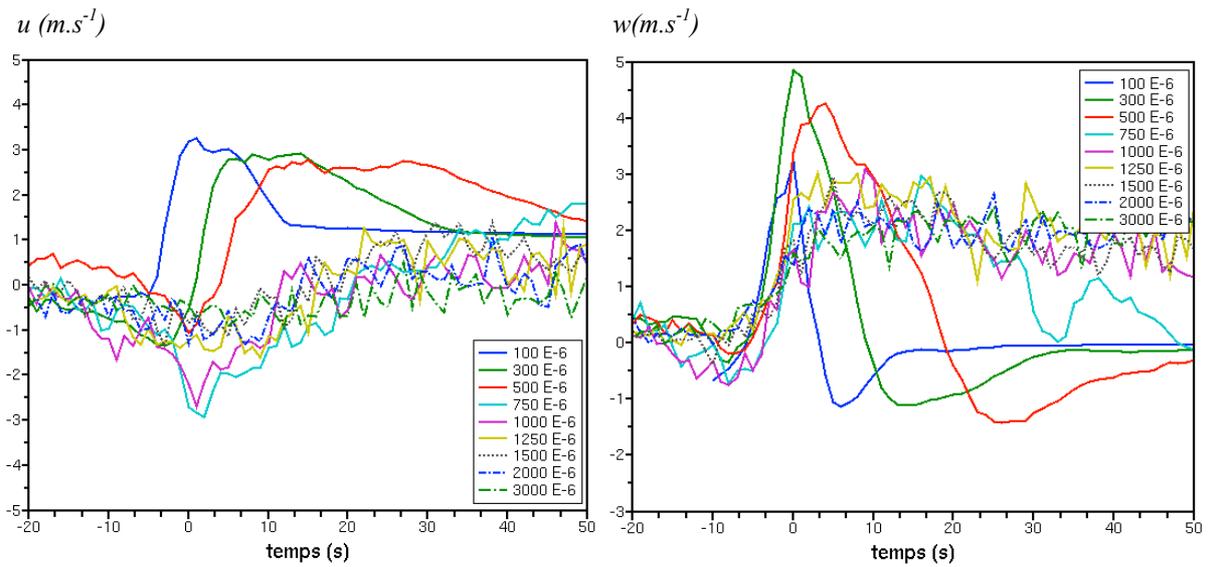


Fig. 1.10. Temps (a) et distance (b) caractéristiques de l'échauffement



a) b)
 Fig. 1.11. Composantes horizontales u (a) et verticales w (b) de la vitesse de l'écoulement dans la première maille ($z=0.75$ m) pour les données ponctuelles moyennées.

Le temps caractéristique de l'échauffement augmente quasi linéairement avec la fraction volumique (**Fig. 1.10a**). A l'inverse, la distance caractéristique présente une certaine saturation pour les fractions volumiques au-delà de $1000 E^{-6}$. On peut interpréter cette saturation par une saturation de l'énergie produite par la flamme, au delà d'une certaine quantité de biomasse.

Caractéristiques de l'écoulement

Les **Fig. 1.11 a** et **b** présentent respectivement les composantes u et w de la vitesse ponctuelle moyennée. Nous observons là encore une différence de comportement entre les feux correspondant aux fractions volumiques inférieures à $750 E^{-6}$ et ceux correspondant aux fractions volumiques plus élevées. Alors que les feux de faibles fractions volumiques présentent une composante u très largement positive dès que la température 600 K est atteinte, les feux de fractions volumiques plus élevées présentent une phase d'une vingtaine de secondes pendant laquelle cette composante demeure négative. Ce dernier comportement traduit une capacité du feu à aspirer de l'air frais en avant du front, là où les feux de faibles fractions volumiques sont toujours poussés par le vent. Lorsque l'on augmente la biomasse, à vent constant, on va de ce fait réduire le rapport entre la puissance de l'écoulement généré par le vent et celle générée par le panache. L'aspiration d'air frais en amont du front d'incendie est donc favorisée. On s'attend donc davantage à obtenir des écoulements dont la composante u de la vitesse est négative. Du point de vue de la composante w (**Fig. 1.11b**), on observe une augmentation brutale de la vitesse au passage du front, qui traduit le passage du panache associé aux forces de flottabilité. Notons que celui-ci est beaucoup plus brutal pour les valeurs de fraction volumique faibles. Par ailleurs, comme pour les températures, les feux de faibles valeurs de fraction volumique présentent extrêmement peu de fluctuations. L'augmentation générale du niveau de turbulence pour les valeurs de fractions volumiques les plus élevées explique notamment les pics de températures (**Fig. 1.9**) et de composante de la vitesse verticale w plus faibles.

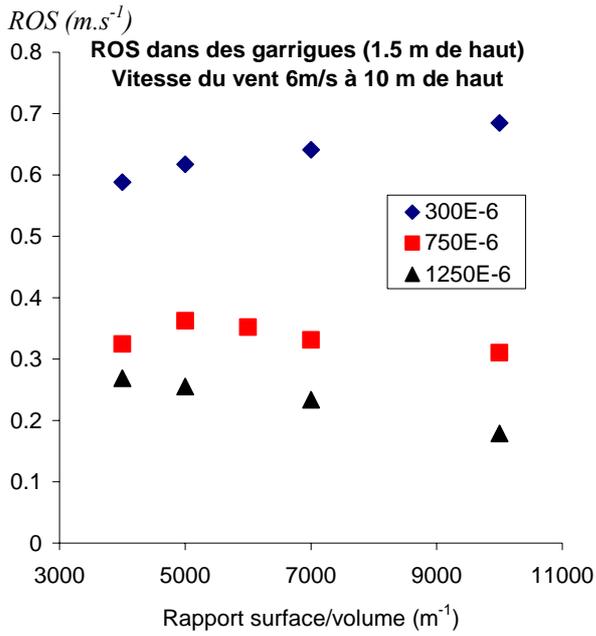
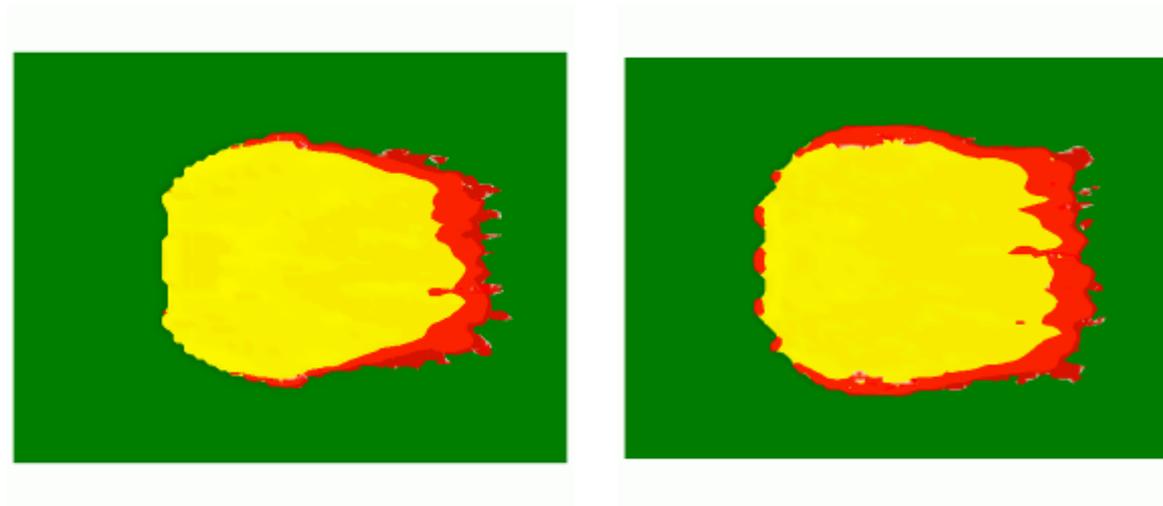


Fig. 1.12. Effet du rapport surface/volume sur la vitesse de propagation pour trois fractions volumiques données



a) $4000 m^{-1}$

b) $7000 m^{-1}$

Fig. 1.13. Formes du front associées à deux valeurs de surface/volume : $4000 m^{-1}$ (a) et $7000 m^{-1}$ (b) sur la vitesse de propagation pour une fraction volumique de $750 E^{-6}$.

Effet du rapport surface/volume

La **Fig. 1.12** met en évidence les effets du paramètre rapport surface/volume pour trois valeurs de fractions volumiques (300, 750 et 1250 E⁻⁶). On observe que la vitesse augmente avec le rapport surface/volume à faible densité et diminue à forte densité. Le comportement pour une densité intermédiaire se situe entre les deux, avec une augmentation suivie d'une diminution du ROS au fur et à mesure que l'on augmente le rapport surface/volume.

L'amplitude de ces effets est cependant bien moindre que celle de la fraction volumique (pour des variations des paramètres cohérentes avec les données de terrain), alors que le ROS peut varier d'un facteur 20 entre les fractions volumiques les plus faibles et les plus élevées (**Fig 1.4a**). Les effets du rapport surface/volume sont en effet inférieurs à 15 % pour 300 E⁻⁶, même s'ils peuvent tout de même atteindre 30 % pour 1250 E⁻⁶. Il faut noter que ces effets contradictoires aux faibles et fortes densités se manifestent également sur les propagations latérales et à contrevent, mais de manière un peu moins systématique. On pourra par exemple constater **Fig. 1.13**, que les propagations latérales et à contrevent sont beaucoup plus importantes avec le rapport surface/volume le plus élevé, la forme du front étant dans ce cas beaucoup plus arrondi pour une même distance parcourue.

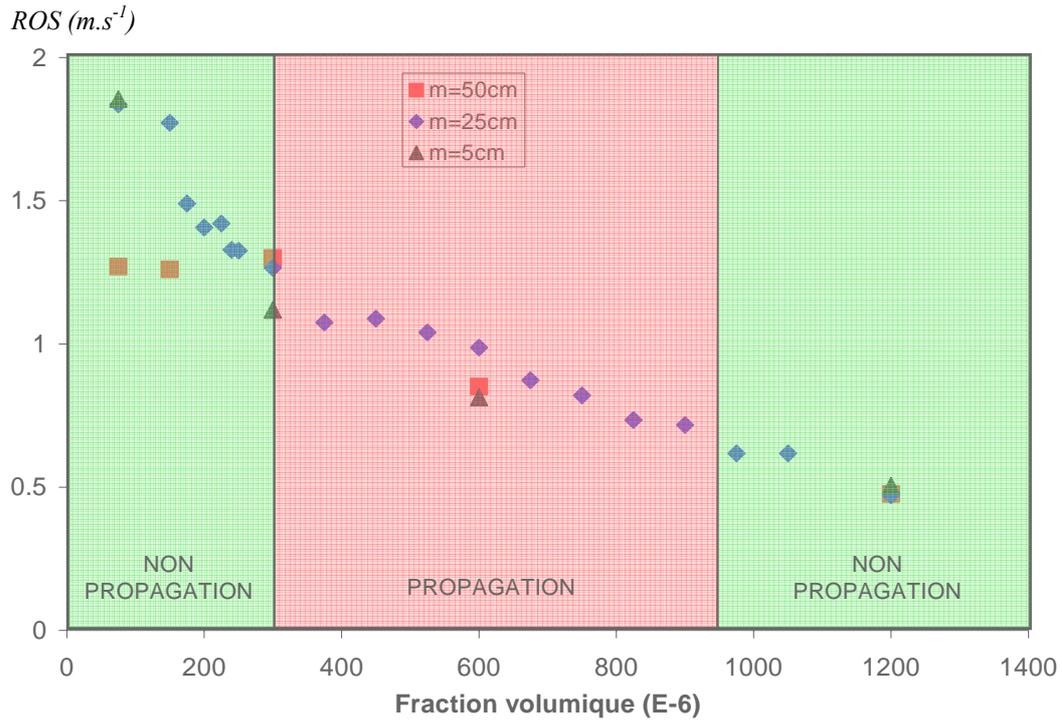


Fig. 1.14. Effet de la fraction volumique sur la vitesse de propagation du feu avec FIRESTAR. Les trois séries $m=5\text{ cm}$, $m=25\text{ cm}$ et $m=50\text{ cm}$ correspondent à trois tailles de maille différentes. Les ROS obtenus dans les zones de non propagation correspondent aux vitesses de propagation avant extinction. La vitesse du vent est de 6 m.s^{-1} et les caractéristiques du combustible sont similaires à celles de FIRETEC, même si la nappe est ici de seulement 75 cm de haut contre 150 cm avec FIRETEC.

2.3. Discussion

Effet de la fraction volumique sur les vitesses de propagation

Le modèle prédit une décroissance du ROS avec la fraction volumique. Nous avons cherché à valider ce comportement sur la base de données expérimentales. Cheney *et al.* (1993) rapportent des corrélations fortement négatives entre vitesse de propagation et fraction volumique dans des feux de terrains réalisés dans des prairies australiennes. Malheureusement, ces données sont insuffisantes pour dépasser la constatation qualitative. A notre connaissance, il n'existe pas de données expérimentales mettant en évidence une loi caractérisant cette décroissance dans le cas de feux de terrains. Les seules données disponibles concernent des expériences réalisées en laboratoire, à petite échelle avec des valeurs de fractions volumiques typiques des litières, c'est-à-dire assez élevées. Bien que les échelles de travail soient à priori très différentes des nôtres, nous avons comparé les décroissances avec les modèles de Catchpole et d'Anderson issus de ces expériences et montré que les résultats pouvaient être cohérents avec ces modèles (eux-mêmes contradictoires !) selon les plages de fractions volumiques considérées. Le principal apport de cette comparaison est de montrer que le modèle a un comportement raisonnable par rapport aux caractéristiques de la végétation. Cependant, ce résultat suggère également que le changement d'échelle qui consiste à faire des expériences à une échelle pour extrapoler les résultats à d'autres pourrait être possible dans certains cas, bien que cette pratique soit controversée.

On peut également noter que la courbe proposée par Rothermel dans BEHAVE (Rothermel 1972) est qualitativement proche de celle obtenue avec FIRETEC pour les propagations latérales et à contrevent. Les expériences qui ont conduit à la proposition de cette courbe ont en effet été réalisées sans vent, conditions qui se rapprochent quelque peu des conditions de propagation latérale.

D'autres modèles prédisent une décroissance avec la fraction volumique. Parmi ceux-ci, on peut noter le cas de FIRESTAR (**Fig. 1.14**), même si la pente semble plus linéaire et que des extinctions se produisent à faibles et fortes fractions volumiques. Par ailleurs, les vitesses de propagation prédites sont environ deux fois plus élevées avec FIRESTAR qu'avec FIRETEC.

Intensité

La grandeur de référence pour les physiciens et les gestionnaires pour estimer un feu est l'intensité. Il est fréquemment fait usage de la formule de Byram pour estimer l'intensité du feu. La comparaison des différentes méthodes de calcul de cette intensité (**Fig. 1.8**) conduit à la conclusion que cette formule est parfaitement adaptée à l'évaluation de l'intensité du feu. La formule de Byram donne en effet des valeurs très comparables à celles obtenues de manière directe par le modèle, qui estime un taux de combustion ; elle ne présente pas les difficultés d'évaluation d'une consommation moyenne de combustible par unité de temps, qui présente un caractère non stationnaire ; elle simplifie de manière notable le calcul car elle ne nécessite pas de définition d'une période de référence pour le calcul de la consommation moyenne de combustible ; enfin elle ne pose pas de problème particulier pour les feux se propageant à contrevent.

La formule de Byram nécessite de connaître le ROS, mais aussi la quantité de combustible réellement consommée par le feu. En effet, il est fréquemment fait usage par les gestionnaires de la quantité de combustible disponible, en lieu et place de la quantité consommée. La comparaison entre la formule de Byram appliquée à la quantité de combustible consommée réellement (ronds bleus) et celle appliquée à la quantité de combustible disponible (croix bleues), montre qu'une surestimation très significative de l'intensité peut être obtenue, en particulier dans les végétations peu denses, lorsque l'on s'appuie sur la quantité de combustible disponible.

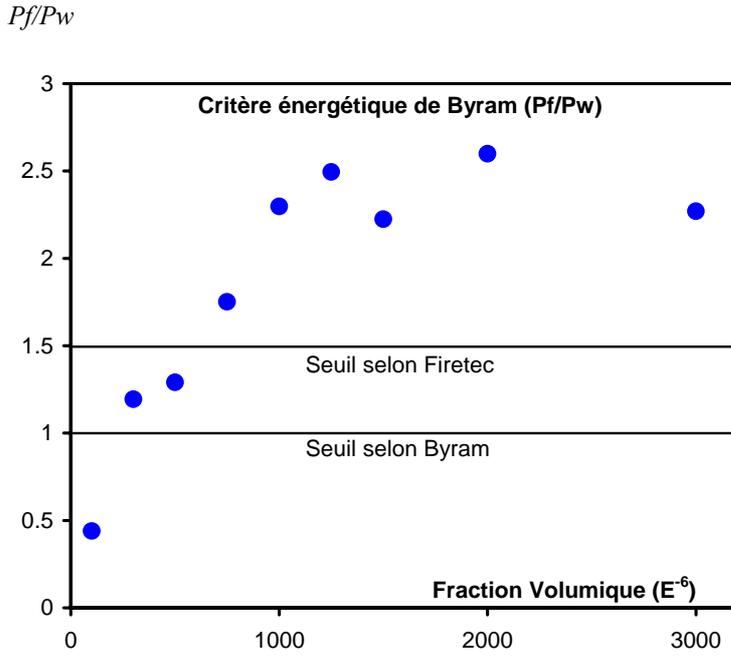


Fig. 1.15. Critère énergétique de Byram et seuil entre feux « wind-driven » et « plume dominated »

Plume dominated/wind driven

Les simulations présentées précédemment ont mis en évidence un comportement qualitativement très différent pour les fractions volumiques faibles et pour les fractions volumiques élevées, avec un seuil situé autour de $750 E^{-6}$. Ces différences se manifestent au niveau des vitesses de propagation, de la capacité du feu à se propager à contrevent, mais aussi au niveau des températures (plus fluctuantes et moins élevées à forte densité) et des distances caractéristiques de l'échauffement (plus courtes à faible densité). Mais ce sont surtout les écoulements qui diffèrent, puisque la **Fig. 1.11a** met en évidence que seuls les feux dans du combustible suffisamment dense sont capables de produire une aspiration de l'air provenant de l'avant du front de feu. Le panache semble donc beaucoup plus puissant dans ces feux que dans ceux de faibles fractions volumiques qui sont littéralement poussés par le feu.

Byram (1959) a proposé la notion de critère énergétique :

$$N = \frac{2 g I_f}{\rho_{amb} c_p T_{amb} (U_{amb} - ROS)^3} \quad (1.3)$$

avec $g=9.8m.s^{-2}$, $c_p=1 kJ.kg^{-1}.K^{-1}$ et $T_{amb}=300 K$

Le critère énergétique, repris et généralisé par Nelson (2003) exprime les ratios de P_f et P_w qui sont respectivement les forces du panache et du vent.

$$P_f = \frac{g I_f}{c_p T_{amb}} \quad (1.4)$$

$$P_w = \frac{\rho_{amb}}{2} (U_{amb} - ROS)^3 \quad (1.5)$$

Selon Byram et Nelson, le comportement du feu se modifie de « wind driven » à « plume dominated » selon que N est inférieur ou supérieur à 1. En effet, $N < 1$ équivaut à une force associée au vent supérieure à celle associée au panache. Selon eux, le comportement du feu devient erratique lorsque $N > 1$. Heilman & Fast (1992) associent également à $N > 1$ la présence de vortex horizontaux et de « couloirs » du feu (« streets »), alors que Clark *et al.* (1996) lui associent les éclatements du front en doigts étroits.

Les deux comportements observés aux fractions volumiques respectivement faibles et élevées s'interprètent bien en termes de feux « wind driven » et « plume dominated », comme dans Morvan & Dupuy (2004). Sur la base des intensités et des ROS prédits avec FIRETEC, nous avons calculé le ratio N (**Fig. 1.15**). Les feux « wind driven » correspondent aux valeurs de N les plus faibles, alors que les feux « plume dominated » correspondent aux valeurs de N les plus élevées. Ceci renforce notre interprétation, d'autant que le seuil entre les deux types de feu serait situé selon FIRETEC entre 0.7 et 0.9, valeur d'ordre de grandeur très proche du 1 théorique de Byram. De plus, on observe une saturation du critère énergétique pour les fractions volumiques supérieures à $1250 E^{-6}$. Cette saturation du critère en régime « plume dominated » est vraisemblablement associée au fait que le redressement de la flamme dû à l'augmentation des forces de flottabilité induit une diminution des transferts thermiques. En effet, ce redressement s'accompagne d'une limitation du transfert convectif par advection horizontale et du transfert radiatif par diminution de l'angle solide sous lequel est vu le panneau radiant. Ces phénomènes sont aussi impliqués dans la diminution des vitesses de propagation.

Effet du rapport surface/volume

Les effets du rapport surface/volume sur la propagation sont beaucoup moins significatifs que ceux de la fraction volumique. Il faut également préciser que l'amplitude naturelle des variations du rapport surface/volume est également beaucoup plus faible.

Le modèle de Wolff *et al.* (1991) propose de faire dépendre le ROS de $\sigma^{0.6}$, alors que Catchpole *et al.* (1998) propose de faire dépendre le ROS de $e^{-347/\sigma}$. Ces deux formulations, bien que radicalement différentes, induisent un ROS qui augmente avec σ , avec cependant des corrélations assez faibles (voir notamment p12 de Catchpole *et al.* 1998, où l'on observe une diminution très sensible des vitesses de propagation entre les expériences réalisées à 3092 m⁻¹ et celles réalisées à 5710 m⁻¹). Nous observons une telle augmentation de la vitesse avec σ aux fractions volumiques les plus réduites. L'augmentation du rapport surface/volume tend à augmenter le coefficient d'absorption et le coefficient de transfert convectif, ce qui peut expliquer un échauffement plus rapide des particules, en particulier pour les combustibles peu denses produisant des feux dégageant peu d'énergie.

En revanche, pour les valeurs les plus élevées, nous observons une décroissance, le changement de comportement se produisant pour un seuil voisin de $N=1$. L'augmentation du coefficient du rapport surface/volume conduit à une augmentation de la traînée, et donc à une diminution de la force de l'écoulement incident, qui peut entraîner une diminution de l'advection. De plus, l'augmentation du coefficient d'absorption induit une augmentation de l'absorption à courte distance, ce qui se traduit par une diminution de la luminance à plus longue distance et donc de l'échauffement radiatif à longue distance. On peut supposer que ces deux effets de l'augmentation du rapport surface/volume deviennent dominants au-delà d'une certaine densité.

Cependant l'analyse des données extraites n'a pas permis de valider ces hypothèses. Nous n'avons pas poussé plus loin les investigations, les variations du rapport surface/volume étant susceptibles d'avoir des effets significatifs sur le rayonnement, dont le mode de calcul n'était pas pleinement satisfaisant dans cette partie.

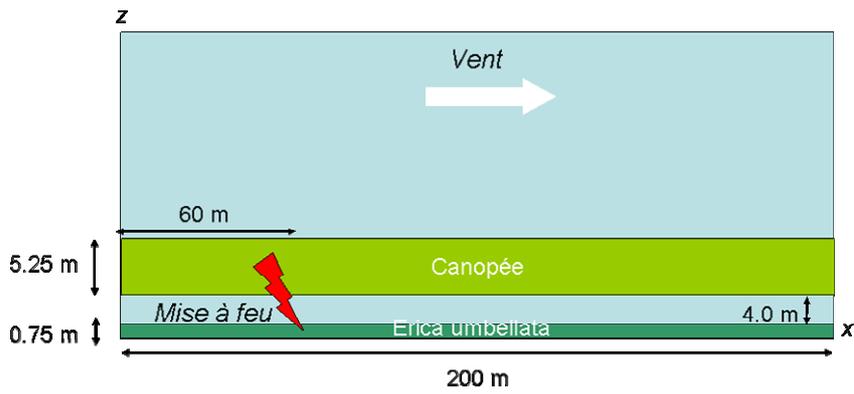
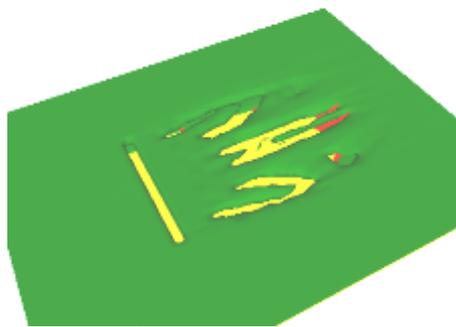
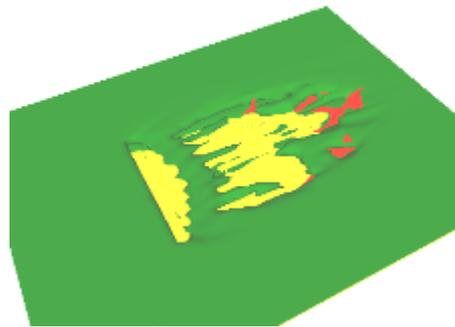


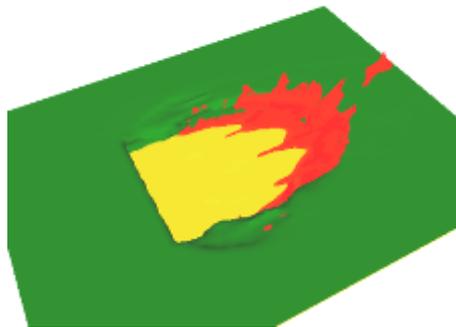
Fig. 1.16. Description du combustible (vue de profil)



a) $\alpha=77 E^{-6}$ ($t=200$ s)



b) $\alpha=155 E^{-6}$ ($t=160$ s)



c) $\alpha=232 E^{-6}$ ($t=90$ s)



d) $\alpha=307 E^{-6}$ ($t=100$ s)



e) $\alpha=467 E^{-6}$ ($t=160$ s)



f) $\alpha=613 E^{-6}$ ($t=220$ s)

Fig. 1.17. Activités de torching ou de crowning pour les six canopées homogènes (en rouge l'isosurface 600 K)

3. Cas des canopées

3.1. Méthodes

Description du combustible

Sept végétations homogènes de type « pinède » de fractions volumiques variables ont été définies (**Fig. 1.16 et Tableau 1.4**). Elles correspondent à des fractions volumiques variant de 0 (absence de canopée) à $613 E^{-6}$. Les moins denses correspondent à des végétations très peu denses (type canopées de pin d'Alep, ou des canopées d'arbres plus denses, mais de recouvrement faible et en homogénéisant le combustible), alors que les plus denses correspondent à des densités proches des pinèdes de pin Maritime. La végétation au sol représente une garrigue d'*Erica umbellata* de 0.75 m de hauteur; d'un point de vue écologique, ce choix paraît cohérent avec une canopée de pin Maritime. D'une manière générale, ces sept combustibles permettent de balayer l'ensemble des valeurs que l'on rencontre dans les canopées réelles (Vigy *et al.* 2005), mais homogénéisées.

Tableau 1.4. Principales caractéristiques du combustible

	Fraction volumique α ($E^{-6} m^3 \cdot m^{-3}$)	Rapport surface/volume σ (m^{-1})	Teneur en eau (%)	Bas de la canopée (m)	Hauteur (m)
Pins	0-77-155-232-307- 467-613	4600	110	4.75	10.0
<i>Erica umbellata</i>	2000	8000	60	0.	0.75

Caractéristiques des simulations

Les caractéristiques des simulations sont les mêmes qu'en partie 2 de ce chapitre.

Sorties de calcul

L'analyse de la position du front s'appuie sur une recherche des lieux du domaine où le champ de température atteint ou dépasse 600 K (température de référence pour la pyrolyse). Sur la base de ces positions, les vitesses de propagation ont été déterminées sur la base de la distance parcourue par le front de feu en 40 s (80 s après l'allumage).

Les champs tridimensionnels ont été plus largement utilisés dans cette étude, afin de mettre en évidence le comportement tridimensionnel du feu, alors même que le combustible est homogène. L'isosurface utilisée pour représenter les contours du feu avec AVS est de 600 K.

Par ailleurs, nous avons également examiné dans cette étude les dommages aux canopées. Ceux-ci ont été évalués sous la forme du pourcentage de biomasse consommée au passage du feu.

3.2. Résultats

La **Fig. 1.17** représente le feu dans les différentes canopées au moment où celui-ci a parcouru 110 m environ. On observe une différence de comportement nette entre les cas où la fraction volumique demeure inférieure à $200 E^{-6}$ (**a** et **b**) et ceux où elle dépasse cette valeur (**c** à **e**). En effet au-delà du seuil, on observe des feux bien établis en cime (« crowning »), alors qu'en deçà de ce seuil, le feu ne passe en cime que dans certains couloirs, et de manière plus ou moins ponctuelle. Un tel comportement est baptisé « torching ». On peut également noter que les temps mis par le feu pour parcourir les 110 mètres sont très variables : ils peuvent dépasser les 200 s (**a** et **f**) ou être inférieurs à 100 s (**c** et **d**).

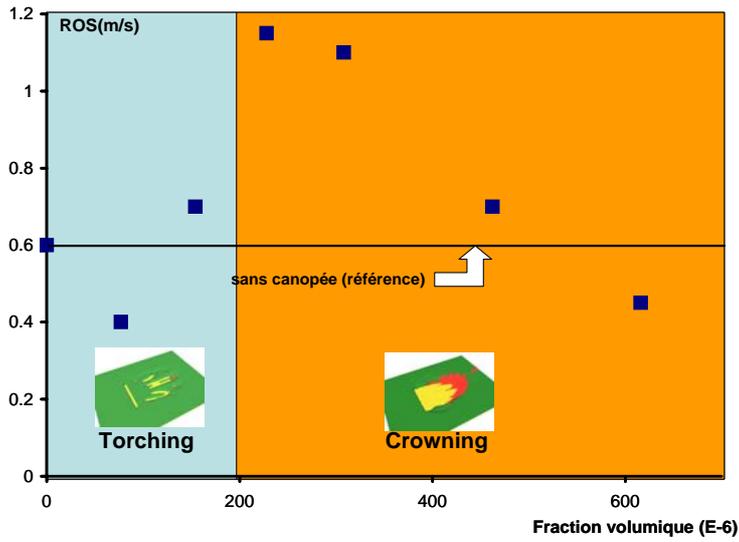


Fig. 1.18. Vitesse de propagation et type de feu en fonction de la fraction volumique de la canopée

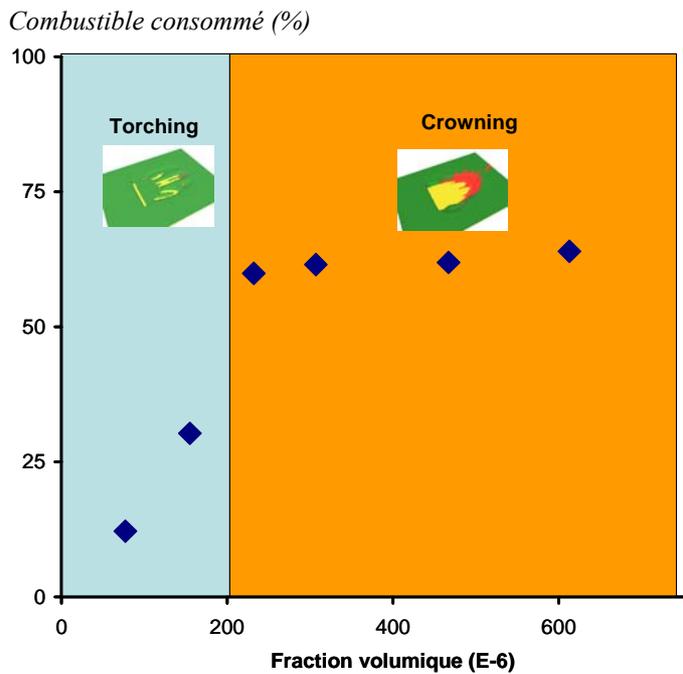


Fig. 1.19. Dommages à la canopée en fonction de la fraction volumique de la canopée

La **Fig. 1.18** permet de synthétiser ces comportements. On observe que les feux de type « torching » présentent une vitesse de propagation à peu près constante, proche de celle du feu de référence sans canopée. En revanche, pour les valeurs de fractions volumiques permettant des feux de cimes pleinement développés, on observe que la vitesse de propagation décroît avec la fraction volumique.

La **Fig. 1.19** montre les dommages aux canopées, exprimés par le pourcentage de combustible consommé après le passage du feu. Nous avons rappelé sur le graphe le seuil entre « torching » et « crowning ». Nous observons qu'il correspond à un niveau de dégâts également très différent, les feux les plus passifs consommant moins de 30 % du combustible disponible, alors que les feux les plus actifs consomment plus de 60 % du combustible présent dans les canopées.

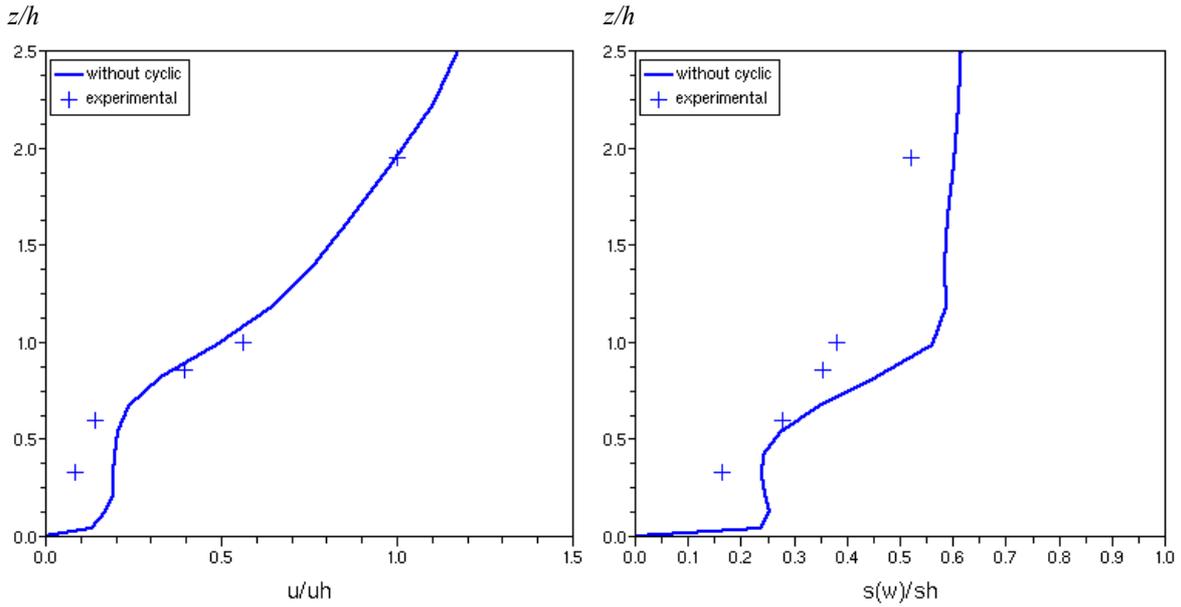
3.3. Discussion

L'effet de seuil entre « torching » et « crowning » est décrit par un certain nombre d'auteurs, comme par exemple Brown (1978) ou Sando & Wick (1972) (utilisés par Beukema 1997), pour lesquels la fraction volumique de la canopée doit être respectivement supérieure à $150 E^{-6}$ et $460 E^{-6}$ pour permettre la propagation en cime. La valeur seuil est susceptible de dépendre d'une multitude de paramètres, comme la hauteur du bas de la canopée, la force du vent et le niveau de turbulence, la manière de comptabiliser le combustible (aiguilles et rameaux fins ou aiguilles uniquement, par exemple), la teneur en eau de la végétation, la présence de combustible « échelle », comme les lichens (Scott & Reinhardt 2001). Cependant, l'existence de ce seuil, qui plus est avec un ordre de grandeur proche de celui prédit par FIRETEC indique un comportement raisonnable du modèle.

La décroissance de la vitesse de propagation avec la fraction volumique telle qu'observée pour les garrigues n'est reproduite ici que lorsque le régime de propagation en cime est établi, c'est-à-dire pour les densités suffisamment importantes. Il n'existe à ma connaissance pas de données permettant d'affirmer si ce comportement est réaliste bien qu'il apparaisse raisonnable. Notons que d'après Cruz (1999), les données concernant des feux de cimes au Canada ne permettent pas de mettre en évidence des relations simples entre vitesse de propagation et densité des canopées. Si la discontinuité dans les vitesses de propagation existe bel et bien et que ce seuil dépend d'un certain nombre de paramètres comme la teneur en eau, la vitesse du vent et la hauteur du bas de la canopée, ceci expliquerait la difficulté à mettre en évidence une relation simple entre vitesse de propagation et fraction volumique, comme il en existe pour les feux de litières et de prairies.

Les formes de front et les dégâts associés sont très hétérogènes, avec un éclatement en doigts de la main (**Fig. 1.17**). En effet, bien que la charge des canopées soit faible, les charges en surface sont telles, que compte tenu de la force relativement faible du vent, N est nettement supérieur à 1. L'éclatement en doigts de la main est donc cohérent avec Clark *et al.* (1996).

Notons enfin, que l'étude présentée à l'ICFFR de Coimbra (Pimont *et al.* 2006) contenait également des simulations en canopées hétérogènes qui montraient que la manière d'allouer le combustible avait une importance cruciale sur le régime de propagation (torching ou crowning), la vitesse de propagation et le niveau de dégâts.



a) Composante u de la vitesse

b) Ecart type de la composante w de la vitesse

Fig. 1.20. Profils de la composante u de la vitesse et de l'écart type de la composante w (fluctuation), en l'absence de conditions limites périodiques, comparés aux données expérimentales de Su *et al.* (1998)

Limite de cette étude en canopées

Comme dans Linn *et al.* (2005a), les profils de vent en entrée sont initialisés avec des valeurs constantes. A cause des tailles de domaine réduites, la traînée n'a pas le temps de faire converger le profil moyen de l'écoulement et la turbulence due au cisaillement n'a pas le temps de s'établir correctement. Ceci induit des profils peu réalistes, lorsqu'on les compare à des données expérimentales, obtenues dans des canopées homogènes (**Fig. 1.20**). Dans ces calculs d'écoulement, on observe que la vitesse du vent est surestimée dans la canopée (**a**) par rapport aux données expérimentales (Su *et al.* 1998 ; les données sont normalisées par la hauteur h de la canopée et la vitesse à $2h$). De plus, le niveau de turbulence sur la composante verticale de la vitesse est surestimé (**b**), en partie car le modèle de turbulence est isotrope (absence de turbulence résolue avec ce type de simulations brèves), alors que les niveaux de turbulence sont plus faibles sur w que sur u et v dans les canopées. Nous verrons comment ce problème a été résolu aux chapitres 3 et 4 de cette thèse.

4. Conclusion

Ces deux études ont permis de montrer que le comportement du modèle par rapport à un certain nombre de caractéristiques de la végétation était cohérent avec les données expérimentales lorsque celles-ci étaient disponibles. Elles ont également permis de mettre en évidence l'intérêt de ce type de modèles qui fournit beaucoup de données par rapport aux modèles empiriques. L'interprétation de ces données peut être riche en enseignement. On rappellera notamment les comportements types que le modèle est capable de reproduire : feux « wind-driven » et feux « plume-dominated », feux avec « torching » ou feux avec « crowning » ; ces différents comportements étant associés à des caractéristiques du combustible. Précisons néanmoins que ces seuils sont susceptibles d'être affectés par la vitesse du vent, la largeur du front, la teneur en eau de la végétation, la stabilité atmosphérique ; autant de paramètres dont il reste à mesurer l'impact.

Néanmoins, l'enseignement principal de cette étude est que la fraction volumique agit de manière très significative sur les caractéristiques de la propagation du feu (facteur 20 sur la vitesse) dans un domaine de variation observée en conditions naturelles. Ces variations observées avec le modèle sont corroborées par quelques expériences et modèles théoriques simples, eux-même appuyés sur l'expérience. Il apparaît donc pertinent de s'interroger sur les effets de sa distribution spatiale (hétérogénéité du combustible). C'est ce qui sera fait au cours des chapitres suivants.

Notons enfin que ces travaux ont également permis de mettre en lumière et diagnostiquer un certain nombre de limites du code (rayonnement, écoulements). Elles ont été dépassées dans le cadre de mon travail (partie écoulement) ou dans des travaux auxquels j'ai collaboré (partie rayonnement).

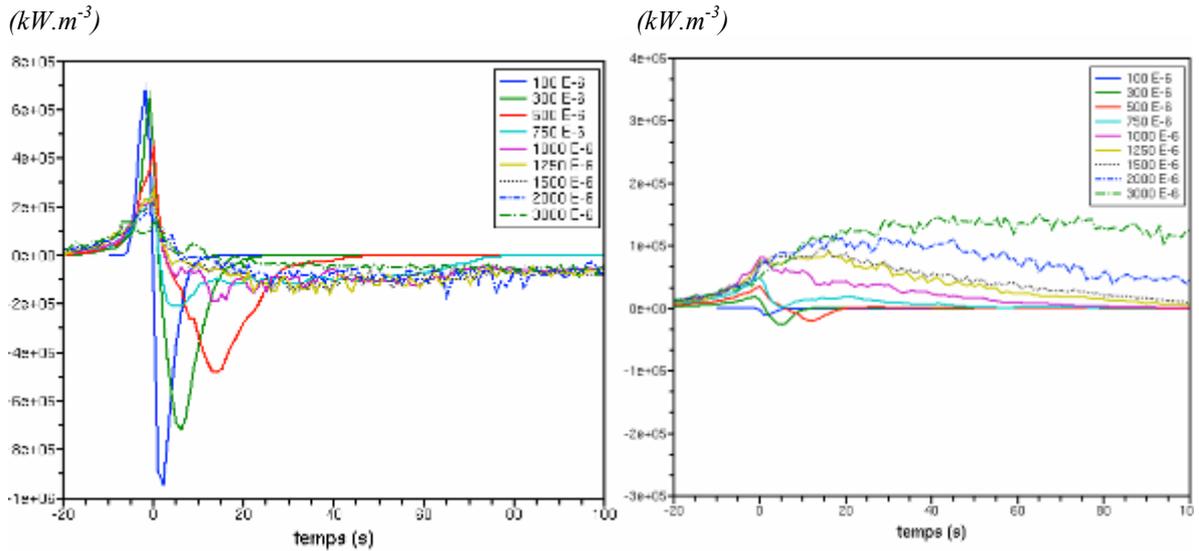


Fig. 1.21. Flux de chaleur reçu par le combustible par transfert convectif (a) et radiatif (b)

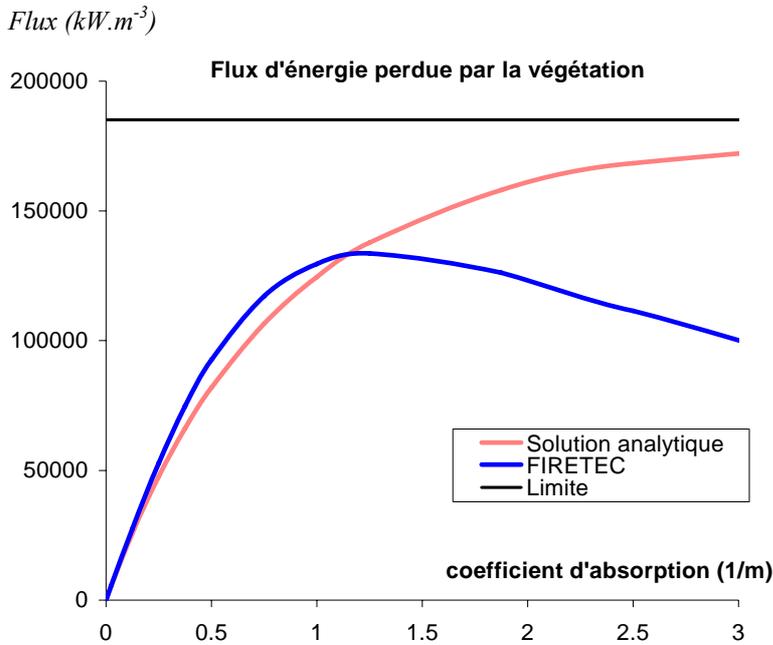


Fig. 1.22. Mise en évidence du problème de sur-absorption de la source solide aux fortes densités par FIRETEC dans le cas d'une source simple.

Annexe 1.1. Mise en évidence sommaire du problème de calcul dans le code de rayonnement

Les **Fig. 1.21 a et b** représentent respectivement les flux de chaleur vers la phase solide par convection et rayonnement, issus des données ponctuelles moyennées. La phase d'échauffement convectif (avant l'inflammation) se caractérise par un flux convectif positif. Une fois la végétation enflammée, il s'ensuit une phase de refroidissement convectif ; la végétation est alors refroidie par l'écoulement incident. En revanche, pour le rayonnement, on ne passe pas par cette phase de refroidissement pour les fractions volumiques les plus élevées.

Les profils obtenus pour le rayonnement dans ce travail, ainsi que dans d'autres études ont conduit à un examen détaillé du mode de calcul du rayonnement. Ces travaux menés notamment avec Gilles Scarella (Post-Doc dans l'équipe PEF), ont permis de mettre en évidence un certain nombre de dysfonctionnements dans le mode de calcul du rayonnement. Le principal problème provenait d'une divergence du solveur de l'équation pour les coefficients d'absorption élevés. Le problème « à une source sphérique », pour lequel il existe une solution analytique (Modest 2003), a permis de le mettre en évidence. Une étude simple a montré que le flux d'énergie sortant de la source pouvait être sous-estimé aux fortes densités (**Fig. 1.22**). Ceci se traduit donc par un combustible dense incapable de se refroidir par rayonnement (**Fig. 1.21**).

Ce problème qui nous est d'abord apparu comme grave, n'a cependant que peu d'impact sur les caractéristiques du feu, car un certain nombre de tests réalisés avec la version corrigée ont montré des comportements très similaires, notamment en ce qui concerne les isosurfaces de température, les températures atteintes et les vitesses de propagation. Cette stabilité du comportement du modèle vient probablement du fait que, dans la phase d'échauffement ($T < 600$ K) qui est déterminante pour les caractéristiques de la propagation du feu, la convection est largement prépondérante.

Ce problème est aujourd'hui résolu et les profils de rayonnement sont similaires à ceux obtenus aux faibles fractions volumiques.

Bibliographie

- Andrews PL (1986) BEHAVE: Fire behaviour prediction and fuel modelling system – BURN subsystem, part 1, USDA Forest Service, Research paper INT-194. 130p.
- Anderson HE (1969) Heat Transfer and Fire Spread. USDA Forest Service, Research Paper INT-69. 20p.
- Beukema SJ, Greenough DC, Robinson CE, Kurtz WA, Reinhardt ED, Crookston NL, Brown JK, Hardy CC, Stage AR (1997) An introduction to the fire and fuels extension to FVS. In Teck R, Mouer M, Adams J, Eds. Proceeding of the Forest Vegetation Simulator conference, 3-4 février 1997, Fort Collins, CO. General Technical Report INT-373. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Research Station. 191-195.
- Brown JK (1978) Weight and density of crowns of Rocky Mountain conifers. Research Paper INT-197. Ogden, UT: USDA, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station, 56p.
- Byram GM (1959) Forest fire behaviour. In: Forest Fire: control and use. (Ed. KP Davis) pp 90-123. McGraw-Hill: New York.
- Catchpole EA, Catchpole WR, Rothermel RC (1993) Fire Behavior Experiments in Mixed Fuel Complexes. *International Journal of Wildland Fire* **3** (1), 45-57.
- Cheney NP, Gould JS, Catchpole WR (1993) The influence of Fuel, Weather and Fire Shape Variables on Fire-Spread in Grasslands. *International Journal of Wildland Fire* **3** (1), 31-44.
- Cheney NP, Gould JS, Catchpole WR (1998) Prediction of fire spread in grasslands. *International Journal of Wildland Fire* **8** (1), 1-13.
- Clark TL, Jenkins MA, Coen J, Packham D (1996) A coupled atmosphere-fire model : role of the convective Froude number and dynamic fingering at the fireline. *International Journal of Wildland Fire* **6**, 177-190.
- Cruz MG (2004) Ignition of crown fuels above spreading surface fires. PhD Dissertation, University of Montana, Missoula. June 2004, 240 pp.
- Dupuy JL, Vachet P, Maréchal J (2006) Fuel bed temperature measurements in laboratory fire spreading over a slope. In: Proceedings of V International Conference on Forest Fire research. D.X. Viegas (Ed.), 2006.
- Heiman WE, Fast JD (1992) Simulations of horizontal roll vortex development above lines of extreme surface heating. *International Journal of Wildland Fire* **2**, 55-68.
- Linn RR, Cunningham P (2005) Numerical simulations of grass fires using a coupled atmosphere-fire model: basic fire behavior and dependence on wind speed. *Journal of Geophysical Research*. **110**. D13107. 19pp.
- Linn RR, Winterkamp J, Colman JJ, Edminster C, Bailey J (2005a.) Modeling interactions between fire and atmosphere in discrete element fuel beds. *International Journal of Wildland Fire* **14**, 37-48.
- Modest MF (2003) Radiative Heat Transfer. Academic Press. Second Edition. 822 pp.
- Morvan D, Dupuy JL (2001) Modeling Firespread Through a Forest Fuel Bed Using a Multiphase Formulation. *Combustion and Flame* **127**, 1981-1994.
- Nelson RM Jr (2003) Power of a fire-a thermodynamic analysis. *International Journal of Wildland Fire* **12**, 51-65.
- Pimont F, Linn RR, Dupuy J-L, Morvan D (2006) Effects of vegetation description parameters on forest fire behavior with FIRETEC. In: Proceedings of V International Conference on Forest Fire research. D.X. Viegas (Ed.), 2006.
- Rothermel RC (1972) A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, General Technical Report INT-115, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Sando RW, Wick CH (1972) A method for evaluating crown fuels in forest stands. Research Paper NC 84. Saint Paul, MN: USDA, Forest Service, North Central Forest Experiment Station. 10p.
- Scott JH, Reinhardt ED (2001) Assessing Crown Fire Potential by Linking Models of Surface and Crown Fire Behavior. USDA Research Paper RMRS-RP-29.
- Su HB, Shaw RH, Paw UKT, Moeng CH, Sullivan PP (1998) Turbulent statistics of neutrally stratified flow within and above a sparse forest from large-eddy simulation and field observations. *Boundary-layer Meteorology* **88**, 363-397.
- Vigy O, Rigolot E, Valette J-C (2005) Fire Star Wildland Fuel Structure: Model Results. FIRE STAR EVG1-CT-2001-00041. Deliverable D6-04.
- Wolff MF, Carrier GF, Fendell FE (1991) Wind-aided fire-spread across arrays of discrete fuel elements. II experiment. *Combustion Science and Technology* **77**, 261-289.

Chapitre 2. Hétérogénéité du combustible et transfert radiatif

1. Introduction

Rappel de la problématique

Nous avons vu en introduction que les incendies de forêt se propagent dans un milieu fortement hétérogène à plusieurs échelles : de la pousse au peuplement. Les modèles physiques de propagation du feu permettent de prendre en compte les motifs spatiaux présents dans la végétation au travers d'une représentation explicite de celle-ci. Les niveaux de spatialisation varient selon les modèles, entre une spatialisation très détaillée (Echelle *S*, de l'ordre de la dizaine de centimètres), une spatialisation intermédiaire (Echelle *M*, de l'ordre du mètre) et une spatialisation grossière (Echelle *L*, de l'ordre de la dizaine de mètre). Une description fine de la végétation sur un maillage constitue une tâche très lourde (Cohen *et al.* 2004). Mais une description grossière ne permet pas de prendre en compte des hétérogénéités spatiales à l'échelle du buisson ou de l'agrégat de feuilles, qui sont susceptibles d'affecter la propagation du feu.

Cas du transfert radiatif

Dans cette partie nous étudierons l'impact de l'hétérogénéité de la végétation sur le transfert radiatif. Ce mode de transfert est très important, car il conditionne à la fois l'échauffement en avant de la flamme, mais aussi le refroidissement de la végétation et de la flamme. Historiquement, c'est également le premier mode de transfert qui a été appréhendé dans les modèles physiques (Albini 1985), à la fois parce qu'il était supposé dominant par rapport à la convection, mais aussi vraisemblablement parce qu'il était plus facile à mettre en œuvre. Le calcul du transfert radiatif dans les modèles physiques est basé sur l'hypothèse des milieux turbides (Albini 1985 ; Grishin 1997 ; Linn 1997 ; Morvan & Dupuy 2001 ; Cruz *et al.* 2006, voir aussi les revues de Pastor *et al.* 2003 et de Sullivan *et al.* 2003). Dans ce contexte, la variation spatiale non aléatoire de la surface foliaire au sein de la canopée se traduit par une variation spatiale du coefficient d'absorption du rayonnement (qui lui est directement proportionnel). Le transfert radiatif lumineux dans les canopées a été largement étudié depuis cinquante ans. Il a permis de mettre en évidence une influence significative de la structure de la végétation sur ce mode de transfert. Il a également permis d'identifier les principales influences de la structure de la végétation (agrégation à l'échelle de la pousse dans le cas des conifères), de mettre en œuvre des méthodes pour le prendre en compte (coefficient d'agrégation, paramètre $STAR^{15}$, raffinement du combustible) et d'identifier les échelles pertinentes pour la description dans le contexte de l'approximation des milieux turbides.

¹⁵ ratio de "shoot silhouette area to total needle area" (Oker-Blom & Smolander 1988)

Plan de la partie

Après un bref rappel des pré-requis concernant le rayonnement, un bilan des acquis de l'approche adoptée pour le transfert radiatif lumineux dans les canopées sera dressé car il fournit des pistes sur la manière d'aborder le transfert thermique dans le contexte des incendies. Nous verrons ensuite quelle approche il est possible de développer et d'adapter dans ce contexte spécifique. L'ensemble de ce travail est détaillé en partie 4 sous la forme d'un article soumis à l'*International Journal of Wildland Fire*, précédé d'une introduction en français. Dans le cas de plusieurs types de végétation méditerranéenne, à la fois arbustive et arborée, les différents motifs et les différentes caractéristiques du combustible conduisant à des effets significatifs de l'hétérogénéité sont déterminés. D'une manière générale, ces démarches nécessitent de disposer d'une connaissance précise de la distribution de la végétation et de ses caractéristiques. Dans le cadre du travail sur le transfert radiatif, la méthode architecturale développée à Montpellier a été largement utilisée (cf chapitre 0, partie 1.3, annexe 0.1 et annexe I ; Caraglio *et al.* 2006) et un modèle d'architecture de pousse a été construit.

2. Généralités sur le transfert radiatif (Sacadura 1980 ; Siegel & Howell 1992)

L'équation du transfert radiatif (ETR) pour la *luminance monochromatique* (*Intensity* en anglais) i_λ (en $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2} \cdot m^{-1}$) s'écrit

$$\frac{di_\lambda}{dS} = a_\lambda i_{\lambda b} - (a_\lambda + \sigma_{s\lambda}) i_\lambda + \frac{\sigma_{s\lambda}}{4\pi} \int_0^{4\pi} i_\lambda(S, \omega_i) \varphi(\lambda, \omega, \omega_i) d\omega_i, \text{ dans la direction } S \quad (2.1)$$

avec $i_{\lambda b}$ l'émissance monochromatique par les sources, a_λ et $\sigma_{s\lambda}$ les coefficients d'absorption et de diffusion.

On suppose le *corps gris*, avec un coefficient de diffusion et d'absorption ne dépendant pas de la longueur d'onde (émissivité non spectrale mais éventuellement strictement inférieure à 1). On peut donc intégrer l'ETR sur les longueurs d'onde.

$$a = \varepsilon_p \frac{\alpha\sigma}{4}, \text{ pour des particules isotropes, convexes, et grises} \quad (2.2)$$

Par ailleurs, dans l'infrarouge thermique, l'émissivité des matériaux comme le bois est très voisine de 1 (Sacadura 1980 ; Campbell et Norman 1997 ; travaux récents de P Boulay communiqués au GDR feux du CNRS, Corte, 5 et 6 juin 2007, sur des échantillons de végétation méditerranéenne). Ceci implique que le coefficient de diffusion est très petit et permet de négliger la diffusion.

L'émissance est calculée sur la base de la loi d'émission du corps noir (loi de Stefan Boltzmann).

$$i_b = \frac{\sigma T^4}{\pi} \quad (2.3)$$

Ces hypothèses nous permettent d'aboutir à l'ETR pour la luminance i (en $W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$) :

$$\frac{di}{dS} = a i_b - a i \text{ dans la direction } S \quad (2.4)$$

Encadré 2.1. LAI et LAD

Une grandeur largement utilisée pour la caractérisation de la structure de la canopée est le *LAD* (*leaf area density*), qui correspond en général à la demi surface foliaire, par unité de volume (Chen & Black 1992).

$$LAD = \frac{\alpha\sigma}{2} \quad (2.7)$$

On notera que $LAD = 2a$, avec a le coefficient d'absorption du rayonnement, sous l'hypothèse

classique $a = \frac{\alpha\sigma}{4}$

Le *LAI* est alors défini par l'intégrale sur la hauteur de la canopée du *LAD*. Il représente la demi surface foliaire, par unité de surface au sol (Chen & Black 1992), mais aussi le double de l'épaisseur optique de la couche de végétation.

$$LAI = \int_0^h LAD(z) dz, \text{ avec } h \text{ la hauteur de végétation.} \quad (2.8)$$

Le flux radiatif (Φ , en W) est la quantité d'énergie émise, transmise ou reçue pendant une unité de temps. L'éclairement ou irradiance ϕ (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) est le flux radiatif incident par unité de surface. On l'obtient en intégrant l'ETR sur toutes les directions. En tenant compte des autres approximations, on obtient :

$$\int_0^{4\pi} \frac{di}{dS} d\omega = 4a \sigma T^4 - a \phi \quad (2.5)$$

$$\text{Le bilan de flux radiatif s'écrit donc } \Phi = 4a \sigma T^4 - a \phi \quad (2.6)$$

La transmittance est le flux radiatif transmis. Il s'agit du flux qui traverse le milieu, dans notre cas, la végétation. Elle dépend de l'épaisseur optique du milieu $k = aL$ (où L est l'épaisseur physique du milieu). Lorsque $k \ll 1$, le milieu est dit transparent ou optiquement mince. Lorsque $k \gg 1$, le milieu est dit épais ou optiquement dense. La structure de la canopée est caractérisée par l'orientation, la taille, la forme et la quantité d'éléments végétatifs (Weiss *et al.* 2004).

3. Transfert radiatif lumineux dans les canopées

La recherche en matière de transfert radiatif lumineux dans les canopées est très riche. Elle vise à mieux comprendre le fonctionnement des plantes en déterminant des bilans précis du flux solaire absorbé par la végétation. Les applications de ces études sont multiples (domaine de l'agronomie, de la modélisation des flux de carbone, etc.). Elle repose sur une description de la communauté de plantes sous forme de milieu optique (Nilson & Ross 1997). Un aspect important est la détermination du *LAI* (*Leaf Area Index*), l'indice de surface foliaire. Il permet par exemple de déterminer les caractéristiques des échanges d'énergie et de masse entre la plante et la canopée. Sous certaines hypothèses concernant le transfert radiatif, la connaissance du *LAI* permet d'évaluer la fraction de rayonnement photosynthétiquement actif (fAPAR) (Weiss *et al.* 2004). A l'inverse, les mesures de télédétection optique permettent de déterminer le *LAI*, en évitant les mesures destructives (Jonckheere *et al.* 2004).

Dans ce domaine, les techniques laser (LIDAR terrestre) semblent extrêmement prometteuses et supplanteront sans doute un jour la photo hémisphérique (Morsdorf *et al.* 2006).

Cependant, la complexité du milieu et son hétérogénéité rendent invalides le lien entre surface foliaire et rayonnement absorbé (ou transmis). Selon Hardy *et al.* (2004), « Les dynamiques des bilans d'énergie sous les canopées sont fortement affectées par une large variabilité spatiale des transferts radiatifs et turbulents dans cet environnement. La transmission du rayonnement solaire est en particulier fortement affectée par la taille et la place des trouées (gaps) de la canopée, ainsi que par la surface foliaire. La modélisation de la transmission est quelque chose de délicat compte tenu de la nature fortement variable des trous dans et entre les canopées, en particulier dans les canopées discontinues. »

De notre point de vue, l'approche transfert radiatif solaire dans les canopées peut nous permettre :

- i. de valider nos valeurs de fraction volumique moyenne (via les données de *LAI*)
- ii. d'évaluer les propriétés optiques des canopées, en particulier liées à l'hétérogénéité
- iii. de servir de guide quant aux effets à attendre et aux méthodologies à développer dans le contexte des incendies

3.1. Limites de l'hypothèse de distribution homogène de végétation

La transmittance dans la végétation : la fraction de trouées (gap fraction)

On définit la fréquence des trouées comme la probabilité qu'un rayon pénétrant dans la canopée n'ait aucun contact avec des éléments de la végétation avant d'atteindre un niveau de référence (Ross 1981). Sous l'hypothèse d'une distribution aléatoire de particules infiniment petites (modèle de Poisson), on peut montrer aisément que la probabilité qu'un rayon traverse un élément de longueur dx est:

$$dP(\theta, \phi) = 1 - G(\theta, \phi) LAD dx, \quad (2.9)$$

avec θ et ϕ les angles zénithaux et azimuthaux de la direction pour laquelle un rayon rentre dans la canopée et $G(\theta, \phi)$, la projection moyenne d'une unité de surface foliaire.

Lorsque la distribution des orientations foliaires est aléatoire (et que les particules sont convexes), on obtient :

$$\overline{G(\theta, \phi)}^{x,y,z} = \frac{1}{2} \quad (2.10)$$

en application de certains théorèmes de Cauchy sur les projections (Lang 1991 ; Knyazikhin *et al.* 2005)

On retrouve alors dans ce cas, le coefficient d'absorption $a = \frac{LAD}{2}$

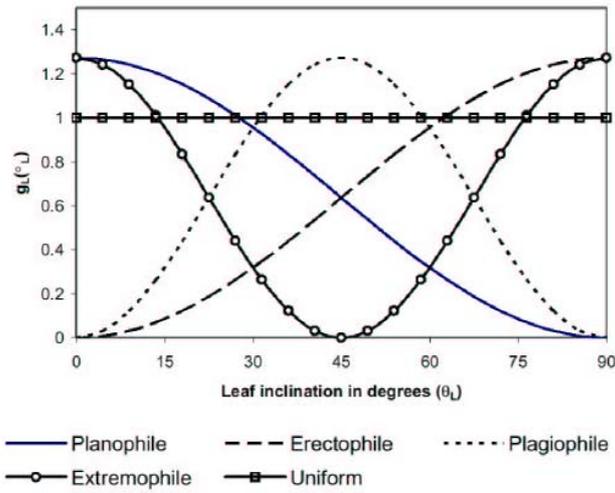
Nilson (1971) présente des arguments théoriques et empiriques pour justifier une expression générale, y compris lorsque les hypothèses du modèle poissonien ne sont pas satisfaites. La *fraction de trouées* est l'intégration sur un domaine donné de la fréquence de trouées. Lorsqu'on intègre l'équation sur la hauteur de la végétation, on obtient :

$$P(\theta, \phi) = \exp\left(-\frac{G(\theta, \phi) LAI}{\cos(\theta)}\right) \quad (2.11)$$

La mesure de la fraction de trouées permet donc d'accéder, via une inversion à la valeur du LAI , qui illustre les liens entre LAI et transfert radiatif.

Confrontation du modèle à l'expérience : effets de l'hétérogénéité

Les LAI calculés sur la base du modèle issu de l'équation (2.11) ont fréquemment été comparés à des mesures destructives. Ceux-ci ont mis en évidence une sous-estimation systématique des valeurs de LAI obtenues. On citera par exemple les travaux de Chason *et al.* (1991), Chen & Cihlar (1995b), Nackaerts *et al.* (1999) qui mettent en évidence des écarts allant de 30 à 70 %. Ces écarts ont été attribués à l'orientation foliaire, mais surtout à l'hétérogénéité spatiale (Oker-Blom & Kellomäki 1982 & 1983 ; Nilson 1992 ; Knyazikhin *et al.* 2005). D'une manière générale, l'hétérogénéité augmente la transmission dans les canopées hétérogènes (Davis & Marshak 2004) : dans un tel cas, la distribution du libre parcours moyen devient plus large que l'exponentielle, alors qu'elle est exponentielle dans un cas homogène. Les trouées permettent au rayonnement d'illuminer plus loin en moyenne. Ce résultat repose sur la convexité de la distribution de libre parcours moyen.



Main expressions of the leaf inclination distribution function

Canopy type	$g(\theta_1)$	ALIA, $\bar{\theta}_1$ (°)	$\langle \theta_1^2 \rangle$	μ	ν
Planophile	$2(1 + \cos 2\theta_1)/\pi$	26.8	1058.6	2.770	1.172
Erectophile	$2(1 - \cos 2\theta_1)/\pi$	63.2	4341.4	1.172	2.770
Plagiophile	$2(1 - \cos 4\theta_1)/\pi$	45.0	2289.6	3.326	3.326
Extremophile	$2(1 + \cos 4\theta_1)/\pi$	45.0	3110.3	0.433	0.433
Uniform	$2/\pi$	45.0	2700.0	1.000	1.000
Spherical	$\sin \theta_1$	57.3	3747.6	1.101	1.930

$g(\theta_1)$ is the distribution function of foliage inclination (assuming a uniform distribution function of the leaf azimuth angle); ALIA is the average leaf inclination angle θ_1 ; and μ and ν are the beta distribution parameters.

$$\begin{cases} \bar{\theta}_1 = \frac{90\nu}{\mu + \nu} \\ \langle \theta_1^2 \rangle = \frac{90^2 \nu(\nu + 1)}{(\mu + \nu)(\mu + \nu + 1)} \end{cases}$$

Fig. 2.1. Six distributions d'inclinaison et d'orientation foliaire proposées (d'après Goels & Strebel 1984 et Goels 1988)

La fonction de distribution d'inclinaison et de l'orientation des feuilles : $g(\theta_1, \varphi_1)$

θ_1, φ_1 les angles zénithaux et azimutaux de la direction normale foliaire.

La variation azimutale de la distribution est en général supposée uniforme. Cette hypothèse est en général valide à grande échelle, sauf en de rares cas (plantes héliotropes ou structurée par le vent par exemple). Lemeur (1973) a montré que la distribution de feuilles de culture était quasi aléatoire (avec cependant une direction privilégiée perpendiculairement aux cultures). La question de l'inclinaison est beaucoup plus complexe. On définit le *LIDF (Leaf Inclination Distribution Fonction)*. Goels & Strebel (1984) et Goels (1988) proposent six distributions types : planophile, érectophile, plagiophile, extrémophile, uniforme et shérique. Elles peuvent être représentées par une distribution β dont les paramètres peuvent être reliés à la moyenne (ALIA) et au second moment de l'angle d'inclinaison foliaire (**Fig. 2.1**).

Campbell (1986) et Campbel & Normann (1997) proposent quant à eux l'utilisation d'une distribution ellipsoïdale, dont les paramètres peuvent être reliés à l'inclinaison moyenne. Ce modèle peut être généralisé (modèle elliptique de Kuusk). D'après Bacour (2001), la distribution ellipsoïdale est la moins complexe et la plus flexible.

Du LAI effectif au LAI vrai

Afin de prendre en compte la variation spatiale due à l'hétérogénéité spatiale de la végétation, un certain nombre d'auteurs (Nilson 1971 ; Lemeur 1974 ; Chen & Black 1992) ont introduit un paramètre d'agrégation λ_0 (*clumping index*), permettant de passer de la valeur de LAI effectif (tel que mesuré) au LAI vrai :

$$P(\theta, \phi) = \exp\left(-\frac{G(\theta, \phi) LAI_{eff}}{\cos(\theta)}\right) \quad (2.12)$$

On a alors $LAI_{eff} = \lambda_0 LAI$, avec $\lambda_0 < 1$ en cas d'agrégation

λ_0 dépend à la fois de la structure de:

- la plante à petite échelle : localisation du feuillage le long des tiges, des branches et des troncs.
- la canopée à grande échelle : (Lang 1986 ; Stenberg 1994 ; Chen *et al.* 1997).

La forme et la taille des feuilles peuvent également jouer un rôle important (effet d'écran). Nilson (1971) suggère qu'il serait nécessaire de relier λ_0 à la taille et à la distance entre les éléments de la végétation. D'après Kucharik *et al.* (1998), il dépend aussi de l'angle sous lequel est vue la canopée. Chen & Cihlar (1995a) définissent la distribution d'accumulation des tailles de trouées ($F(d)$: fraction d'un transect contenant des trouées supérieures à d). Ils proposent alors :

$$\lambda_0 = \frac{\ln(Fm(0))}{\ln(F(0))} \quad (2.13)$$

(l'indice m correspondant à la canopée étudiée, l'absence d'indice correspond à une canopée distribuée aléatoirement).

Tableau 2.1. Paramètres synthétisant l'ensemble des effets d'agrégation sur le transfert radiatif lumineux (selon Gower *et al.* 1999)

Paramètre	γ_E	Ω_E	α
Description	Agrégation à l'échelle de la pousse	Agrégation à une échelle supérieure à celle de la pousse	Rapport de la surface exposée du bois à la surface totale
Echelle de valeur	1-2	0.38 – 0.95	0.03-0.035

Andrieu & Sinoquet (1993) comparent la variation angulaire de ce paramètre pour une canopée homogène et pour une culture. Dans ce dernier cas, le paramètre d'agrégation est fortement dépendant des directions. Ils montrent aussi qu'il est plus important de prendre en compte la variation spatiale de la densité que celle de l'orientation. Un autre facteur qui perturbe les mesures optiques de LAI est la présence de parties non feuillées responsable d'un facteur d'écran pas toujours négligeable (Chen *et al.* 1997). On introduit alors la notion de PAI (Plant Area Index), qui correspond à la demi surface exposée par unité de surface au sol de toute la plante. On peut alors introduire un coefficient α qui représente la fraction de bois. On a alors recours à des mesures destructives pour évaluer α .

$$LAI_{eff} = \frac{\lambda_0}{1 - \alpha} LAI \quad (2.14)$$

On peut également procéder par analyse digitale (Kucharik *et al.* 1998). Dans ce cas, un cluster permet de séparer les parties photosynthétiques du bois sur les images. La fraction de bois responsable de l'interception lumineuse varie entre 3 et 35 %, les valeurs maximales étant atteintes pour de vieux arbres (Gower *et al.* 1999).

Gower *et al.* (1999) vont encore plus loin en séparant le terme d'agrégation λ_0 en deux termes (**Tableau 2.1**) : l'un représente l'agrégation à l'échelle de la pousse ($1/\gamma_E$) et le second représente l'agrégation à une échelle supérieure à celle de la pousse (Ω_E). Nous reviendrons plus en détails sur le paramètre γ_E au paragraphe 2.3.3. Il obtient ainsi la formulation :

$$LAI_{eff} = \frac{\Omega_E}{1 - \alpha} LAI \quad (2.15)$$

Il apparaît donc que le lien surface foliaire/rayonnement absorbé peut être considérablement perturbé par la distribution spatiale et l'orientation de la végétation. La définition d'un paramètre pseudo-empirique de calibration permet d'affiner le lien. Cependant, cette approche est limitée car elle est susceptible de varier d'une espèce à l'autre et d'un peuplement à un autre. L'hypothèse d'homogénéité du peuplement n'est pas adaptée pour certains peuplements (par exemple si l'âge varie, Stenberg 1994). Rappelons que les traitements DFCI¹⁶ tendent à augmenter l'hétérogénéité naturelle de la végétation. Une telle approche n'est donc pas envisageable dans notre domaine. Une voie possible est la résolution de l'ETR sur une canopée non plus homogénéisée, mais reprenant une spatialisation fine du combustible. C'est ce que nous allons voir dans la partie suivante. Cette approche a cependant des limites concernant l'agrégation aux très petites échelles (échelle de la pousse de pin notamment), dont le rôle peut être très important chez les conifères.

3.2. Prise en compte de l'hétérogénéité de la végétation par raffinement de la description du combustible

Résoudre l'ETR sur un maillage fin permet d'améliorer les calculs de transmissions avec l'approche « milieu turbide » (Sinoquet *et al.* 2005). Il s'agit donc de mieux discrétiser les variations de la densité foliaire à petite échelle afin d'affiner le calcul du libre parcours moyen (Davis & Marshak 2004) et ainsi d'améliorer la précision des calculs. Cette approche nécessite une spatialisation de la végétation en 3D, qui peut être obtenue par une méthode architecturale, une approche fractale ou des méthodes de digitalisation ou vectorisation (cf chapitre 0). Néanmoins, cette approximation n'est pas à même de prendre en compte les plus petites échelles d'agrégation.

¹⁶ Défense des Forêts Contre l'Incendie

Si l'on examine en détail les hypothèses mises en œuvre dans les milieux turbides (Ross 1981 ; Knyazikhin *et al.* 2005), on note que l'approche s'applique à une distribution dense de petits éléments plans, d'épaisseur et d'aire négligeables. Ces hypothèses s'avèrent un peu contradictoires. D'après Ross (1981), le volume élémentaire, utilisé pour la formulation des problèmes de transfert radiatif doit être suffisamment petit pour qu'il n'y ait pas d'ombre mutuelle entre les éléments, mais suffisamment grand pour appliquer des lois statistiques, comme la loi de Beer. Lorsque les mailles sont trop petites, c'est-à-dire que la taille des feuilles est trop grande ou que leur nombre est insuffisant, la loi de Beer doit être remplacée par une loi binomiale, prenant en compte explicitement le nombre d'éléments dans la maille ; Sinoquet *et al.* (2005) ont cependant montré que cet effet était très limité. Par ailleurs, la morphologie des plantes a une géométrie fractale qui n'est pas compatible avec ces hypothèses (De Reffye *et al.* 1991 ; Knyazikhin *et al.* 1998). En effet, l'agrégation à petite échelle (notamment celle des pousses) induit une variabilité spatiale importante du LAD sur des échelles très courtes et un ombrage mutuel important à des échelles spatiales déjà petites devant le nombre d'éléments. Ce caractère fractal de la végétation à petite échelle rend l'utilisation de l'approche « milieu turbide » hasardeuse à une échelle infiniment petite. Selon Ross (1981), lorsque la taille du maillage s'approche de celle des particules, on ne peut plus améliorer la précision. D'après Kranigk (1996), le fait de dépasser un seuil de résolution critique génère des instabilités numériques, alors que certaines considérations théoriques montrent qu'un raffinement excessif du maillage peut conduire à des résultats moins précis (Knyazikhin *et al.* 1998). Selon Fournier *et al.* (1996), la dimension optimale est estimée sur la base de l'organisation du feuillage et de la branchaison. La dimension doit donc être pondérée par la longueur des segments de branches contenant des aiguilles et par la projection moyenne d'un cylindre formé par le feuillage sur les branches. A l'inverse, lorsque la taille de maille est trop importante, l'ombre mutuelle devient importante. Dans le cas des conifères où l'agrégation à petite échelle est très marquée, une résolution directe est impossible, nous reviendrons sur ces aspects dans la partie suivante.

3.3. Prise en compte de l'hétérogénéité au moyen d'un coefficient d'agrégation à l'échelle de la pousse (cas des conifères)

L'agrégation des aiguilles étroites en pousses agrégées est une stratégie architecturale commune à plusieurs genre de conifères (*Abies*, *Picea*, *Pinus*, *Pseudotsuga* et *Larix*, voir Cescatti & Zorer 2003). Ces agrégations affectent profondément le transfert radiatif, la photosynthèse et la dynamique de l'écoulement dans les canopées (Stenberg 1996), comme nous l'avons vu en partie 2.3.1. Ce niveau d'agrégation dense dans les petites zones occupées par des pousses induit des variations importantes de la densité d'aiguilles à l'échelle de la pousse, du cm au dm (Ross 1981 ; Knyazikhin *et al.* 1998 ; Shabanov *et al.* 2000). Cette variabilité à petite échelle ne peut être introduite dans les distributions de LAD et une ombre mutuelle substantielle est toujours présente (Oker-Blom & Smolander 1988). Afin de sauvegarder l'approximation des milieux turbides, un certain nombre d'auteurs proposent d'utiliser la pousse comme élément structurel de base du milieu turbide (Nilson & Ross 1997 ; Chen *et al.* 1997). C'est le caractère répétitif des motifs de pousse qui permet d'utiliser la pousse plutôt que l'aiguille ou la feuille comme élément de base de l'approche turbide, ce que n'autorisent pas les autres niveaux d'agrégation, comme la branche ou le houppier (Chen & Cihlar, 1995a & b).

Un certain nombre d'études confirment le fait que l'on peut traiter les pousses d'aiguilles comme des éléments de base du feuillage pour l'interception du rayonnement. On décrit alors la canopée en terme de distribution spatiale et angulaire des pousses et les propriétés géométriques et spectrales des feuilles sont remplacées par celles des pousses dans les modèles d'interception lumineuse (Oker-Blom & Kellomäki 1983 ; Nilson & Ross 1997 ; Cescatti 1998) et dans les techniques de mesure du LAI (Chen *et al.* 1997 ; Stenberg 1996). Nilson & Ross (1997) présentent même une approche pour l'analogie des milieux turbides à l'échelle de la pousse, en supposant une distribution aléatoire d'aiguilles sur des pousses cylindriques idéalisées.

Le point clé est l'entrée dans les modèles de la shoot silhouette total area ratio (*STAR*) (Oker-Blom & Smolander 1988), qui constitue l'analogie de la fonction G ou de la projection moyenne d'unité de surface foliaire, définie pour les feuilles plates (Nilson 1971).

Le paramètre STAR

Au lieu d'utiliser $a = \alpha\sigma/4$, Oker-Blom & Smolander (1988) proposent d'utiliser $a = STAR.\alpha.\sigma$, où *STAR* correspond au rapport entre la surface projetée moyenne d'une pousse et la surface totale de ses aiguilles. Ce paramètre vaut $1/4$ dans le cas homogène aléatoire (position aléatoire d'aiguilles aléatoirement orientées, Stenberg 1996). Il s'interprète comme étant le paramètre $1/4\gamma_E$ de Gower *et al.* 1999. Un certain nombre d'auteurs proposent d'autres coefficients, tous proportionnels au *STAR*. On notera le R_{max} de Leverenz & Hinckley (1990), qui correspond à l'aire projetée de la pousse divisée par l'aire projetée de ses aiguilles (*i.e.* mise à plat). On a alors $R_{max} = STAR \times \pi$. Nilson & Ross (1997) proposent le *RGCS* (*relative geometrical cross section of the particle*) qui correspond à la surface projetée divisée par la demi surface totale. On a alors $RGCS = STAR \times 2$.

Mode de calcul ou de mesure

Un paramètre baptisé *STAR* peut être évalué sur la base de photographies numériques (Smolander & Stenberg 2003) ou de modélisation de l'architecture des pousses (Stenberg 1996 ; Stenberg *et al.* 1999 ; Smolander & Stenberg 2003). Un certain nombre d'hypothèses concernant l'architecture et les paramètres de la pousses sont alors introduits (aiguilles de la même taille et cylindriques, les paires d'aiguilles sont régulièrement disposées autour de l'axe de la pousse, l'angle entre l'aiguille et l'axe est constant, etc.). Ces études montrent qu'un certain nombre de paramètres affectent l'efficacité de l'interception, comme la densité de surface foliaire, la distribution angulaire et l'agrégation des aiguilles.

Valeurs typiques

La littérature montre que les valeurs du paramètres *STAR* varient entre 0.08 et 0.3 (Leverenz & Hinckley 1990 ; Stenberg 1996 ; Stenberg *et al.* 1999 ; Guyon *et al.* 2003). Les valeurs de 0.3 correspondent à des espèces dont la dispersion du feuillage est régulière ($STAR > 0.25$) et on les rencontre pour des espèces comme *Sequoia sempervirens* et *Abies grandis*. Les valeurs minimales sont obtenues pour des espèces comme *Picea orientalis*. D'une manière générale, les valeurs typiques sont de 0.15 pour *Pinus sylvestris* et *Pinus conforta* ou encore 0.2 pour *Pinus pinaster*. Ces valeurs varient au sein de l'arbre : entre 0.1 dans la partie haute pour *Pinus sylvestris* à 0.2 dans la partie basse. D'une manière générale, le ratio surface totale/surface projetée augmente dans le houppier avec la disponibilité en lumière (Stenberg 1996 ; Cescatti & Zorer 2003).

3.4. Bilan

Le transfert radiatif lumineux a été largement étudié dans les canopées durant les trente dernières années. Si l'on s'appuie sur les acquis de cette discipline, il apparaît que les hétérogénéités du combustible peuvent affecter le transfert radiatif à trois niveaux. En premier lieu, il y a une variation spatiale non aléatoire de la surface foliaire dans la canopée, qui se traduit par une variation spatiale du coefficient d'absorption du rayonnement (qui lui est directement proportionnel). Ensuite, les particules de végétation ne sont pas infiniment fines. Enfin, il y a une agrégation particulière à l'échelle de la pousse, en particulier chez les conifères. Plus généralement, l'approximation des milieux turbides pose un paradoxe car elle s'appuie sur deux hypothèses contradictoires (Ross 1981 ; Knyazikhin *et al.* 2005). D'un côté, le nombre d'éléments présents dans une maille doit être suffisamment grand pour que l'on puisse appliquer les lois statistiques (comme la loi de Beer) aux distributions de surfaces foliaires et d'angulation avec une précision suffisante.

De l'autre, un volume élémentaire doit être suffisamment petit pour limiter les phénomènes d'ombre mutuelle entre feuilles. De plus, il apparaît que la morphologie foliaire a une géométrie fractale qui est incompatible avec ces hypothèses (De Reffye *et al.* 1991 ; Knyazikhin *et al.* 1998). Des considérations théoriques montrent même qu'un raffinement excessif du maillage peut conduire à des résultats moins précis (Knyazikhin *et al.* 1998). Afin de prendre en compte l'agrégation à très petite échelle, l'utilisation de paramètres d'agrégation est donc nécessaire. De plus, la structure répétitive des motifs de pousse dans les canopées permet d'utiliser la pousse plutôt que l'aiguille ou la feuille comme élément de base de l'approche turbide (Chen & Cihlar ; 1995a & b). Un paramètre baptisé STAR peut être évalué sur la base de photos numériques ou de modélisation de l'architecture des pousses (Stenberg 1996 ; Stenberg *et al.* 1999). Ce paramètre vaut $\frac{1}{4}$ dans le cas homogène aléatoire (position aléatoire d'aiguilles aléatoirement orientées). Une approche complémentaire à cette approche des très petites échelles est nécessaire pour prendre en compte l'échelle du buisson ou l'échelle entre branches (échelle *B* de FIRETEC). Raffiner le maillage et prendre en compte plus de détails dans la description de la végétation permet d'améliorer les calculs de transmission avec l'approche turbide (Sinoquet *et al.* 2005). Il s'agit donc de mieux discrétiser les variations de la densité foliaire à petite échelle. D'une manière générale, les effets de cette hétérogénéité peuvent être significatifs. Ils augmentent la transmission dans les canopées hétérogènes (Davis & Marshak 2004) : dans un tel cas, la distribution du libre parcours moyen devient plus large que l'exponentielle, alors qu'elle est exponentielle dans un cas homogène. Les trouées permettent au rayonnement d'illuminer plus loin en moyenne. Ce résultat repose sur la convexité de la distribution de libre parcours moyen. Dans ce contexte, raffiner l'échelle de description permet d'améliorer la précision des calculs. De ces calculs à petite échelle peuvent être dérivés des coefficients d'agrégation, qui permettent de définir un coefficient d'absorption effectif, qui prend en compte l'hétérogénéité. Un certain nombre d'exemples illustrant cette démarche existent en matière de mesure de LAI, de modélisation de la réflectance ou de transfert radiatif dans les nuages (Weiss *et al.* 2004 ; Smolander & Stenberg 2003 ; Benassi *et al.* 2004).

En matière de feux de forêts, notre problématique est à la fois plus simple est plus sophistiquée. D'un côté, la diffusion due à la végétation peut être négligée, ce qui simplifie le calcul de l'ETR. Les particules de combustible peuvent en effet être considérées comme des corps noirs dans l'infrarouge thermique et l'on peut négliger leur réflectance (Kimes *et al.* 1981 ; Albini 1985). Cependant, elle introduit deux complications sérieuses. La première est due au fait que la source de chaleur se trouve dans la végétation et à très courte distance de celle-ci. Une grande partie du transfert a donc lieu à très courte distance. On ne peut donc postuler que la source est à grande distance. Pour cette raison, les effets de l'hétérogénéité ne dépendent pas uniquement de la végétation mais aussi de la source elle-même.

De plus, la propagation n'est pas affectée directement par la transmission de l'énergie incidente, mais plutôt par l'irradiance de la végétation qui cause l'échauffement (Albini 1985). Pour ces deux raisons, les méthodes employées dans le domaine du rayonnement solaire doivent donc être adaptées.

4. Effet de l'hétérogénéité de la végétation sur le transfert radiatif dans un feu de forêt

4.1. Introduction

Le transfert radiatif nécessite a priori une description de la végétation aux trois échelles suivantes :

- i) A l'échelle de la pousse. A cette échelle, les particules ne sont pas aléatoirement distribuées. On a une agrégation qui fait que les particules se font écran et que leur orientation n'est pas aléatoire. On introduit le paramètre *STAR*. Si les particules étaient ponctuelles et aléatoirement orientées, on aurait $STAR = 1/4$. Cette technique permet de se passer de la description de la végétation au niveau de la pousse. Deux stratégies sont possibles pour évaluer le paramètre STAR : une mesure (sur la base de photographies), ou un calcul sur la base d'un modèle architectural de pousse (Smolander & Stenberg 2001). Nous avons notamment utilisé cette deuxième technique et nous verrons la description de notre modèle de pousse dans le paragraphe 3.4.1.
- ii) A l'échelle des branches. Cette forme d'hétérogénéité peut être prise en compte au moyen d'une voxelisation de la plante. Les données de fraction volumique par maille sont obtenues à partir d'une approche architecturale (arbre AMAP), paragraphe 4.2 ou de données mesurées (méthode cube de FIRESTAR). Dans le contexte du rayonnement, on considère à cette échelle une spatialisation de la distribution de pousses. On fera l'hypothèse que l'ombre mutuelle entre les pousses est négligeable (hypothèse des milieux turbides appliquée aux pousses). Notons qu'il serait possible d'attribuer à chaque voxel, un paramètre STAR dépendant de la position et de l'angle considéré pour l'absorption.
- iii) A l'échelle des houppiers. A cette échelle, on spatialise uniquement les houppiers. Par rapport aux techniques décrites en i) et ii), la prise en compte de cette échelle ne nécessite que la spatialisation des arbres individuels.

Notre objectif est de tester des représentations d'arbres à différentes échelles, de la plus précise permettant de prendre en compte les trois niveaux d'hétérogénéité à des représentations dégradées, en spatialisant par exemple uniquement les houppiers (valeur de fraction volumique constante au sein d'un houppier), ou même une représentation encore plus dégradée où la canopée n'est représentée que comme une strate homogène. La comparaison des différents modes de transferts sur ces représentations plus ou moins dégradées permettra d'évaluer l'impact de l'échelle de description et de déterminer quelles échelles sont nécessaires pour décrire correctement les principaux phénomènes. Concrètement, il s'agira d'écrire un code calculant le transfert radiatif issu d'une flamme sur de la végétation finement spatialisée, en intégrant une approche à l'échelle de la pousse et d'interpréter les résultats obtenus en terme de description du combustible et d'impact des hétérogénéités.

Dans l'étude qui suit, nous étudierons plus spécifiquement :

- une strate arbustive hétérogène « à l'échelle du bouquet », sous forme de patches d'arbustes de type « chêne kermès », dont l'hétérogénéité à l'échelle de la pousse est négligeable
- une canopée d'arbres (de type pin d'Alep et pin Maritime), présentant les trois niveaux d'hétérogénéité.

4.2. Article IJWF (Révision en cours, Pimont *et al.* 2007)

Effect of vegetation heterogeneity on radiative transfer in forest fire

François Pimont^{A,D}, Jean-Luc Dupuy^A, Yves Caraglio^B and Dominique Morvan^C

^A INRA, UR 629 Ecologie des Forêts Méditerranéennes, Equipe de Prévention des Incendies de Forêt, domaine Saint Paul, Site Agroparc, F-84914 Avignon Cedex9 France.

^B INRA-CIRAD. Unité de Modélisation des Plantes TA40/PS2. 34398 Montpellier, France.

^C UNIMECA. 60 rue Joliot Curie Technopôle de Château Gombert, 13453 Marseille cedex 13, France.

^DCorresponding author. Telephone: +33 4 32722947; fax:+33 4 32722902; email: pimont@avignon.inra.fr

Abstract. Wildland fires are driven by the heat transferred from the fire source to the unburned fuel bed, that is very heterogeneous at several scales. These heterogeneities from shoot to stand levels are likely to affect fire behaviour. In the context of theoretical fire modelling, we investigated the effects of departure from randomness in radiative transfer. A methodology derived from the approach developed for solar radiation in canopies or clouds was adapted to our problem. Fuel description was done from field measurements and plant architecture modelling. From several Mediterranean fuel type calculations, conditions on vegetation parameters that provide heterogeneity effects were exhibited. Results show that both a strong spatial variability in fuel distribution and a high vegetation density were required to provide significant effects. The combined effect of fuel surface area, cover fraction and heterogeneity size was studied. We showed that radiative transfer in heterogeneous maritime pines and dense shrub stands are significantly affected by heterogeneity, but mainly at crown and shoot scale. Lower effects are observed from Aleppo pine and light shrub fuel distributions, with the exception of shoot clumping. In terms of fuel modelling in a fire model like FIRETEC, the 2-m resolution seems to be accurate enough except in dense shrubland with significant small size heterogeneity. An effective coefficient is proposed for these cases.

Additional Keywords: Fuel modelling; Physically-Based Model; Plant Architecture; Shoot clumping; STAR

Introduction

Wildland fires are driven by the heat transferred from the fire source to the unburned fuel bed. This fuel bed is a porous media that is very heterogeneous at several scales (Campbell & Norman 1997). The smallest scale is at shoot level, when needles or leaves are clumped around the shoot. The second scale is at branch level, when shoots are aggregated around a branch. The third one is at tree or shrub level. It defines the contour of vegetation. The last scale is the one of the stand. It can be affected by ecological, historical and human factor specific to each stand. Energy budget dynamics under forest canopies are strongly influenced by the effects of spatial variability within the canopy. It especially affects radiative and turbulent transfers (Hardy *et al.* 2004). Physically-based model for fire propagation are able to use the spatial patterns of vegetation described at a fine level in the mesh (Morvan & Dupuy 2001; Dupuy & Morvan 2005; Linn *et al.* 2002) and to study how spatial patterns affect propagation (Linn *et al.* 2005). However, the mesh size used in calculation does not always entail to consider all kinds of heterogeneity, especially in shoot aggregation and understory description. Moreover, mesh refinement is maybe not an appropriate objective because of plant fractal geometry (de Reffye *et al.* 1991; Knyazikhin *et al.* 1998). In addition, describing vegetation at these levels can be very time consuming (Cohen *et al.* 2004). Hence, we could wonder whether or not details in vegetation patterns affect significantly fire behaviour, especially through radiation transfer. Indeed, radiation transfer in fires is a short distance heating, directly affected by the transmission through the vegetation. For this reason, it is likely to be affected on average by small scale heterogeneity. Like in solar radiation transfer, the computation of radiation transfer in theoretical fire models is based on turbid media approximation (Albini 1985; Weber 1991; Grishin 1997; Linn 1997; Morvan & Dupuy 2001; Cruz *et al.* 2006; see also Reviews by Sullivan *et al.* 2003), that is valid for a distribution of small planar elements, with negligible area and thickness. Under this assumption, absorption coefficient in the media is :

$$\lambda = \alpha\sigma/4 \quad (1)$$

where α is the volume fraction and σ is the area per volume ratio of the fuel.

In this context, fuel inhomogeneities are involved in three different ways. First, there is a non-random spatial variation of leaf area density (*LAD*) within the canopy volume. Second, leaves are not infinitely small. Third, there is clumping at leaf scale. More generally, the turbid media approximation raises a paradox with two contradictory assumptions (Ross 1981; Knyazikhin *et al.* 2005). On one hand, the number of elements has to be big enough in order to apply statistical laws (like the Beer law) to leaf area density and foliage angular distribution with a reasonable degree of accuracy. On the other hand, the elementary volume has to be small enough, to limit mutual shading. Plant morphology has a fractal geometry that could be incompatible with these assumptions (Knyazikhin *et al.* 1998). Indeed, clumping at shoot scale induces a strong spatial density variability and significant mutual shading (Oker-Bloom & Smolander 1988). Literature about solar radiative transfer in canopy shows that clumping at shoot and plant scale can affect radiative intensity, especially for pine canopies (Stenberg 1996; Cescatti 1998). Because of vegetation fractal geometry, turbid media approximation does not entail to take into account explicitly the small scale variability. Theoretical considerations even show that refining too much the vegetation description could provide less accurate results (Knyazikhin *et al.* 1998).

To deal with very small scale clumping (shoot level) in the context of the turbid media approximation, clumping parameters for the shortest scales are needed. Due to the repetition of the shoot pattern in canopies, the turbid media approximation can be used with a shoot instead of a needle as a basic element (Chen & Cihlar 1995a & b; Knyazikhin *et al.* 1997; Nilson & Ross 1997). A clumping parameter called *STAR* (silhouette to total area ratio) can be introduced as the ratio of the shoot projected area to the shoot total area. The absorption coefficient of the media is then defined as:

$$\lambda = STAR\alpha\sigma \quad (2)$$

STAR can be evaluated from numerical pictures (Stenberg *et al.* 2001) or shoot architecture modelling (Stenberg 1996; Stenberg *et al.* 1999). It is equal to one fourth in a homogeneous random case (random position of randomly-oriented needles). Other parameters are introduced by other authors: the *RGCS* (relative geometrical cross section of the particle) in Nilson & Ross (1996), the R_{max} (Leverenz & Hindkley 1990); they are generally proportional to *STAR*.

For solar interception applications (Oker-Blom 1983; Stenberg 1994; Cescatti 1998; Nilson 1999) or leaf area index (*LAI*) measurements (Stenberg 1996; Chen *et al.* 1997), the canopy is described in terms of *STAR* parameter and shoot spatial and angular distributions, instead of needles or leaves distributions. This approach entails to consider a wide range of heterogeneity (shoot, bush, inside crown, crown). A fine description of the vegetation can be obtained in 3D through various methods: some architectural methods (Dauzat 1993; Nilson 1999; Cescatti 1997; Gower *et al.* 1999; Rochdi *et al.* 2006), some fractal methods (Parsons 2006) and even plant digitalisation or vectorization (Sinoquet *et al.* 1998; Fournier *et al.* 1996; Phattaralerphong & Sinoquet 2005). Refining mesh size until a certain level in vegetation description and calculation could help to improve transmission accuracy (Andrieu & Sinoquet 1993; Knyazikhin *et al.* 1998; Davis & Marshak 2004; Sinoquet *et al.* 2005). It entails to take into account variations in *LAD* at small scale. As a general rule, heterogeneity effects can result in a significant increase of transmission in canopies (Davis & Marshak 2004): in a heterogeneous case, free-path distribution becomes wider than exponential, whereas it is exponential in a homogeneous case. Heterogeneity gaps make radiation illuminate farther on average because of free-path distribution convexity (Jensen inequality). These effects can be observed on distances greater than optical path, when the autocorrelation of the *LAD* is significant on distances greater than the mean free path. In these cases, refining description scale can permit to improve models accuracy. From these results at fine scale, clumping parameters can be calculated to define an effective absorption coefficient of the media, taking into account its heterogeneity. Examples can be found in *LAI* measurements, reflectance modelling or even in radiative transfer in clouds (Weiss *et al.* 2004, Smolander & Stenberg 2003; Szczap *et al.* 2000; Benassi *et al.* 2004).

In the forest fire radiative transfer issue, diffusion due to vegetation can be neglected and fuel particles can be considered as blackbody (Albini 1985). Nevertheless, the problem can be considered as tougher than solar one, because of two main complications. First, the unburned vegetation is very close to the heat source (and is even a part of the heat source itself) and most of the transfer takes place at short distance so that accuracy at short distance is needed. In this way, heat source cannot be considered far away from vegetation, as well as in the solar radiation assumption. The flame shape and size in order of magnitude may influence the way vegetation affects the radiant heat transfer. Second, the fire propagation is not only affected by the transmission of radiant energy, but also by the energy received by the vegetation that causes heating (Albini 1985); studying vegetation structure effects on radiant energy transfer is insufficient. For these reasons, the effective properties of the medium can not be determined in the same way as for solar radiation and some adaptations are needed.

The main objective of the present study was to evaluate the magnitude of vegetation heterogeneity effects on radiative transfer in forest fires. We also wanted to determine which heterogeneity sizes should be considered either for fuel description or fire modelling. First, we studied these effects at shoot level (variations within several tens of centimetres) to identify which pine shoot parameters cause a significant departure from the homogeneous random absorption coefficient ($STAR = 1/4$). A study based on a shoot modelling approach (Stenberg 1996; Stenberg *et al.* 2001; Smolander & Stenberg 2001; Cescatti & Zorer 2003; Smolander & Stenberg 2003) was used for a computation of the *STAR* parameter. It was based on architecture measurements for *Pinus halepensis*. Then, we considered the effects of heterogeneity in patchy Mediterranean shrublands or tree canopies (*Pinus halepensis*, *Pinus pinaster*). These vegetations were studied at plant clump scale (variations within several meters), using field measurements and detailed tree architecture models (Caraglio *et al.* 1996; Barczi *et al.* 1997; Caraglio *et al.* 2006). For this purpose, the methodology used for solar radiation was adapted to fire radiation. We investigated the effects of heterogeneity size and cover fraction for different bulk densities, on the vegetation heating by radiation from a source of assumed dimensions. The results were analysed in terms of appropriate scale for fuel description and physical fire modelling.

Material and methods

1. Radiation transfer at shoot level

Shoot architectural modelling

In the context of solar radiation modelling or *LAI* computation, shoot architecture has been used to compute the *STAR* parameter for *Picea sitchensis* (Wang & Jarvis 1993), *Pinus pinaster* (Guyon *et al.*

2003) and especially for *Pinus sylvestris* (Smolander *et al.* 1994; Stenberg 1996; Stenberg *et al.* 2001; Smolander & Stenberg 2001; Cescatti & Zorer 2003; Smolander & Stenberg 2003). Some simplifications of the architecture are generally introduced. Needle size is generally taken as a constant within a shoot and the shape is assumed to be cylindrical. The fascicle inclination (*FI*, angle between the needles and the twig) is also generally chosen as a constant; the phylotaxic angle (*PA*, angle between two successive needle fascicles) is random. The main parameters are the number of needles, their length, diameter and angle, the twig length and diameter (Smolander *et al.* 1994; Smolander & Stenberg 2001; Smolander & Stenberg 2003).

An architectural model was designed for *Pinus halepensis* shoots, with constant cylindrical needles and constant fascicle inclination. Because the number of needles was much smaller than for *Pinus Sylvestris*, we considered fascicles with two needles and a constant needle angle (*NA*, angle between the two needles of a fascicle) and two fascicles, instead of random needles in order to test the influence of these parameters. Twigs were assumed to be cylinders and needles fascicles were inserted on a virtual screw. The different structural parameters are shown on Fig. 1.

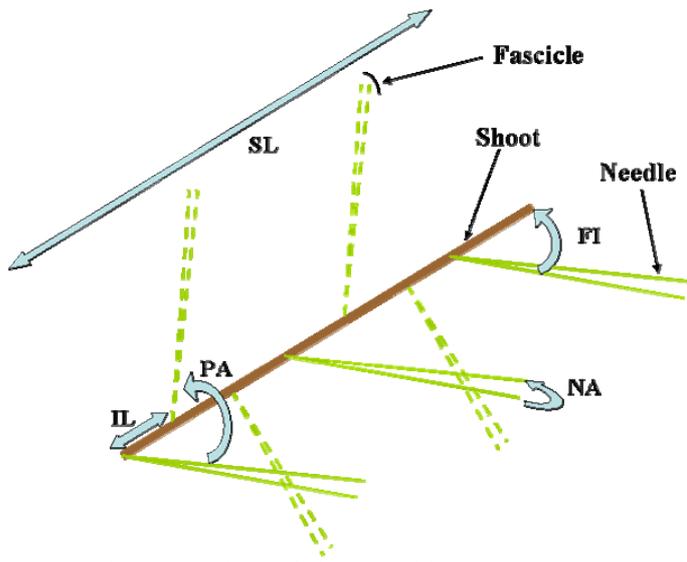


Fig. 1. Schematic view of shoot architecture and structural parameters.

SL: shoot length; *IL*: Internode Length; *FI*: Fascicle Angle (between a fascicle and the twig); *NA*: Needles Angle (between two needles of a fascicle); *PA*: Phylotaxic Angle (between two fascicles)

Effect of shoot architecture on radiative absorption coefficient

The projected area was computed from the shoot model as a function of the projection angle θ (angle between the normal to the projection plan and the shoot, Fig. 2). The *STAR* parameter was computed as the shoot projected area to total area ratio. As pointed in introduction, radiative absorption coefficient is directly proportional to *STAR*.

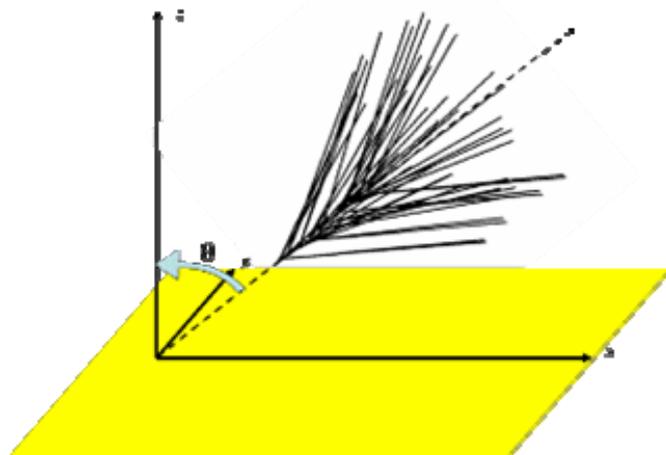


Fig. 2. Projection procedure of a modelled shoot

A sensitivity study to structural parameters was done in a wide range about the reference values (bold) obtained from measurements (Table 1).

Table 1. Shoot structural parameters

Parameter	<i>SL</i> (mm)	<i>IL</i> (mm)	<i>PA</i> (°)	<i>NA</i> (°)	<i>NN</i>	<i>FI</i> (°)
Value	25- 50 - 75-100	1.8- 2.2 -2.6	136- 138 - 142	3- 5 -10-20	1- 2	20- 35 -50-65

SL: shoot length; *IL*: Internode Length; *PA*: Philotaxic Angle; *NA*: Needles Angle; *NN*: Needles Number (per fascicle); *FI*: Fascicle Angle;

Reference data (bold) from Daligault & Moro (1991) Caraglio *et al.* (2006), other unpublished data

2. Radiation heating at a plant clump level

Methodology used here was inspired from solar radiation studies of heterogeneous canopies (Cescatti 1998; Sinoquet *et al.* 2005) or clouds (Benassi *et al.* 2004). The effects of the medium heterogeneity on the average energy transmission were considered. Our approach also integrates the fact that the source was not infinitely far from the medium. In addition, the aim was to evaluate the potential effect of heterogeneity on fire behaviour and not only on radiative transfer. For these reasons, some appropriate quantities were defined.

Irradiance index J

Fire propagation is due to heat transfer from the source (made of both flame and burning fuel) to the unburned fuel. This heat transfer occurs through radiation and convection and causes the heating of the fuel, according to an energy balance equation. In the preheated fuel ahead of the combustion zone, the equation can be written as (Morvan & Dupuy 2001):

$$\alpha \rho C_p \frac{dT}{dt} = Q_{rad} + Q_{conv} \quad (3)$$

In this equation and the following, α , ρ , σ respectively denote the volume fraction, the density and the area to volume ratio of the fuel. Q_{rad} , and Q_{conv} denote the radiative transfer, the convective transfer. C_p is the specific heat.

The radiative transfer term is (Morvan & Dupuy 2001):

$$Q_{rad} = STAR \alpha \sigma \left(\int_0^{4\pi} I d\Omega - 4BT^4 \right) \quad (4)$$

where I is the radiant intensity field due to the source and B is the Stephan-Boltzmann constant; $\alpha\sigma$ is the leaf area per unit volume and $STAR\alpha\sigma$ is the fuel absorption coefficient

Q_{conv} depends on fuel and gas temperatures, but also on gas velocity, so that a sound evaluation of this term requires solving the Navier-Stokes equations governing the flow. It is beyond the scope of the present study that focuses on radiative transfer. Q_{rad} only depends on source properties and fuel temperature in the energy balance (3).

In equation (4), the first term is irradiance. It is the energy received by the fuel from heating. The second term is the energy lost by radiative cooling. Following Albini (1985), the irradiance definition for a given point P_v in the vegetation is:

$$J(d) = J(P_v) = STAR \sigma \int_0^{4\pi} I d\Omega = STAR \sigma \iint_{P_f \in Sf} I(P_f, P_v) dS \quad (5)$$

where d is the distance from the source to the vegetation point P_v , and P_f is a given point in the source Sf (Fig. 3).

From now, we assume that the source is a radiant panel of constant emissive power E_0 . We then defined the normalised irradiance:

$$J^*(d) = \iint_{P_f \in S_f} \frac{I(P_f, d)}{E_0} dS \quad (6)$$

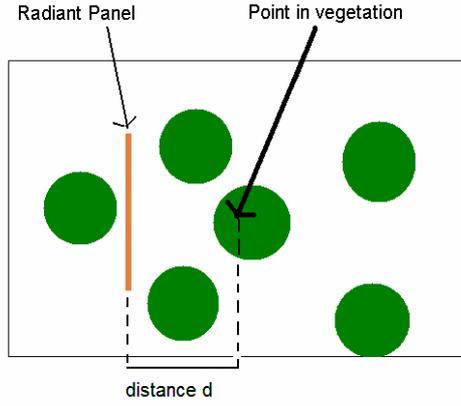


Fig. 3. Scheme of $J^*(d)$ calculation

Integrated Irradiance index J_{int}

In steady state case, the equation (3) can be modified (Albini 1985):

$$-ROS \alpha \rho C_p \frac{dT}{dx} = Q_{rad} + Q_{conv} \quad (7)$$

where ROS is the rate of spread of the fire propagating along the x axis.

Following Albini (1985), an integration of (7) along the x axis gives:

$$ROS Q_{ig} = \sigma STAR E_0 \int_0^{\infty} J^*(x) dx + Radiative\ Cooling + Convective\ balance \quad (8)$$

where Q_{ig} is the energy required to ignite a unit of volume of vegetation.

The radiative cooling term can be evaluated from fuel temperature, which is unknown in the present study, as well as the convective balance. The integration of normalized irradiance parameter $J^*(x)$ over all distances x represents the total amount of energy transferred to the fuel by radiation before ignition. The present study focuses on that term, which directly affects the ROS , according to equation (8). It is defined as J_{int} in the following.

$$J_{int}^* = \int_0^{\infty} J^*(x) dx \quad (9)$$

It is directly involved in fire propagation characteristics through equation (8).

Average irradiance and integrated irradiance index in heterogeneous plots

In heterogeneous cases, we assumed that the irradiance index still controlled propagation characteristics. In fact, we supposed that the rate of spread was not affected locally by the heterogeneity, but on average. This point will be discussed farther.

For a given distance to the radiant panel d , we calculated $\overline{J^*(d)}$ as an average of $J^*(d)$ values for a random set of points in the vegetation. This value is the average heating of the vegetation by radiation at plot scale, for a given distance to the source.

The integrated average irradiance index is then evaluated as follows:

$$\overline{J_{int}^*} = \int_0^{\infty} \overline{J^*(x)} dx = \int_0^{\infty} \overline{J^*(x)} dx \quad (10)$$

Source characteristics

The source is assumed to be a thick flame S_f , normal to the x axis. Its emissive power E_0 is constant. The aim of this study was not to focus on source details, but on the way that vegetation properties affected radiative transfer. The flame shape and size in order of magnitude may influence the way vegetation affects the radiant heat transfer, but we assumed that the details of the flame do not. For this reason, we tested different flame sizes to evaluate their influence. Changes in flame height (lz) and flame width (ly) from one to fifteen meter high and one to twenty meter wide were chosen, as reported in Table 3, depending on the characteristics of the vegetation layer.

Numerical details

A radiative transfer code was written under the turbid media assumption with no scattering in the specific context of this study. For a given point $P_v(x_v, y_v, z_v)$ in the vegetation, the algorithm solves the numerical integration of equation (6) to compute the irradiance $J^*(P_v)$.

If the optical path length between point P_v and a given point $P_f(x_f, y_f, z_f)$ in the source is given by:

$$L(P_f P_v) = L(x_f, y_f, z_f; x_v, y_v, z_v) = \int_{M \in [P_f P_v]} \lambda(M) dl \quad (11)$$

The normalized irradiance can be computed as:

$$J^*(P_v) = \int_0^{lz} \int_{y_v - ly/2}^{y_v + ly/2} \frac{x_v - x_f}{\left((x_v - x_f)^2 + (y_v - y_f)^2 + (z_v - z_f)^2 \right)^{3/2}} e^{-L(P_f P_v)} dy_f dz_f \quad (12)$$

It can be expressed as a function of d, x_v, y_v and z_v only:

$$J^*(d, x_v, y_v, z_v) = \int_0^{lz} \int_{y_v - ly/2}^{y_v + ly/2} d \frac{\exp(-L(x_v - d, y_f, z_f; x_v, y_v, z_v))}{\left(d^2 + (y_v - y_f)^2 + (z_v - z_f)^2 \right)^{3/2}} dy_f dz_f \quad (13)$$

This equation can be solved by numerical integration. We compared the results of our algorithm to the ones obtained with the reference MonteCarlo method. MonteCarlo is a method of statistical simulation to determine the average behaviour of the system. It consists in following a finite number of photons through their transport histories and to assess radiative transfer through the average behaviour of the photons. To compute the irradiance of vegetation within a given mesh, photons are randomly emitted from the surface elements of the planar source. The emission is non directional and the surface is gray. The optical path of a given photon is also random, so that the mesh cell that is going to absorb the photon can be assessed. Irradiance of vegetation in a given cell can be computed as the product of the number of photons absorbed within the cell and the photon energy. This method was used to check the results of the numerical integration (13).

From these values of $J^*(d, x_v, y_v, z_v)$ at a given point, average irradiance at distance d was computed, using spatial averages, as described in the last paragraph. In case of shrubs, $\overline{J^*(d)}$ was computed for discrete values of d , sampled as follows: for d between 0 and 10 cm (close to the source), the spatial step was 1 cm; for d between 10 cm and 10 m, the spatial step was between 5 cm and 10 cm. In case of trees, the spatial resolution was lower (between 5 cm and 25 cm). These computational characteristics and others are reported in Table 3.

$\overline{J_{\text{int}}^*}$ was computed with a numerical integration, following equation (10).

For the purpose of our study, we used a numerical integration of equation (13) instead of one of the reference method for radiative transfer computation, such as MonteCarlo or discrete ordinates methods (Siegel & Howell 1992). In fact these methods provide the radiant energy field in the whole domain for a given source, whereas we are only interested in irradiance at a given point. For that reason, the use of these standard methods was inappropriate, because computational time to compute the energy field in a given configuration was very high, compared to the direct numerical integration at one point.

Calculations were run on an eight processors parallel computer (Silicon Graphics, Inc.). The code was not parallelized, but different processors were used to run several cases at the same time.

For convenience, $\overline{J^*(d)}$ and $\overline{J_{int}^*}$ will be noted respectively $J(d)$ and J_{int} in the following.

Vegetation patterns

Several typical kinds of vegetation were studied here. The first one was a kermes oak garrigue (*Quercus coccifera*). It is a dense Mediterranean shrubland where the bushes can form either continuous layer or heterogeneous patches (Fig. 4). We belayed on some destructive measurements of volume fraction (Vigy *et al.* 2005). Kermes oak has small leaves, randomly oriented. For this reason, no clumping factor at shoot scale is needed and a STAR of $\frac{1}{4}$ is appropriate.



Fig. 4. Heterogeneous *Q. coccifera*.

A more general study on shrubland was done, relying on a large sample of volume fraction, cover fraction and patch size (65 calculations, Table 2).

Table 2. Characteristics of the different vegetation fields

	α (10^{-3})	σ (m^{-1})	STAR	C (%)	L (m)	H (m)
<i>Q. coccifera</i>	1.1	6000	$\frac{1}{4}$	20-50- 80-100	0.5-1.0- 1.5-3.	0.75
Generic Shrub	0.1-0.5-1.0- 1.5-2.0	6000	$\frac{1}{4}$	25-50- 75-100	0.5-1.0- 1.5-3.	0.75
<i>P. pinaster</i> (10 years old)	0.67	5000	0.2	25-50-75		4.5
<i>P. pinaster</i> (35 years old)	0.23					14.5
<i>P. halepensis</i> (10 y.o.)	0.11	10000	0.2	25-50-75		2.75
<i>P. halepensis</i> (35 y.o.)	0.022					9.75

α : mean volume fraction of a clump; σ : area per volume ratio; C: cover fraction; l: heterogeneity size; H: vegetation height

For generic shrubs and kermes oak, two different patterns with same average volume fraction $\overline{\alpha}$ were compared. First, we considered *heterogeneous* shrubs that had cylindrical patches of diameter l and local fuel volume fraction α , C is the cover fraction (Fig. 5a). Second, we used *homogenized* shrubs that had the same average volume fraction $\overline{\alpha} = \alpha \times C$ than the heterogeneous case; it means that the local density in *homogenized* shrubs is constant, equal to $\overline{\alpha}$ (Fig. 5b). In addition, a *homogeneous dense* shrub layer that had a constant local volume fraction equal to the local volume fraction in patches α (Fig. 5c) was also used as a reference case. A mesh size of 25 cm was appropriate to describe quite accurately all these patterns in the context of the turbid media assumption.



(a) Heterogeneous (b) Homogenized (c) Homogeneous dense

Fig. 5. Top view of three different vegetation patterns of shrubs for a given local value in patches α .

(a) $\bar{\alpha} = \alpha \times C$, (b) same $\bar{\alpha}$ than a), (c) $\bar{\alpha} = \alpha$

The third kind of vegetation studied here was tree canopies (*Pinus halepensis* and *Pinus pinaster*). In this part, architectural modelling of plant growth was used for fuel modelling (Caraglio *et al.* 2006, Fig. 6) at the finest scale (*Amap trees*, Fig. 7a). Three coarser models were also introduced.



Fig. 6. Simulated *Pinus halepensis* crown architecture (from Caraglio *et al.* 2006)

The first one generates trees as cylindrical envelopes of the same dimensions as *Amap trees* (crown base height, height and diameter), but with homogeneous density inside (*Homogenized trees*, Fig. 7b). A homogenized layer with same crown base height as *Amap trees* was introduced too (*Homogenized 1*, Fig. 7c). Finally, a homogenized layer starting from the ground was also defined (*Homogenized 2*, Fig. 7d). Notice that these four models were several ways to allocate a same fuel load (same stand average volume fraction $\bar{\alpha}$), with a resolution of details that is very fine (*Amap trees*) to very coarse (*Homogenized 2*). Global amounts of vegetation predicted were same order of magnitude than field measurements of Guyon *et al.* (2003) for maritime pine and Lopez-Serrano *et al.* (2000) for Aleppo pine. *STAR* values were chosen as in Guyon *et al.* (2003) for maritime pine. For Aleppo pine, we chose a mean value derived from the results of our shoot modelling (Table 2).



a) *Amap trees* b) *Homogenized trees* c) *Homogenized 1* d) *Homogenized 2*

Fig. 7. Side view for four different tree patterns, for a same average fuel density

The choice of mesh size is a tough problem. Refining mesh can improve model accuracy (Sinoquet *et al.* 2005), but mesh size has to be big enough for the turbid media assumption. According to Ross (1981), using distribution close to canopy element size does not increase the accuracy of the computation. Some instabilities can even appear at this scale (Knyazikhin *et al.* 2005). Some elements for an appropriate choice of mesh size are discussed in appendix 2. Here, we respected Fournier *et al.*

(1996) and Sinoquet *et al.* (2005) recommendations and chose a mesh size of 25 cm for fuel description for both pine species.

Results of irradiance and integrated irradiance in heterogeneous vegetations were systematically compared to the ones obtained with coarser levels of description for shrubs and pines. The finest description was assumed to be the most accurate. Irradiances and integrated irradiances with fine description were compared to the ones we obtained with their coarser descriptions. The errors in integrated irradiance between coarse descriptions and the equivalent finest description were calculated in %. Some regressions of these errors as a function of different stand variables (α , C , l) were done using *Scilab software*.

Table 3. Computational characteristics

	l_z (m)	l_y (m)	Domain size (m)	Irradiance Resolution	Random Points in vegetation
<i>Q. Coccifera</i>	0.75-2	2-4	25×25×10	1 cm (d<0.1m) 5 cm (d>0.1m)	5000
Generic Shrub	0.75-2	2-4	25×25×10	1 cm (d<0.1m) 5 cm (d>0.1m)	5000
<i>P. pinaster</i> (10 years old)	4.5	10	50×50×10	1 cm (d<0.1m) 5 cm (d>0.1m)	10000
<i>P. pinaster</i> (35 years old)	14.5	20	100×100×15	5 cm (d<0.5m) 25cm (d>0.5m)	20000
<i>P. halepensis</i> (10 years old)	2.75	10	50×50×10	1 cm (d<0.1m) 5 cm (d>0.1m)	10000
<i>P. halepensis</i> (35 years old)	9.75	20	100×100×10	5 cm (d<0.5m) 25cm (d>0.5m)	20000

l_z : Flame Height; l_y : Flame Width

Results

Radiation transfer at shoot level

4STAR values computed as a function of projection angle values (θ) are shown on Fig. 8, in a wide range of structural parameters. The departure to 1 of the 4STAR is due to shoot clumping. 4STAR increases from 0.7 to 1 with the projection angle for the reference structural parameters set. When θ is small, the shoot is perpendicular to projection plane, whereas it is parallel to the projection plane when θ is about 90°. These results illustrate the fact that a vertical shoot absorbs less light when sun is high, than a horizontal shoot.

Among structural parameters, only the fascicle inclination (FI) has significant effects on 4STAR (Fig. 8f). The effects of the others are almost negligible (Fig. 8a to 8e), even if shoot length (SL) might play a small role (Fig. 8a).

The effect of the fascicle inclination parameter can be seen on Fig. 9. On the shoot of the past year (on the right of the picture), the inclination angle is smaller than for the current year (terminal shoot, on the left). This phenomenon results in mutual shading that is significantly higher in the most recent shoot when the FI is still low; the collusion between needles decreased with FI . According to our simulations, 4STAR ranged between 0.6 for narrow shoots to 1.1 for open shoots.

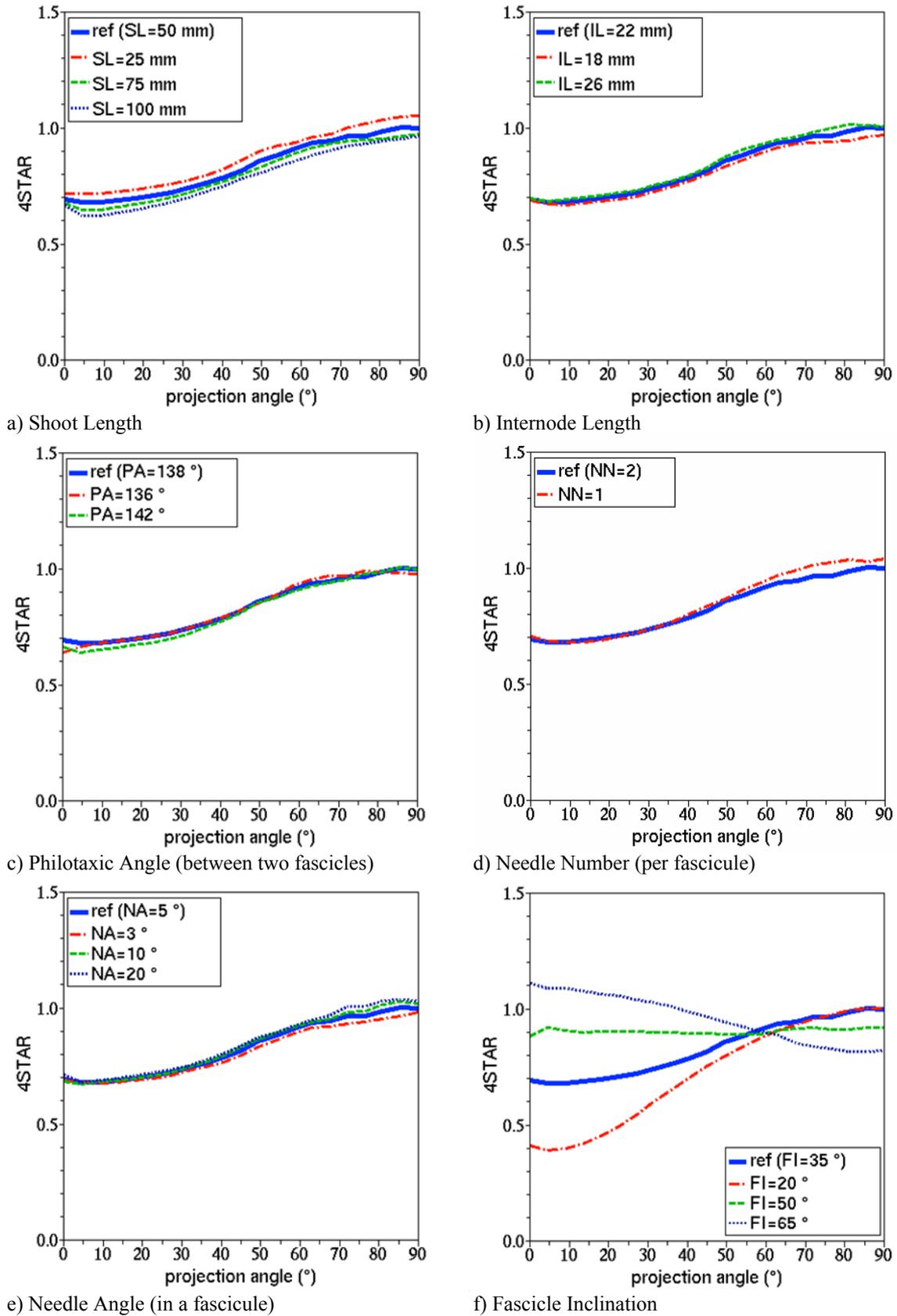


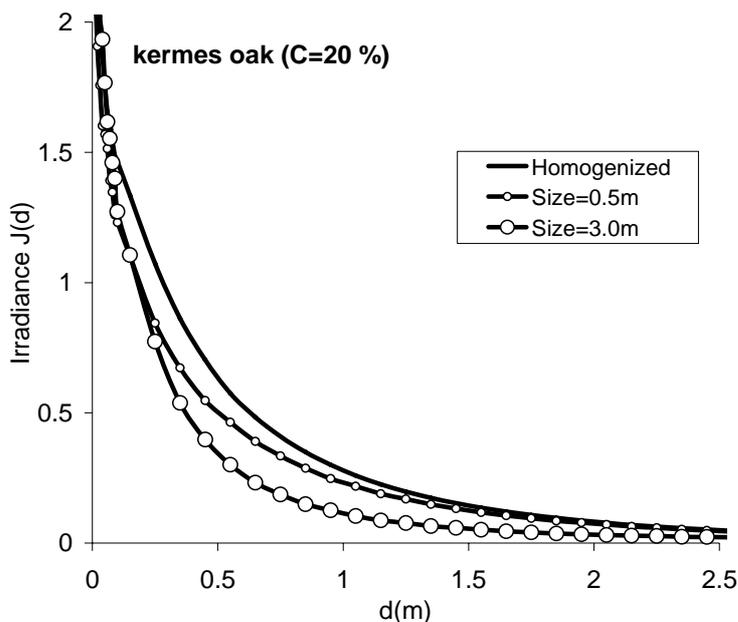
Fig. 8. Effects of shoot structural parameters on the *STAR* parameter



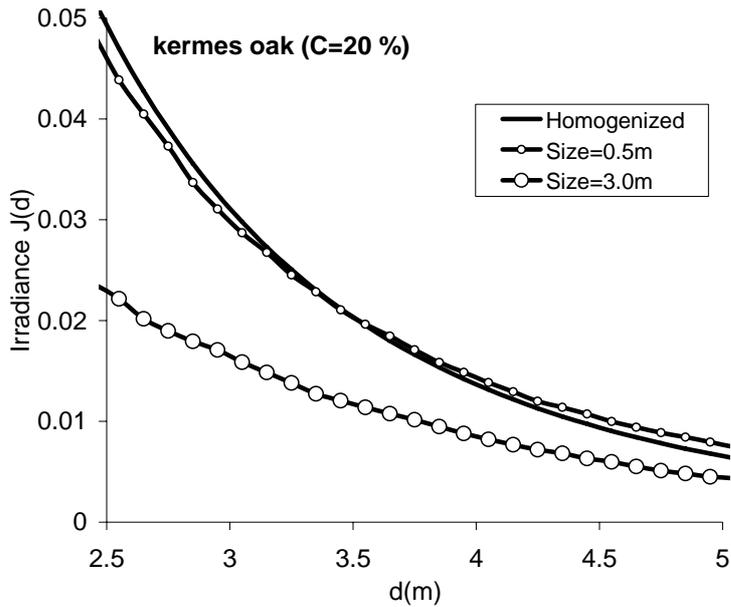
Fig. 9. Picture of a *Pinus halepensis* shoot

Radiation heating at a plant clump level

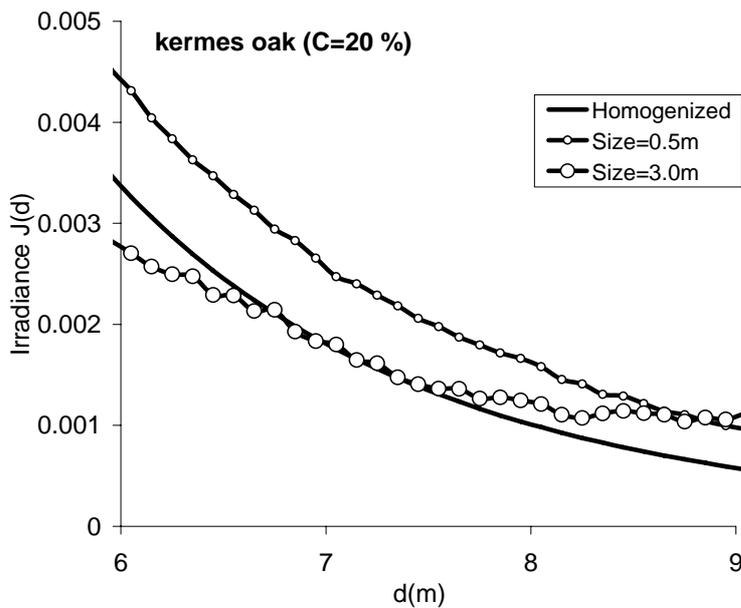
The irradiance profiles for kermes oak are shown on Fig. 10. Heterogeneity effects were characterized by two opposite effects, depending on the distance to the flame. A zoom (Fig. 10b) shows that heat transfer increased with the heterogeneity, when distance to the flame was greater than 3.5 m, compared to *homogenized* case. The same behaviour can be seen in Fig. 10c for larger heterogeneities (3 m diameter patches), but it occurred farther from the flame (the curves intersects about 7 m). This effect is due to Jensen convexity inequality (Davis & Marshak 2004). In fact, homogeneous medium is the one that absorbs the most in average: due to the heterogeneity, the irradiance is higher at long distance than in the homogeneous case. Radiative transfer at short distance decreased in *heterogeneous* cases due to another effect, which was dominant at short distance (Fig. 10a). This effect is mainly due to the fact that we included short distance heating inside the fuel bed. We did not look at transmission across a block of vegetation, but rather at the decrease of the heating of an elementary volume. Due to vegetation clumping, vegetation elementary volumes are generally surrounded by vegetation, especially at short distance so that the volumes that contain vegetation are over-represented at short distance. The medium behaves as if it was denser, on lengths close to clumping size. This effect can be seen as a self-sheltering effect, because the irradiance of a clump decreased due to stronger interception within the clump.



a) Near the flame (0 - 2.5 m)



b) Medium distance (2.5 - 5 m)



c) Far from the flame (6 -9 m)

Fig. 10. Comparison of irradiance profiles $J(d)$ in kermes oak at different scale

These irradiance profiles were integrated on d to build J_{int} . The values of J_{int} as a function of cover fraction were represented Fig. 11, for different heterogeneity sizes and for the homogenized pattern. J_{int} values were always higher for *homogenized* cases and decreased with heterogeneity size. It shows that the short distance self-sheltering effect described in the last paragraph dominated the long distance convexity effect. In the *homogeneous dense* case, the J_{int} value was the smallest, which is consistent with its absorption coefficient that was the highest.

In addition, the differences between J_{int} values for a given cover fraction were much stronger at low cover fraction, than at high cover fraction. It shows that heterogeneity effects decrease with cover fraction. These results were obtained with kermes oak, that had a given absorption coefficient of 1.65 m^{-1} .

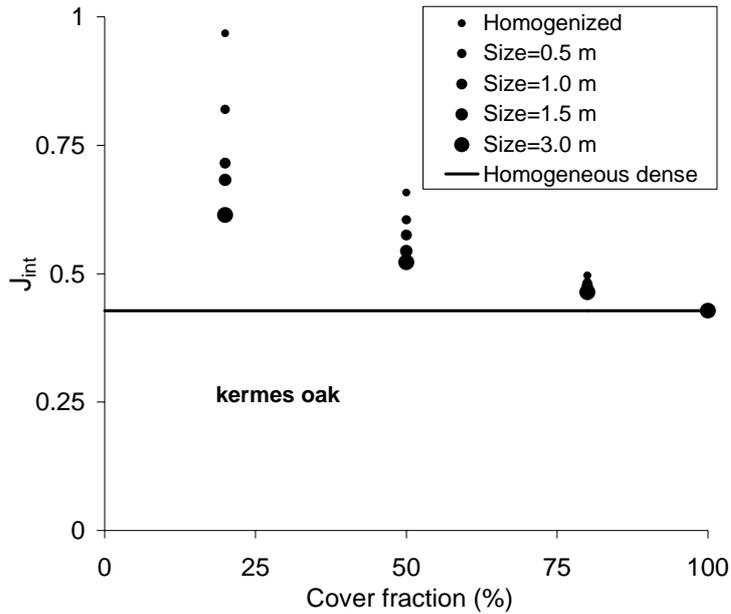


Fig. 11. Comparison of integrated irradiance indices J_{int} in kermes oak

We now introduce the effect of the absorption coefficient. The Fig. 12 (solid lines with triangles) represents J_{int} for a given cover fraction of 25 %, as a function of absorption coefficient. The magnitude of differences between the J_{int} values for the different heterogeneity sizes increased with the absorption coefficient. It means that heterogeneity effects increase with the absorption coefficient.

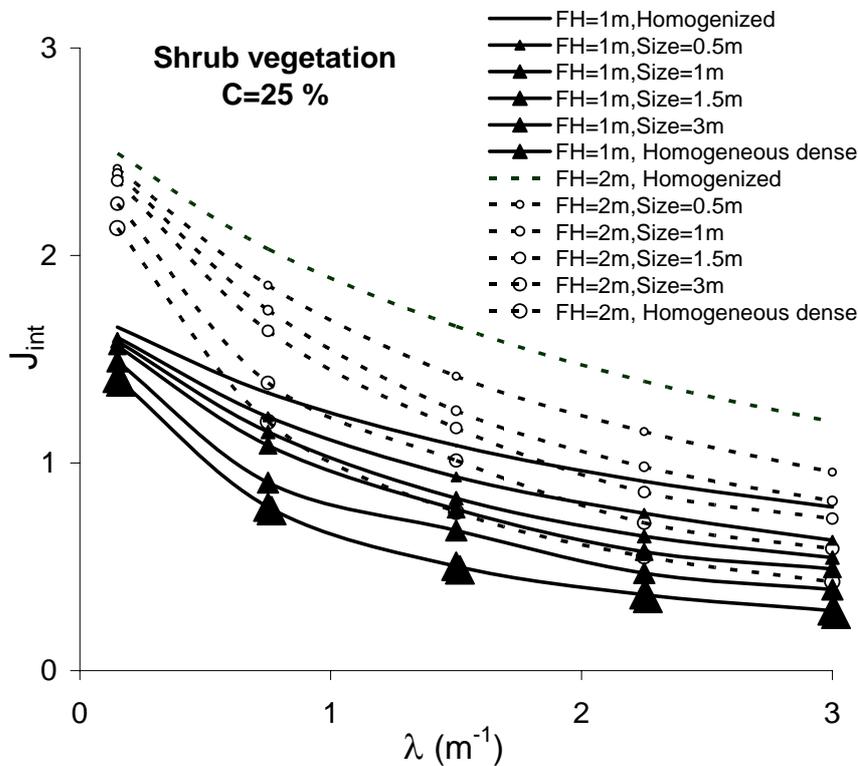


Fig. 12. Comparison of integrated irradiances indices J_{int} in shrubs for two flame heights (FH=1 or 2 m)

On Fig. 12, the dashed lines with circles represent the values obtained for the same set of vegetation patterns, but with a higher flame (2 m). As expected, the irradiance magnitude depends on flame characteristics. However, an evaluation of heterogeneity effects should rely more on differences between accurate heterogeneous distribution and homogenized distribution, than on absolute J_{int} values. So, we introduced the errors on irradiance evaluation between homogenized value and the value obtained for a given heterogeneous case. For further analysis, a geometrical regression (14) was driven using the stand variables described in Table 4.

$$Error(\%) = A \prod_i Variable_i^{a_i} \tag{14}$$

A regression was done using the three variables used for vegetation description at stand level: absorption coefficient, heterogeneity size and cover fraction (P_3 model). According to the P_3 results, a second regression was done using the variable $\frac{\lambda l}{C^2}$ (P_1 model). As an approximation for P_1 , we introduced the following simple model (P_{mod}).

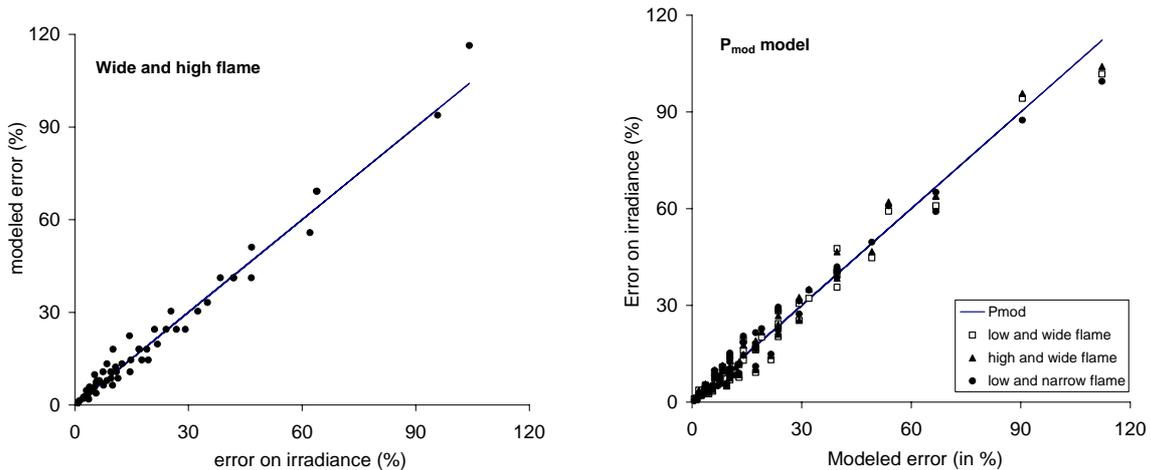
$$Error(\%) = 2.8 \left(\frac{\lambda l}{C^2} \right)^{3/4} \tag{8}$$

The correlation coefficient was 0.99; the plot of predicted errors against computational results is also very satisfactory (Fig. 13a).

Fig. 13b represents the error predicted with the P_{mod} model against errors obtained with different flame dimensions. The model was able to predict accurately the errors obtained with all flames. It shows that this model was almost insensitive to flame characteristics, in a given order of magnitude.

Table 4. Error Models

Models	Parameter estimates					Correlation
	A	$\lambda = \frac{\alpha\sigma}{4}$	l	C	$\frac{\lambda l}{C^2}$	
P_3	2.60	0.701	0.717	-1.56		0.991
P_1	2.80				0.732	0.990

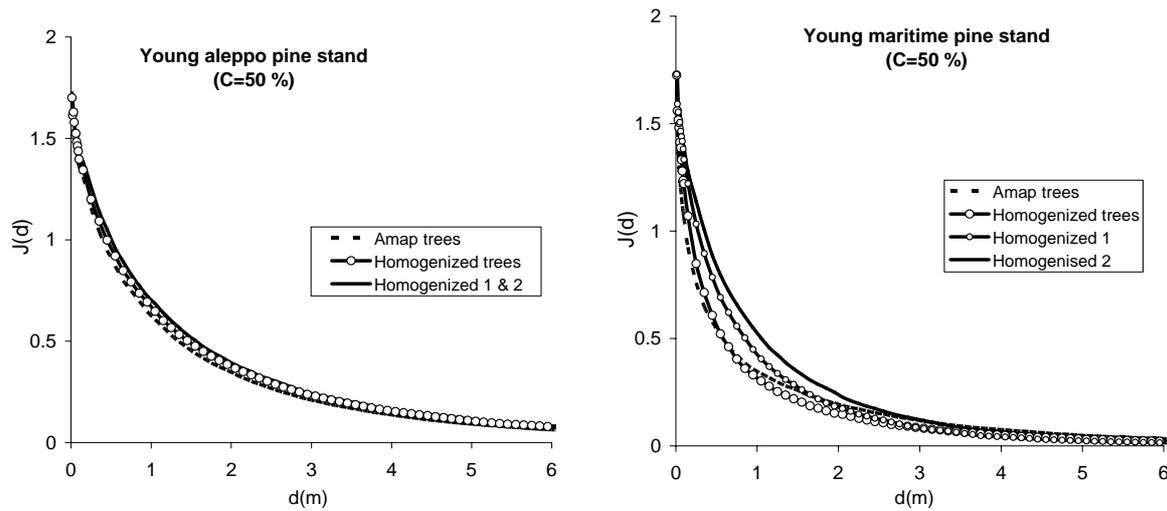


a) Performance of P_{mod}

b) P_{mod} performance for the three different flames

Fig. 13. Error modelling prediction against computational results

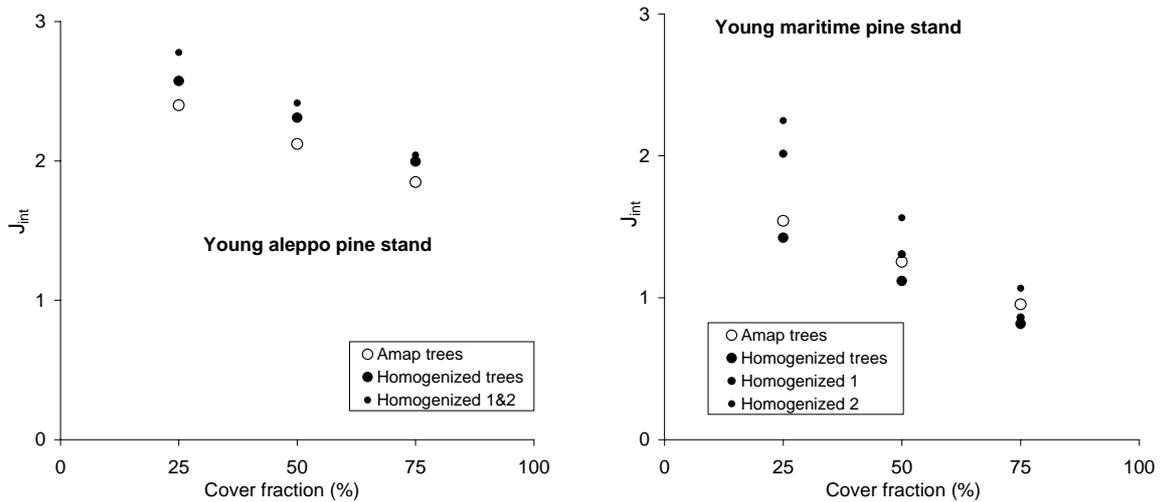
Same kinds of studies for pine canopies were driven. The homogenized patterns of young Aleppo pine led to irradiance profiles that were very close to the detailed *Amap trees* patterns (Fig. 14a). In terms of integrated irradiance (Fig. 15a), heterogeneity effects decreased with cover fraction, as in shrublands. However, the differences were much smaller than in shrublands. The overestimation due to homogenization was always lower than 14 %. Maritime pine, which was denser, showed a different behavior. The comparison between *Amap trees* and *homogenized trees* (Fig. 16b) showed that the inversion in profiles appeared at very short distance (less than 50 cm). The integrated irradiance of *Amap trees* was higher than the *homogenized trees* value. It means that in that case, overtransmission due to heterogeneity at long distance was more significant on average than effect at short distance (Fig. 15b).



a) Aleppo pine stand

b) Maritime pine stand

Fig. 14. Comparison of irradiance profiles for several tree models of young pines

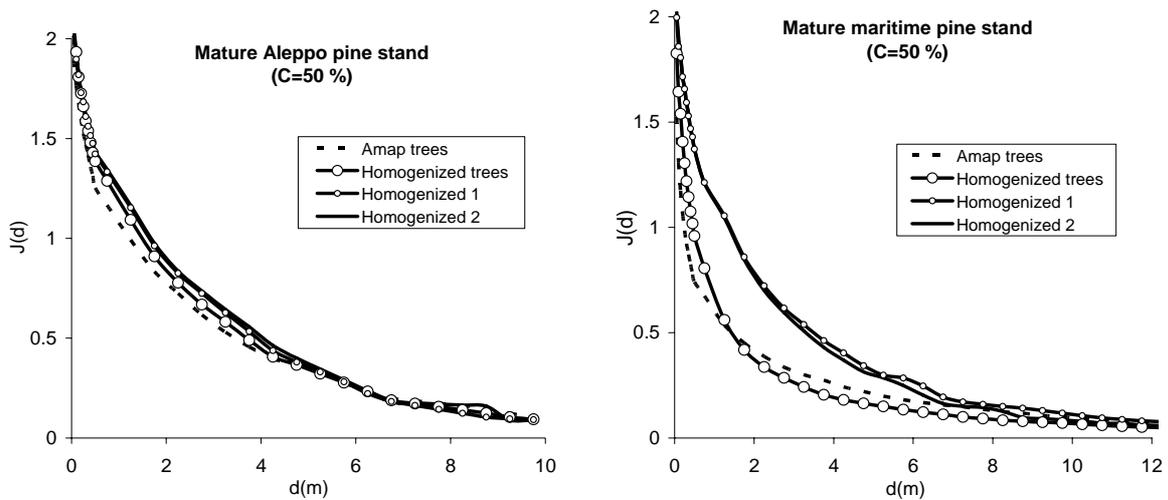


a) Aleppo pine stand

b) Maritime pine stand

Fig. 15. Comparison of integrated irradiances for several tree models of young pines

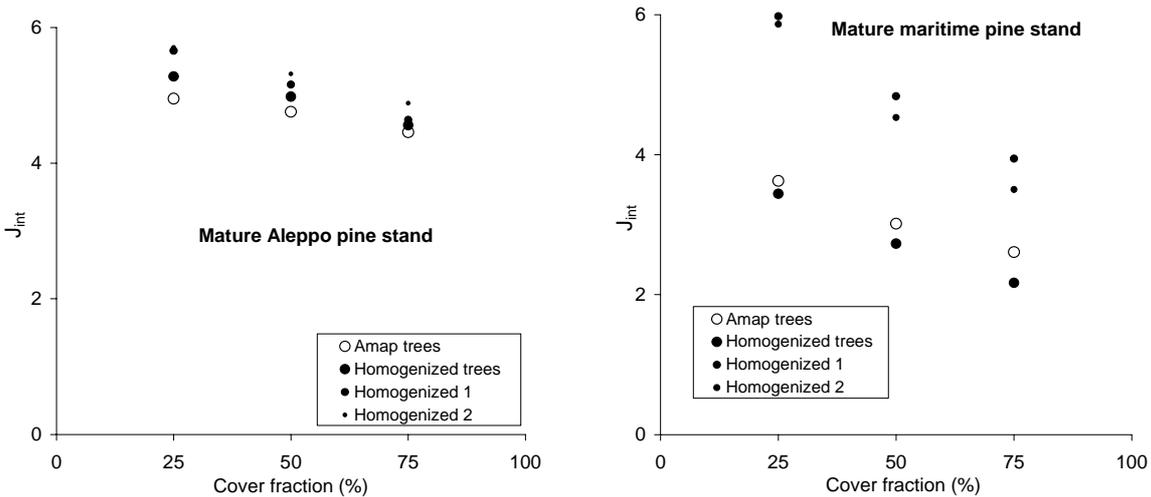
Results for mature pines showed same trends as young pine for both Aleppo and Maritime pine. However, heterogeneity effects were more significant for mature stands (38 % of error against 31 % for the 25 % cover homogenized Maritime pines; 15 % against 14 % for the 25 % cover homogenized Aleppo pines). The effects of heterogeneity were much stronger for Maritime pine than for Aleppo pine (Fig. 18 & 17), which was consistent with their much higher density.



a) Aleppo pine stand

b) Maritime pine stand

Fig. 16. Comparison of irradiance profiles for several tree models of mature pines



a) Aleppo pine stand

b) Maritime pine stand

Fig. 17. Comparison of integrated irradiances for several models of mature pines

Discussion

Radiative transfer at shoot level

The results obtained with the shoot model about the projection parameter are in agreement with Nilson & Ross (1997) and Stenberg (1996). Narrow shoots (with low inclination angle) are known to be an architectural strategy common to several species of coniferous (*Abies*, *Picea*, *Pinus*, *Pseudotsuga* and *Larix*). The shade shoots that are generally at the bottom of trees are more opened than the sun shoots at tree top. It can be seen as a way to let the light reach the canopy bottom and to reduce the sun shoot irradiance (Stenberg 1996; Stenberg *et al.* 2001; Cescatti & Zorer 2003).

For solar radiation, the *4STAR* value is known to range between 0.4 and 1.2 (Leverenz & Hinckley 1990; Stenberg 1996). In the context of forest fire, such a departure to the $\frac{1}{4}$ has only been described in case of litter (Vaz & Viegas 2004), but not for pine canopies. The method described here can be used for every pine species and should be applied for pine species concerned with forest fire.

In our *Pinus halepensis* simulation, *4STAR* ranges between 0.6 for sun shoots to 1.1 for shade shoots. To our knowledge, it is the first time that the *4STAR* value is assessed for this pine species, that is involved in most of the Mediterranean crown fires. Generally, an average value is chosen for the

whole tree. As for *Pinus pinaster* (Guyon *et al.* 2003), a value of 0.8 seems to be reasonable. However, in the context of forest fire, the interception of radiation at the bottom of the canopy has to be accurate, because it is involved in transition from surface to crown fire, and also because it may influence at least foliage damage at crown base. This study shows that shade shoots are likely to absorb more radiation than sun shoots. In order to accurately compute fire severity on trees, a STAR coefficient depending on z is probably needed. This also depends on the role played by radiative heat transfer in these effects on trees with respect to convective transfer.

Radiative transfer at plant clump scale

The approach of radiative heating at plant clump scale did not intend to solve entirely the tough problem of the effect of vegetation heterogeneity on fire spread. It was only adapted when the propagation is settled with a fire front larger than the size of vegetation heterogeneity. For example, it can not deal with torching problem in tree canopies. For this reason, we always chose flames at least as high as the vegetation itself, even for canopies, in order to represent the radiant panel of an active crown fire. However, considering different radiant panel dimensions in this order of magnitude, our results of Fig. 13b showed that flame dimensions affected integrated irradiance, but not significantly the error percentage due to homogenization. It means that our results in terms of magnitude of error due to homogenization are characteristic of the vegetation structure itself. This fact is important because it gives a broader perspective to the conclusions of the present study. The main interest of the method is to give a global understanding of heterogeneity effects on radiative transfer and fire propagation.

The study assumed a well established radiant panel. When fuel cover is too low, fire is probably not driven by the patchy vegetation we considered (shrub patches or trees): it is rather driven by the vegetation existing between the patches. For tree canopies, Pimont *et al.* (2006) showed for example that a threshold between torching and crowning could occur between 25 and 37 % of tree cover under certain conditions. For this reason, we did not test cover fraction lower than 25 % for canopies.

Irradiance profile showed that effects were opposite at short and long distance. The long distance effect is known as the convexity effect (Davis & Marshak 2004) and still took place in our case. We identified also a short distance effect on transfer which was opposite to the convexity effect. In most of the studied cases, this self-sheltering effect dominated the convexity effect. This is mainly due to the fact that short distance heating was much more significant than long distance heating. Two reasons explain this importance of short distance heating. Firstly, flames are not infinitely wide. Contrary to infinite flame model, irradiance decreases strongly with distance to the source for geometrical reasons. This also means that a significant part of the energy is lost in the environment (sky and ground) and is not absorbed by vegetation. Secondly, the absorption due to vegetation also reduces strongly radiant intensity. However, in *Amap* Maritime pine stands, integrated irradiance could increase with heterogeneity (even at small scale). It depends on the location of the inversion point (Fig. 10 b&c, and 16) and on flame dimensions. For wide and high flames, irradiance decreases slower, so that convexity effect can be higher than self-sheltering. The inversion point tends to be closer to the flame with the increase of leaf area (Fig. 14 a&b, other data not shown).

This study showed that heterogeneity at small and medium scale could provide significant effects on average in some conditions. The first condition was on absorption coefficient. Fig. 12 showed that effects increased with averaged absorption coefficient. Moreover, equation 14 showed that effects were growing with the power to the three quarter of absorption coefficient. In canopies, our results showed insignificant effects in Aleppo pine stands (low absorption coefficient) and much stronger effects in Maritime pine stands (high absorption coefficient). This trend has been shown for the convexity effect in solar radiation (Davis & Marshak 2004). Here, we found the same behaviour with a fire propagation problem where the short distance effect was dominant. The second condition was on heterogeneity itself. When cover fraction was too high or heterogeneity size was too low, effects were very small (equation 8, Fig. 11, 15 & 17). Apparently, both cover fraction and $\lambda.l$, (the optical thickness of a given patch) were the significant parameters. In pine canopies, crown size can be seen as a characteristic heterogeneity size. The effects of heterogeneity are stronger for mature pine than for young pine, which is consistent with the increase of heterogeneity effects with heterogeneity size.

Definition of an effective coefficient in heterogeneous cases

Accurate description of small scale heterogeneity is generally not available. This approach gives a way to model heterogeneity in radiative transfer. A clumping parameter, similar to the STAR parameter, but on a higher level of resolution can be introduced so that the integrated irradiance of an equivalent homogeneous medium would be the same as the integrated irradiance of the heterogeneous case. Simulations of homogeneous media of various absorption coefficients can be done to determine numerically the value of the appropriate STAR parameter of the homogeneous media.

An example of this approach can be found on Fig. 18. In this figure, the solid line represents the different values of irradiance index as a function of absorption coefficient. Let consider the heterogeneous kermes oak with a cover fraction of $C=20\%$ and heterogeneity size $l=50\text{ cm}$; it has an irradiance index of 0.61 (dashed line). The average absorption coefficient of this heterogeneous case is 0.33 m^{-1} , so that the irradiance index of the homogenized media is 0.82. The irradiance index of the heterogeneous plot is significantly different from the one of the homogenized plot. However, the heterogeneous case has the same integrated irradiance index as the homogeneous layer that has an absorption coefficient of 0.59 m^{-1} .

Thus, if we define a homogenized medium with a 4STAR parameter equal to $0.59/0.33 = 1.8$, it has an effective absorption coefficient of 0.59 m^{-1} . Its integrated irradiance would be the same as the heterogeneous one, so that radiative transfer will have the same average properties.

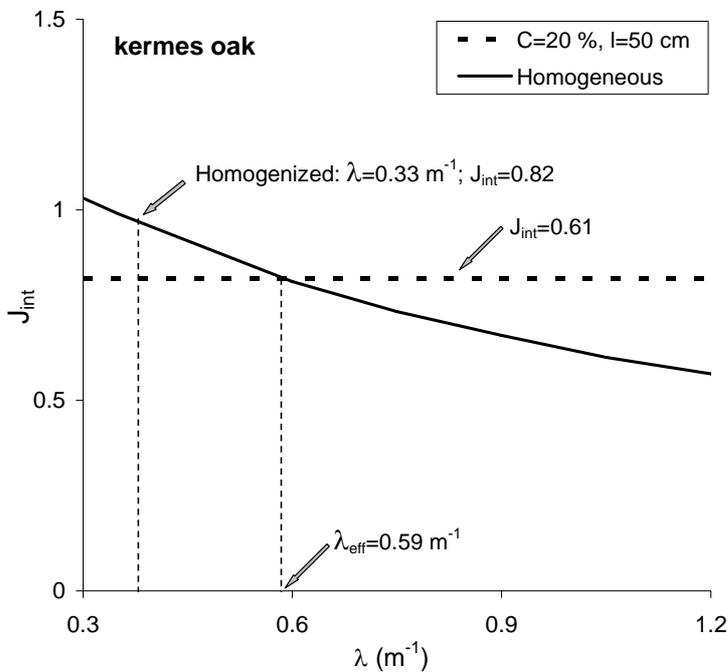


Fig. 18. Definition of an effective absorption coefficient

In this approach, only the average irradiance is well taken into account and not the over-irradiance at short distance and the under-irradiance at long distance. If an average behaviour is needed, we recommend to use the method. However, if the details of the behaviour at small scale are needed, mesh refinement is required.

Fuel description recommendation

This study suggests ideas about fuel description resolution requirements for physically-based fire models that use a spatial grid to solve the radiative transfer equation. We emphasize that these conclusions are based on consideration of radiative transfer only. Ideally the mesh size of the model should be adapted to each level of heterogeneity when it causes a significant effect on radiative transfer. However, the mesh size is usually conditioned by several factors involved in modelling (computational resources, numerical schemes, modelling of turbulence or combustion, etc) and also involved in available fuel data. As an example, we consider the case of the FIRETEC model (Linn

1997, Linn *et al.* 2002 & 2005), which typically uses a mesh size of 2 m in the vegetation layer. When the size of heterogeneity is smaller or equal to mesh size, we recommend to consider the vegetation as a homogeneous layer but to use a correction for the absorption coefficient. For such heterogeneity sizes, the error in shrubland case was found to be rather small and a correction seems to be well-suited.

We emphasize that the correction is not appropriate for the low cover fraction (i.e. case of biggest errors) because we expect that fire will be driven mainly by fuel existing between shrub patches and not by patches. In this last case, a 2 m mesh will be inappropriate for a correct resolution of patches smaller than the mesh size. However, we expect that the error will be low because patches will only contribute a little to fire spread. When heterogeneity sizes are at least twice as big as the mesh size (here 4 m), the spatial resolution of the model is small enough. In the case of tree canopies, it was found that the description at tree crown scale including a clumping parameter for shoot was good enough to capture most of the radiative transfer characteristics. The details of the shoot distribution within the tree crown, which were resolved at 25 cm (Amap trees), were insignificant. Moreover, for light trees (*Pinus halepensis*) even a homogenized layer gives negligible error.

In addition, we noticed that most of the time, the coarser descriptions of fuel were characterized by more irradiance. It means that a too coarse model will probably tend to overestimate the rates of spread. In terms of risk, it is better to overestimate than to underestimate. But on the contrary, irradiance values at long distance will be underestimated with a coarse model of vegetation. In terms of damage to people or building, this could lead to a significant underestimation of damage on the target.

Conclusion

This study helps to understand which kinds of heterogeneity can significantly affect radiative transfer in fully-developed fires, as well as what spatial resolution is needed for a relevant description of fuel.

At pine shoot level, the methods that are currently used for solar radiation were applied to *Pinus halepensis*. It was found that the only structural parameter that affects significantly the absorption coefficient was fascicle inclination (angle between the fascicle and the shoot itself). Such a method should be used more broadly for absorption coefficient assessment in pine canopies.

At plant clump scale, two opposite mechanisms due to heterogeneity were identified from the comparison between heterogeneous and homogeneous vegetations. A long distance effect, called the convexity effect increased long distance irradiance. A short distance effect, called the self-sheltering effect decreased short distance irradiance. In general, the global effect depended on the balance between convexity and sheltering effects; it was found that the second one was almost always dominant. This means that heterogeneity generally contributed to decrease the average integrated irradiance, which is the average energy transferred to the fuel by radiation.

For shrublands, the effects of heterogeneity on integrated irradiance were significant when they have strong leaf area density, low cover fraction and large clump size. Error due to homogenization can be evaluated with a simple formula that is function of these three vegetation characteristics. Significant effects were also observed in Maritime pines, but mainly for heterogeneity at crown scale. Very few effects were found in Aleppo pine stands, due to lower leaf area density.

Some recommendations were proposed regarding the resolution for spatial description of vegetation. In particular, for tree canopies, it was shown that a coarse description of the tree shapes associated to a shoot clumping parameter should be enough, even in relatively dense trees like mature *Pinus pinaster*. It means that the details of fuel distribution within the crown were not important. For shrublands, when detailed information is not fully available or when heterogeneity size cannot be resolved by the physical model, an effective homogeneous media that has the same average properties of the heterogeneous media can be defined.

Acknowledgements

The authors thank the two anonymous reviewers who greatly contributed to improve the present article. This study has been partially funded by the European Commission in the frame of the FIRE PARADOX research programme (6th Framework R&D Program of the European Union, 2006-2010).

References

- Albini FA (1985) A Model for Fire Spread in Wildland Fuels by Radiation. *Combustion Science and Technology* **42**, 229-258.
- Andrieu B, Sinoquet H (1993) Evaluation of structure description requirements for predicting gap fraction of vegetation canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* **65**, 207-227.
- Benassi A, Szczap F, Davis A, Masbou M, Cornet C, Bleuyard P (2004) Thermal radiative fluxes through inhomogeneous cloud fields : a sensivity study using a new stochastic cloud generator. *Atmospheric Research* **72**, 291-315.
- Barcezi JF, de Reffye P, Caraglio Y (1997). Essai sur l'identification et la mise en œuvre des paramètres nécessaires à la simulation d'une architecture végétale. Le logiciel AMAPsim. Modélisation et simulation d'une architecture des végétaux. In 'Science Update'. (Eds J Bouchon, P de Reffye, D Barthelemy) pp 205-254. (INRA Editions, Paris).
- Campbell GS, Norman JM (1997) 'Introduction to environmental biophysics'. (Second edition. Springer).
- Caraglio Y, Lagarde I, Blaise F (1996) Modélisation des peuplements combustibles : une nouvelle approche dans la prévention des incendies. *Forêt Méditerranéenne* **XVII(4)**, 324-328.
- Caraglio Y, Pimont F, Rigolot E (2006) *Pinus halepensis* Architectural Analysis for Fuel Modelling. In 'Proceedings, MEDPINE 3. International Workshop on Mediterranean Pines'. Bari, 2005. To be published. 15 p.
- Cescatti A (1997) Modelling the radiative transfer in discontinuous canopies of asymmetric crowns. I. Model structure and algorithms. *Ecological Modelling* **101**, 263-274
- Cescatti A (1998) Effects of needle clumping in shoots and crowns on the radiative regime of a Norway spruce conifers. *Annales des sciences forestières* **55 (1-2)**, 89-102.
- Cescatti A, Zorer R (2003) Structural acclimatation and radiation regime of silver fir (*Abies alba* Mill) shoots along a light gradient. *Plant, Cell and Environment* **26**, 429-442.
- Chen JM, Cihlar J (1995a) Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf area index. *Applied Optics* **34 (27)**, 6211-6222.
- Chen JM, Cihlar J (1995b) Quantifying the effect of canopy architecture on optical measurements of leaf area index using two gap size analysis methods. *IEEE transactions on geoscience and remote sensing* **33 (3)**, 777-787.
- Chen JM, Rich PM, Gower ST, Norman JM, Plummer S (1997) Leaf area index of boreal forests : theory, techniques and measurements. *Journal of Geophysical Research* **102 (D24)**, 29429-29443.
- Cohen M, Rigolot E, Valette JC (2004) From the vegetation to the inputs of a fire model: fuel modelling for wildland-urban interface management. In 'Warm International Workshop on "Forest Fires in the Wildland-Urban Interface and Rural Areas in Europe: an integral planning and management challenge"' (Athens, May 2003) pp 113-120.
- Cruz MG, Butler BW, Alexander ME, Forthofer JM, Wakimoto RH (2006) Predicting the ignition of crown fuels above a spreading surface fire. Part I: model idealization. *International Journal of Wildland Fire* **15**, 47-60.
- Daligault O, Moro C. 1991. Caractéristiques physiques des aiguilles de pin. PIF1991-12; 17 p + annex
- Dauzat J (1993) Simulated plants and radiative transfer simulations. In 'Crop structure and light microclimate: characterization and applications' (eds Varlet-Grancher C, Bonhomme R, Sinoquet H) pp 271-278. (INRA Editions, Paris).
- Davis AB, Marshak A (2004) Photon propagation in heterogeneous media with spatial correlations: enhanced mean-free-paths and wider-than-exponential free-path distributions. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative transfer* **84**, 3-34.
- Dupuy JL, Morvan D (2005) Numerical study of a crown fire spreading toward a fuel break using a multiphase physical model. *International Journal of Wildland Fire* **14 (2)**, 141-151.
- Fournier RA, Landry R, August NM, Fedosejevs G, Gauthier RP (1996) Modelling light obstruction in three conifer forests using hemispherical photography and fine tree architecture. *Agricultural and Forest Meteorology* **82**, 47-72.
- Gower ST, Kucharik CJ, Norman JM (1999) Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR and Net Primary Production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing Environment* **70**, 29-51.
- Grishin AM (1997) 'A mathematical modelling of forest fires and new methods of fighting them'. Publishing House of the Tomsk University, Tomsk, Russia, F. Albini (Eds.).
- Guyon D, Berbigier P, Courrier G, Lagouarde JP, Moreau P (2003) LAI estimation in managed maritime pine ecosystem from directions gap fraction measurements. *Canadian Journal of Remote sensing* **29 (3)**, 336-348.

- Hardy JP, Melloh R, Koenig G, Marks D, Winstral A, Pomeroy JW, Link T (2004) Solar radiation transmission through conifer canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* **126**, 257-270.
- Knyazikhin Y, Miessen G, Panfyorov O, Gravenhorst G (1997) Small-scale study of three-dimensional distribution of photosynthetically active radiation in a forest. *Agricultural and Forestry Meteorology* **88**, 215-239.
- Knyazikhin Y, Kranigk J, Myneni RB, Panfyorov O, Gravenhorst G (1998) Influence of small-scale structure on radiative transfer and photosynthesis in vegetation canopies. *Journal of Geophysical Research* **103 (D6)**, 6133-6144.
- Knyazikhin Y, Marshak A, Myneni RB (2005) Three-Dimensional Radiative Transfer in Vegetation Canopies. In 'Three-Dimensional Radiative Transfer in the Cloudy Atmosphere' (eds Davis A, Marshak A) pp 617-651. (Springer-Verlag).
- Lang AR (1991) Application of some of the Cauchy's theorems to estimation of surface area of leaves, needles, and branches of plants, and light transmittance. *Agricultural and Forest Meteorology* **35**, 83-101.
- Leverenz JW, Hinckley TM (1990) Shoot structure, leaf area index and productivity of evergreen conifer stands. *Tree Physiology* **6**, 135-149.
- Linn RR (1997) A transport Model for Prediction of Wildfire Behavior. Sci. Rep. LA -13334-T, 195pp., Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.
- Linn RR, Reisner J, Colman JJ, Winterkamp J (2002) Studying wildfire behavior using FIRETEC. *International Journal of Wildland Fire* **11**, 233-246.
- Linn RR, Winterkamp J, Colman JJ, Edminster C, Bailey J (2005) Modeling interactions between fire and atmosphere in discrete element fuel beds. *International Journal of Wildland Fire* **14**, 37-48.
- Lopez-Serrano FR, Landete-Castillejos T, Martinez-Millan J, del Cerro-Barja A (2000) LAI estimation of natural pine forest using a non-standard sampling technique. *Agricultural and Forest Meteorology* **101**, 95-111.
- Morvan D, Dupuy J-L (2001) Modeling Firespread Through a Forest Fuel Bed Using a Multiphase Formulation. *Combustion and Flame* **127**, 1981-1994.
- Nilson T, Ross J (1997) Modelling radiative transfer through forest canopies : implications for canopy photosynthesis and remote sensing. In The Use of Remote Sensing in the Modelling of Forest Productivity. Eds Gholz, HL. Nakane, K. Shimoda, H : p23-60. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Nilson T (1999) Inversion of gap frequency data in forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology* **98-99**, 437-448.
- Oker-Blom P, Kellomäki S (1983) Effect of grouping foliage on the within-stand and within-crown light regime : comparison of random and grouping canopy models. *Agricultural Meteorology* **28**, 143-155.
- Oker-Blom P, Smolander H (1988) The ratio of shoot silhouette area to total needle area in Scots pine. *Forest Science* **34**, 894-906.
- Parsons RA (2006) Fuel 3D: a spatially explicit fractal fuel distribution model. In 'Fuels Management-How to measure success: conference proceedings' (Andrews P.L., Butler B.W. Ed.), 28-30 March 2006, Portland (OR). Proceedings RMRS-P-41 Fort Collins (CO), USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Phattaralerphong J, Sinoquet H (2005) A method for 3D reconstruction of tree crown volume from photographs: assessment with 3D-digitized plants. *Tree Physiology* **25(10)**, 1229-1242.
- Pimont F, Linn RR, Dupuy JL, Morvan D (2006) Effects of vegetation description parameters on forest fire behavior with FIRETEC. *Forest Ecology and Management* **234S (S120)**, 12p.
- de Reffye P, Dinouard P, Barthélémy P (1991) Modélisation et simulation de l'architecture de l'Orme du Japon *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino (Ulmaceae): la notion d'axe de référence. In ' C.R. 2ème Colloq. Int. sur l'Arbre' Montpellier. France. *Naturalia Monspeliensa*, 1991, (n° hors-série), 251-266.
- Rochdi N, Fernandes R, Chelle M (2006) An assessment of needles clumping within shoots when modeling radiative transfer within homogeneous canopies. *Remote Sensing of Environment* **102 (1-2)**, 116-134
- Ross J (1981) The radiation regime and architecture of plant stands. Dr W. Junk Publ, The Netherlands XXVII (391pp)
- Szczap F., Isaka H., Saute M., Guillemet B., Gour Y (2000) Inhomogeneity effects of 1D and 2D bounded cascade model clouds on their effective radiative properties. *Phys. Chem. Earth – Part B* **25(2)**, 83-90.
- Shabanov N, Knyazikhin Y, Baret, Myneni RB (2000) Stochastic modeling of radiation regime in discontinuous vegetation canopies. *Remote sensing of environment* **74**, 125-144.
- Siegel R, Howell JR (1992) Thermal radiation heat transfert. Taylor and Francis. 1072 p.
- Sinoquet H, Thalissawanyangkura S, Mabrouk H, Kasemsap P (1998) Characterization of the light environment in canopies using 3D digitizing and image processing. *Annals of Botany* **82**, 203-212.

- Sinoquet H, Sonohat G, Phattaralerphong J, Godin C (2005) Foliage randomness and light interception in 3-D digitized trees: an analysis from multiscale discretization of the canopy. *Plant, Cell and Environment* **28** (9), 1158-1170.
- Smolander H, Stenberg P, Linder S (1994) Dependence of light interception efficiency of Scots pine shoots on structural parameters. *Tree Physiology* **14**, 971-980.
- Smolander S, Stenberg P (2001) A method for estimating light interception by a conifer shoot. *Tree Physiology* **21**, 797-803.
- Smolander S, Stenberg P (2003) A method to account for shoot scale clumping in coniferous canopy reflectance models. *Remote Sensing of Environment* **88**, 363-373.
- Stenberg P (1994) Crown structure, light interception and productivity of pine trees and stands. *Ecological Bulletins of Copenhagen* **43**, 20-34.
- Stenberg P (1996) Simulation of the effects of shoot structure and orientation on vertical gradients intercepted light by conifer canopies. *Tree physiology* **16**, 99-108.
- Stenberg P (1996 b) Correcting LAI2000 estimates for the clumping of needles in shoots of conifers. *Agricultural and Forest Meteorology* **79**, 1-8.
- Stenberg P, Kangas T, Smolander H, Linder S (1999) Shoot structure, canopy openness and light interception in Norway spruce. *Plant, Cell and Environment* **22**, 1133-1142.
- Stenberg P, Palmroth S, Bond BJ, Sprugel DG, Smolander H (2001) Shoot structure and photosynthetic efficiency along the light gradient in a Scots pine canopy. *Tree Physiology* **21**, 805-814.
- Sullivan AL, Ellis PF, Knight IK (2003) A review of radiant heat flux models used in bushfire applications. *International Journal of Wildland Fire* **12**, 101-110.
- Vaz GC, André JCS, Viegas DX (2004) Estimation of the radiation extinction coefficient of natural fuel beds. *International Journal of Wildland Fire* **13**, 65-71.
- Vigy O, Rigolot E, Valette J-C (2005) Fire Star Wildland Fuel Structure: Model Results. FIRE STAR EVG1-CT-2001-00041. Deliverable D6-04.
- Wang YP, Jarvis PG (1993) Influence of shoot structure on the photosynthesis of sitka spruce (*Picea sitchensis*). *Functional Ecology* **7**, 433-451.
- Weber R (1991) Modelling fire spread through fuel beds. *Progress in Energy and Combustion Science Journal* **17**, 67-82.
- Weiss M, Baret F, Smith GJ, Jonckheere I, Coppin P (2004) Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology* **121**, 37-53.

Appendix 1: Nomenclature used in the text

Latin symbols

C	cover fraction
C_p	specific heat of the fuel ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$)
C_d	drag coefficient
d	distance between the fuel and the flame (m)
h	main vegetation height (m)
l	patch diameter or heterogeneity size (m)
E_0	source emissive power (W m^{-2})
I	radiant intensity ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$)
J	irradiance (W m^{-2})
LAD	leaf area density (m^{-1})
LAI	leaf area index
ROS	rate of spread (ms^{-1})
S_f	radiant source
$STAR$	silhouette to total area ratio
T	solid temperature (K)
Q_{ig}	energy required to ignite a unit of volume of vegetation (J m^{-3})
Q_{rad}	energy flux to the fuel by radiation (W m^{-2})
Q_{conv}	energy flux to the fuel by convection (W m^{-2})

Greek symbols

α	volume fraction (packing ratio)
$\bar{\alpha}$	average volume fraction at stand level

λ	absorption coefficient (m^{-1})
σ	area per volume ratio (m^{-1})
ρ	wood density (kg m^{-3})
θ	projection angle (angle between the normal to the projection plan and the shoot in $^\circ$)

Appendix 2 : Turbid media approximation including shoot scale aggregation

The shoot silhouette to total needle area ratio (*STAR*) is defined, as a function of shoot orientation, by

$$STAR(\theta, \phi) = \frac{S_{proj}shoot}{S_{tot}shoot} \quad (\text{Stenberg 1994, Stenberg 1996}),$$

where $S_{proj}shoot$ and $S_{tot}shoot$ are respectively the projected and total leaf area of a shoot. When needles or leaf orientation and position are random and when they are small compared to shoot size, *STAR* is equal to $\frac{1}{4}$ (Lang 1991).

The transmission probability of a shoot is equal to:

$$P = \left(1 - \frac{S_{proj}shoot}{S}\right) = 1 - STAR \frac{S_{tot}shoot}{S}, \quad \text{where } S = x^2 \text{ is the surface on which the shoot is projected}$$

(x is mesh size).

For a given number of N shoots of $STAR(i)$ with random position :

$$P_{poisson} = \prod_{i=1}^N \left(1 - \frac{S_{tot}shoot}{S} STAR(i)\right) \quad (\text{binomial law})$$

If $\frac{S_{tot}shoot}{S} STAR(i)$ small enough (ie $x \gg \sqrt{S_{tot}shoot}$), which means that voxels are big enough

compared to shoot characteristic dimension, the logarithm development entails to obtain :

$$P_{poisson} = \exp \left(- \frac{\sum_{i=1}^N S_{tot}shoot(i) STAR(i)}{S} + o \left(\frac{\sum_{i=1}^N S_{proj}(i) STAR(i)}{S} \right) \right)$$

And finally,

$$P_{poisson} = \exp \left(- \alpha \sigma \overline{STAR} x + o(\alpha \sigma \overline{STAR} x) \right) \approx \exp \left(- \alpha \sigma \overline{STAR} x \right)$$

When mesh size is big enough in front of $\sqrt{S_{proj}shoot}$, we find again the Beer law modified with the *STAR* parameter (Stenberg 1994).

Fournier *et al.* (1996) did some tests with high resolution plants. They proposed the following criterion: $2 \times l_{needles} \times \cos(LA)$. For Red pines, they obtained 25 cm. For Jack pine and White spruce, he obtained something about 4 cm. But numerical studies showed that 10 cm was enough, so their criterion was a little bit to severe. With his criterion, we obtained between 10 to 15 cm for Aleppo pine and between 20 to 30 cm for maritime pine. For this reason, we chose 25 cm for the resolution. Some tests showed that mesh did not affect significantly the results.

Table 5. Minimum mesh size in the context of turbid media approximation

	Max projected surface of a shoot (mm^2)	Number of needles	$\sqrt{S_{tot}shoot}$ (cm)	Minimum appropriate mesh size (cm)	Fournier <i>et al.</i> (1996) criterion
Maritime pine	100	50	7	20-30	20-30
Aleppo pine	30	100	5	15-25	10-15

5. Conclusion

Agrégation à l'échelle de la pousse

A l'échelle de la pousse de pin, notre démarche a mis en évidence que le seul paramètre susceptible de faire varier significativement le paramètre *STAR* était l'angle d'inclinaison des aiguilles sur les rameaux, les autres paramètres structuraux ayant un effet négligeable. Nous proposons une valeur de *STAR* pour le pin d'Alep variant de 0.15 pour les pousses de la partie supérieure de l'arbre à 0.27 pour les pousses de la partie inférieure. Ces valeurs rentrent dans l'échelle des valeurs habituellement admises (Leverenz & Hinckley 1990; Stenberg 1996). Une valeur moyenne de 0.2, comme pour le pin Maritime (Guyon *et al.* 2003) semble raisonnable. Cependant, dans le contexte des feux de forêt, l'interception du rayonnement à la base des canopées doit être précisément calculée, car elle est impliquée dans la transition feu de surface/feu de cime. Notre étude montre que les pousses de la partie inférieure de l'arbre interceptent davantage le rayonnement que celles de la partie supérieure.

Autres échelles

A petite et moyenne échelles, nous avons montré que l'hétérogénéité pouvait produire des effets significatifs dans un certain nombre de conditions. La première condition concerne le coefficient d'absorption : les effets augmentent avec la valeur du coefficient d'absorption moyen, ce qui veut dire que la surface foliaire moyenne doit être suffisamment importante pour que des effets se manifestent. Nous avons mis en évidence que les effets augmentaient avec la puissance $\frac{3}{4}$ du coefficient d'absorption. Ces effets sont quasiment négligeables dans le cas du pin d'Alep dont la densité foliaire est très faible, mais beaucoup plus significatifs dans le cas du pin Maritime qui se trouve être plus dense. Ce phénomène a déjà été mis en évidence dans le contexte de l'effet de convexité en transfert lumineux (Davis & Marshak 2004), mais ici il est mis en évidence sur des motifs de végétation réalistes et typiques de la végétation méditerranéenne. La seconde condition est l'hétérogénéité elle-même. Elle doit être suffisamment marquée, ce qui passe par un recouvrement assez faible et une taille caractéristique d'hétérogénéité significative. Les effets sont en effet plus importants pour les grands arbres, que pour les petits arbres.

Quelques recommandations

Dans le contexte de la modélisation du feu, nous avons reparti les modèles en trois catégories (*S*, *M* ou *L*) selon leur échelle de résolution. Dans notre étude du transfert radiatif, la plus petite taille d'hétérogénéité que nous avons envisagée est celle de la pousse. Dans le contexte de l'approximation des milieux turbides, il convient que la taille de la maille demeure supérieure à la taille de la pousse. Afin de prendre en compte cette hétérogénéité, nous préconisons l'usage du paramètre *STAR* pour toutes les catégories de modèles (*S*, *M* ou *L*). Concernant les espèces américaines ou boréales, de nombreuses études proposent des valeurs pour le paramètre *STAR* (par exemple, Leverenz and Hinckley 1990). Concernant le pin d'Alep et le pin Maritime, une valeur de 0.2 semble satisfaisante, la valeur dépendant principalement de l'angle entre les aiguilles et le rameau qui les porte. Concernant les hétérogénéités dans les strates basses, lorsque la taille caractéristique de l'hétérogénéité est inférieure ou égale à celle du maillage, nous recommandons d'utiliser une végétation homogène avec un coefficient effectif approprié (cf. **Fig. 2.19**). C'est en particulier le cas pour les modèles de type *L*, ainsi que pour ceux de type *M*, lorsque les hétérogénéités sont de petites tailles. Nous émettons cependant une réserve quant à l'utilisation du calcul d'un coefficient effectif pour les valeurs de recouvrement les plus faibles. En effet, dans ce cas, le vecteur du feu ne sera plus la végétation hétérogène considérée ici (arbustes), mais la végétation herbacée se situant entre les taches arbustives. Seuls les modèles de type *S* sont capables de résoudre finement ce type de problème.

Dans le cas des canopées, nous avons mis en évidence que la description sous forme d'enveloppes était suffisamment précise pour un calcul correct du transfert radiatif. Les détails dans les distributions foliaires obtenues au moyen des maquettes *Amap* à 25 cm se sont avérés négligeables. Les modèles de type *S* et *M* sont capables d'effectuer une telle description en enveloppe. Nous rappelons cependant que l'agrégation à l'échelle de la pousse demeure significative et nécessite l'usage du paramètre *STAR*.

Bibliographie

- Albini FA (1985) A Model for Fire Spread in Wildland Fuels by Radiation. *Combustion Science and Technology* **42**, 229-258.
- Andrieu B, Sinoquet H (1993) Evaluation of structure description requirements for predicting gap fraction of vegetation canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* **65**, 207-227.
- Bacour C (2001) Contribution à la détermination des paramètres biophysiques des couverts végétaux par inversion de modèles de réflectance : analyses de sensibilité comparatives et configurations optimales, thèse de doctorat «Méthodes Physiques en Télédétection », université Paris 7, 228 pages.
- Benassi A, Szczap F, Davis A, Masbou M, Cornet C, Bleuyard P (2004) Thermal radiative fluxes through inhomogeneous cloud fields : a sensitivity study using a new stochastic cloud generator. *Atmospheric Research* **72**, 291-315.
- Campbell GS (1986) Extinction coefficients for radiation in plant canopies calculated using an ellipsoidal inclination angle distribution. *Agricultural and Forest Meteorology* **36**, 317-321.
- Campbell GS, Norman JM (1997) Introduction to environmental biophysics. Second edition. Springer.
- Caraglio Y, Pimont F, Rigolot E (2006) *Pinus halepensis* Architectural Analysis for Fuel Modelling. In: Proceedings, MEDPINE 3. International Workshop on Mediterranean Pines. Bari, 2005. To be published. 15 p.
- Cescatti A (1998) Effects of needle clumping in shoots and crowns on the radiative regime of a Norway spruce conifers. *Annales des sciences forestières* **55 (1-2)**, 89-102.
- Cescatti A, Zorer R (2003) Structural acclimatation and radiation regime of silver fir (*Abies alba* Mill) shoots along a light gradient. *Plant, Cell and Environment* **26**, 429-442.
- Chason JW, Baldocchi DD, Huston MA (1991) A comparison of direct and indirect methods for estimating forest canopy leaf area. *Agricultural and Forest Meteorology* **57**, 107-128.
- Chen JM, Black TA (1992) Defining leaf area index for non-flat leaves. *Plant, Cell and Environment* **15**, 421-429.
- Chen JM, Cihlar J (1995a) Plant canopy gap-size analysis theory for improving optical measurements of leaf area index. *Applied Optics* **34 (27)**, 6211-6222.
- Chen JM, Cihlar J (1995b) Quantifying the effect of canopy architecture on optical measurements of leaf area index using two gap size analysis methods. *IEEE Transactions Geosciences and Remote Sensing* **33 (3)**, 777-787.
- Chen JM, Rich PM, Gower ST, Norman JM, Plummer S (1997) Leaf area index of boreal forests : theory, techniques and measurements. *Journal of Geophysical Research* **102 (D24)**, 29429-29443.
- Cohen M, Rigolot E, Valette JC (2004) From the vegetation to the inputs of a fire model: fuel modelling for wildland-urban interface management. In 'Warm International Workshop on "Forest Fires in the Wildland-Urban Interface and Rural Areas in Europe: an integral planning and management challenge"' (Athens, May 2003) pp 113-120.
- Cruz, MG, Butler BW, Alexander ME, Forthofer JM, Wakimoto RH (2006) Predicting the ignition of crown fuels above a spreading surface fire. Part I: model idealization. *International Journal of Wildland Fire* **15**, 47-60.
- Davis AB, Marshak A (2004) Photon propagation in heterogeneous media with spatial correlations: enhanced mean-free-paths and wider-than-exponential free-path distributions. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative transfer* **84**, 3-34.
- De Reffye P, Dinouard P, Barthélémy D (1991) Modélisation et simulation de l'architecture de l'Orme du Japon *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino (Ulmaceae): la notion d'axe de référence. In: *C.R. 2ème Colloq. Int. sur l'Arbre, Montpellier (FRA), 9-14 Sept. 1990., Naturalia Monspeliensa, 1991, (n° hors-série), 251-266.*
- Fournier RA, Landry R, August NM, Fedosejevs G, Gauthier RP (1996) Modelling light obstruction in three conifer forests using hemispherical photography and fine tree architecture. *Agricultural and Forest Meteorology* **82**, 47-72.
- Goels NS (1988) Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Review* **4 (1)**, 1-213.
- Goels NS, Strebel DE (1984) Simple beta distribution representation of leaf orientation in vegetation canopies. *Agronomy Journal* **76**, 800-802.
- Gower ST, Kucharik CJ, Norman JM (1999) Direct and indirect estimation of leaf area index, fAPAR and Net Primary Production of terrestrial ecosystems. *Remote Sensing of Environment* **70**, 29-51.
- Grishin AM (1997) A mathematical modelling of forest fires and new methods of fighting them. Publishing House of the Tomsk University, Tomsk, Russia, F. Albini (Eds.).

- Guyon D, Berbigier P, Courrier G, Lagouarde JP, Moreau P (2003) LAI estimation in managed maritime pine ecosystem from directions gap fraction measurements. *Canadian Journal of Remote sensing* **29** (3), 336-348.
- Hardy JP, Melloh R, Koenig G, Marks D, Winstral A, Pomeroy JW, Link T (2004) Solar radiation transmission through conifer canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* **126**, 257-270.
- Jonckheere I, Fleck S, Nackaerts K, Muysa B, Coppin P, Weiss M, Baret F (2004) Review of methods for *in situ* leaf area index determination Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* **121**, 19-35.
- Kimes DS, Smith JA, Link LE (1981) Thermal IR exitance model of a plant canopy. *Applied Optics* **20**(4), 623-632.
- Knyazikhin Y, Kragnik J, Myneni RB, Panfyorov O, Gravenhorst G (1998) Influence of small-scale structure on radiative transfer and photosynthesis in vegetation canopies. *Journal of Geophysical Research* **103** (D6), 6133-6144.
- Knyazikhin Y, Marshak A, Myneni RB (2005) Three-Dimensional Radiative Transfer in Vegetation Canopies. In: Davis, A., & Marshak, A., [Eds], Three-Dimensional Radiative Transfer in the Cloudy Atmosphere Springer-Verlag, 617-651.
- Kranigk J (1996) Ein Model für den Strahlungstransport in Fichtenbeständen. Cuvillier, Göttingen, Germany.
- Kucharik CJ, Norman LM, Gower ST (1998) Measurements of leaf orientation, light distribution and sunlit leaf area in boreal aspen forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **91**, 127-148.
- Lang ARG (1986) Leaf area and average leaf angle from direct transmission of sunlight. *Australian Journal of Botany* **34**, 349-355.
- Lang AR (1991) Application of some of the Cauchy's theorems to estimation of surface area of leaves, needles, and branches of plants, and light transmittance. *Agricultural and Forest Meteorology*, **35**, 83-101.
- Lemur R (1973) A method for simulating the direct solar radiation regime in sunflower, Jerusalem artichoke, corn, and soybean canopies using actual stand structure data. *Agricultural Meteorology* **12**, 229-47.
- Leverenz JW, Hinckley TM (1990) Shoot structure, leaf area index and productivity of evergreen conifer stands. *Tree Physiology* **6**, 135-149.
- Linn RR (1997) A transport Model for Prediction of Wildfire Behavior. Sci. Rep. LA -13334-T, 195pp., Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.
- Morsdorf F, Kötz B, Meier E, Itten KI, Allgöwer B (2006) Estimation of LAI and fractional cover from small footprint airborne laser scanning data based on gap fraction. *Remote Sensing of Environment* **104**(1), 50-61.
- Morvan D, Dupuy JL (2001) Modelling Fire spread Through a Forest Fuel Bed Using a Multiphase Formulation. *Combustion and Flame* **127**, 1981-1994.
- Nackaerts K, Wagendorp T, Coppin P, Muys B, Gombier R (1999) A correction of indirect LAI measurements for a non-random distribution of needles on shoots. Proceedings of ISSR 1999. USA, Nevada.
- Nilson T (1971) A theoretical analysis of the frequency gaps in plant stands. *Agricultural and Forest Meteorology* **8**, 25-38.
- Nilson T (1992) Radiative transfer in nonhomogeneous plant canopies. *Advances in Bioclimatology* **1**, 59-38.
- Nilson T, Ross J (1997) Modelling radiative transfer through forest canopies : implications for canopy photosynthesis and remote sensing. In The Use of Remote Sensing in the Modelling of Forest Productivity. Eds Gholz, HL. Nakane, K. Shimoda, H : p23-60. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands.
- Oker-Blom P, Kellomäki S (1982) Effect of angular distribution of foliage on light absorption and photosynthesis in the plant canopy: Theoretical computations. *Agricultural Meteorology* **26**, 105-116.
- Oker-Blom P, Kellomäki S (1983) Effect of grouping foliage on the within-stand and within-crown light regime : comparison of random and grouping canopy models. *Agricultural Meteorology* **28**, 143-155.
- Oker-Blom P, Smolander H (1988) The ratio of shoot silhouette area to total needle area in Scots pine. *Forest Science* **34**, 894-906.
- Pastor E, Zàrate L, Planas E, Arnaldos J (2003) Mathematical models and calculation systems for the study of wildland fire behaviour. *Progress in Energy and Combustion Science* **29**, 139-153.
- Pimont F, Dupuy JL, Morvan D (2007) Effect of vegetation heterogeneity on radiative transfer in forest fire. Soumis à *International Journal of Wildland Fire*.
- Ross J (1981) The radiation regime and architecture of plant stands, The Hague, 391pp.
- Saccadura JF (1980) Initiation aux transferts thermiques. Centre d'Actualisation Scientifique et Technique. INSA de Lyon. 446p.

- Shabanov N, Knyazikhin Y, Baret, Myneni RB (2000) Stochastic modeling of radiation regime in discontinuous vegetation canopies. *Remote sensing of environment* **74**, 125-144.
- Siegel R, Howell JR (1992) Thermal Radiation Heat Transfer. Taylor and Francis publisher.
- Sinoquet H, Sonohat G, Phattaralerphong J, Godin C (2005) Foliage randomness and light interception in 3-D digitized trees: an analysis from multiscale discretization of the canopy. *Plant, Cell and Environment* **28** (9), 1158-1170.
- Smolander S, Stenberg P (2001) A method for estimating light interception by a conifer shoot. *Tree Physiology* **21**, 797-803.
- Smolander S, Stenberg P (2003) A method to account for shoot scale clumping in coniferous canopy reflectance models. *Remote Sensing of Environment* **88**, 363-373.
- Stenberg P (1994) Crown structure, light interception and productivity of pine trees and stands. *Ecological Bulletins, Copenhagen* **43**, 20-34.
- Stenberg P (1996) Simulation of the effects of shoot structure and orientation on vertical gradients intercepted light by conifer canopies. *Tree physiology* **16**, 99-108.
- Stenberg P, Kangas T, Smolander H, Linder S (1999) Shoot structure, canopy openness and light interception in Norway spruce. *Plant, Cell and Environment* **22**, 1133-1142.
- Sullivan AL, Ellis PF, Knight IK (2003) A review of radiant heat flux models used in bushfire applications. *International Journal of Wildland Fire* **12**, 101-110.
- Weiss M, Baret F, Smith GJ, Jonckheere I, Coppin P (2004) Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural Forest and Meteorology* **121**, 37-53.

Chapitre 3. Hétérogénéité du combustible et écoulements

1. Introduction

Transfert convectif

La propagation d'un incendie est largement dépendante de la dynamique de l'écoulement ambiant. Un certain nombre d'expériences ont notamment mis en évidence une corrélation forte entre la vitesse moyenne du vent (par exemple, les expériences des feux de prairies d'Australie de Cheney *et al.* 1998). Par ailleurs, le couplage entre un code de calcul de l'écoulement moyen avec BEHAVE améliore significativement les prédictions de ce simulateur, en affinant localement les données de vent en matière de direction et de force (Butler *et al.* 2006). Cet effet du vent passe par une inclinaison de la flamme qui augmente le panneau radiant et donc le transfert radiatif (Albini 1985), mais aussi par un transport des gaz chauds vers la végétation encore intacte (advection et diffusion turbulente). Le transfert de chaleur s'effectue alors par convection. Le transfert convectif est issu des différences de température entre phase gazeuse et phase solide. Les gaz chauds qui arrivent sur la végétation participent à son échauffement qui provoque évaporation et pyrolyse au même titre que le rayonnement thermique. Par ailleurs, une fois le front de feu passé, le vent incident plus frais que le combustible en feu contribue à son refroidissement. Comme pour le rayonnement, la structure de la végétation influe sur ce mode de transfert. Il a déjà été mentionné, que la distance qui existe entre les strates basses et la base du houppier (hétérogénéité verticale) constitue un paramètre clé pour la transition feu de surface/feu de cime (par exemple, Cruz 2004), alors que les mises à distance des houppiers sur les coupures de combustible, permettent de limiter la propagation horizontale du feu dans les cimes. L'échauffement par convection a longtemps été négligé dans les modèles (Albini 1985), notamment à cause de la complexité de sa prise en compte. Lorsque celle-ci était introduite dans les modèles, c'était généralement sous la forme d'un terme de refroidissement (Albini 1986). Plus récemment, un certain nombre d'auteurs ont utilisé la théorie des panaches thermiques pour déterminer la stratification de la température dans la colonne de convection du feu et par suite, l'inflammation ou les dégâts occasionnés au feuillage des arbres (Cruz 2004). Le modèle suppose que pour des vents modérés, le panache est seulement incliné, mais que sa structure ne change pas. En outre, le modèle ne prend pas en compte l'interaction panache/canopée, ce qui constitue une approximation importante. D'une manière générale, le transfert convectif est modifié lorsque la phase solide présente un degré d'hétérogénéité marquée. Sur ce sujet, on notera l'existence de travaux dans les domaines variés du refroidissement des produits alimentaires (Alvarez & Fick 1999), des milieux poreux (Chen *et al.* 2002 ; Nield & Kuznetsov 2003), de la rugosité du sol (Sugita *et al.* 1998), ainsi que dans l'analyse du manteau terrestre (Lopez & Smith 1996 ; Summita & Olson 2002 ; Simms & Garven 2004).

Écoulements atmosphériques

Une prédiction précise du transfert convectif nécessite un calcul des écoulements. Ce sont notamment les conditions environnementales de vent et de turbulence dans et au dessus de la canopée qui influent sur le transfert, à la fois par la capacité du vent à « advecter »¹⁷ les gaz chauds du panache vers la végétation encore intacte, par la diffusion turbulente de la chaleur et par les processus de refroidissement. Ces écoulements atmosphériques sont situés dans la Couche Limite Atmosphérique (CLA). Il s'agit de la couche dans laquelle le vent est influencé par la végétation au sol, le relief et la stabilité atmosphérique. La dynamique de l'écoulement dans les canopées a une structure très particulière de turbulence intermittente générée par les instabilités de Kelvin-Helmholtz (Raupach *et al.* 1996 ; Finnigan 2000).

¹⁷ Action de transporter en avant de la chaleur (par l'écoulement)

En effet, en l'absence de feu et quand l'atmosphère se trouve à l'état neutre (thermiquement), les caractéristiques de la turbulence sont analogues à celle de la couche de mélange, avec de larges tourbillons cohérents générés par le cisaillement. Afin de reproduire ces caractéristiques, plusieurs types de modèles de dynamique des fluides ont été proposés, en particulier au cours des dix dernières années, avec différentes approches en matière de modélisation de la turbulence. Leur objectif était principalement de déterminer les échanges de masse, de quantité de mouvement et d'énergie au niveau de l'interface canopée-atmosphère. Un certain nombre de modèles dit Reynolds Average Navier Stokes (RANS) avec des schémas de fermeture basés sur une hypothèse de viscosité turbulente qui supposent un comportement isotrope des structures turbulentes, ont été utilisés pour simuler les écoulements à cette interface (Li *et al.* 1990; Green 1992; Liu *et al.* 1996; Foudhil *et al.* 2005). Cependant, ces modèles simulent uniquement les champs moyens et ne permettent pas d'analyser la turbulence en détails comme avec les techniques LES (Large Eddy Simulation). En effet, ces derniers résolvent explicitement la turbulence à une échelle supérieure à celle de la taille de la maille et permettent de reproduire les tourbillons cohérents (dont le comportement est fortement anisotrope) au moyen des champs instantanés.

Cette dynamique de l'écoulement n'est généralement pas explicitement prise en compte dans les modèles de propagation du feu. Le modèle BEHAVE (Andrew 1986) considère la vitesse du vent à mi hauteur de flamme comme paramètre d'entrée. D'autres s'appuient sur des données issues de stations météorologiques ou de modèles « large échelle » (par exemple Optiflow¹⁸), qui fournissent le vent à 10 m de haut. Linn & Cunningham (2005) ont déjà discuté ce point qui dépasse le simple problème méthodologique : il pose en premier lieu le problème du lien entre données expérimentales et résultats de modèle. Mais il met également en évidence que l'interaction vent/panache est susceptible de modifier les conditions météorologiques locales et donc de rendre caduque une notion de vent exogène. De plus, les expériences de laboratoire sur lesquelles s'appuient les modèles empiriques ou semi-empiriques (Rothermel 1972; Catchpole *et al.* 1998) ont lieu dans des conditions de turbulence générale très éloignées de la turbulence atmosphérique. On notera enfin qu'il existe peu de connaissances sur l'interaction entre ces larges structures cohérentes et le feu (Raupach 1990 ; Cunningham *et al.* 2005), et que ces études se focalisent sur les parties supérieures du panache et non sur l'interaction vent/végétation/feu. Il est cependant vraisemblable que la présence de ces larges tourbillons influence la propagation, que ce soit la propagation dans la direction du vent, la propagation latérale, ou la transition entre feu de surface et feu de cime.

FIRETEC résout explicitement les écoulements par le biais de HIGRAD, ce qui en fait un outil particulièrement adapté pour examiner cette interaction. Il s'agit cependant de savoir si les écoulements simulés par HIGRAD permettent de reproduire fidèlement cette turbulence spécifique des canopées. Avec cet objectif, une étude du modèle d'écoulement (indépendante de toute propagation de feu) et de ses capacités à simuler des profils de vent turbulent réalistes a été conduite sur la base de données de terrains (en condition homogène) et de soufflerie (en condition hétérogène). Elle fait l'objet d'un article soumis à l'IJWF, qui constitue la section 3.3 du présent document (description, validation et sensibilité aux paramètres du modèle d'écoulement). Cette étude permet de compléter les validations expérimentales de FIRETEC qualitatives et quantitatives des feux de prairies en Australie et des feux de cimes au Canada.

Coupure de combustible

Parmi les facteurs susceptibles d'influer sur la dynamique de l'écoulement, la végétation qui génère les instabilités est un facteur clé, en particulier par sa structure spatiale. Les écoulements dans les canopées ont été largement étudiés dans un certain nombre de configurations : forêt homogène, transition forêt-zone ouverte ou zone ouverte forêt, haies brise-vent (pour protéger les cultures). Les coupures de combustible présentent un cas d'étude intéressant : une réduction partielle du combustible arbustif et/ou arboré de niveau variable conduit en général à une forte hétérogénéité sur une bande d'une largeur de plusieurs dizaines de mètres (parfois 100 à 200 m). L'impact de ces traitements de végétation sur les vents locaux (vitesses moyennes et niveau de turbulence) est très peu connu.

¹⁸ <http://www.optiflow.fr/>



Fig. 3.1. Effet des coupures de sécurité sur la propagation du feu dans l'expérience ICFME

On sait seulement que la suppression du combustible induit une augmentation de la vitesse du vent sur la coupure, dont l'effet sur l'intensité du feu pourrait compenser, au moins partiellement, la diminution de la charge. Les variations dans la dynamique et la turbulence des écoulements induites à ces échelles sont particulièrement importantes. Leur effet sur la propagation du feu a déjà été partiellement mis en évidence par Linn *et al.* (2005b) qui démontrent l'influence des bandes de sécurité sur la dynamique de l'écoulement dans les feux expérimentaux de ICFME (**Fig. 3.1**). Nous proposons donc en section 3.4 une étude des écoulements dans des coupures hétérogènes afin de mieux comprendre l'influence des coupures sur l'écoulement incident. Cette étude ainsi que la validation du modèle d'écoulement seront l'occasion de discuter la question de la résolution spatiale de la végétation pour une reproduction fidèle des écoulements et donc du niveau de description requis. Le modèle de turbulence, qui permet la prise en compte des fluctuations et de l'hétérogénéité du combustible en sous maille sera également abordé.

Encadré 3.1. Equations de Navier-Stockes

Equation de conservation de la masse

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho u) = 0 \quad (3.1)$$

Conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \nabla u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u \quad (3.2)$$

Equation de conservation d'un scalaire passif (température, concentration)

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + u \nabla \phi = \Gamma \nabla^2 u \quad (3.3)$$

ρ avec la masse volumique. p est la pression modifiée : elle prend en compte les potentiels, comme le potentiel gravitationnel. Γ est le coefficient de diffusivité associé au scalaire. Dans le cas de la diffusivité thermique, on a le nombre de Prandtl qui vaut :

$$\text{Pr} = \frac{\nu}{\Gamma} \quad (3.4)$$

Encadré 3.2. Représentation de la turbulenceSi $f(v, x, t)$ est la fonction de probabilité de u ¹⁹, on a la décomposition dite de Reynolds suivante :

$$\overline{u(x, t)} = \int v f(v, x, t) dv \text{ et } u(x, t) = \overline{u(x, t)} + u(x, t)'. \quad u(x, t)'$$
 est alors ce que l'on appelle la fluctuation.

On peut accéder aux expressions de la fonction f et de $\overline{u(x, t)}$ en examinant des répétitions de l'évènement. Il s'agit de la notion de moyenne d'ensemble. Dans le cas particulier des problèmes stationnaires, on peut utiliser la décomposition particulière suivante :

$$u(x, t) = \overline{u(x)} + u(x, t)' \text{ et } \overline{u(x)} \text{ est alors la moyenne sur le temps du champ de vitesse. Le tenseur de Reynolds est défini comme étant le moment des fluctuations des vitesses } \tau = -\overline{\rho u' v'}.$$

¹⁹ PDF : probability distribution function; probabilité que u ait une valeur comprise entre v et $v+dv$

2. Écoulements atmosphériques dans les canopées

2.1. Les écoulements turbulents atmosphériques et leur modélisation (Pope 2000)

Généralités

Les écoulements fluides sont régis par les *équations de Navier-Stokes*, qui permettent de calculer le champ des vitesses du fluide (*fluides Newtonien*, écoulement à faible vitesse). Leur résolution assure les conservations de la masse, de la quantité de mouvement et celle du transport d'un scalaire passif comme l'oxygène par exemple.

La présence de gradients de vitesse perpendiculaires à l'écoulement (cisaillement), dus par exemple à la présence de particules solides (par exemple la végétation), à des fluides de densité ou de vitesse différente (présence du vent ou d'un panache), ou à des contraintes aux frontières du domaine conduit à la mise en place d'écoulements dit *turbulents* (par opposition à *laminaires*), au sens où les variations spatiales et temporelles du champ de vitesse vont devenir très importantes (présence de tourbillons à différentes échelles et sur une plage de longueurs d'onde continue). Le champ de vitesse suit toujours les équations de Navier-Stokes, mais leur résolution directe est si complexe que l'analyse expérimentale ne peut pas passer par un suivi détaillé de l'écoulement. La modélisation ne peut envisager de reconstituer le mouvement exact du fluide.

On introduit donc la notion de fluctuation du champ de vitesse (spatiale et temporelle) par rapport à une valeur moyenne. Cette valeur moyenne peut elle-même varier dans le temps et l'espace ; les *fluctuations* considérées constituent alors les écarts entre le champ instantané et cette valeur, dont on étudie le comportement des moyennes et des statistiques d'ordre supérieur. Le *tenseur de Reynolds* représente par exemple les corrélations entre les différentes composantes de la vitesse.

Le niveau de turbulence dépend du **nombre de Reynolds** $Re = U.L/\nu$, où U et L représentent respectivement des dimensions et des vitesses caractéristiques du problème. En présence d'écoulements turbulents ($Re > 2000-3000$), il est possible de mesurer ou de calculer le champ moyen, mais il devient difficile d'avoir accès aux fluctuations. Celles-ci sont donc traitées statistiquement. La variance de la norme du vecteur vitesse permet d'introduire la notion d'*énergie cinétique turbulente* (*TKE*). En turbulence homogène isotrope, les fonctions de probabilité des fluctuations sont des variables gaussiennes. Dans le cas général, cette hypothèse n'est pas valide et l'étude conduit à l'introduction de moment d'ordre supérieur (*skewness, kurtosis*). Ces grandeurs permettent d'évaluer l'écart par rapport aux distributions gaussiennes.

Les tourbillons sont également caractérisés par une fréquence et une longueur caractéristiques. Ceci incite donc à décomposer les fluctuations en série de Fourier et à étudier le *spectre de la turbulence* (des techniques d'ondelettes sont également utilisées, pour s'affranchir de l'hypothèse d'*ergodicité*).

Le comportement des tourbillons suit un schéma d'évolution particulier, appelé *cascade énergétique de Kolmogorov*. De grands tourbillons (faible nombre d'onde) sont générés par les contraintes de *cisaillement* imposées par le champ moyen. Ces tourbillons sont porteurs d'énergie cinétique. Ils vont petit à petit se décomposer en tourbillons de plus faible taille (augmentation de la longueur d'onde), en devenant de moins en moins porteurs d'énergie : c'est l'*inertial subrange* (*ISR*). Enfin, à l'échelle dite de Kolmogorov, ces tourbillons vont se dissiper sous forme de frottements visqueux au fur et à mesure que leur taille diminue. Une analyse dimensionnelle permet d'évaluer les dimensions caractéristiques des tourbillons et l'évolution spectrale (notamment la pente de la cascade). Le comportement de cette cascade est affecté par la présence de particules solides comme les éléments fins de la végétation. Les situations qui conduisent à des écoulements turbulents sont très nombreuses : jet, turbulence de grille (écoulement uniforme passant dans une grille), frottement visqueux sur une surface plane (*couche de surface*) et le mélange de courants parallèles de vitesses différentes (*couche de mélange*). Les deux dernières configurations constituent des modèles de références vis-à-vis des écoulements atmosphériques. Les écoulements en milieux forestiers présentent en effet une analogie marquée avec la couche de mélange. La couche limite atmosphérique, dans sa partie inférieure, correspond plutôt à la couche de surface.

Tableau 3.1. Caractéristiques des principaux modèles de turbulence utilisés dans les canopées

Type de modèle	Principales hypothèses	Echelle de turbulence	Intérêts/défaut	Références
RANS du premier ordre	1. Diffusion de la turbulence selon le gradient de vitesse (Boussinesq) 2. Diffusion des autres quantités selon le gradient	Exogène : a) Longueur de mélange (l_m) b) diffusivité turbulente ($k-l$)	Facile à utiliser, calculs relativement légers, mais pas de résolution explicite des tourbillons ; L'Hyp1 est valide dans la plupart des flux de cisaillement mais défaillance de l'hyp2 en cas de courbure forte de l'écoulement Résolution des champs moyens et de leurs moments uniquement	Wilcox 1993
		Calculée : a) $k-\epsilon$ b) $k-\omega$		Launder & Sharma 1974, Wilcox 1993 ; Orszag <i>et al.</i> 1996 ; Green 1992 ; Liu <i>et al.</i> 1996; Foudhil <i>et al.</i> 2005; Morvan & Dupuy 2001
RANS Tensions de Reynolds (ordre supérieur)	EDP sur le tenseur de Reynolds au deuxième ou troisième ordre	Comme au premier ordre, ils fixent ou calculent l'échelle de turbulence	Résolution des champs moyens et de leurs moments uniquement	Wilson & Shaw 1977, Meyers & Paw U 1986, Ayotte <i>et al.</i> 1999, Poggi <i>et al.</i> 2004 a&b
LES	Filtrage implicite des modes hautes fréquences sous la forme d'un filtrage spatial	Filtrage lié à la taille de la maille ; une (parfois deux) échelles de turbulence résolue	Résolution explicite des grosses structures	Deardorff 1980, Kanda & Hino 1994, Shen & Leclerc 1995, Dwyer 1997, Su <i>et al.</i> 1998, Shaw & Patton 2003

Modélisation des écoulements turbulents

Les objectifs principaux en matière de modélisation sont de prédire ou de reconstruire les champs dynamiques (vents, turbulence) et diffusifs (gaz, particules). D'une manière générale, il existe quatre types de simulation des écoulements turbulents (Pope 2000) :

- la Simulation Numérique Directe (*Direct Numerical Simulation*, DNS),
- les modèles à « moyenne de Reynolds » (*Reynolds Averaged Navier-Stokes*, RANS),
- les modèles à fonction de distribution de la probabilité (*probability distribution function*, PDF non abordés ici)
- les simulations des grands tourbillons (*Large Eddy Simulation*, LES).

La DNS s'appuie en général sur une résolution spectrale (décomposition en série de Fourier du spectre de la turbulence et sur une étude de l'évolution des différents modes), même si elle peut aussi constituer une résolution des équations de Navier-Stokes sur un maillage très raffiné, permettant de résoudre explicitement toutes les échelles de turbulence. Comme seulement 0.016 % des modes contiennent réellement de l'énergie, la DNS constitue un raffinement réservé à des investigations fondamentales de la turbulence (Pope 2000). Pour des raisons évidentes de temps calcul, cette approche est impraticable dans le domaine des incendies de forêts.

Le principe des RANS consiste à résoudre un champ moyen des vitesses au moyen d'un tenseur de Reynolds qui suppose un régime turbulent, en opérant une moyenne sur le temps (décomposition de Reynolds). Les RANS se divisent en deux catégories, les modèles du premier ordre et les modèles aux tensions de Reynolds.

Les modèles les plus simples sont ceux du premier ordre. L'hypothèse de Boussinesq suppose que la turbulence est diffusée selon le gradient de la vitesse locale. Cette hypothèse permet d'exprimer le tenseur de Reynolds en fonction de l'énergie cinétique turbulente et d'un coefficient de diffusion turbulente. Pour calculer ce coefficient, un certain nombre de modèles utilisent la notion de longueur de mélange, même si l'essentiel repose sur un calcul de viscosité turbulente, basé sur la formule de Prandl-Kolmogorov. Un certain nombre de ces modèles fixent l'échelle de la turbulence de manière exogène (modèles k-l) et résolvent alors uniquement l'équation d'énergie cinétique turbulente ; d'autres la calculent (modèles k- ϵ , k- ω ...) et résolvent alors l'équation d'énergie et celle du taux de dissipation (Launder & Sharma 1974 ; Orszag *et al.* 1996, Wilcox 1993). Dans le contexte de la modélisation du feu et des hétérogénéités spatiales de la végétation, les modèles k-l ne semblent pas adaptés au problème car la question de l'échelle de la turbulence reste délicate. De plus, les modèles qui calculent l'échelle de la turbulence ne parviennent pas non plus à s'affranchir de certains aspects empiriques (l'ajustement des constantes notamment). Les modèles k- ϵ sont très utilisés, car techniquement applicables à quasiment toutes les situations. Mais Pope (2000) insiste sur le fait que l'applicabilité ne garantit nullement la précision. Selon Wilcox (1993), leurs performances ne sont en général pas meilleures que celles des modèles k-l. Les valeurs utilisées pour les paramètres montrent que l'on sous estime quasi systématiquement l'amortissement de la turbulence. Il faut donc ajuster les paramètres lorsque l'on considère la turbulence décroissante (*decaying turbulence*). Les performances des k- ϵ RNG, comme FIRESTAR, sont en général meilleures.

Le second type de modèle RANS est le type aux tensions de Reynolds. Ils résolvent eux directement le tenseur de Reynolds (sept équations en général). Ces modèles introduisent une équation aux dérivées partielles pour le tenseur de Reynolds, qui met en jeu quatre processus : production, dissipation, redistribution (variation de pression) et transport turbulent (Launder 1990). Le modèle de transport de Daly et Harlow est simple et performant. Les modèles aux tensions de Reynolds peuvent être très performants dans le cas d'écoulement présentant une forte courbure.

D'une manière générale, les modèles RANS modélisent la turbulence de manière moyenne et globale : les gros tourbillons (qui participent au transfert convectif) ne sont pas séparés des petits et les écoulements ne sont pas explicitement calculés. Enfin, ils s'appliquent en général à des problèmes stationnaires. On s'intéresse aux champs moyens (moyenne temporelle) et à l'ensemble des fluctuations par rapport à cette moyenne, modélisé sous forme d'énergie cinétique turbulente. Les

grands tourbillons ne sont pas explicitement résolus. Notons enfin que ces modèles supposent en général une turbulence pleinement développée (Detering & Etling 1985).

Cette approche a été généralisée par l'approche T-RANS (transient), qui permet d'aborder les problèmes instationnaires. Cette dernière utilise la notion de moyennes d'ensemble (c'est-à-dire des moyennes sur des réalisations différentes du même événement) qui remplace les moyennes temporelles de Reynolds. Le champ moyen résolu est alors susceptible d'évoluer avec le temps. Cette méthode présuppose une séparation des échelles, entre le champ moyen et la turbulence. En matière d'écoulements forestiers, les modélisateurs n'ont pas utilisé ces méthodes T-RANS, parce que la nature du problème est stationnaire et que ce type de modèle n'est pas capable de résoudre explicitement les tourbillons, mais uniquement un comportement moyen. Pour les modèles RANS, comme pour les modèles T-RANS, le comportement, comme l'action de la turbulence sur le mouvement moyen sont isotropes. Nous reviendrons plus loin sur les limites induites.

L'approche LES permet de pallier un certain nombre de ces défauts. Elle s'appuie sur un filtrage des modes les moins énergétiques de la turbulence (en terme de développement en série de Fourier), la fonction filtre ayant pour objet d'éliminer les fluctuations de plus haute fréquence du champ des vitesses. Celui-ci se décompose donc en deux parties : la partie obtenue à l'issue du filtrage et la partie résiduelle :

$$u(x,t) = \overline{u(x,t)} + u'(x,t) \quad (3.5)$$

On obtient alors des équations (de type Navier-Stokes, si le filtre a certaines propriétés d'uniformité notamment) pour la partie filtrée. Si l'on introduit des hypothèses de fermeture sur la partie résiduelle, il est alors possible de résoudre numériquement ces équations. La LES peut être abordée de deux manières. La première s'inspire directement de la DNS : elle consiste à résoudre explicitement les différents modes de la partie filtrée. Cette approche impose un certain nombre de contraintes et s'éloigne assez notablement des méthodes décrites jusqu'ici.

Une autre approche propose un filtrage implicite, puisque c'est la discrétisation de la résolution (en effectuant les moyennes spatiales) qui agit comme filtre : les mouvements dont l'échelle caractéristique est supérieure à la taille de la maille sont résolus explicitement (partie filtrée à l'échelle de la grille, *GS* pour grid-scale) au moyen des équations de Navier-Stokes. Les mouvements dont l'échelle est inférieure à celle du maillage sont filtrés (par les différences ou les volumes finis) : la *partie résiduelle* (*SGS* pour subgrid-scale) n'est pas calculée explicitement, mais modélisée au moyen d'une énergie cinétique turbulente de sous-maille qui apparaît alors lors du processus de moyenne. Cette décomposition s'apparente à la décomposition de Reynolds, mais sur l'espace et non sur le temps. Les fluctuations et les tourbillons ayant une échelle spatiale supérieure à celle de la maille sont alors explicitement résolus. Contrairement aux RANS, nous sommes ici en mesure de résoudre des problèmes instationnaires avec des tourbillons résolus explicitement. Le premier modèle LES est historiquement celui de Smagorinsky. Il fait l'hypothèse de viscosité des tourbillons (qui constitue un peu un analogue de l'approximation de Boussinesq en RANS). En pratique, des modèles analogues aux RANS existent, à la différence que l'échelle caractéristique de la turbulence est imposée par la taille du filtre (donc de la maille).

Deardorff propose en 1972 un analogue du modèle de Rotta, dont il dérive une version isotrope (analogue du k-l) en 1980. Ce modèle a été très utilisé en météorologie (Shaw & Schumann 1992 ; Moeng & Wyngaard 1988). Il introduit de manière explicite « e », la TKE à l'échelle SGS. Pour Finnigan (2000), la LES représente la technique d'avenir. Dans ce type de modèle, l'hypothèse d'isotropie de la turbulence se limite à la partie modélisée, en général peu énergétique et donc peu susceptible d'agir sur l'écoulement moyen.

2.2. La couche limite atmosphérique et l'interaction vent/végétation

Généralités sur la CLA

La *couche limite atmosphérique (CLA)* est une partie de la basse atmosphère dont la dimension verticale varie entre deux kilomètres (mésos-échelle) et la centaine de mètres (micrométéorologie). Elle est définie comme étant la partie de l'atmosphère où la présence de la surface intervient directement sur les caractéristiques de l'écoulement. Les éléments de végétation et de sol constituent des éléments de rugosité qui jouent un rôle dans les transferts d'énergie et de matière. Deux échelles temporelles de fluctuations dominent la CLA : une échelle dite *synoptique*, qui comprend les fluctuations dont la période est de l'ordre de la semaine et une autre échelle inférieure à la minute. Cette CLA est composée de trois parties distinctes :

- La couche *limite visqueuse*
- La couche *limite superficielle*
- La couche *externe* ou *spirale*

Au voisinage immédiat du sol, les termes d'inertie (tenseur de Reynolds) deviennent négligeables devant les termes visqueux. Cette zone s'appelle la *couche limite visqueuse* (de l'ordre de quelques centimètres). Au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la paroi, les forces d'inertie deviennent dominantes. On se trouve alors dans une zone appelée *couche limite superficielle* (CLS). Dans cette zone, la vitesse moyenne de l'écoulement augmente avec le logarithme de la distance à la paroi.

$$\langle \bar{u} \rangle = \frac{u_\tau}{\kappa} \ln(z+) + B, \text{ avec } \kappa=0.41 \text{ (Constante de Von Karman) et } B=5.2 \quad (3.6)$$

La dernière partie de la CLA est la *couche externe* ou *spirale*, dans laquelle les forces de Coriolis deviennent non négligeables. Elle influence notamment la vitesse moyenne du vent et sa direction. Le sommet de la CLA est caractérisé par un vent dit *géostrophique*.

L'interaction entre vent et réchauffement de l'air (par le soleil notamment) conduit à des configurations dans lesquelles les forces de flottabilité peuvent jouer un rôle plus ou moins important. Ceci induit trois états possibles (neutre, instable ou stable), suivant que la *température potentielle*²⁰ moyenne est constante, diminue ou augmente avec l'altitude. On identifie en général six classes de stabilité (stabilité de Pasquill), en fonction de la vitesse du vent et du rayonnement net (niveau d'insolation estimé à partir de la hauteur du soleil et de la couverture nuageuse). La classe A est la plus instable ; elle correspond à une journée ensoleillée par vent faible. La classe F est la plus stable ; elle correspond à une nuit par temps clair et vent faible (la CLA ne mesure alors que 300 m d'épaisseur). La classe D correspond à la situation neutre : la baisse de température due à l'augmentation de l'altitude est égale à celle enregistrée en cas d'expansion adiabatique de l'air (profil de température potentiel constant).

Notre étude se concentre sur la sous-couche de surface (CLS), qui mesure quelques dizaines de mètres de hauteur avec une situation synoptique constante. En effet, la durée de l'incendie simulé se compte en minutes, qui correspondent aux temps caractéristiques des petites échelles turbulentes, largement séparées dans le spectre des fréquences des échelles synoptiques (**Fig. 3.2**). Notons cependant que HIGRAD/FIRETEC calcule les écoulements dans l'ensemble de la CLA et qu'il est possible de le coupler avec un modèle méso-échelle (Bradley 2002 ou Bossert *et al.* 2000), comme le Coupled Ocean Atmosphere Mesoscale Prediction System (COAMPS), développé par l'US Naval Research Laboratory de Monterey (Californie) ou le Regional Atmospheric Modeling System (RAMS), développé à l'Université du Colorado.

²⁰ C'est la température qu'acquerrait un petit élément de l'atmosphère, si on le ramenait verticalement au niveau de pression 1 000 hPa sans lui permettre d'échange de chaleur avec le milieu extérieur.

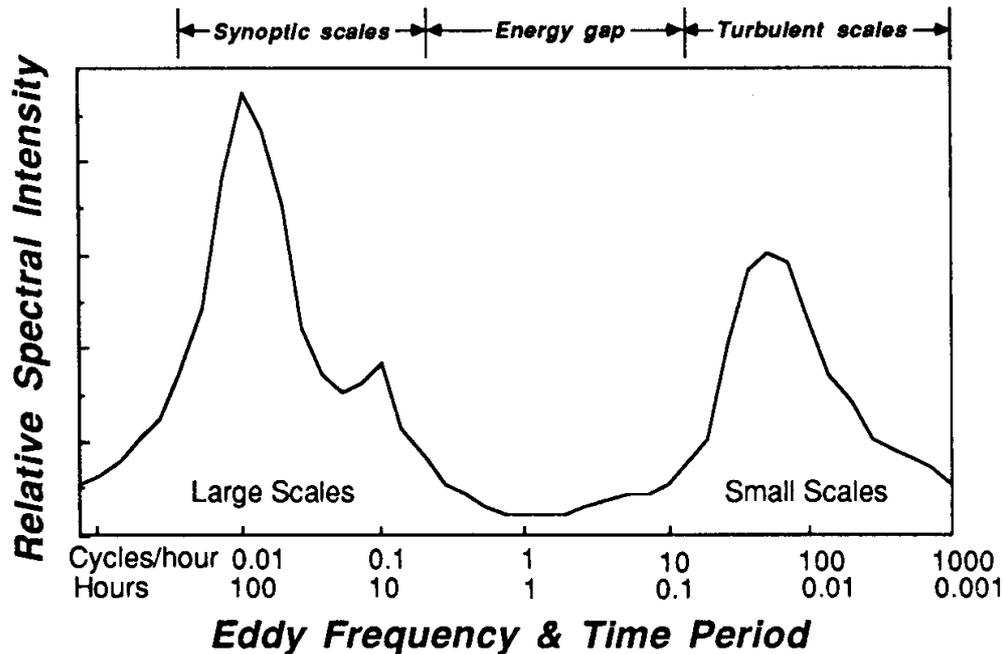


Fig. 3.2. Spectre schématique de la vitesse du vent au sol (D'après Van der Hoven 1957)

Encadré 3.3. Sémantiques et notation

Le paramètre a est le *Leaf Area Density* (LAD) qui vaut $\alpha \sigma / 2$. Il s'agit de la demi surface exposée des particules de végétation. Le LAI (*Leaf Area Index*) est l'intégration verticale du LAD . Une ambiguïté est fréquemment maintenue dans les articles entre LAI et λ (frontal area index : surface frontale moyenne de l'ensemble des particules, intégré sur la hauteur). On peut montrer qu'il existe une relation $2\lambda=LAI$ (sous des hypothèses d'isotropie et de particules sphériques). On leur préfère parfois les termes de *Canopy Area Density* et de *Canopy Area Index* (noté Λ , intégré verticalement), qui prend en compte également les éléments non transpirants (feuilles mortes et tiges), non pris en compte dans le LAI (paramètre lié à l'origine au fonctionnement photosynthétique de la plante (Raupach 1994).

Influence de la végétation dans la CLA : généralités

Les forêts sont des surfaces considérées comme très rugueuses (Collineau 1993). L'influence des canopées sur les écoulements a longtemps été vue comme une superposition de tourbillons à petites échelles produits par le sillage des différentes parties des plantes. Depuis plus de vingt ans, les mécanismes sont maintenant beaucoup mieux connus. Les années 80 ont en effet été marquées par des campagnes de mesures précises (en particulier, mesures multipoints). On sait maintenant que les écoulements sont dominés par des tourbillons turbulents à grande échelle (de l'ordre de la hauteur de la végétation, Brunet *et al.* 1994).

L'interaction entre la canopée et l'atmosphère se comporte différemment dans les deux zones suivantes (Finnigan 2000) :

- La *sous-couche rugueuse* (Roughness sublayer), sous influence de la pression de rugosité des éléments qui génère la turbulence intermittente. L'énergie de l'écoulement est absorbée par la traînée aréodynamique (**Encadré 3.5**) de la végétation. Dans cette portion inférieure de la CLS (de l'ordre de 1.5 à 3.5 fois la hauteur de végétation), les profils ne sont en général plus logarithmiques.
- La *sous-couche inertielle* (Inertial layer), dans laquelle l'écoulement est quasi stationnaire, et les flux verticaux turbulents (moment, énergie, masse) constants avec la hauteur. Cette couche, située au dessus de la végétation a les mêmes propriétés que la couche limite atmosphérique.

La sous-couche inertielle

En présence de végétation, le profil logarithmique de la CLS est valable dans la sous-couche inertielle, mais il se trouve décalé et modifié par la présence de la végétation :

$$\langle \bar{u} \rangle = u_*^* \left(\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \right) \quad (3.7)$$

d (*zero plane displacement*) est un paramètre empirique qui s'interprète comme étant la hauteur à laquelle la traînée moyenne commence à se manifester. Il augmente avec la densité de la canopée : pour une canopée très peu dense, il est proche de 0. Pour une canopée très dense, il est proche de h . Il est généralement voisin du $\frac{3}{4}$ de la hauteur de la canopée (Brunet *et al.* 1994 ; Finnigan 2000). Raupach (1994) montre que lorsque l'hétérogénéité horizontale n'est pas trop marquée, on peut utiliser les expressions suivantes, pour évaluer les paramètres de l'équation (3.7), Λ représentant le Canopy Area Index (une notion voisine du LAI, voir **Encadré 3.3**).

$$\frac{u_*}{U_h} = \min(\sqrt{0.3 + 0.0015\Lambda}; \sqrt{0.3}) \quad (3.8)$$

$$1 - \frac{d}{h} = \frac{1 - \exp(-\sqrt{7.5\Lambda})}{\sqrt{7.5\Lambda}} \quad (3.9)$$

$$\frac{z_0}{d} = \left(1 - \frac{d}{h} \right) \exp \left(-\kappa \frac{u_*}{U_h} - \ln(2) + 0.5 \right) \quad (3.10)$$

Raupach (1994) insiste néanmoins sur le fait que les profils verticaux de LAD influent évidemment sur les paramètres de rugosité de la végétation. Il cite l'utilisation d'un paramètre zm^{21} qui est néanmoins mal connu et sans doute insuffisant, permettant de représenter correctement les effets de l'hétérogénéité verticale. Néanmoins, bien qu'il ne prenne pas en compte ces hétérogénéités, le modèle de Raupach (1994) fournit des estimations de $\frac{z_0}{d}$ avec moins de 20% d'erreur et de $\frac{d}{h}$ avec moins de 10% (confirmé par Poggi *et al.* 2004).

²¹ Sellers, P.J. 1992. Biophysical Models of Land Surface Processes. In K.E. Trenberth, Climate System Modelling. Cambridge University Press : 451-490.

Encadré 3.4. La couche de mélange

Deux écoulements laminaires parallèles à vitesses différentes, initialement séparés se rejoignent. Se développent alors des tourbillons, dont la hauteur est caractérisée par

$$\delta_w = \frac{\Delta U}{\left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{\max}}$$

, avec ΔU la différence de vitesse entre les deux flots.

L'analyse de stabilité linéaire montre que pour qu'une telle instabilité puisse se développer, il faut que le profil vertical de vitesse soit marqué par un point d'inflexion (caractéristique). Des instabilités (dites de **Kelvin-Helmholtz**) dans la position de ce point d'inflexion sont à l'origine de la zone de turbulence créée en aval de la zone de jonction entre les deux écoulements. La théorie de la stabilité montre que l'on peut forcer à faible amplitude (forçage par une petite perturbation) et ainsi influencer la dimension caractéristique de la couche de mélange. En cas non forcé, on observe une très grande sensibilité expérimentale (les petites différences sont incontrôlables).

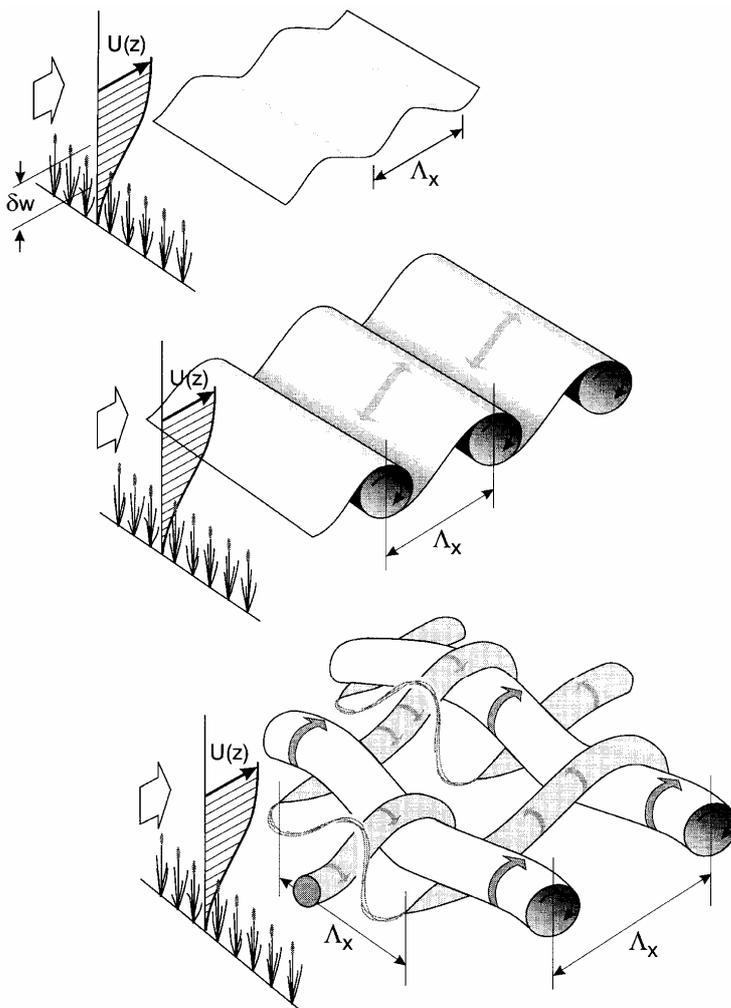


Fig. 3.3. Etablissement en trois étapes de la turbulence due à la végétation au bas de la CLA (D'après Finnigan 2000)

Les grands tourbillons cohérents et l'analogie de la couche de mélange

Les champs moyens sont caractérisés par un fort cisaillement au sommet de la canopée qui induit une inflexion dans le profil de vitesse horizontale, ainsi qu'une décroissance rapide de l'énergie cinétique turbulente et du flux de moment au fur et à mesure que l'on s'enfonce dans la canopée. La turbulence active et les mouvements cohérents qui se développent près du sommet de la canopée peuvent donc être attribués aux instabilités de Kelvin-Helmholtz comme dans la couche de mélange (voir, par exemple, Raupach *et al.* 1996; Brunet *et al.* 1994; Kaimal & Finnigan 1994; Finnigan 2000). Ce point d'inflexion est également responsable du développement de larges tourbillons cohérents qui contrôlent l'essentiel du transfert de la quantité de mouvement et du scalaire entre la végétation et l'atmosphère (Gao *et al.* 1989; Lu & Fitzjarrald 1994).

L'analogie avec la couche de mélange est décrite par Raupach *et al.* (1996) et semble très largement adoptée par la communauté scientifique (Finnigan 2000 ; Lee 2000). Elle s'appuie sur une étude détaillée du champ des vitesses, du ratio des composantes du tenseur de Reynolds (théorie RDT), du rôle des éjections et des balayages (sweeps) ; cette étude très documentée conclut à la validation de l'analogie avec la couche de mélange. Elle démontre en particulier, l'existence du point d'inflexion caractéristique (à mi hauteur de la canopée environ) dans le profil de vitesse horizontale, des cycles de forts « sweeps » et d'« éjections », nettement plus faibles. Leur taille caractéristique est de l'ordre de la hauteur de la canopée. L'analogie conduit alors à définir une échelle de cisaillement

$$L_s = \frac{u(h)}{\left. \frac{\partial u}{\partial z} \right|_{z=h}} \approx \frac{1}{2} \delta_w.$$

L_s est en général voisin de $0.5h$ et varie dans l'intervalle $[0.1h, 0.8h]$ suivant que la canopée est dense ou épars (Finnigan 2000). Ces grands tourbillons sont associés à des vagues (*honamis*) de périodicité spatiale de $\Lambda_x \approx 8L_s$ et temporelle de $T_l \approx 0.7 \frac{L_s}{\sigma_w}$. La valeur de Λ_x pour l'échelle

caractéristique des instabilités est également cohérente avec les valeurs obtenues sur des couches de mélange (entre 7 et 10).

La mise en œuvre des grands mouvements cohérents (**Fig. 3.3**) s'opère en trois étapes : une rafale ou un balayage élève le niveau de cisaillement au dessus d'un certain seuil. Les instabilités du point d'inflexion induisent un profil de vitesse horizontale qui ondule suivant la direction du vent. Ces vagues se regroupent jusqu'à former des rouleaux conservant la même périodicité. Puis, des instabilités secondaires contribuent au renforcement de toute forme de vorticité ambiante pour induire des tourbillons parallèlement à la direction du vent. Les instabilités de Kelvin-Helmholtz sont alors modifiées par plusieurs processus à haut nombre de Reynolds : instabilité 3D, interactions non linéaires entre vortex et turbulence d'arrière plan (  petite échelle). Selon Raupach *et al.* (1996), la croissance des instabilités est proportionnelles à $u'(h)$. Il en résulte que les instabilités les plus grandes et les plus rapides sont générées durant les rafales. Ceci pourrait expliquer le fait que les honamis et les balayages (sweeps) arrivent par groupe de 3 ou 4.

Influence de la densité de la canopée, de l'hétérogénité spatiale, du relief et de la stabilité atmosphérique

Les considérations développées précédemment ont été largement mises en évidence pour des canopées denses et homogènes, sur terrain plat et dans des cas d'atmosphère neutre (ou quasi neutre). Des situations présentant des écarts par rapport au cas idéal discuté précédemment ont également été analysées et sont encore l'objet d'étude : stabilité, effet d'hétérogénité due à la végétation, etc. (Lee 2000). Nous examinons ces cas non idéaux.

Un écoulement au dessus d'une canopée de densité faible se comporte de manière intermédiaire, entre un écoulement sur sol nu qui s'assimile à une couche limite de surface et un écoulement au dessus d'une canopée suffisamment dense, qui génère des instabilités de type couche de mélange. Il n'existe cependant pas de modèle bien défini dans le cas des densités moyennes (Novak *et al.* 2000 ; Finnigan 2000). Le point d'inflexion du profil des vitesses générateur des instabilités est beaucoup moins marqué. Finnigan (2000) note même que si la densité devient trop faible, on peut observer une disparition du point d'inflexion et retrouver un écoulement du type couche de surface. Poggi *et al.* (2004b) observent qu'une transition entre couche de surface (moment quasi gaussien, pas d'inflexion) et couche de mélange au fur et à mesure que l'on augmente la densité, rend correctement compte des données expérimentales.

Le paysage peut également marquer une certaine hétérogénéité. On considère en premier lieu, des hétérogénéités liées à la structure globale du peuplement (transition zone ouverte-forêt, brise-vent...). Dans une moindre mesure, quelques hétérogénéités liées à la structure interne du peuplement ont également été étudiées. Ces derniers aspects sont décrits en partie 3.3. En présence de transition zone ouverte-forêt, une zone de fortes turbulences apparaît entre $3h$ et $7h$ et l'équilibre est retrouvé au delà d'une distance d'environ $10h$ (Brunet 2000). Selon Morse *et al.* (2002), les changements de végétation modifient u jusqu'à $4h$ et v et w jusqu'à $5h$. Les transitions forêt-zone ouverte s'accompagnent d'une accélération de l'écoulement et d'une diffusion verticale de la turbulence de haut en bas dans la zone ouverte entre $2h$ et $16h$ après la lisière de la forêt. L'équilibre est atteint après plusieurs dizaines de h (Brunet 2000). Lee (2000) mentionne la présence de trois zones : une zone calme (4 à $7h$), une zone de mélange (avec point d'inflexion et instabilité de Kelvin-Helmholtz) et enfin une zone de rééquilibrage (au bout de $22h$ pour Chen *et al.* 1995). Li *et al.* (1990) observent que l'écoulement descend après la lisière, la vitesse verticale maximum pour cette descente intervenant au bout d'une longueur égale à $2.5h$. Ces effets sont foncièrement tridimensionnels (Lee 2000). Des études portent également sur des brise-vent (Patton *et al.* 1998 ; Guan *et al.* 2003) et fournissent de nombreuses applications en matière de protection des cultures et du sol contre l'érosion.

La présence de collines induit une augmentation de la vitesse relative dans les bas niveaux de la canopée en dessous de la crête (Brunet *et al.* 1994 ; Finnigan & Brunet 1995). Ce phénomène est causé par l'établissement du champ de pression sur l'ensemble de l'écoulement. Des résultats expérimentaux montrent l'évolution des profils au fur et à mesure que l'on monte sur la colline. On note en particulier une modification de l'inflexion du profil des vitesses : celle-ci diminue vers le milieu de la colline (parfois jusqu'à disparition) et se renforce au niveau de la crête (longueur caractéristique divisée par 3). Finnigan & Belcher (2004) proposent un modèle d'écoulement spécifique des collines.

La flottabilité n'est pas prise en compte dans l'analogie de la couche de mélange. Elle s'applique donc en général dans des conditions où l'atmosphère est thermiquement neutre (dans lesquelles la flottabilité devient négligeable). Brunet & Irvine (2000) étudient l'effet de la stabilité et de l'instabilité (en fonction de la longueur L d'Obukhov) de l'atmosphère afin de voir si l'analogie de la couche de mélange peut être maintenue dans ces configurations. Les conditions atmosphériques proches de la neutralité et dans une certaine mesure instable, présentent la même relation, avec un nombre de Strouhal²² très faiblement dépendant de L . En revanche, dans les conditions stables, le nombre de Strouhal augmente avec la stabilité. Ceci semble logique puisque les gradients verticaux sont plus forts et qu'il s'agit en général de situation où le vent est faible. L'étude conclut au fait que l'analogie peut être maintenue dans ces configurations, mais qu'il est nécessaire de mieux évaluer les effets respectifs des instabilités dues au point d'inflexion et celles dues aux forces de flottabilité.

²² Le nombre de Strouhal $Sr = \frac{f d}{v}$ décrit la circulation oscillante (f la fréquence des tourbillons, d une longueur caractéristique et v la vitesse du fluide).

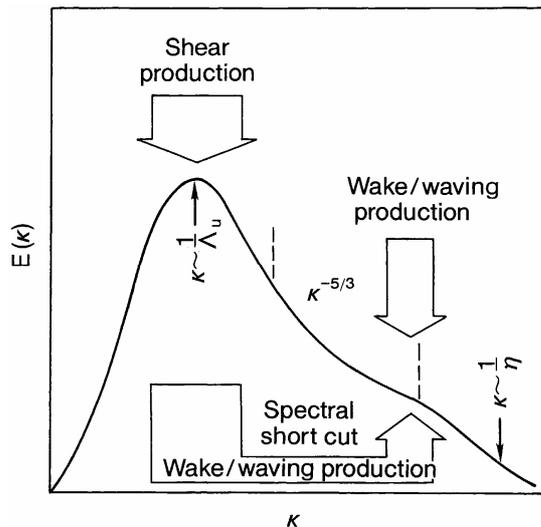


Fig. 3.4. Modification de la structure de la cascade de Kolmogorov en présence de végétation (D'après Finnigan 2000)

Encadré 3.5. Modélisation de la traînée $F_i = C_d a |u| u_i$ (a représente la distribution surfacique de feuilles).

Le coefficient C_d contient en réalité deux types de traînée de nature différente. La première dite *de friction* est due à la rugosité des particules en contact avec l'écoulement. Cette forme de traînée est due aux frottements visqueux du fluide sur la plante.

$$F_{vi} = C_{dv} a |u| u_i, \text{ avec } a \text{ la surface mouillée des éléments}$$

La seconde forme de traînée est due à la forme même des particules qui perturbe le cours de l'écoulement (force de pression).

$$F_{vi} = C_{df} a |u| u_i, \text{ avec } a \text{ la surface frontale des éléments}$$

En pratique, on se ramène à une unique expression $F_i = C_d a |u| u_i$

Le calcul expérimental de la traînée (Marcolla *et al.* 2003) consiste à évaluer la traînée à partir de l'équation du moment et de la distribution surfacique de particule (Meyers & Paw U 1986; Amiro 1990; Katul & Albertson 1998). Hopwood (1996) calcule le coefficient de traînée de l'ensemble de la couche végétation et sol, en prenant en compte la rugosité du sol et le LAI. Cette partition, avec deux coefficients de traînée a de nombreuses applications en matière d'effet de la présence de couvert sur l'érosion (Crawley & Nickling 2003). Le coefficient de traînée n'est pas une constante absolue du système (Brunet *et al.* 1994; Finnigan 2000). Il varie avec la hauteur dans le couvert, quand on passe du laboratoire au terrain et lorsque l'on augmente le nombre de particules. Son comportement est cependant maintenant mieux connu. Pour des particules isolées, le Reynolds varie entre 10^2 dans la partie basse et peu ventilée de la canopée et 10^5 dans la partie supérieure bien ventilée. C_{df} vaut environ 0.5 pour Re entre 10^3 et 10^5 , mais double lorsque Re diminue à 10^2 . C_{dv} , en revanche, varie avec \sqrt{Re} . Ceci explique une partie des variations du C_d en fonction de la vitesse du vent (Finnigan 2000; Shaw & Patton 2003). Cette variabilité observée était autrefois expliquée par le caractère flexible des canopées, mais l'explication par les différences de niveau de turbulence entre les conditions expérimentales et *in situ* apparaît beaucoup plus satisfaisante. A cela s'ajoute le fait que les valeurs de coefficient de traînée décroissent avec le nombre de particules en particulier quand le niveau de turbulence est assez élevé (effet de couvert) (Taylor 1988; Finnigan 2000; Poggi *et al.* 2004b).

Turbulence à petite échelle

La zone appelée ISR (*inertial subrange*) de la cascade de Kolmogorov se caractérise par une décroissance en taille des tourbillons (le spectre d'énergie cinétique turbulente suit une loi de la forme $S(k) \sim k^{-5/3}$, avec k le nombre d'onde (**Fig 3.4**)).

La présence de végétation induit deux phénomènes susceptibles de modifier le schéma de la cascade dans cette zone (Finnigan 2000 ; Brunet *et al.* 1994) :

- La production par *effet de sillage* : l'écoulement moyen travaille contre les forces de traînée aérodynamiques et de pression pour produire de la chaleur par dissipation, mais aussi de la turbulence à petite échelle dans le sillage des éléments de la végétation ; il en résulte une production de tourbillons qui contribue à augmenter l'EKT aux échelles de la couche inertielle. Cette production est assez faible.
- Le *court-circuitage de la cascade* : les interactions décrites précédemment entre l'écoulement moyen et la végétation se produisent entre les tourbillons turbulents et la végétation. Il en résulte une production directe de chaleur, mais aussi un transfert de l'énergie cinétique turbulente des gros tourbillons vers l'énergie cinétique turbulente aux échelles de la couche inertielle.

On peut montrer d'un point de vue théorique que l'adjonction de ces deux termes induit une modification de la pente par un facteur exponentiel qui induit une diminution beaucoup plus rapide du spectre d'énergie aux faibles nombres d'onde, par rapport à la cascade classique, et plus lente aux grands nombres d'onde. Cependant, les mesures effectuées sur le spectre montrent que les variations de la pente et de l'isotropie sont en général mineures (Brunet *et al.* 1994), sans doute parce que les petits tourbillons produits sont diffusés très rapidement.

Les modèles d'écoulements turbulents, qu'ils soient RANS ou LES, intègrent ces différents effets de la végétation au moyen de termes spécifiques.

La modélisation RANS en milieu forestier

Par rapport aux modèles RANS standard, la présence de la végétation nécessite l'introduction de termes permettant de prendre en compte l'influence de cette phase solide sur l'écoulement.

Il a été également nécessaire d'introduire des modifications sur les équations de *TKE* (et éventuellement du taux de dissipation) qui ont pour objet de prendre en compte à la fois les effets de production de turbulence dues au sillage et le court-circuitage de la cascade de Kolmogorov (Finnigan 2000).

Ces termes sont (Green 1992 ; Liu *et al.* 1996 ; Foudhil *et al.* 2005) :

- Le terme de traînée dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement,

$$F_i = \rho C_d a |u| u_i, \text{ où } a \text{ représente la distribution surfacique de feuilles} \quad (3.11)$$

- Le terme de production d'*EKT* par effet de sillage dans l'équation de conservation de l'*EKT* :

$$\rho C_{Pw} C_d a \left[\overline{u_j} \overline{u_j} \right]^{3/2} \quad (3.12)$$

- Le terme de dissipation de l'*EKT* par court-circuitage de la cascade dans l'équation de conservation de l'*EKT* (l'énergie des petits tourbillons est rapidement dissipée) :

$$- \rho C_{sw} C_d a \sqrt{\overline{u_j} \overline{u_j}} k \quad (3.13)$$

- Dans le cas d'un modèle $k-\varepsilon$, des termes similaires aux deux précédents dans l'équation régissant le taux de dissipation :

$$\rho C_{Psw} \frac{\varepsilon}{k} C_d a \left[\overline{u_j} \overline{u_j} \right]^{3/2} \text{ et } - \rho C_{Dsw} C_d a \sqrt{\overline{u_j} \overline{u_j}} \varepsilon \quad (3.14 \text{ et } 3.15)$$

Tableau 3.2. Valeurs de coefficient de traînée

Type de canopée	Source	C_d
Pins	Amiro 1990	0.2
Forêt <i>Quercus-Carya</i>	Meyers & Baldocchi 1991	0.15 ou 0.18
Epicea	Liu <i>et al.</i> 1996	0.3
Buisson (<i>Euonymus alatus</i>)	Gillies <i>et al.</i> 2002	0.42 +/-0.03
Epicea bleu du Colorado (<i>Picea pungens glauca</i>)	Gillies <i>et al.</i> 2002	0.39+/-0.04
Herbes (<i>Pennisetum setaceum</i>)	Gillies <i>et al.</i> 2002	0.34+/-0.06
Brise-vent	Guan <i>et al.</i> 2003	0.6-1.1

La valeur de la constante $C_{D_{\text{av}}}$ (théoriquement égale à 6) est discutée (Liu *et al.* 1996 ; Foudhil *et al.* 2005). Cette constante est contestée par Liu *et al.* (1996), en particulier à cause du fait que le court-circuitage de la cascade énergétique s'accompagne d'une réduction de la longueur de l'échelle de mélange qui accroît la dissipation. Il propose donc une valeur de $C_{D_{\text{av}}}$ de 2.4. Cette valeur permet d'éviter des surestimations d'EKT (jusqu'à 50 %) et elle permet d'ajuster le modèle aux grandeurs expérimentales. Selon Wilson *et al.* (1998), les hypothèses « de base » du k- ϵ sont particulièrement faibles dans les canopées. Même la version avec adjonction de termes supplémentaires est très critiquée, car les résultats sont particulièrement sensibles au paramètre de réduction du taux de dissipation dû au sillage (dissipation instantanée), qui fait perdre au modèle une bonne partie de son universalité. Après ajustement de ce paramètre, ce modèle obtient cependant un bon accord modèle-expérience (2.4 chez Liu *et al.* (1996), 3.24 chez Foudhil *et al.* (2005)). Chez Liu *et al.* (1996), les erreurs observées sont relativement faibles et sont attribuées au fait que la turbulence n'est pas isotrope dans cette région (le k- ϵ modélise la turbulence homogène isotrope). Face aux changements de rugosité de surface (doux à rugueux) et aux hétérogénéités de peuplement (transition peuplement/éclaircie et éclaircie/peuplement), les résultats de Foudhil *et al.* (2005) semblent également encourageants, même s'il semble nécessaire de développer certains aspects de la dissipation dans les régions de fortes distorsions (impossible d'obtenir une valeur correcte à toutes les hauteurs, à cause des distorsions rapides de l'écoulement et de l'intermittence de la turbulence). FIRESTAR est très proche de ces modèles, mais utilise en plus des moyennes de Favre (pour prendre en compte les fortes dilatations des gaz), une équation de divergence non nulle (multiphasique) et le terme supplémentaire RNG. Il introduit également un terme de correction à bas Reynolds dans le calcul de la viscosité. A la différence des RANS utilisés pour modéliser les écoulements en milieux forestiers, le RANS de FIRESTAR est instationnaire (T-RANS), et est utilisé pour résoudre la part turbulente des écoulements non calculés explicitement.

Une critique importante des RANS du premier ordre provient de l'hypothèse de viscosité turbulente. Celle-ci ne peut rendre compte de phénomènes parfois observés de diffusion de la turbulence ou de la chaleur dans le sens inverse du gradient moyen des vitesses (diffusivité turbulente négative). Ce phénomène est dû à l'action des grosses structures cohérentes que représentent les tourbillons les plus énergétiques. La diffusion efficace en un point est en effet due à la contribution diffusivité des sources proches, mais aussi à la contribution non diffusivité représentant le flux de sources éloignées en présence de gros tourbillons intermittents. Ces phénomènes ne peuvent évidemment pas être pris en compte avec l'hypothèse de diffusion selon le gradient mais peuvent l'être par des modèles d'ordre supérieur (Wilson *et al.* 1998). Ces modèles RANS ne font pas l'approximation de la diffusion de la turbulence selon la gradient des vitesses, et introduisent une fermeture du modèle à un ordre plus élevé (modèle « Reynold-Stress ») ; en général, les hypothèses de diffusion selon le gradient sont alors introduites au second ou au troisième ordre. On trouvera notamment cette approche chez Wilson et Shaw (1977), reprise par Poggi *et al.* (2004a), qui introduit notamment des échelles pour la longueur caractéristique de mélange. Comme pour les modèles du premier ordre, certains modèles ne fixent pas l'échelle de la turbulence et résolvent une équation sur le terme de dissipation (Ayote *et al.* 1999) pour application à canopée hétérogène. D'autres modèles vont jusqu'au troisième ordre, (Meyers & Paw U 1986) mais fixent l'échelle de turbulence. Les modèles d'ordre élevé ne fournissent généralement pas forcément de meilleurs résultats que des modèles plus simples (Katul & Albertson 1998). De plus, ils sont beaucoup plus complexes (jusqu'à dix équations pour 1D), comportent de nombreuses constantes et utilisent quand même des hypothèses de gradients aux ordres supérieurs. Pour cette raison, un certain nombre d'auteurs comme (Wilson *et al.* 1998) préfèrent cependant les modèles du premier ordre, ignorant la part non locale et non diffusivité des diffusivités, même s'il est difficile d'obtenir de bons résultats de modélisation dans les parties basses de la canopée.

Tableau 3.3. Valeurs des différents paramètres du modèle de Deardorff (y compris en présence de végétation)

	C_1	C_2	$C_1 \times C_2$ ₂₃	C_{e1}	C_{e2}	Δs
Deardorff 1972 (analogue de Rotta)		0.7				$(\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$
Deardorff 1980 (analogue du k-l)	0.1	0.7				$(\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$
Shen & Leclerc (1997)	0.1	0.19+ (0.51.l/ Δs) 0.70	0.07	0	2	$\Delta s = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$ (atmosphère instable) $\min(\Delta s, 0.76 \bar{k}^{-1/2} \left(\frac{g}{\theta} \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial z} \right)^{-1/2})$ (atmosphère stable)
Dwyer <i>et al.</i> 1997	0.1	?	?	0	2	?
Kanda & Ino 1994	0.05	1.0	0.05	$\alpha=0.1$	2	$(\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3}$
Su <i>et al.</i> 1998 ²⁴ ,	0.1 ²⁵	0.93	0.093 ₂₆	0	1	$(1.5 \Delta x 1.5 \Delta y \Delta z)^{1/3}$
Shaw & Patton 2003	0.1+ sillage	0.93	0.093	1	8/3	$(1.5 \Delta x 1.5 \Delta y \Delta z)^{1/3}$

Tableau 3.4. Caractéristiques numériques des simulations LES

	Dimension du domaine et Hauteur végétation (en m)	Taille de maille (moyenne) Nombre de nœuds	Type de maillage	dt	Schéma numérique
Kanda & Ino 1994	1.5 × 1.0 × 1.0 0.33	0.05 × .05 × .03 32 × 20 × 30	Homogène en x,y Ratio géométrique de 1.1 en z (partie fine près des parois)	0.048s	Euler au premier ordre implicite 2 nd ordre centré (sauf advection : 4 ^{ème} ordre upwind)
Shen & Leclerc 1997; Dwyer <i>et al.</i> 1997	180 × 120 × 60 20	2.0 × 2.0 × 2.0 90 × 60 × 30	Homogène	0.1s	Schéma Adams-Bashforth du second ordre Dérivées horizontales : méthode pseudospectrale Dérivées verticales : différences finies centrées du second ordre
Su <i>et al.</i> 1998	180 × 120 × 60 20	2.0 × 2.0 × 2.0 90 × 60 × 30	Homogène	0.1s	Runge-Kutta du troisième ordre pour le temps. Dérivées idem avant
Shaw & Patton 2003	180 × 120 × 60 20	2.0 × 2.0 × 2.0 90 × 60 × 30	Homogène		

²³ analogue de C_μ avec un k- ϵ

²⁴ Moeng, CH. Wyngaard, JC. 1988. Spectral analysis of Large-Eddy Simulation of the convective Boundary-Layer. J. Atmos. Sci. 45 :3573-3587.

²⁵ 0.025 dans la végétation

²⁶ 0.023 dans la végétation

L'approche RANS de la turbulence propose donc trois types de modèles en milieu forestier : du premier, du second et du troisième ordre. Il apparaît que plus les modèles se complexifient, plus ils sont sensibles aux choix des paramètres, qui sont eux-mêmes délicats à évaluer. Les modèles du troisième ordre en particulier sont complexes et ne semblent pas apporter de meilleurs résultats que les autres. Dans le cas des écoulements forestiers, un aspect délicat provient du fait que la turbulence n'est pas toujours pleinement développée (en particulier en présence de végétation hétérogène, caractérisée par l'intermittence). Enfin, ces modèles représentent la turbulence de manière moyenne et globale : les gros tourbillons (qui participent au transfert convectif), ne sont pas séparés des petits (qui pilotent la combustion turbulente) et les fluctuations (même importantes) ne sont pas explicitement calculées. A la différence des feux de petites dimensions réalisés en atmosphère confinée, les feux de forêts se propagent donc dans un contexte où la turbulence est dominée par de grosses structures intermittentes. Ce type de structure peut être résolu au moyen des techniques issues de la LES, que nous allons maintenant étudier, car elles séparent la partie résolue à l'échelle du maillage du champ des vitesses, de sa partie modélisée (souvent énergie cinétique turbulente de la sous-maille), au moyen d'un filtrage spatial et non plus d'une moyenne statistique temporelle comme les RANS.

La modélisation LES en milieu forestier

Avec la LES, les tourbillons dont la taille est supérieure à celle de la maille sont explicitement résolus, et la turbulence de sous-maille est modélisée. Sous réserve que la grille soit suffisamment fine (voir **tableau 3.4**), la LES permet d'avoir accès aux champs instantanés et permet de reproduire les rafales et les larges structures cohérentes que l'on trouve dans une canopée. La LES a été appliquée avec succès à des canopées :

- homogènes (Shaw et Schumann 1992 ; Kanda & Hino 1994 ; Shen & Leclerc 1997 ; Su *et al.* 1998 ; Su *et al.* 2000 ; Watanabe 2004 ; Dupont et Brunet 2007a ; Pimont *et al.* 2007)
- hétérogènes (Patton *et al.* 1998 ; Yang *et al.* 2006a et b ; Dupont et Brunet 2007b), dans des cas de stratification neutre de l'atmosphère (sauf Shen & Leclerc 1997).

De gros progrès ont été réalisés depuis les premiers modèles (Shaw et Schumann 1992) et de très bons accords modèle-expérience sont obtenus dans plusieurs études Dwyer *et al.* 1997 ; Su *et al.* 1998 (canopée éparse) ; Patton 1998 (coupure de vent). Une meilleure résolution et des modèles de sous-maille adaptés aux caractéristiques spatiales de la végétation sont cependant nécessaires. La plupart des modélisateurs arrivent à reproduire les profils et différentes tendances observées sur le terrain. On peut citer la validation expérimentale de Kanda & Ino (1994), qui retrouvent les rouleaux dans le plan vertical (balayages et éjections) ainsi que les deux vortex en contre rotation dans le plan horizontal. Les résultats de Dwyer *et al.* (1997) semblent également en accord avec les données expérimentales et les précédents résultats de modélisation. Les termes associés au transport (turbulent et pression) sont très importants dans le haut de la canopée (plus de 50% de la production). Le transport par les fluctuations de pression devient dominant dans le bas de la végétation. Au dessus de la canopée, ces termes de transport sont opposés. Ces travaux sont cités par Morse *et al.* (2002) qui conduit une étude expérimentale (sur site et en soufflerie) sur une lisière : ils sont en bon accord avec l'expérience. Enfin, les simulations de Su *et al.* (1998) d'une forêt décidue éparse (Camp Borden) présentent de bons accords expérimentaux pour le premier et le second moment. Concernant le troisième moment simulé, l'allure est correcte, mais l'amplitude est trop faible. On peut citer également les travaux de Fitzmaurice *et al.* (2004), dans lesquels les techniques LES sont mises à contribution pour étudier les micro-fronts scalaires. Les résultats sont en accord avec les données expérimentales précédemment recueillies. Ceci montre encore une fois la bonne qualité des prédictions des modèles LES. Enfin, Albertson *et al.* (2001) s'intéressent aux importances relatives des contrôles régionaux et locaux liés à l'hétérogénéité de la végétation (distribution de LAI, variant de 3.7 à 7.6 avec une longueur caractéristique de variation de 30 m (champ aléatoire corrélé)), sur les flux d'énergie, d'eau et de carbone dans les canopées.

En général, le filtrage est réalisé à $\Delta_s = (1.5\Delta_x 1.5\Delta_y \Delta_z)^{1/3}$, plutôt qu'à $(\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3}$, afin de limiter les *aliasing errors* dans les méthodes pseudo-spectrales (Su *et al.* 1998 ; Shaw & Patton 2003).

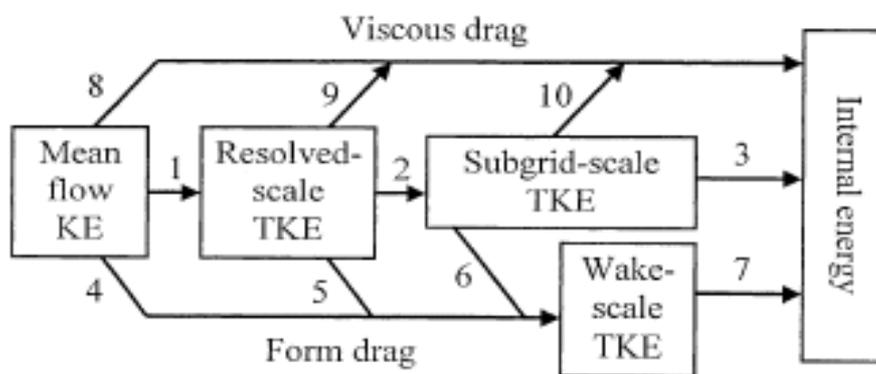


Fig. 3.5. Séparation de l'EKT à différentes échelles dans le modèle de Shaw & Patton (2003)

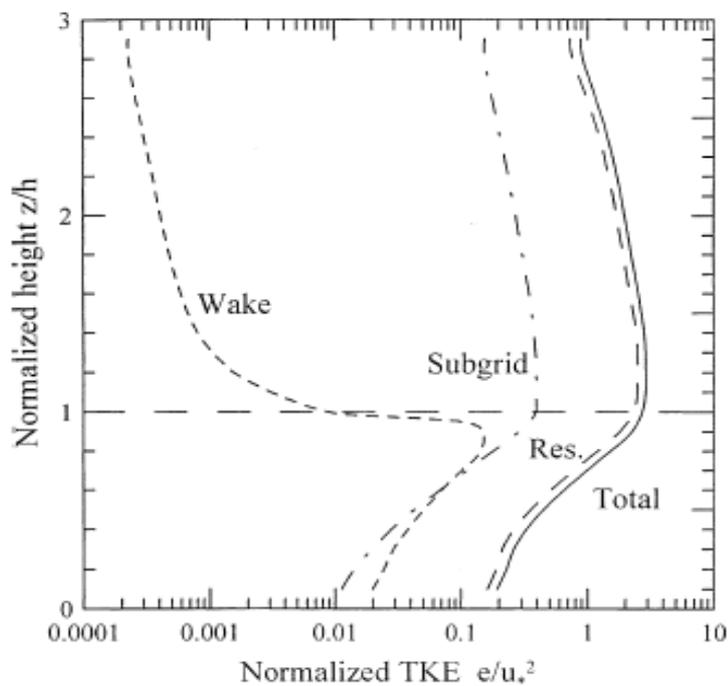


Fig. 3.6. Contribution des deux EKT modélisées et de l'EKT calculée explicitement à l'EKT totale (Extrait de Shaw & Patton 2003)

L'équation portant sur l'énergie à l'échelle de la SGS comprend les mêmes termes spécifiques de la végétation qu'en RANS. Cependant l'échelle de résolution conduit les modélisateurs à des hypothèses différentes qui conduisent à des valeurs de coefficients C_{e1} et C_{e2} particulières (voir **Tableau 3.3**). Pour Shen & Leclerc (1997), l'énergie dans la SGS est supposée dissipée directement dans l'énergie interne. En effet, les mouvements à petite échelle dus au sillage se dissipent rapidement par rapport à l'EKT de la SGS, car la taille de la maille est largement supérieure à celle des tourbillons dus au sillage. Ainsi, le terme de production par le sillage (terme source) peut être négligé ($C_{e1}=0$). C'est également l'hypothèse de Dwyer *et al.* (1997) et de Su *et al.* (1998). Cependant, Kanda & Ino (1994) utilisent des mailles beaucoup plus petites (la végétation est également plus petite). Si la taille de la grille est négligeable par rapport à la taille des tourbillons générés par une feuille, alors ceux-ci seront calculés explicitement dans la GS. Les travaux de Kanda & Ino concernent donc un cas intermédiaire. Ils considèrent donc qu'une fraction $1-\alpha$ de l'énergie produite par le sillage est directement dissipée alors qu'une fraction α (ici 0.1) contribue réellement à l'énergie de la SGS. Su *et al.* (1998) (dont la maille est grande) observent que ces termes affectent très peu les calculs portant sur la GS et décident donc de négliger à nouveau ce terme. Ces travaux sont poursuivis et développés dans Shaw & Patton (2003), qui introduisent une **énergie de sillage spécifique**, indépendamment de la SGS, qui constitue l'analogue LES de ce qui avait été proposé en RANS par Wilson *et al.* (1988) ou Ayotte *et al.* (1999). Cette approche présente un certain nombre de similitudes avec l'approche actuellement retenue dans FIRETEC. En effet, les effets de la traînée sur la production de turbulence à l'échelle de la particule de végétation induisent une turbulence qui se produit à une échelle a priori très différente (plus petite) que la SGS.

L'énergie à l'échelle de la SGS est toujours régie par (Shaw & Patton 2003):

$$\frac{\partial e}{\partial t} + u_j \frac{\partial e}{\partial x_j} = -R_{i,j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_M \frac{\partial e}{\partial x_j} \right] - \varepsilon - \varepsilon_{fd} - \varepsilon_{sf}, \quad (3.16)$$

avec toujours $\varepsilon = C_2 \frac{e^{3/2}}{l}$ et $C_2=0.93$ et $\varepsilon_{fd} = \frac{8}{3} C_d a U e$ (conversion de l'énergie de la SGS en

énergie à l'échelle du sillage (même procédure que Wilson *et al.* 1988 pour calculer la transmission de l'ensemble de la TKE en énergie à l'échelle du sillage ; voir aussi que Shaw & Shumann 1992, mais 8/3 au lieu de 2)) et $\varepsilon_{sf} = \frac{8}{3} C_{sf} a U e$ (conversion de l'énergie de la SGS en énergie interne).

Pour l'énergie à l'échelle du sillage, on a :

$$\frac{\partial e_w}{\partial t} + u_j \frac{\partial e_w}{\partial x_j} = C_d a U^3 + \varepsilon_{fd} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left[K_M \frac{\partial e_w}{\partial x_j} \right] - \varepsilon_w, \text{ avec } \varepsilon_w = C_2 \frac{e_w^{3/2}}{l_f} \quad (3.17)$$

et l_f une longueur caractéristique représentative de la taille des éléments dans la canopée

Le premier terme source représente la production de sillage résultant de la GS. Le second correspond à celui résultant de la SGS.

$$\text{On a } R_{i,j} = K_M \left[\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right] - \frac{2}{3} \delta_{ij} k \text{ avec } K_M = C_1 (l_\Delta e^{1/2} + l_f e_w^{1/2}) \text{ et } C_1=0.1 \quad (3.18)$$

l_f varie entre 0.05 et 1 m. En pratique, cette modélisation spécifique de l'énergie à l'échelle du sillage a peu d'impact sur la TKE globale. La TKE à l'échelle du sillage augmente cependant avec la dimension des particules, jusqu'à atteindre la moitié de la contribution de l'énergie modélisée dans le milieu et le bas de la canopée (**Fig. 3.6**).

La contribution de l'énergie à l'échelle du sillage et celle de la SGS sont de l'ordre de 10 fois inférieures à celle de la GS. Le bilan de l'énergie à l'échelle du sillage montre que les termes dominants sont dus à la production à la GS et à la dissipation visqueuse. D'une manière générale, les paramètres de la SGS influent peu sur les résultats numériques de la GS.

Ces résultats sont dans l'ensemble très encourageants. Cependant les études sont encore peu nombreuses et souvent menées par les modélisateurs (Pope 2000). En situation complexe, les résultats sont sensibles à la grille et à la méthode numérique et les traitements aux parois ne sont pas toujours clairement décrits (Rodi *et al.* 1997). Ceci prêche pour un maillage adaptatif, apte à diminuer l'échelle de filtrage de manière à toujours prendre en compte les tourbillons porteurs d'énergie.

Des efforts sont nécessaires pour travailler sur de plus grand domaine, avec une meilleure résolution. De plus, s'il apparaît que les LES sont bien à même de rendre compte des flux à l'échelle de résolution, il apparaît également qu'elles ne semblent par encore prêtes à fournir des modèles fiables pour la SGS. Le modèle de Smagorinsky (tout comme celui de Deardorff) sont critiqués pour être très dissipatifs et pour produire des profils de vents près des parois éloignés des profils logarithmiques. Des modèles de sous-maille de type dynamique ont également été proposés (par exemple, Germano *et al.* 1991), mais n'ont pas été, à ma connaissance appliqués au calcul des écoulements en milieu forestier.

Les bons résultats fournis en présence de canopée s'expliquent vraisemblablement par le fait que le cisaillement est le facteur le plus important. De même, la dissipation dans la SGS est dominée par la traînée (Sullivan *et al.* 1994). D'autres exemples de bons comportements des modèles de LES dans des conditions où l'hypothèse de Smagorinsky est en défaut, existent (écoulement laminaire, écoulements dans la zone visqueuse...). Selon Jimenez *et al.* (1998), leurs bonnes performances ne sont que faiblement reliées à leurs capacités à correctement modéliser la physique de la sous grille. Mais si ces défauts ne constituent pas un frein vis-à-vis de la modélisation des écoulements en général, lorsqu'il s'agit principalement de décrire les écoulements dominants, il n'en est pas de même dans le contexte de la combustion turbulente en milieu forestier, puisque les grandeurs liées à la SGS paramètrent directement celle-ci.

La modélisation des incendies de forêts nécessite d'être en mesure de calculer explicitement les courants de convection, afin d'évaluer le transfert convectif lié au feu. De plus, la présence du feu induit des phénomènes foncièrement instationnaires. L'approche T-RANS permet une réponse à ce problème, en présupposant une séparation des échelles entre celle de la turbulence locale (due à la végétation, au feu...), et celle des tourbillons générés par l'instationnarité du problème (avancée de flamme, interaction vent/panache...).

L'approche LES consiste à calculer explicitement les tourbillons dont l'échelle est supérieure à celle du maillage sans distinction qualitative entre ceux qui sont générés par la couche limite atmosphérique et ceux générés par l'instationnarité du problème (propagation du feu), avec un filtrage spatial implicite (différences finies) ou non (méthode pseudo spectrale). Les résultats expérimentaux sont en général très bons concernant la partie résolue (gros tourbillons, puisque la maille est en générale de 2 m). Cependant, les modèles de sous-maille ne semblent pas très fiables, parce que trop dissipatifs. Les modélisateurs d'écoulements en milieu forestier ne semblent pas trop préoccupés par ces insuffisances, car celles-ci constituent une part négligeable de l'énergie cinétique turbulente totale (dominée par les gros tourbillons) et que cela n'affecte pas beaucoup le calcul du champ résolu explicitement. Ils s'intéressent en effet davantage aux grosses structures qu'aux petites. Dans les contextes de la modélisation des incendies, toutes les structures sont importantes : les grosses pour le transport convectif (balayages notamment), les moyennes pour la dispersion et le transport convectif, et les plus faibles pour les propriétés du mélange liées à la combustion. Une évaluation correcte de la turbulence à petite échelle apparaît en effet déterminante, car elle pilote la combustion. Les modèles actuels ne semblent pas être en mesure de fournir cette précision.

3. Description de HIGRAD/FIRETEC et validation du modèle en conditions homogène et hétérogène

L'objectif de la présente étude est de valider la partie dynamique de HIGRAD/FIRETEC en présence de canopées, mais en l'absence de feu. Elle intervient en complément des validations du modèle présentées dans la section 0.4.2. Après une description détaillée de la prise en compte de la végétation dans le modèle de turbulence, une comparaison est effectuée entre les statistiques de l'écoulement obtenues par simulation avec les données expérimentales *in situ* de Shaw *et al.* (1988) dans une canopée homogène. Cette première étude fournit notamment une occasion d'évaluer la sensibilité du modèle à différents paramètres comme le coefficient de traînée. Elle est suivie par une comparaison des résultats de simulations sur une canopée hétérogène avec les données de soufflerie de Raupach *et al.* (1987). Ces deux jeux de données ont déjà été utilisés par un certain nombre d'auteurs pour la validation de leur modèle (Su *et al.* 1998; Foudhil *et al.* 2005; Yang *et al.* 2006a; Dupont & Brunet 2007a & b). Le cas de la canopée discontinue nous permet de tirer quelques premières conclusions quant à l'effet des coupures de combustible sur la propagation du feu, avant l'étude plus détaillée qui sera conduite aux paragraphes 3.4 et au chapitre 4.

Validation of FIRETEC wind-flows over a canopy and a fuel-break

François Pimont^A, Jean-Luc Dupuy^A, Rodman R. Linn^B, Sylvain Dupont^C

^A INRA, Unité de Recherches Forestières Méditerranéennes, Equipe de Prévention des Incendies de Forêt, UR 629, F-84914, Avignon, France.

Corresponding author. Phone +33 4 32722947; fax:+33 4 32722902;

email: pimont@avignon.inra.fr

^B Los Alamos National Laboratory MS: D401, Los Alamos, New Mexico, 87544, USA.

^C INRA, UR1263 EPHYSE, 71 avenue Edouard Bourlaux, F-33883, Villenave d'Ornon, France.

The propagation of a wildfire depends strongly on the dynamics and turbulence of the wind flow. This study demonstrates the ability of the physically-based model FIRETEC to accurately simulate wind flow over continuous and discontinuous vegetation canopies with neutral stratification.

Abstract

Several experiments have shown that fire propagation depends on wind velocity. In vegetated canopies, wind-flows are dominated by turbulent regimes characterized by large coherent eddy structures. The wildfire model, FIRETEC, explicitly simulates a part of this turbulence within and above the canopy using a large-eddy simulation (LES) approach. This model has been qualitatively validated in its ability to simulate fire behavior such as seen in grassland fires (Australia), International Crown Fires Modelling Experiment (Canada), the Calabasas Fire, and Oakland Hills Fire. However, there is still a need to also validate process level physical sub models separately. In the present study, the dynamics and turbulence of the flow simulated by FIRETEC are validated in a manner similar to other air flow models without fire, through comparison with measurements associated with flows within continuous and discontinuous forests captured through in-situ and wind-tunnel experiments with neutral thermal stratification. The model is shown to be able to reproduce accurately all essential features of turbulent flow over both forests. Moreover, a short sensitivity study shows that the model is not very sensitive to uncertain parameters such as vegetation drag coefficient. Finally, it is shown in the discontinuous forest case that wind gusts on fuel-break can be very strong and significantly higher than in surrounding canopies, even if their directions are more stable. Although simulations were performed in neutral conditions, these results and others briefly reviewed in the present paper allow for better understanding of wind flow perturbations induced by fuel-breaks. This new validation added to previous ones confirms the ability of FIRETEC for investigating effects of fuel-break design on fire propagation.

Keywords: FIRETEC, Forest canopy, Forest edge, Fuel-break, HIGRAD, Large-eddy simulation, Wildfire, Wind-flow

Introduction

It is well known that wildfire propagation is closely linked to the wind flow dynamics and turbulence within and above forest canopy (i.e. the fuel-bed). Several experiments have shown that the fire spread is strongly correlated to mean wind velocity (see, for example, Cheney *et al.* 1998). Wind flow is indeed responsible for convective cooling and advection of hot gaseous species; it also plays a critical role in determining turbulent mixing within the flame and is likely to influence the balance between different modes of heat transfer (convective and radiative). At local scales, the wind flow dynamics and wildfire propagation are all the more complex as the fuel-bed is heterogeneous due to, for example, the presence of clearing, fuel-breaks, clumping at tree scale, undergrowth, etc. Hence, modelling turbulent wind fields accurately over heterogeneous landscapes is crucial in fire propagation models. The computation of more accurate wind flows has been shown to result in improvements of fire behaviour model predictions (Butler *et al.* 2006).

Wildfire models range from empirical to conglomerations of theoretical representations of physical processes that drive wildfires. Winds are incorporated into these models in different ways depending on the basis behind the model development. In some empirical models, the mean non-fire influenced wind at specific heights is used. It can be the average wind speed at midflame height (see, for example, the BEHAVE model in Andrews 1986), or the 10-m height wind speed measured from meteorological stations. The appropriate reference wind speed is not easy to define (Linn and Cunningham 2005) and is influenced by the local environment, including fire and fuel discontinuities. The modifications of wind-field dynamics and turbulence regimes due to fuel discontinuities are usually not explicitly considered. Additionally, the empirical laws of fire used by some of these models are deduced from laboratory experiments (Rothermel 1972; Catchpole *et al.* 1998), where turbulence conditions can be very different from turbulence generated in field canopies. On the other hand, some of the models are based on representing the physical processes that drive wildfires including coupled atmosphere/fire interaction and wind interaction with canopies. In these models the determination of fire behavior (spread, intensity, etc.) depends on physical processes occurring within and above the vegetation. This paper is focused on one of these coupled atmosphere/fire models.

Without wildfires, the wind flow dynamics and turbulence over homogeneous canopies is reasonably well understood for neutral thermal stratification; it is analogous to a plane mixing-layer flow (Raupach *et al.* 1996). The mean flow is characterized by a strong wind shear at canopy top associated with an inflection point in the mean horizontal velocity profile, and a rapid decrease of turbulent kinetic energy and momentum flux with depth in the canopy (see, for example, Raupach *et al.* 1996; Brunet *et al.* 1994; Kaimal and Finnigan 1994; Finnigan 2000). The inflection point is responsible for the development of large coherent eddies that control most of the momentum and scalar transfer between vegetation and the atmosphere (Gao *et al.* 1989; Lu and Fitzjarrald 1994). These large coherent structures are characterized by cycles of strong 'sweeps' (gusts) into the canopy and weak 'ejections' (bursts) vertically out of the top of the canopy. Their length scales are on the order of the canopy height. The presence of sudden canopy heterogeneities induces additional turbulence, acceleration of the wind, and consequently increases gust intensity (Dupont and Brunet 2006). In wildfire context, the interaction between large coherent structures and fire is not well understood. However, it seems reasonable to speculate that the presence of such eddy structures may influence fire propagation at the fuel-bed scale as well as at the tree scale by increasing the vertical transport from the ground (or undergrowth) to the canopy top and conversely.

In order to reproduce the observed characteristics of turbulent flow over vegetated canopies, various types of computational fluid dynamics (CFD) models have been developed over the last decade, using a range of turbulent schemes. These particular CFD models are designed to be able to assess mass, momentum and energy exchanges at the canopy-atmosphere interface. Several low-order closure schemes have been applied to simulate air flow over vegetation canopies (Li *et al.* 1990; Green 1992; Liu *et al.* 1996; Foudhil *et al.* 2005). However, these Reynolds-averaged type models only simulate mean fields and do not allow the canopy turbulence to be resolved. Without resolving this turbulence, it is difficult to analyze the turbulent structures in as great a detail as is possible with large-eddy simulation (LES). With LES techniques, eddy motions of order twice the grid mesh size and

larger are explicitly solved, whereas subgrid-scale eddy motions are modelled. Provided that the grid is fine enough, a LES technique allows one to have access to instantaneous dynamical fields and is therefore capable of resolving wind gusts in a plant canopy, as well as large coherent eddy structures, which may be crucial in wildfire propagation. LES has been successfully applied over various homogeneous (Shaw and Schumann 1992; Kanda and Hino 1994; Su *et al.* 1998; Su *et al.* 2000; Watanabe 2004; Dupont and Brunet 2008a) and heterogeneous (Patton *et al.* 1998; Yang *et al.* 2006a and b; Dupont and Brunet 2008b) vegetation canopies under essentially neutral stratification.

The wildfire model FIRETEC (Linn 1997) is a three dimensional, physically-based model coupled to the atmospheric transport HIGRAD model (Reisner *et al.* 2000a and b). HIGRAD computes compressible fluid flow in the lower atmosphere, solving Navier-Stokes equations with a LES approach. The model is based on MPDATA for advection scheme (Smolarkiewicz & Margolin 1998) and is second-order accurate in time and space. FIRETEC includes a multiphase representation of vegetation in order to simulate mass, momentum, and energy exchange between solid fuels and gases during fire propagation at multiple-meter scales. Terms such as radiative and convective heat transfer and combustion, have been included in order to account for interactions between fire, air flow, and vegetation. While HIGRAD was previously validated for some scenarios including: urban areas through comparison with laboratory data and urban field experiments by representing explicitly buildings (Smith *et al.* 2001, Smith *et al.* 2002), the validation of wind fields produced by the HIGRAD/FIRETEC modelling system with its multiphase interaction between air flow and vegetation canopy has never been published, which is the subject of the present paper.

Two approaches are possible to evaluate the performance of such a physics-based wildfire model. The first approach is to validate the global behavior of the fire model using simple cases. Qualitative data, such as fire behavior or fire-front shape, as well as global quantitative data, such as rate of spread or fire intensity, can be compared to experimental values for various winds, slopes and fuel types. In FIRETEC simulations performed by Linn and Cunnigham (2005), the predicted wind effect on the rate of spread (ROS) compared well with the observations of experimental fires over homogeneous grasslands in Australia (Cheney *et al.* 1998). The more complex situation observed during the crown fires of the International Crown Fires Modelling Experiment (ICFME) was also investigated (Linn *et al.* 2005b). Although the results were encouraging, local dynamic and thermodynamic variables (gas densities, velocities, temperatures, heat flux) were never validated due to the difficulty to perform *in situ* measurements of real fires; indeed, the available field datasets showed considerable variability due to fuel inhomogeneities and turbulent gusts among other reasons (Alexander 1998; Cruz 2004). Experimental works performed at laboratory scales are also difficult to use for FIRETEC validation because the fire itself compromises the use of dimensional analysis and because the model is not designed to represent processes at centimetre scales (FIRETEC mesh sizes are typically around 2 m). The second approach to validate wildfire models is to validate and calibrate step by step each part of the model. This approach is of course not possible for all parts of the model because of the difficulty in isolating small portions of the coupled set of physical processes such as heat transfer and combustion that constitute a wildfire.

The goal of the present study is to validate the wind dynamics part of HIGRAD/FIRETEC over vegetated canopies with a neutral thermal stratification and without considering fire propagation or interaction between winds and strong buoyant sources. Although wildfire may often occur under unstable thermal stratifications, applying LES under unstable condition at fine scale over vegetation canopy is still very challenging since it would require much more complex physical parameterization such as vegetation and soil energy budget, which is not the scope of the present paper. This is the subject of ongoing research. In the present paper, a description of the dynamic part of HIGRAD/FIRETEC is provided, then a description of the validation of the mean wind velocity and basic turbulent statistics simulated by the model over a continuous forest canopy using the in-situ measurements of Shaw *et al.* (1988). The model is then validated over a discontinuous forest using the wind-tunnel measurements of Raupach *et al.* (1987). The discontinuous forest case suggests some conclusions on the role of fuel-breaks in fire propagation through an analysis of the wind flow characteristics.

Model description

The HIGRAD/FIRETEC modelling system is a three-dimensional two-phase transport model where conservation equations of mass, momentum, energy and chemical species are written in terrain-following coordinates. A detailed description of the physical and chemical formulation of the model is available in Linn (1997), Linn *et al.* (2002) and Linn and Cunningham (2005). HIGRAD's solver is based on a conservative forward-in-time numerical technique (Reisner *et al* 2000 a&b). FIRETEC includes a multiphase representation of vegetation with a drag-force approach; a pressure and viscous drag force term in the momentum equation is included, as well as a sink term in equations for subgrid-scale turbulent kinetic energy in order to represent the acceleration of the dissipation of turbulent eddies in the inertial subrange. The technique used to resolve conservation equations is similar to large-eddy simulation technique (LES). Eddy motions larger than twice the grid mesh are explicitly solved through conservation equations, while subgrid-scale eddy motions are modelled. Provided that the grid is fine enough, the model allows one to have access to instantaneous dynamical fields and is capable of reproducing wind gusts in a plant canopy.

Hence, the momentum equation is filtered to separate small and large scales. The resulting equations can therefore be seen as grid mass-averaged equations. The momentum equation is written as:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_g \tilde{u}_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_g \tilde{u}_i \tilde{u}_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_j} + \rho_g g_i - \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_j} + F_{di} \quad (1)$$

where the tilde indicates resolved mass-weighted averaged variables, ρ_g is the gas density, u_i the gas velocity component in the i direction ($i=1, 2,$ and 3 for the $x, y,$ and z or streamwise, spanwise and vertical directions, respectively), p is the pressure, g_i the gravitational acceleration in the i direction and F_{di} the drag force component in the i direction. The turbulent Reynolds stress tensor $R_{ij} = \rho_g \widetilde{u_i'' u_j''}$ represents the correlation between velocity departures from the resolved field or subgrid-scale velocities (double primes variables) in the i and j directions. The terms on the right-hand side of equation (1) represent, respectively, the pressure-gradient force, buoyancy, turbulence diffusion, and the drag force induced by the vegetation. This latter term is modelled as follow using the Tensor summation convention:

$$F_{di} = -C_d a_f \sqrt{\widetilde{u_k u_k}} \tilde{u}_i \quad (2)$$

where C_d is the drag coefficient of the vegetation canopy and a_f the vegetation frontal area density, equal to $\alpha\sigma/2$, where α is the volume fraction and σ is the area per unit volume of leaves or needles.

All turbulent structures larger than the largest specified turbulent length scale are explicitly solved by the model, especially turbulent eddies produced by wind shear at canopy top, while smaller turbulent structures (i.e. subgrid-scale (SGS) turbulent motions such as vegetation wake eddies) are modelled. Most LES models applied at the vegetation canopy scale compute these SGS turbulent motions through a 1.5-order turbulence closure scheme that resolves a SGS turbulent kinetic energy (TKE) conservation equation (see for example Watanabe 2004 or Dupont and Brunet 2008a). The turbulent length scale characterizing the SGS eddies in these models is usually equivalent to the grid spacing. In the context of wildfires, we expect that complex SGS TKE transformations occur at various spatial and temporal scales within subgrids. For this reason, three length scales of turbulence, s_A, s_B and s_C , are considered in FIRETEC, each one being associated to a SGS TKE (k_A, k_B and k_C , respectively) conservative equation. This approach is equivalent to splitting SGS TKE into three frequency bands. Shaw and Patton (2003) developed a similar approach in order to focus on vegetation wake TKE by splitting SGS TKE into two frequency bands. In FIRETEC, this approach is developed in order to estimate the TKE at fine scale (s_C) that is used for computing the reaction rate in the fire model. The two other length scales, s_A and s_B , are respectively the largest unresolved scale and the scale where wake structures are significant. Hence, the total Reynolds stress tensor R_{ij} is calculated

using the Boussinesq approximation from the three considered frequency bands referenced by the subscript A , B and C : $R_{ij} = R_{ij,A} + R_{ij,B} + R_{ij,C}$ (3)

$$\text{with } R_{ij,A,B,C} = \frac{2}{3} \delta_{ij} \rho_g \left(\nu_{T,A,B,C} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} + k_{A,B,C} \right) - \rho_g \nu_{T,A,B,C} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

where δ_{ij} is the kronecker symbol (δ_{ij} equals 1 for $i=j$, and 0 otherwise).

$$\text{The total SGS TKE is given by: } k = k_A + k_B + k_C \quad (5)$$

Note that some modifications in the turbulence model have been implemented since Linn and Cunningham (2005). SGS TKE at scale A (k_A) takes into account the transfer of energy present in the mean winds above the canopy due to the main structures of plants composing the canopy:

$$\frac{\partial \rho_g k_A}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g \tilde{u}_i k_A}{\partial x_j} = D_A + P_{S,A} - \varepsilon_A - ET_{A \rightarrow B} + VT_{corr} \quad (6)$$

The second term on the left-hand side of equation (6) represents the advection of k_A by the resolved flow, and the terms on the right-hand side represent, respectively, the turbulent transport diffusion of k_A , the dynamic shear production coming from resolved scales to SGS, the dissipation of k_A , the cascade of k_A and the buoyancy production of k_A (see Appendix 2 for the expression of these terms). The cascade term for SGS TKE ($ET_{A \rightarrow B}$) represents a transfer of energy from eddies at scale A to eddies at scale B that accentuates the dissipation of turbulence in the canopy compared to the free air due to the interaction of eddies with vegetation. The inertial eddy-cascade is therefore bypassed (Finnigan 2000). The formulation of this term is equivalent (i) to the TKE transfer term from SGS to wake TKE considered in Shaw and Patton's (2003) model with a coefficient of 4 instead of 8/3 (see Appendix 2), and (ii) to the eddy cascade term used in LES models using only one SGS TKE conservation equation with a smaller coefficient (usually 2) in order to consider also the effect of wake eddies that accentuates SGS TKE dissipation (Shaw and Patton 2003).

Eddies at scale B (s_B) depend on the smallest vegetation structures (branch size). The conservation equation of SGS TKE (k_B) at this scale (equation 7) is very similar to the k_A equation, except (i) the $ET_{A \rightarrow B}$ term has a positive sign indicating that energy is being transferred from k_A to k_B , (ii) a transfer term $ET_{B \rightarrow C}$ from B to C scales (similar to $ET_{A \rightarrow B}$) is included as well as a wake SGS TKE production term P_W due to wake eddies induced by small vegetation elements such as branches, leaves or needles (see Appendix 2 for the expression of right-hand side terms of equation 7).

$$\frac{\partial \rho_g k_B}{\partial t} + \frac{\partial \rho_g \tilde{u}_i k_B}{\partial x_j} = D_B + P_{S,B} - \varepsilon_B + ET_{A \rightarrow B} - ET_{B \rightarrow C} + VT_{corr} + P_W \quad (7)$$

The last scale C (s_C) is the scale of clumping of particles (shoot of leaves or needles). The SGS TKE of eddies at this scale, k_C , is simply taken proportional to k_B since eddies at both scales B and C are statistically produced in the same vicinity (Linn and Cunningham 2005):

$$k_C = 0.2 k_B \quad (8)$$

The turbulent diffusion coefficient is calculated according to Prandtl and Kolmogorov formulation (Pope 2000) and by assuming that SGS turbulent diffusion is isotropic (Equation 9). This latter assumption may not be valid in presence of a fire and for the grid cell size considered in this study but the use of an anisotropic formulation in this particular case would have been too speculative.

$$\nu_{T,n} = 0.09 s_n k_n^{1/2} \quad (\text{where } n \text{ could be } A, B, \text{ or } C \text{ scale}) \quad (9)$$

Total turbulent diffusion coefficient is given by:

$$\nu_T = \nu_{T,A} + \nu_{T,B} + \nu_{T,C} \quad (10)$$

Model validation on a continuous forest

To test the ability of HIGRAD/FIRETEC to simulate the dynamic and turbulent flow fields over homogeneous canopy in neutral atmospheric conditions, we used the mean wind velocity and standard turbulent statistics profiles measured in near neutral conditions by Shaw *et al.* (1988) within and above a deciduous forest at Camp Borden in Ontario, Canada. These measurements are consistent with others from wind-tunnel and field campaigns (Raupach *et al.* 1986; Brunet *et al.* 1994; Kaimal and Finnigan 1994; Finnigan 2000), and have already been used by Shaw and Schumann (1992), Su *et al.* (1998) and Dupont and Brunet (2008a) to validate their LES air flow models.

Numerical details

The size of the computational domain for the validation simulations was 200 m×150 m×615 m (see Figure 1) with a horizontal resolution of 2-m. The mesh was stretched in the vertical direction, starting from 1.5-m resolution near the ground to 40-m at the top. The canopy height was set at $h=18$ m height. The frontal area density profile a_f was characterized by a lower density within the trunk space (see Figure 2), and the drag coefficient C_d was set to 0.25. The initial wind flow was considered in equilibrium with the ground, which means that the initial velocity profile was logarithmic. Its direction was parallel to the x axis. Consequently, wind velocity profiles were initialized as follows:

$$u_1^{ini}(z) = u_{2h}^{ini} \frac{\log(z)}{\log(2h)}, \quad u_2^{ini}(z) = u_3^{ini}(z) = 0, \quad (11)$$

where the upper script *ini* indicates initial value. Additionally, the vertical profile of potential temperature was constant and equal to 300 K, and the atmosphere was dry.

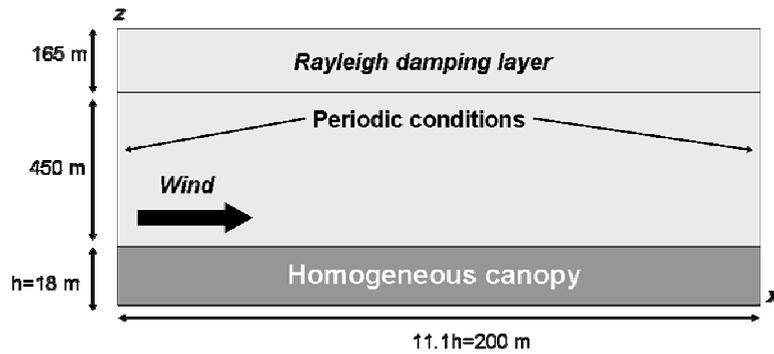


Fig. 1. Schematic representation of the computational domain used in homogeneous canopy simulations.

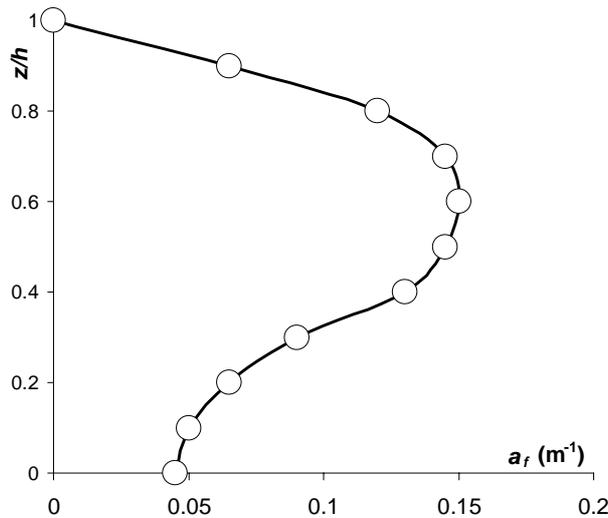


Fig. 2. Frontal area density profile a_f of the vegetation used in homogeneous canopy simulations.

In the reference simulation, noted as *hom0*, the initial wind velocity u_{2h}^{ini} at $2h$ above the surface was equal to 2.75 ms^{-1} and turbulent scales s_A , s_B and s_C were set to 2 m (close to the average grid size near the ground), 1 m, and 0.25 m, respectively. The initial wind velocity was selected so that the mean velocity obtained after simulation convergence was close to the observed values. Some problems related to the use of Dirichlet boundary conditions for simulating flows in canopies with physically-based models were already mentioned in Pimont *et al.* (2006). The use of such boundary conditions generates wind velocity and TKE fields that are not realistic with an unrealistically strong inflection in the vertical profile of the streamwise velocity. In response to this problem, we used cyclic conditions on lateral boundaries in the x direction, as usually used in LES models. A Rayleigh damping layer was used at the upper boundary as well as at lateral boundaries in the y direction in order to absorb propagating wave disturbances and to eliminate wave reflection at the boundaries.

Three additional simulations similar to *hom0* were performed in order to study the sensitivity of model results to the drag coefficient value (C_d) and to the wind velocity intensity at $2h$ (u_{2h}^{ini}). Table 1 presents differences between these additional simulations. In summary, simulations *hom1* and *hom2* were performed with a drag coefficient C_d equal to 0.16 and 0.32, respectively, which represents the classical range of variation of C_d : between 0.15 and 0.37 following Amiro (1990), Gillies *et al.* (2002) and Shaw and Patton (2003). In the three first simulations (*hom0*, *hom1* and *hom2*), u_{2h}^{ini} was chosen between 2.5 and 3 ms^{-1} in order to obtain mean wind profiles of similar magnitude (before normalization) to observations, while simulation *hom3* was performed with a higher initial wind velocity, $u_{2h}^{ini} = 6 \text{ ms}^{-1}$.

Table 1. Description of the four numerical simulations performed over the homogeneous canopy.

	Drag coefficient C_d	Initial wind at $2h$ in ms^{-1} u_{2h}^{ini}
<i>Hom0</i> (Ref)	0.25	2.75
<i>Hom1</i>	0.16	2.50
<i>Hom2</i>	0.32	3.00
<i>Hom3</i>	0.25	6.00

Each simulation was run on 50 processors for 50 to 80 hours of wall-clock time. Since no fire propagation was considered in our simulation, the flow reached an equilibrium state. Wind velocity and turbulence statistics profiles were computed from a time averaging procedure (recognized hereafter by the symbol $\langle \rangle_t$) which was performed between 3000 and 6500 s (when the simulations had reached a quasi steady state) with a 0.02 s interval between realizations for the averaging procedure. Consequently, resolved wind velocity components \tilde{u}_i can be decomposed into $\tilde{u}_i = \langle \tilde{u}_i \rangle_t + \tilde{u}'_i$, where the symbol $\langle \rangle_t$ denotes the time average and the prime the deviation from the averaged value. The mean total TKE (k_{tot}) and u -momentum flux ($u'w'_{tot}$) profiles were computed as follow:

$$k_{tot} = 0.5 \langle \tilde{u}'_i \tilde{u}'_i \rangle_t + \langle k_A \rangle_t + \langle k_B \rangle_t + \langle k_C \rangle_t, \quad (12)$$

$$u'w'_{tot} = \langle \tilde{u}' w' \rangle_t + \left(\langle R_{13,A} \rangle_t + \langle R_{13,B} \rangle_t + \langle R_{13,C} \rangle_t \right) / \langle \rho_g \rangle_t, \quad (13)$$

Results

Figure 3 compares the mean vertical profiles of observed and (a) simulated streamwise wind velocity $\langle \tilde{u} \rangle_t$, (b) total TKE k_{tot} , (c) total momentum flux $u'w'_{tot}$, and (d, e, f) and standard deviations of the three wind velocity components σ_u , σ_v and σ_w (d, e, f) for the reference simulation (*hom0*). The comparison is only performed through normalized profiles, observed absolute values being not

available. Hence, the first three profiles are normalized by their respective value at the canopy top, and the three latter profiles by $\sigma_h = \sqrt{2k_{tot}}|_{(z=h)}$.

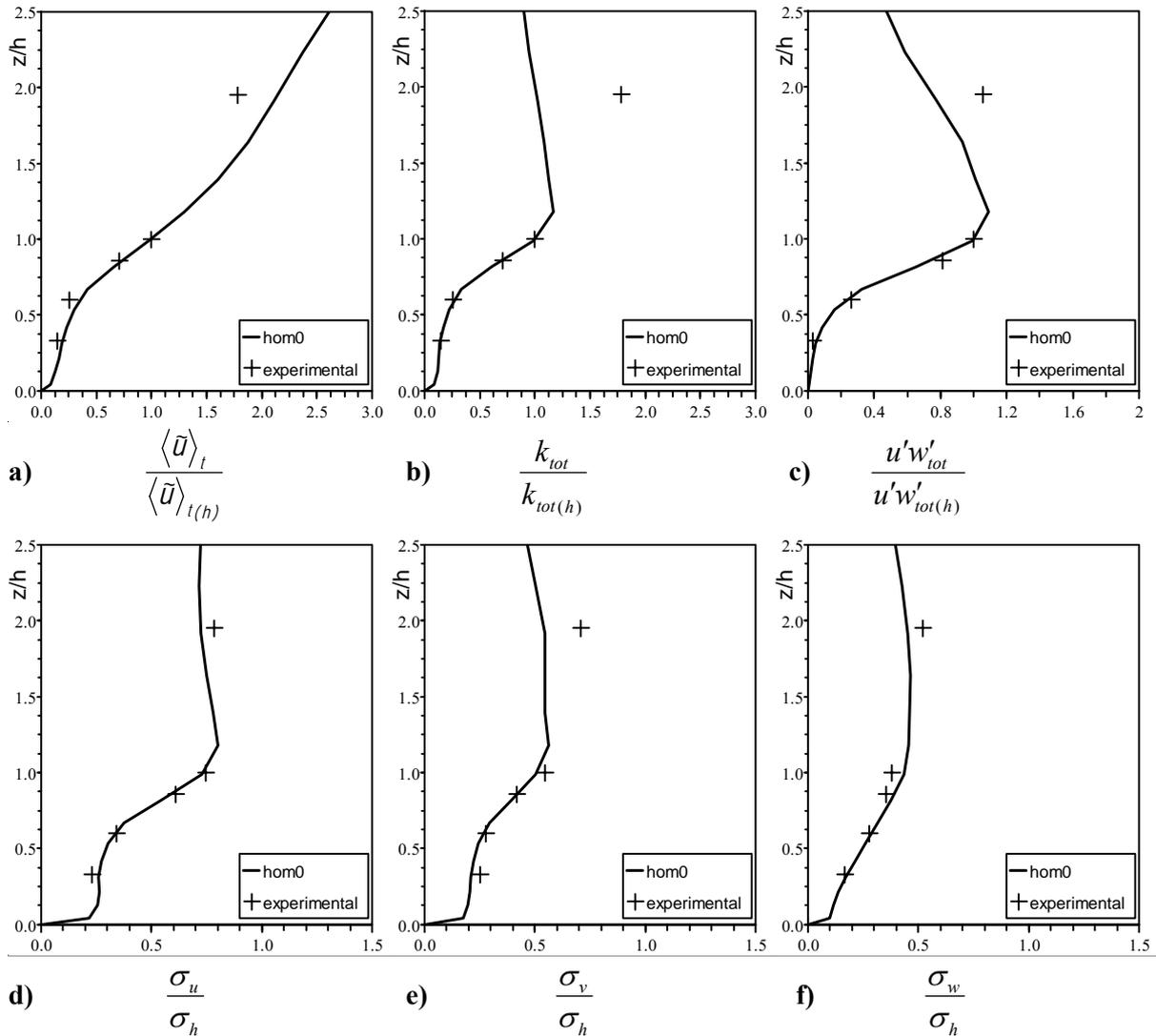


Fig. 3. Validation of HIGRAD/FIRETEC against the field observations of Shaw *et al.* (1988) in a homogeneous forest canopy (hom0 simulation). Comparison between simulated (lines) and observed (crosses) normalized vertical profiles of mean horizontal wind velocity **(a)**; total TKE **(b)**; momentum flux **(c)**; and standard deviations of the streamwise **(d)**, spanwise **(e)** and vertical **(f)** wind components. The first three profiles are normalized by their respective value at the canopy top, and the three latter profiles by $\sigma_h = \sqrt{2k_{tot}}|_{(z=h)}$. The experimental dataset is taken from the paper of Su *et al.* (1998).

Compared with observations, the model performed quite well for all quantities. The model reproduced accurately all essential features of turbulent flow in the vicinity of the homogeneous canopy. Above the canopy, the velocity profile is close to the well-known surface layer logarithmic profile. The TKE and u -momentum profiles reach a slight maximum around $z=1.2h$. An underestimation of predicted turbulence (TKE and u -momentum) can be observed at twice the canopy height. At the canopy top, the mean velocity profile is characterized by an inflection point with a strong wind shear before to decreasing exponentially within the canopy as trees extract momentum from the flow through drag forces. Within the canopy, TKE and u -momentum decay very rapidly with near zero values at the ground for the latter. The partition of TKE into the three spatial directions is accurately reproduced by the model (Figure 3d, e and f), with a larger partition in the streamwise direction.

As explained above, the total TKE (k_{tot}) is composed of a resolved part ($0.5\langle\tilde{u}_i\tilde{u}_i'\rangle_t$) and three modelled parts (k_A , k_B and k_C). These latter parts are associated with a specific length scale of turbulent structures ranging from 2 to 0.25 m. Figure 4 compares the contribution of the different parts of the total TKE within the canopy for the reference simulation (*hom0*). Generally speaking, the contributions of modelled parts are very small compared to the resolved one: they represent less than 10% of the total TKE. Hence, the simulated flow does not strongly depend on the SGS turbulence scheme. Consequently, for simulations without wildfire, the decomposition of the SGS TKE into three frequency bands is not necessary. This result confirms previous observations of Shaw and Patton (2003) who showed from their LES model that the role of smaller scales is essentially to enhance the dissipation of subgrid-scale energy, and therefore it may be simply represented through an increase of the cascade term in a unique SGS TKE conservation equation. The decomposition of SGS TKE into three frequency bands in FIRETEC is therefore only required for fire simulation in order to represent accurately the interaction between the fire and the ambient air at various spatial and temporal SGS.

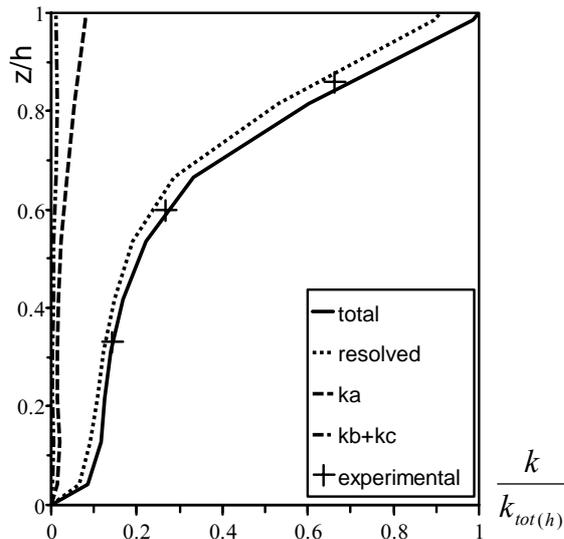


Fig. 4. Comparison between observed and simulated normalized turbulent kinetic energy profiles (total, resolved, SGS at scales A, B and C) for the reference simulation (*hom0*)

Normalized mean wind velocity and turbulence statistics profiles from the three additional simulations (*hom1*, *hom2* and *hom3*) are presented in Figure 5. Mean profiles were slightly sensitive to the drag coefficient value and to the wind velocity chosen here, especially within the canopy. The differences between the first three runs, *hom0*, *hom1* and *hom2*, can be intuitively connected to differences in drag coefficient values. Since the drag coefficient C_d is a multiplicative factor of the frontal area density a_f of the vegetation, increasing C_d is similar to increasing the canopy density. Within the canopy, all turbulent variables (wind velocity, momentum flux, TKE and standard deviation of wind velocity components) were increasingly damped as C_d increased as previously observed from wind-tunnel and numerical experiments (Raupach *et al.* 1996; Novak *et al.* 2000; Dupont and Brunet 2008a). This feature indicates that large intermittent eddies do not have sufficient energy to penetrate deep into the canopy with increasing density (Dupont and Brunet 2008a). With increasing canopy density, large eddies are easier broken into smaller eddies that accentuate turbulence dissipation. As expected, a stronger inflection of the streamwise velocity profile is obtained at the canopy top with the highest drag coefficient (see *hom2* case in Figure 5a). Above the canopy, variations between profiles are more pronounced than within the canopy. The increase of C_d induces smaller wind velocity within the vegetation and larger velocity above it; indeed, vegetation extracts more momentum from the within-canopy-flow with increasing density and the upper flow is accelerated by mass conservation. No clear tendency is observed for the other turbulent variables when C_d increased. With a larger wind velocity (*hom3*), momentum flux and TKE are increased above the canopy with a higher maximum than in the reference simulation (*hom0*), at $z=1.9h$ instead of $1.2h$, while they remain similar within the canopy. Compared with observations, all statistical profiles

deduced from the additional simulations remain in good agreement; turbulence variables are even better simulated with a higher initial wind velocity (*hom3* simulation).

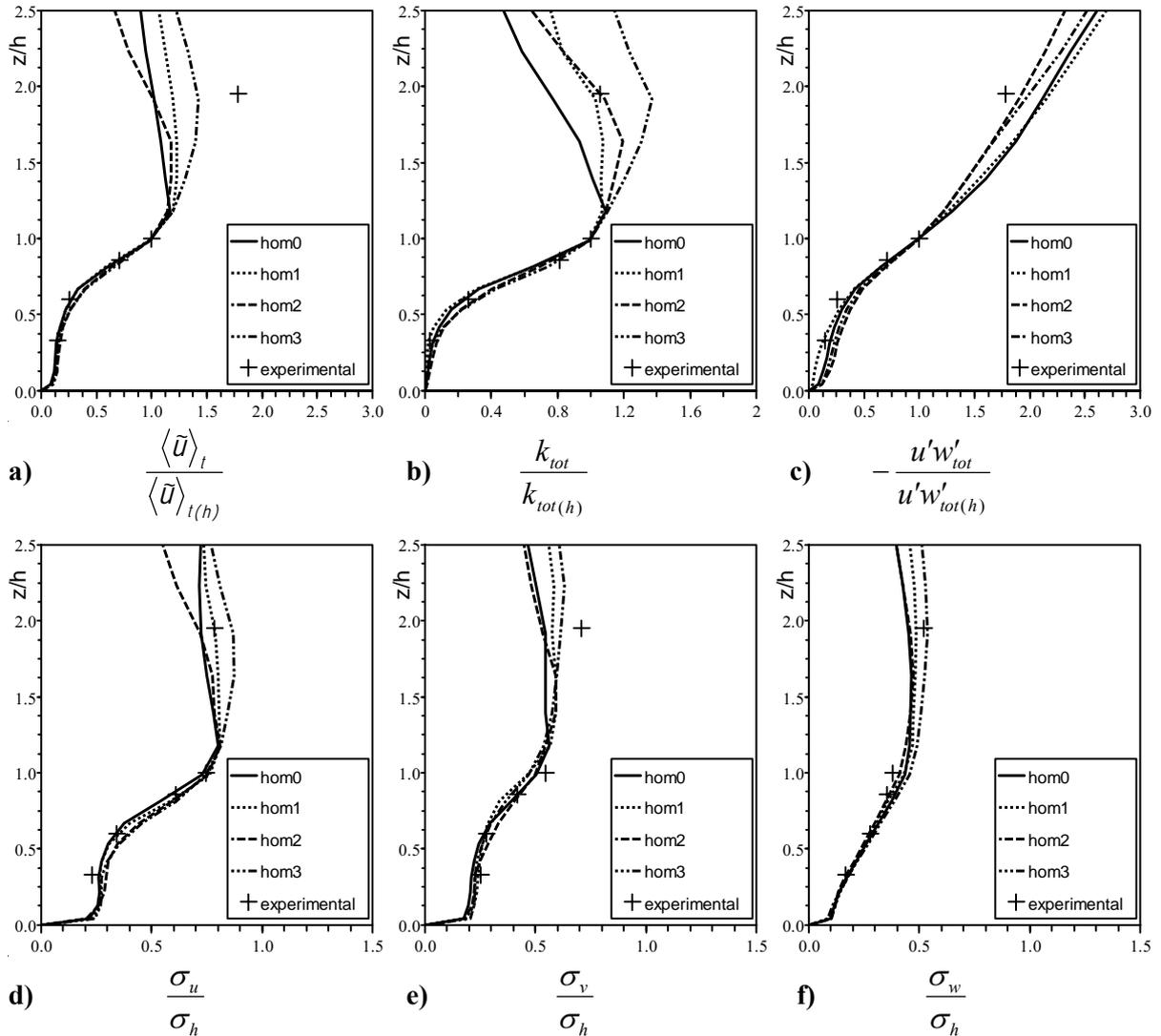


Fig. 5. Same as Figure 3 but with an additional comparison between the four simulations of the sensitivity study.

Initial velocity profiles and more importantly environmental winds, in the absorption layer at the top of the domain in *hom0*, *hom1* and *hom2* were selected so that the magnitude of the mean wind velocity obtained after convergence was close to the non-normalized experimental one. Thus, in these simulations, the coefficient $\langle \tilde{u} \rangle_t(h)$ used to normalize the data was very close to the value used for the experimental data. For *hom3*, the initial and top velocity used to set the profile (6 ms^{-1} at 35-m high) was at least twice as high as the velocities used in *hom0*, *hom1*, and *hom2*. In this case, the mean velocity of the simulated data after convergence was significantly higher than the mean velocity of the experiments; the normalization coefficient was then higher than the coefficient for experimental data. In this case, turbulent statistics (*hom3*) show better agreement, even above the canopy.

Model validation on a discontinuous forest

As stated in the introduction, it is also critical in wildfire models to capture wind flow perturbations induced by discontinuities in fuel-bed structures such as a break (or clearing). In this section, FIRETEC is validated over a “canopy-clearing-canopy” configuration from the Raupach *et al.*'s (1987) wind-tunnel dataset. In a wildfire context, the clearing can be assimilated as a fuel-break.

Raupach *et al.* (1987) measured mean wind velocities and turbulence statistics at different distances downwind from the upstream edge of the canopy under neutral stratification. This data set was previously used by Wilson and Flesch (1999), Foudhil *et al.* (2005), Yang *et al.* (2006a), and Dupont and Brunet (2008b) to validate their air flow models.

Numerical details

Simulations were performed in a $300\text{ m} \times 150\text{ m} \times 615\text{ m}$ domain with the same spatial resolution as in the homogeneous case. The vegetation canopy was represented by a vertically constant frontal area density equal to 0.17 m^{-1} with a height of $h=6.5\text{ m}$. The vegetation was only represented through 4 layers here compared to the 10 layers used in the previous section in order to minimize (i) the computational cost and (ii) the aspect ratios of the model grid cells, given that the length of the domain had to be almost 50 times the vegetation height to match experimental conditions. This size of mesh was also chosen to roughly match with the usual mesh size used to simulate fires at the landscape scale with FIRETEC. According to the experimental configuration, fuel-break length was $20h$ and canopy length was about $26h$ (see Figure 6). The same initial wind velocity profiles as in the continuous forest were used (equation 11), with $u_{2h}^{ini} = 3\text{ ms}^{-1}$. The other characteristics of the simulation were similar to those used in the previous section for the homogeneous canopy (*hom0* simulation). The averaging procedure performed on the output data was also similar but from an earlier and shorter time period (between 1500 and 3000 s) due to the faster simulation convergence associated to the higher wind velocity.

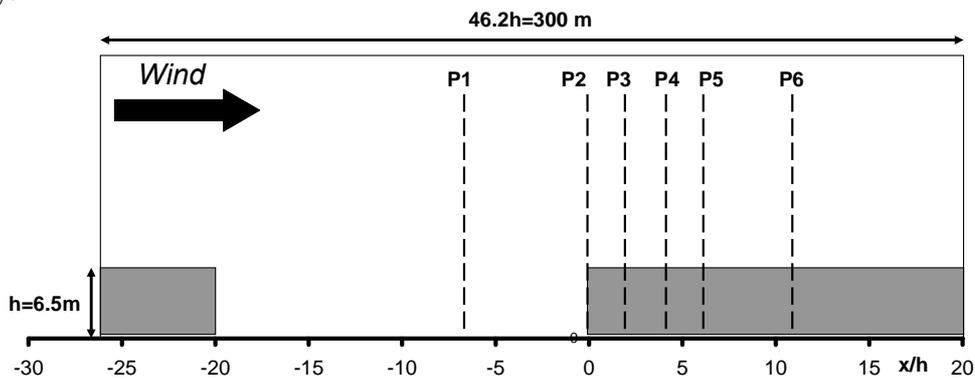


Fig. 6. Schematic representation of the computational domain used for the fuel-break-fuel configuration. Dashed black lines indicate the position of the measured profiles.

Results

The main flow characteristics simulated behind the canopy leading edge were analyzed with observations from Figure 7 that compares the mean vertical profiles of observed and (a) simulated streamwise wind velocity $\langle \tilde{u} \rangle_t$, (b and c), standard deviations of the streamwise σ_u and vertical σ_w wind velocity, and (d) total momentum flux $u'w'_{tot}$. All variables are normalized by a reference streamwise velocity $u2h$ (equal to 2.5 ms^{-1}), located at the forest leading edge ($x=0h$) and $z=2h$.

The flow gets distorted when it hits the leading edge of the fuel on the downwind side of the fuel-break. This feature is characterized by a positive vertical velocity as the flow is diverted up and over the trees by the positive pressure gradient resulting from the canopy drag (Figure 8). The canopy drag also causes a decrease in horizontal velocity downwind from the forest edge (Figure 7a). The flow accelerates above the canopy. Compared with observations, the vertical profiles of the streamwise wind velocity are accurately simulated at various distances downwind from the leading edge. The vertical velocity above the canopy remains positive until $x = 6.4h$, with maximum values between $x=2.1$ and $4.3h$ (Figure 8); then it is about zero at $x=10.6h$ and down to the next forest edge. This is in agreement with Dupont and Brunet (2008b), who showed that $10h$ may characterize the length of the adjustment region of the flow with the canopy. Hence, beyond $x = 10h$ all turbulent variables have reached their equilibrium value with the canopy.

The large wind shear at the canopy top (Figure 7a) induces the development of a region of large turbulence above the canopy observed from the vertical profiles of σ_u (Figure 7b) and σ_w (Figure 7c). This region is not readily apparent at the leading edge of the canopy but develops after $x = 4.6h$. Previous studies (Morse *et al.* 2002; Yang *et al.* 2006b; Dupont and Brunet 2008b) suggested that the development of this turbulent region coincides with the decrease in mean vertical velocity, which is in agreement with the strong decrease observed in simulated vertical velocity at $x=6.4h$ (Figure 8). The delay from the leading edge of the canopy in the development of this turbulent region above the canopy is explained by the vertical advection of TKE within the adjustment region that transports less turbulent flow from the lower layers toward the top of the canopy. This feature was confirmed by the numerical investigation of the TKE budget of Yang *et al.* (2006b). The shapes of σ_u and σ_w profiles appear well simulated by the model, although σ_w is slightly underestimated (Figures 7c). This latter underestimation was not observed in the homogeneous case; it may be explained by the coarser vertical grid resolution used here. The momentum flux $u'w'_{tot}$ profiles agree well with experiments, with a small overestimation above the canopy (Figure 7d) as also obtained by Yang *et al.* (2006a) and Dupont and Brunet (2008b) with their LES models. This slight discrepancy may be explained by the use of periodic conditions, since the flow hitting the canopy edge is still affected by the upstream canopy block. More details on the characteristics of turbulent edge flow deduced from LES can be found in Yang *et al.* (2006b) and Dupont and Brunet (2008b).

These results show that the presence of a fuel-break strongly modifies the wind field. The mean wind within the canopy (profile at $x=10.6h$ in Figure 7a) is significantly lower than within the break (profile at $x=0h$ in Figure 7a). Figure 9a and c show the enhancement of the mean wind and total TKE within the fuel-break through their vertical profiles at different distances downwind from the fuel trailing edge. The increase in flow speed with distance into the fuel-break is explained by the lower drag force there than in the canopy and a negative vertical flux of higher velocity winds in the early portion of the fuel-break. The flow is slightly divergent in the break, and the strong wind shear near the tree top is no longer sustained. The large amount of TKE near the tree top is advected downwind from the fuel canopy. The negative vertical velocities (Figure 9b) transport the turbulent flows from the canopy top to the ground and induce an increase of TKE in the lower layers (Figure 9c). The flow progressively reaches a new equilibrium with the surface but the length of the break, $20h$, is not sufficient to observe a fully adjusted flow, which is in agreement with several authors that describe flow equilibrium after several tens of h downwind from a forest trailing edge (Chen *et al.* 1995; Lee 2000; Dupont and Brunet 2008b).

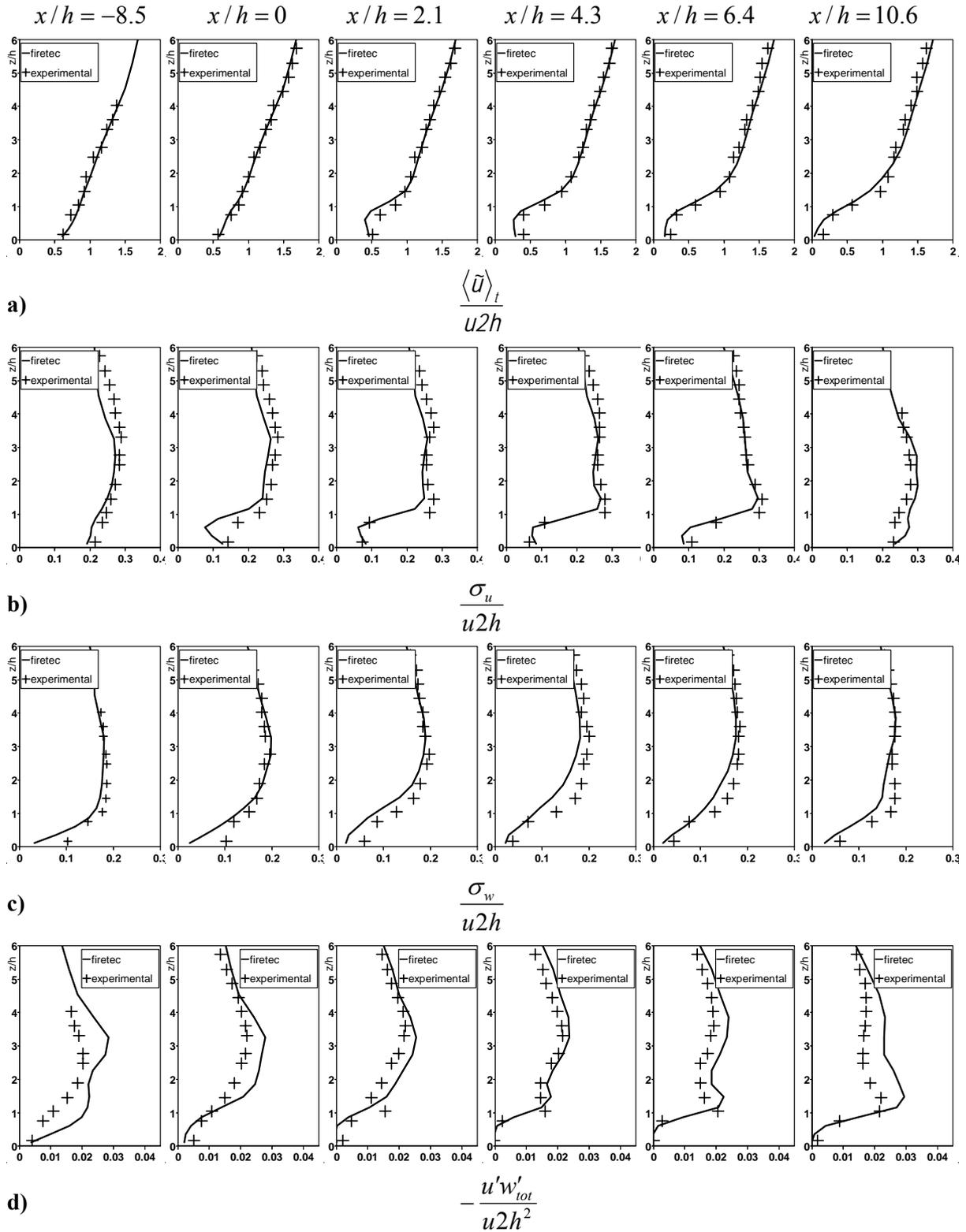


Fig. 7. FIRETEC validation against Raupach *et al.*'s (1987) wind tunnel observations on a fuel-break-fuel pattern. Comparison between the simulated (solid line) and observed (stars) mean profiles of horizontal wind velocity **(a)**, standard deviation of u **(b)**, standard deviation of w **(c)** and momentum flux **(d)**. The variables are normalized from the mean streamwise wind velocity $u2h$ at $x = 0h$ and $z = 2h$.

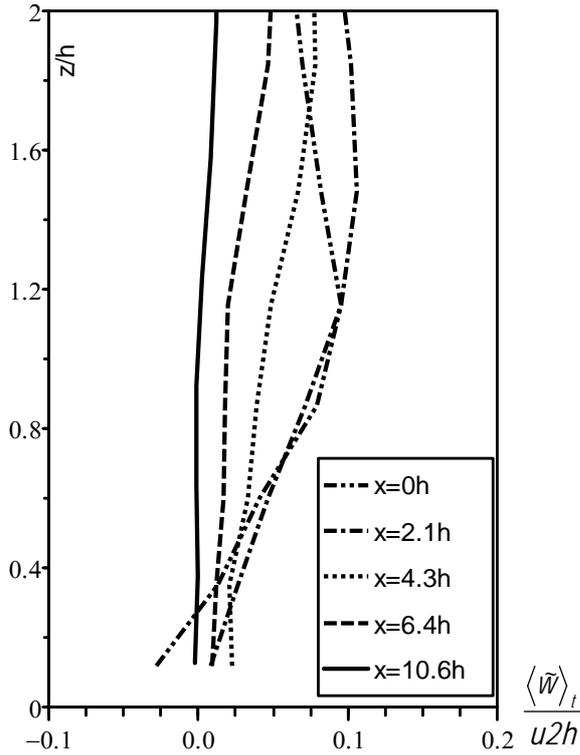


Fig. 8. Simulated mean profiles of vertical wind velocities in the forest at different distances downwind from the leading forest edge: $x = 0h$; $x = 2.1h$; $x = 4.3h$; $x = 6.4h$; $x = 10.6h$. The variables are normalized from the mean streamwise wind velocity $u2h$ at $x = 0h$ and $z = 2h$.

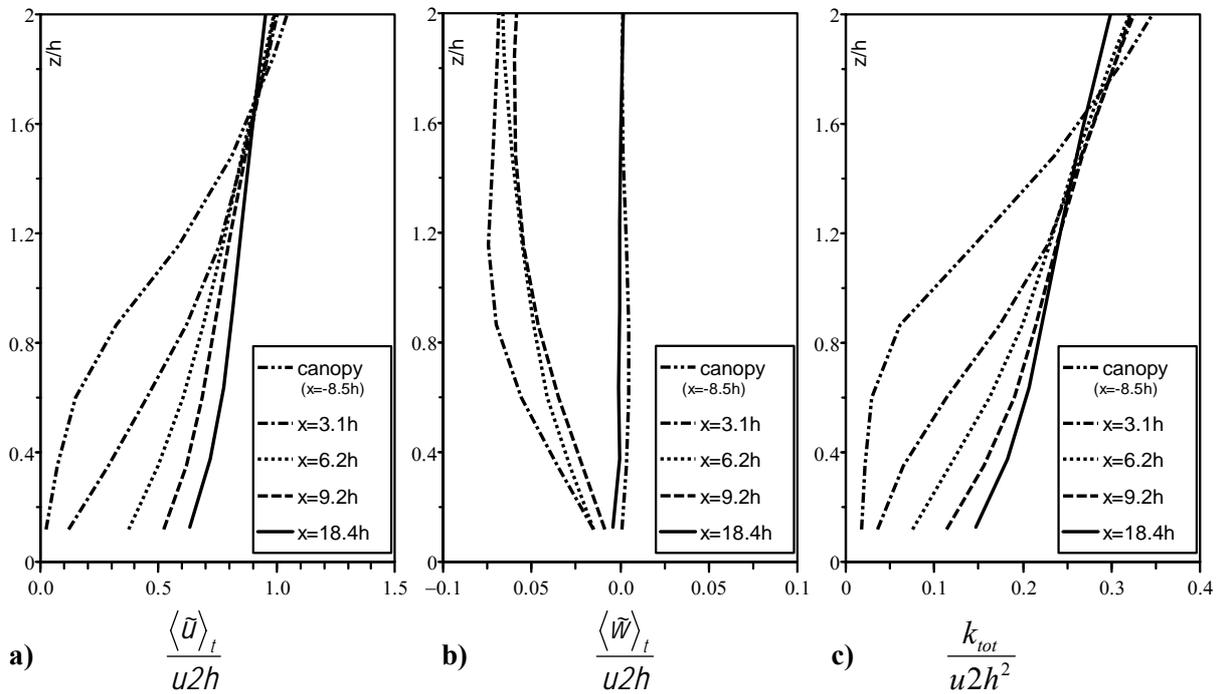


Fig. 9. Simulated mean profiles of horizontal (a) and vertical (b) wind velocities, and turbulent kinetic energy (c) at different distances downwind from the fuel trailing edge: $x = 0h$; $x = 3.1h$ (20m); $x = 6.2h$ (40m); $x = 9.2h$ (60m); $x = 18.4h$ (120m). The variables are normalized from the mean streamwise wind velocity $u2h$ at $x = 0h$ and $z = 2h$.

Discussion

Modelling wind for fire simulation

It follows from the above sections that the wind-flow dynamics simulated by FIRETEC over both continuous and discontinuous forests is very realistic. With the perspective that FIRETEC's main purpose is to simulate fire-atmosphere interactions over heterogeneous landscapes, agreement between the experimental data and the simulation results is good, although some slight discrepancies are present. Pimont *et al.* (2006) pointed out that non-cyclic boundary conditions for wind computations could provide unrealistic wind profiles. In order to rely on accurate wind data as in the present study for fire simulation, we recommend to precompute wind-flows using cyclic boundary conditions, at least to settle mean and turbulent profiles of the simulation. A use of precomputed wind fields (and not only profiles) as boundary conditions for a fire simulation is probably even better (Canfield *et al.* 2005). In terms of fire behavior, the large wind fluctuations in the three spatial directions in the case of a canopy could explain a significant part of the lateral rate of spread of a fire, especially with the presence of a canopy. This effect, as well as the structure of resolved turbulence can only be taken into account in a 3D fire model such as FIRETEC that simulates instantaneous wind fields.

Wind velocity and direction fluctuations within a forest and on a fuel-break

The intensity of temporal fluctuations of wind speed and direction differs within the canopy and in the fuel-break. Figure 10 presents 10-min time series of the streamwise wind speed and wind direction at 2.3 m ($z=0.35h$) above the ground within the canopy (at $x=10.4h$) and in the fuel-break ($x=-8.5h$). The magnitudes of the mean and fluctuating parts of the wind speed are significantly higher within the break than within the canopy due, respectively, to extraction by trees of momentum from the flow through drag forces and to the presence of small wake eddies that accentuate turbulence dissipation. Maximum streamwise wind speeds can be 7 times higher within the vegetation break than within the canopy. On the other hand, fluctuations of the wind directions are much higher within the canopy, with variations of almost 180° in less than 2 minutes. This large variability of the wind direction within the canopy is explained not only by the low wind speed, but also by the passage of large coherent eddy structures generated by the canopy and scaling with h , which induces local recirculation close to the ground. As stated in the introduction section, these structures are the subject of many research efforts since many years and their development is similar to the development of the structures in a plane-mixing layer flow. They result from the development of Kelvin-Helmholtz instabilities at the canopy top due to the presence of an inflexion point in the mean velocity profile.

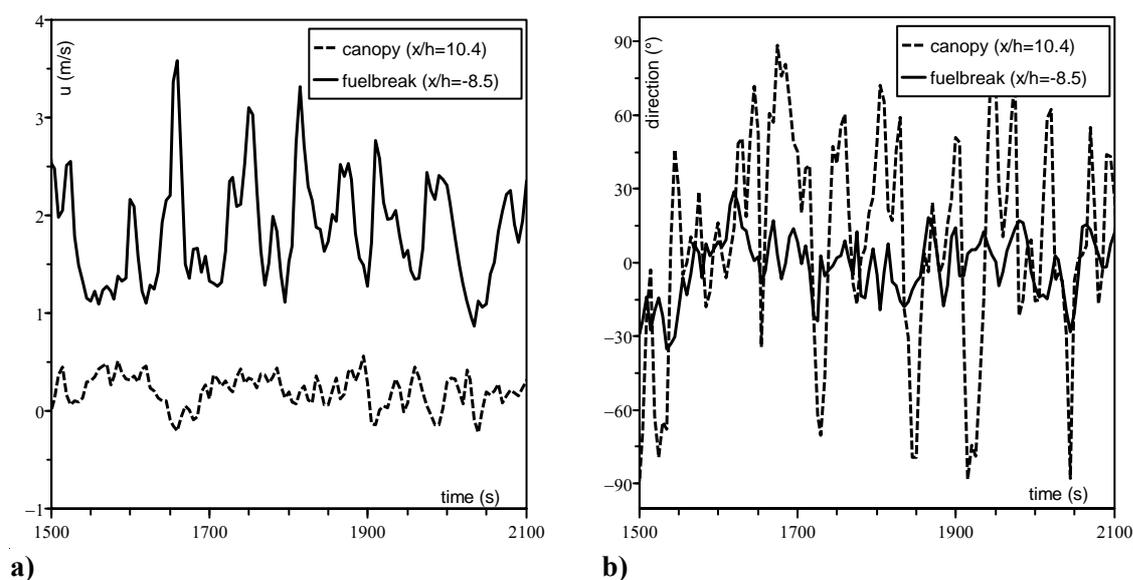


Fig. 10. 10 minutes time series of the instantaneous wind velocity intensity **(a)** and direction **(b)** at 2.3 m ($0.35h$) above the ground within the canopy and within the fuel break.

To illustrate the variability of the wind velocity and direction, Figure 11 shows two vertical slices of the instantaneous streamwise wind velocity separated by 220 s. These two plots show that in less than 5 minutes the wind conditions are totally different. A zoom on some selected zones of the plot at Time=2560 s (top view, side views near the trailing edge, and downwind to the leading edge) illustrates the presence of coherent structures of several h on Figure 12. Figure 11 illustrates wind fluctuations over a time period on the order of the duration of experimental fires done in the field (10 minutes). It shows that the wind environment is likely to change very significantly during a single fire experiment. It also shows the difficulties in getting some repetitions of fire experiments under the same weather conditions. Moreover, fuel-breaks built for safety reasons in experiments such as the ICFME and other experiments are likely to affect wind characteristics both in magnitude and direction. These fuel-breaks are characterised by an increase of wind velocity and turbulence as also observed in our simulations. As described in Linn *et al.* 2005b over an experimental plot where the fire propagates (Figure 13), these higher wind speed on both sides of the experimental plot provides lateral indrafts from the break to the plot that could significantly affect the fire behavior on the sides of the plot and even influence the shape of the fire line on the interior of the plot.

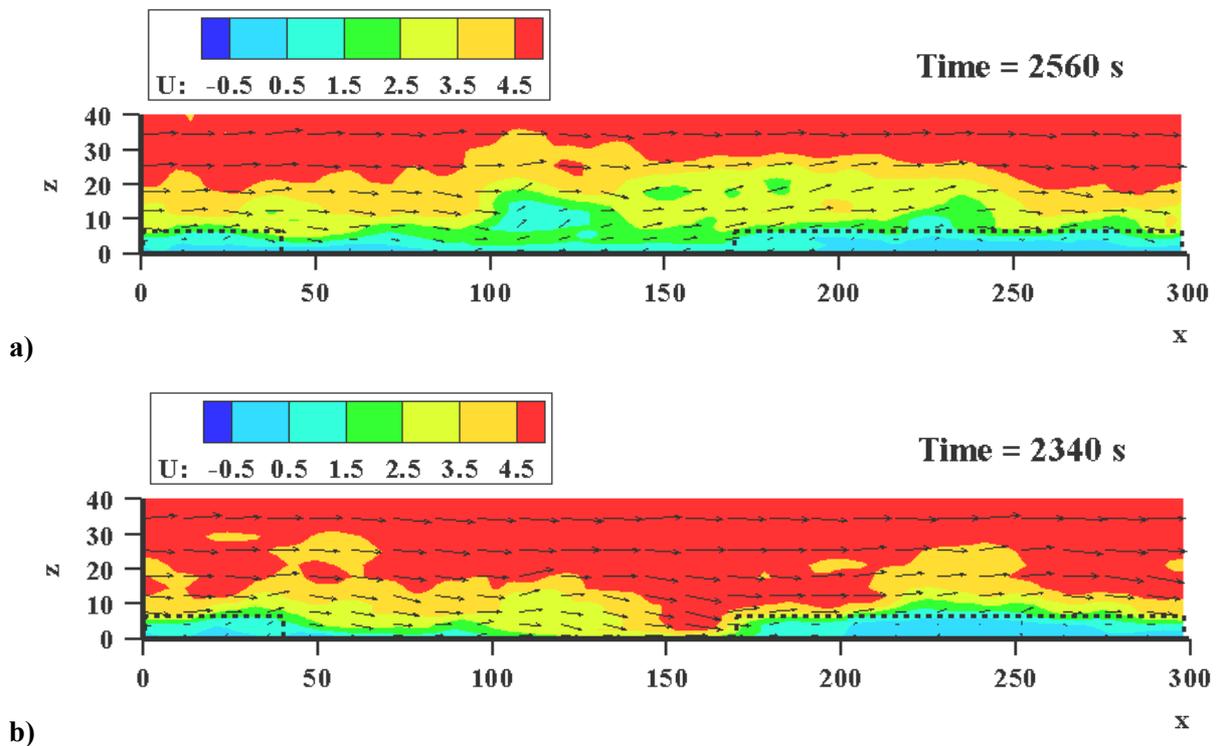


Fig. 11. Instantaneous streamwise wind velocity in a streamwise cross-section over a fuel-break-fuel pattern at two specific times: wind on the break can be low (a) or high (b); the dotted line corresponds to the canopy envelope; x and z are in m, u in $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Fuel-break impact on fire propagation

The design of fuel-breaks raises a paradox: on one hand, they reduce the biomass available thereby reducing the fire intensity; but on the other hand, they increase the rate of spread due to the wind velocity increase in the breaks (Rigolot and Costa 2000). This increase of wind velocity is confirmed and quantified by the present studies. It is therefore required to investigate the role of fuel-breaks on fire propagation depending on break size, ground topography, alignment of fuel break with fireline or wind direction, fuel structure, etc (Linn *et al.* 2005a; Winterkamp *et al.* 2006; Pimont *et al.* 2006). Pimont *et al.* 2006 studied the effects of fuel-break cover fraction and heterogeneity size. They showed that reducing cover fraction at stand level could limit crowning activities, but their simulations were performed without pre-computation of wind-flows. The present study shows that the modifications of the wind flow velocity and turbulence induced by the presence of a break can be very well described

by the physically-based model, FIRETEC. A fire propagation study including these accurate precomputed flows is still to be done. The present study shows that the model can help to investigate the role of a fuel-break on fire propagation.

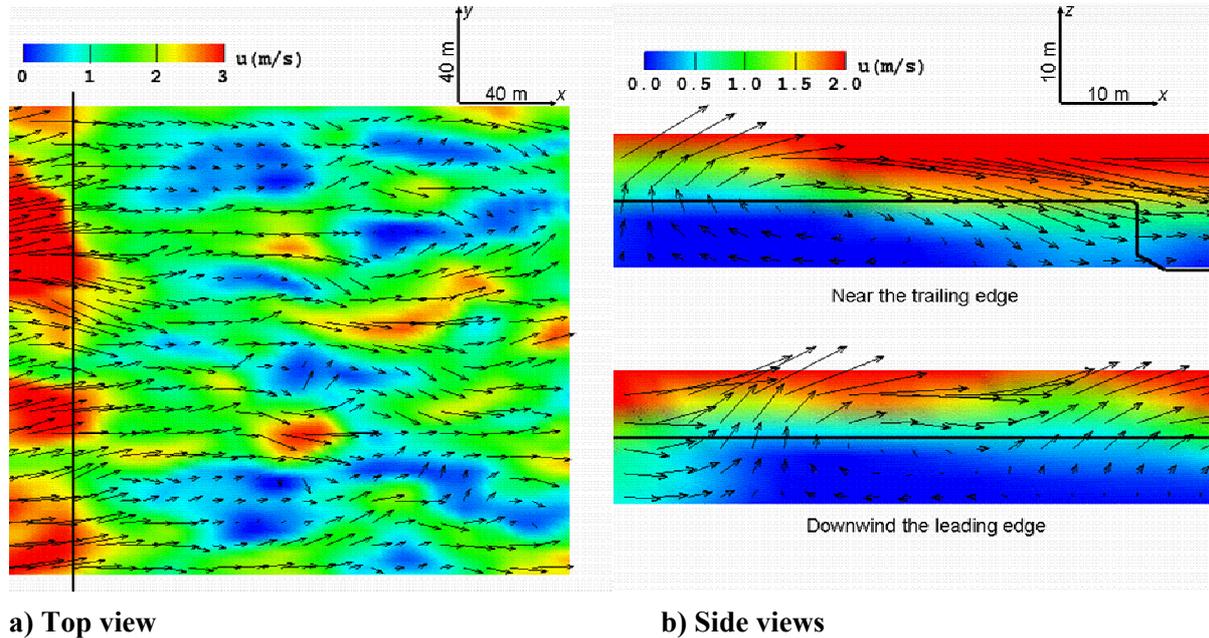


Fig. 12. Instantaneous streamwise wind velocity at time=2560 s: Top view of the forest area downwind to the leading edge at $z= 6.5$ m (a) and Side views at $y=75$ m, near the trailing edge and downwind to the leading edge (b); the black line corresponds to the canopy envelope.



Fig. 13. Comparison FIRETEC simulation and International Crown Fire Modeling Experiment (ICFME) plot 1. (taken from Linn *et al.* 2005b).

Photographs courtesy of Natural Resources Canada ICFME website, http://fire.cfs.nrcan.gc.ca/research/environment/icfme/photographs_e.htm

Conclusion and future works

The results of this study are very encouraging. Even though FIRETEC has been primarily designed for fire modelling, it is important that this model is able to capture the main aspects of turbulent flow over heterogeneous canopies since fire propagation is largely controlled by the wind flow. The model validation under neutral conditions presented in this paper illustrates that FIRETEC simulates turbulent flows over canopies with the same accuracy as other air-flow models specifically dedicated to turbulence computation. The wind flow structure under unstable conditions, in the vicinity of topographic features, or with fire influence is by far less known and have been seldom reproduced with LES models. Further investigations and additional experimental data are needed for validation in this context.

The flows modelled by the FIRETEC model are very realistic, with intermittent large turbulent structures (gusts). At stand or wildland urban interface scales or at the experimental plot scale, these local gusts and directional changes created by vegetation itself likely have a very significant impact on fire behavior in terms of rate of spread, lateral rate of spread and crowning activities. The ability of FIRETEC to reproduce these wind fluctuations is promising for a better understanding of their influence on fire behavior.

This study also shows that fuel-break design is not straightforward since even though vegetation treatments might reduce the amount of fuel for a fire to burn, they can also simultaneously result in an increase in the mean wind velocity and gust intensity. Further investigations performed with physics-based wildfire models, such as FIRETEC, would help to understand which fuel structure and which fuel-break design are the most appropriate for reducing fire-intensity and severity under various wind conditions.

Acknowledgements

This study has been partially funded by the European Commission in the frame of the FIREPARADOX research programme (contract FP6-018505) and the large computations for this work have been made possible by the Los Alamos National Laboratory Institutional Computing resources.

References

- Alexander ME (1998) ‘Crown fire thresholds in exotic plantations of Australasia’. Ph.D. Thesis, Australian National University, Canberra, Australia. 228p.
- Amiro BD (1990) Comparison of turbulence statistics within three boreal forest canopies. *Boundary-Layer Meteorology* **51**, 99-121.
- Andrews PL (1986) “BEHAVE: Fire behaviour prediction and fuel modelling system – BURN subsystem, part 1”. USDA Forest Service, Research paper INT-194. 130p.
- Brunet Y, Finnigan JJ, Raupach MR (1994) A wind tunnel study of air flow in waving wheat: single-point velocity statistics. *Boundary-Layer Meteorology* **70**, 95–132.
- Butler B, Forthofer J, Finney M, McHugh C, Stratton R, Bradshaw L (2006) ‘The impact of high resolution wind field simulations on the accuracy of fire growth predictions.’ V International Conference on Forest Fire Research. D. X. Viegas (Ed.), 2006.
- Canfield FM, Linn RR, Cunningham P, Goodrick SL (2005) ‘Modelling effects of atmospheric stability on wildfire behaviour’ In the Sixth symposium on fire and forest meteorology. Canmore, AB, Canada. 25-27 october 2005.
- Catchpole WR, Catchpole EA, Butler BW, Rothermel RC, Morris CA, Latham DJ (1998) Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel. *Combustion Science and Technology* **131**, 1-37.
- Chen JM, Black TA, Novak MD, Adams RS (1995) A wind tunnel study of turbulent airflow in forest clearcuts. In : Coutts MP, Grace J (Eds.), *Wind and Trees*. Cambridge University Press, pp. 71-87.
- Cheney NP, Gould JS, Catchpole WR (1998) Prediction of fire spread in grasslands. *International Journal of Wildland Fire* **8** (1), 1-13.
- Cruz MG (2004) ‘Ignition of crown fuels above a spreading surface fire’. Ph.D. Thesis, University of Montana, Missoula, MT. 240 p.
- Dupont S, Brunet Y (2006) Simulation of turbulent flow in an urban forested park damaged by a windstorm. *Boundary-Layer Meteorology* **120**, 133-161.
- Dupont S, Brunet Y (2008a) Influence of foliar density profile on canopy flow: a large-eddy simulation study. *Agricultural and Forest Meteorology* doi:10.1016/j.agrformet.2008.01.014.
- Dupont S, Brunet Y, (2008b) Edge flow and canopy structure: a large-eddy simulation study. *Boundary-Layer Meteorology* **126**, 51-71.
- Finnigan J (2000) Turbulence in plant canopies. *Annual review of fluid mechanics* **32**, 519-571.
- Foudhil H, Brunet Y, Caltagirone JP (2005) A fine-scale k-ε model for atmospheric flow over heterogeneous landscapes. *Environmental Fluid Mechanics* **5** (3), 247-265.
- Gao W, Shaw RH, Paw UKT (1989) Observation of organised structures in turbulent flow within and above a forest canopy. *Boundary-Layer Meteorology* **47**, 349–377.
- Gillies JA, Nickling WG, King J (2002). Drag coefficient and plant form response to wind speed in three plant species: Burning bush (*Euonymus alatus*), Colorado Blue Spruce (*Picea pungens glauca.*), and Fountain Grass (*Pennisetum setaceum*). *Journal of Geophysical Research-Atmospheres* **107** (D24), art 4760.

- Green SR (1992) Modelling Turbulence Air Flow in a Stand of Widely-Spaced Trees, *PHOENICS, Journal of Computational Fluid Dynamics* **5**, 294–312.
- Kaimal JC, Finnigan JJ, (1994) Atmospheric boundary layer flows. Their structure and measurements. Oxford University Press, New-York, 289 pp.
- Kanda M, Hino M (1994) Organized structures in developing turbulent-flow within and above a plant canopy, using a LES. *Boundary-Layer Meteorology* **68** (3), 237-257.
- Lee X (2000) Air motion within and above forest vegetation in non-ideal conditions. *Forest Ecology and Management* **135**, 3-18.
- Li Z, Lin JD, Miller DR (1990) Air flow over and through a forest edge: a steady state numerical simulation. *Boundary Layer and Meteorology* **51**, 179-197.
- Linn RR (1997) 'A transport Model for Prediction of Wildfire Behavior.' Sci. Rep. LA -13334-T, 195pp., Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM.
- Linn RR, Reisner J, Colman JJ, Winterkamp J (2002) Studying wildfire behavior using FIRETEC. *International Journal of Wildland Fire* **11**, 233-246.
- Linn RR, Cunningham P (2005) Numerical simulations of grass fires using a coupled atmosphere-fire model: basic fire behavior and dependence on wind speed. *Journal of Geophysical Research* **110**. D13107. 19pp.
- Linn RR, Winterkamp J, Colman JJ, Edminster C, Bailey J (2005a) Modeling interactions between fire and atmosphere in discrete element fuel beds. *International Journal of Wildland Fire* **14**, 37-48.
- Linn RR, Canfield J, Winterkamp J, Cunningham P, Colman JJ, Edminster C, Goddick SL (2005b) 'Numerical Simulations of Fires Similar to the International Crown Fire Modeling Experiment.' In: Proceedings of the Sixth Symposium on Fire and Forest Meteorology, American Meteorological Society, Canmore, Alberta, 25-27 October.
- Liu J, Chen JM, Black TA, Novak MD (1996) E-ε modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge. *Boundary-Layer Meteorology* **77**, 21-44.
- Lu CH, Fitzjarrald DR (1994) Seasonal and diurnal variations of coherent structures over a deciduous forest. *Boundary-Layer Meteorology* **69**, 43–69.
- Morse AP, Gardiner BA, Marshall BJ (2002) Mechanisms controlling turbulence development across a forest edge. *Boundary layer meteorology* **103**, 227-251.
- Novak MD, Warland JS, Orchansky AL, Kettler R, Green S (2000) Wind tunnel and field measurements of turbulent flow in forests. Part I: uniformly thinned stands. *Boundary-Layer Meteorology* **95**, 457–495.
- Patton EG, Shaw RH, Judd MJ, Raupach MR (1998) Large-eddy simulation of windbreak flow. *Boundary-Layer Meteorology* **87**, 275–306.
- Pimont F, Linn RR, Dupuy JL, Morvan D (2006) 'Effects of vegetation description parameters on forest fire behavior with FIRETEC.' V International Conference on Forest Fire Research. D. X. Viegas (Ed.), 2006. 15p.
- Pope SB (2000) 'Turbulent flows.' (Cambridge University Press: Cambridge, UK)
- Raupach MR, Coppin PA, Legg BJ (1986) Experiments on scalar dispersion within a model plant canopy. Part I: the turbulence structure. *Boundary-Layer Meteorology* **35**, 21–52.
- Raupach MR, Bradley EF, Ghadiri H (1987) A wind tunnel Investigation Into Aerodynamic Effect of Forest Clearing on the nesting of Abbott's Booby on Christmas Island, Internal report, Csiro Centre for environmental Mechanics, Canberra.
- Raupach MR, Finnigan JJ, Brunet Y (1996) Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-layer analogy. *Boundary-Layer Meteorology* **78**, 351-382.
- Reisner JM, Wynne S, Margolin L, Linn RR (2000a) Coupled Atmospheric-Fire Modeling Employing the Method of Averages. *Monthly Weather Review* **128**, 3683-3691.
- Reisner JM, Knoll DA, Mousseau VA, Linn RR (2000b) 'New Numerical Approaches for Coupled Atmosphere-Fire Models.' In: Proceedings of the Third Symposium on Fire and Forest Meteorology. January 2000, Long Beach, California.
- Rigolot E, Costa M (2000) 'Conception des coupures de combustible.' Réseau Coupures de Combustible RCC no. 4. Editions de la Cardère : Morières, France.
- Rothermel RC (1972) A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, General Technical Report INT-115, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Shaw RH, Den Hartog G, Neumann HH (1988) Influence of Foliar Density and Thermal Stability on Profiles of Reynolds Stress and Turbulence Intensity in a Deciduous Forest. *Boundary-Layer Meteorology* **45**, 391-409.
- Shaw RH, Schumann U (1992) Large-eddy simulation of turbulent flow above and within a forest. *Boundary-Layer Meteorology* **61**, 47–64.
- Shaw RH, Patton EG (2003) Canopy element influences on resolved- and subgrid-scale energy within a large-eddy simulation. *Agricultural and Forest Meteorology* **115**, 5-17.

- Smith WS, Reisner JM, Kao C YJ (2001) Simulation of flow around a cubical building: comparison with towing-tank data and assessment of radiatively induced thermal effects. *Atmospheric Environment* **35**, 3811-3821.
- Smith WS, Brown MJ, DeCroix DS (2002) 'Evaluation of CFD simulations using laboratory data and urban field experiments.' In: Proceedings of American Meteorological Society 4th Symposium on the Urban Environment. Norfolk, VA May 2002.
- Smolarkiewicz PK, Margolin LG (1998) MPDATA: A finite-Difference Solver for Geophysical Flows. *Journal of Computational Physics* **140**, 459-480.
- Su HB, Shaw RH, Paw UKT, Moeng CH, Sullivan PP (1998) Turbulent statistics of neutrally stratified flow within and above a sparse forest from large-eddy simulation and field observations. *Boundary-layer Meteorology* **88**, 363-397.
- Su HB, Shaw RH, Paw UKT (2000) Two-Point Correlation Analysis of Neutrally Stratified Flow Within and Above a Forest from Large-Eddy Simulation, *Boundary-Layer Meteorology*, **94**, 423-460.
- Watanabe T (2004) Large-Eddy Simulation of Coherent Turbulence Structures Associated with Scalar Ramps Over Plant Canopies. *Boundary-Layer Meteorology* **112**, 307-341.
- Wilson JD, Flesh TK (1999) Wind and Remnant Tree Sway in Forest Cutblocks. III. a Windflow Model to Diagnose Spatial Variation, *Agricultural Forest Meteorology*. **93**, 259-282.
- Winterkamp J, Linn RR, Colman J, Smith S, Edminster CB, Weise DR (2006) 'Interaction between wildfires, atmosphere, and topography.' V International Conference on Forest Fire Research. D. X. Viegas (Ed.), 2006.
- Yang B, Raupach M, Shaw RH, Paw UKT, Morse AP (2006a) Large-Eddy Simulation of Turbulent Flows across a forest edge: Part I, Flow Statistics. *Boundary-Layer Meteorology* **120**, 377-412.
- Yang B, Morse AP, Shaw RH, Paw UKT (2006b) Large Eddy Simulation of Turbulent Flow Across a Forest Edge. Part II: Momentum and Turbulence Kinetic Energy Budgets, *Boundary-Layer Meteorology* **121**, 433-457.

Appendix 1: Nomenclature used in the text

Latin symbols

A, B, C	subscripts related to the length scale of turbulent structures
a_f	leaf area density (m^{-1})
C_d	vegetation drag coefficient
C_{Pw}	parameter of the wake production term
D	diffusion term of the SGS turbulent kinetic energy ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$)
$ET_{A \rightarrow B}$	energy transfer from scale A to scale B ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$)
$ET_{B \rightarrow C}$	energy transfer from scale B to scale C ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$)
F_{di}	vegetation drag force in the i -direction ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-2}$)
g_i	gravity acceleration (component in the i -direction) (ms^{-2})
h	main vegetation height (m)
k	total SGS turbulent kinetic energy (m^2s^{-2})
k_A, k_B, k_C	SGS turbulent kinetic energy at scale A, B, C (m^2s^{-2})
k_{tot}	mean total turbulent kinetic energy (m^2s^{-2})
LAD	leaf area density (m^{-1})
p	pressure (Pa)
P_S	shear production term ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$)
P_W	wake production term ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$)
R_{ij}	Reynolds tensor
s_A, s_B, s_C	turbulent length scale A, B and C
T	gas temperature (K)
u, v, w	wind velocity (ms^{-1})
u_1, u_2, u_3	wind velocity (ms^{-1})
$u_1^{ini}, u_2^{ini}, u_3^{ini}$	initial wind velocity (ms^{-1})
u_{2h}^{ini}	initial wind velocity at $z = 2h$ (ms^{-1})

$u2h$	velocity at height h and $x/h=0$ in fuel-break case (ms^{-1})
$u'w'_{tot}$	mean total momentum flux (m^2s^{-2})
VT_{corr}	velocity pressure correlation ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$)

Greek symbols

α	volume fraction (packing ratio)
σ	area per volume ratio (m^{-1})
σ_h	mean total standard deviation of velocity module (ms^{-1})
$\sigma_{u,v,w}$	mean total standard deviations of velocity components (ms^{-1})
ρ_g	gas density ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ε	turbulence dissipation rate ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$)
ν_T	total turbulent diffusion coefficient (m^2s^{-1})
$\nu_{T,s}$	total turbulent diffusion coefficient at scale s (m^2s^{-1})

Appendix 2: Formulation of the different terms of the SGS TKE equations for scales A (equation 6) and B (equation 7)

Terms	Designation	Scale A	Scale B
DK	Diffusion of Energy	$D_A = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho_g \nu_T \frac{\partial k_A}{\partial x_j} \right]$	$D_B = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\rho_g \nu_T \frac{\partial k_B}{\partial x_j} \right]$
P_S	Shear Production	$P_{S,A} = \left(\rho_g \nu_{T,A} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho_g \nu_{T,A} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} + \rho_g k_A \right) \right) \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j}$	$P_{S,B} = \left(\rho_g \nu_{T,B} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \left(\rho_g \nu_{T,B} \frac{\partial \tilde{u}_k}{\partial x_k} + \rho_g k_B \right) \right) \frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j}$
ET	Energy transfer	$ET_{A \rightarrow B} = 4 \rho_g C_d a_f \sqrt{\tilde{u}_j \tilde{u}_j} k_A$	$ET_{B \rightarrow C} = 4 \rho_g C_d a_f \sqrt{\tilde{u}_j \tilde{u}_j} k_B$
ε	Dissipation Rate (Free air)	$\varepsilon_A = \rho_g \frac{\sqrt{k}}{s_A} k_A$	$\varepsilon_B = \rho_g \frac{\sqrt{k}}{s_B} k_B$
P_W	Wake Production		$\rho_g C_{pw} C_d a_f [\tilde{u}_j \tilde{u}_j]^{3/2 (*)}$
VT_{corr}	Velocity temperature correlation	$-\frac{\rho_g}{T_0} g_i u_i \widetilde{T^n}$	$-\frac{\rho_g}{T_0} g_i u_i \widetilde{T^n}$

(*) C_{pw} is a parameter that has been discussed by several authors. It varies from 0.8 (Foudhil *et al.* 2005) to 1.0 in most cases (Liu *et al.* 1996; Shaw and Patton 2003). In our simulations, we chose it equal to 1.

4. Écoulements dans des canopées hétérogènes

4.1. Introduction

Les simulations présentées en partie 3 du présent chapitre montrent que des hétérogénéités de grandes tailles, comme des coupures de combustibles mesurant plusieurs dizaines de h (hauteur de la canopée) sont susceptibles d'affecter en profondeur les caractéristiques de l'écoulement.

L'influence d'hétérogénéités de tailles intermédiaires (entre 0.2 et $5h$) est assez mal connue. On sait que lorsque les canopées sont peu continues, avec des écarts entre les individus supérieurs à h , le champ devient tridimensionnel (Lee 2000). Chaque individu produit alors un effet discernable sur le plan mécanique (sillage et couvert) et sur le plan thermique (différences entre les propriétés des arbres et des trouées). Si le vent est faible, on peut observer des mécanismes de circulation thermique au sein des trouées. Shaw & Shumann (1992) insistent sur le fait que la résolution individuelle des arbres n'est que partiellement prise en compte du fait des limitations dues à la taille de la maille. La canopée est traitée comme un milieu poreux horizontalement uniforme en densité, avec un coefficient de traînée constant. Ces remarques n'ont apparemment pas été prises en compte dans les études ultérieures. La présence d'hétérogénéités soudaines dans la canopée induit une augmentation de la turbulence, une accélération du vent et de l'intensité des rafales (Dupont & Brunet 2006). On notera également les travaux d'Albertson *et al.* (2001) qui introduisent l'hétérogénéité spatiale dans les distributions de LAI. On notera que ces références concernent des travaux de modélisation et non des travaux expérimentaux (modélisation $k-\varepsilon$ et LES). Dupont & Brunet (2006) montrent que l'hétérogénéité locale modifie significativement la répartition spatiale de l'EKT à l'échelle d'un parc urbain. Quant à Albertson *et al.* (2001), ils montrent que la présence d'hétérogénéité induit une diminution de la vitesse du vent au dessus de la canopée. Ce phénomène est attribué à une augmentation de la rugosité de surface, due à l'accroissement du cisaillement généré par les gradients de rugosité locaux. On note également, que plus la végétation est dense, plus la vitesse du vent au dessus de la canopée est élevée (skimming effect).

Il semble ressortir de cette étude que les variables d'états présentent des contrôles plutôt non locaux (étude des corrélations avec le LAI localement). Par ailleurs, Patton (1997) compare l'introduction d'une distribution de LAI détaillée (arbres individualisés) avec celle d'une canopée moyenne. Cependant son étude se limite à des niveaux de recouvrement très élevés. Du coup, les tailles des trouées entre les arbres sont très limitées, et il conclut que les hétérogénéités locales ont peu d'influence.

D'une manière générale, ces études concernent des canopées naturelles plutôt homogènes. Nous avons déjà évoqué l'importance que revêt l'élaboration des coupures de combustible. Les structures qui en résultent présentent alors une hétérogénéité spatiale largement supérieure à celle que l'on trouve dans les canopées naturelles. Notons également que les pratiques sylvicoles conduisent également à l'introduction d'hétérogénéités marquées. C'est dans ce contexte que nous présentons cette étude de l'effet de la végétation sur l'écoulement. Dans cette partie, nous comparerons donc les principales caractéristiques de l'écoulement (champ moyen, turbulence), dans le contexte de coupures de combustible présentant des recouvrements et des niveaux d'agrégation variés (taille caractéristique de taches variables). Comme dans la partie 2, ces configurations hétérogènes seront comparées à des cas homogènes de même densité moyenne (donc de même surface foliaire moyenne). Cette étude est menée dans le contexte de deux écosystèmes typiques : l'écosystème à pin d'Alep (peu dense) et l'écosystème à pin Maritime (dense).

Tableau 3.6. Caractéristiques physiques du combustible

	Densité (kg.m ⁻³)	Rapport surface /volume σ (m ⁻¹)	Teneur en eau (%)	Bas de la canopée (m)	Hauteur (m)
Canopée: Pin d'Alep	0.1	10000	100	4.75	12
Pin Maritime	0.5	5000			
Sous bois	1.0	5000	70	4.75	0.5

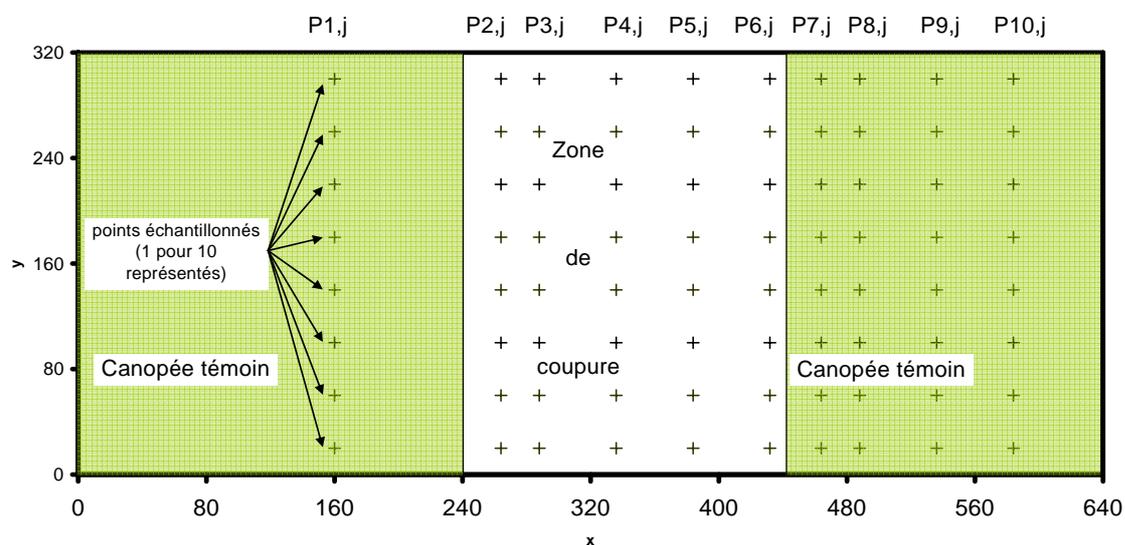


Fig. 3.18. Domaine de calcul (vue de dessus) et points échantillonnés

Tableau 3.7. Caractéristiques spatiales du combustible

Cas d'étude	Ecosystème	Diamètres des agrégats (m)	Recouvrement (%)	Densité max (kg.m ⁻³)	LAI	Charge (kg.m ⁻²)
<i>PmHet75a</i> Zone non traitée (Témoin)	Pin Maritime	4	75 %	0.5	7.2	2.7
<i>PmHet50a</i>		4	50 %	0.5	4.8	1.8
<i>PmHet50b</i>		10	50 %	0.5		
<i>PmHet50c</i>		20	50%	0.5		
<i>PmHom50</i>		∞	100 %	0.33		
<i>PmHet25a</i>		4	25 %	0.5	2.4	0.9
<i>PmHet25b</i>		10	25 %	0.5		
<i>PmHet25c</i>		20	25%	0.5		
<i>PmHom25</i>		∞	100 %	0.17		
<i>PmHet0</i>			-	0 %	0.0	0.0	0.0
<i>PaHet75a</i> Zone non traitée (Témoin)	Pin d'Alep	4	75 %	0.1	2.9	0.54
<i>PaHet50a</i>		4	50 %	0.1	1.9	0.36
<i>PaHet50b</i>		10	50 %	0.1		
<i>PaHet50c</i>		20	50 %	0.1		
<i>PaHom50</i>		∞	100 %	0.067		
<i>PaHet25a</i>		4	25 %	0.1	0.97	0.018
<i>PaHet25b</i>		10	25 %	0.1		
<i>PaHet25c</i>		20	25 %	0.1		
<i>PaHom25</i>		∞	100 %	0.033		
<i>PaHet0</i>			-	0 %	0.0	0.0	0.0

(STAR=0.8, rho=750 kg/m³)

4.2. Description du protocole

Description du combustible

Pour les études réalisées dans cette sous-partie, nous avons utilisé les caractéristiques physiques classiques pour les écosystèmes à pin d'Alep et à pin Maritime (**Tableau 3.6**). Une strate arbustive de 50 cm de haut et de densité de 1 kg.m^{-3} compose le sous-bois de l'écosystème, alors que les strates de pins, élaguées à 4.75 m, ne varient que par leur densité et leur rapport surface/volume.

Le domaine de calcul est représenté **Fig. 3.18**. Les dimensions horizontales du domaine pour ces séries de simulations sont de $640 \text{ m} \times 320 \text{ m}$. Il se compose de deux zones témoins correspondant à une canopée non traitée, respectivement de 240 et 200 m séparée par une coupure de combustible de 200 m de large.

Le combustible des canopées dans les zones témoins présente les caractéristiques spatiales suivantes : une taille caractéristique d'hétérogénéité de 4 m (diamètre des arbres individualisés) pour un recouvrement de 75 %, ce qui correspond à peu près aux recouvrements maximaux observés dans ce type d'écosystèmes (sauf forêts plantées de pin Maritime). Ceci conduit à des LAI élevés de 7.2 pour les parties témoins des forêts de pin Maritime (*Pm*) et de 2.9 pour celles de pin d'Alep (*Pa*).

La zone de coupure diffère des zones témoins par une réduction du combustible de la canopée de pins. Le recouvrement en zone traitée varie de 0 à 75 % (de *Het0* à *Het75*) et les tailles de bosquets d'arbres varient de 4 à 20 m (*a*, *b* ou *c*). Une scène homogène (de *Hom0* à *Hom75*) représente ces mêmes combustibles de manière homogénéisée à l'échelle de la coupure. Ces différentes configurations, ainsi que les densités, charges et LAI qu'elles génèrent sont récapitulées **Tableau 3.7**.

Caractéristiques des simulations

La résolution horizontale est de 2 m, alors que le maillage est dilaté selon l'axe des *z*, pour commencer à 1.5 m près du sol et finir à 60 m, à 615 m de haut (toît du domaine). Chaque simulation a été réalisée sur 128 processeurs, avec des conditions périodiques en *x* et en *y*.

Un profil logarithmique a été utilisé pour l'initialisation du vent ambiant, soufflant dans le sens de l'axe des *x*. La vitesse du vent dans ces conditions ambiantes est de 8 m.s^{-1} à 10 m de haut. Notons que l'usage des conditions périodiques en *x* permet d'obtenir une zone témoin de 440 m de long, soit $440/12 = 36.7h$. Une telle longueur assure un retour du champ de vitesse à une situation non perturbée de type « zone témoin » aux abords de la coupure. Une comparaison des profils obtenus sur les points $P_{i,j}$ pour les cas présentant une coupure et pour les cas sans coupure permettra de valider cette hypothèse.

Le (grand) pas de temps utilisé pour ces calculs est $dt=0.04 \text{ s}$. Nous avons réalisé 180000 pas de temps de calcul soit un temps réel de 7200 s (2 heures). La première phase de 3600 s (1 heure) sert à la convergence du profil moyen sur toute la hauteur de la couche limite atmosphérique (615 m de haut), alors que la deuxième est utilisée pour réaliser les moyennes temporelles.

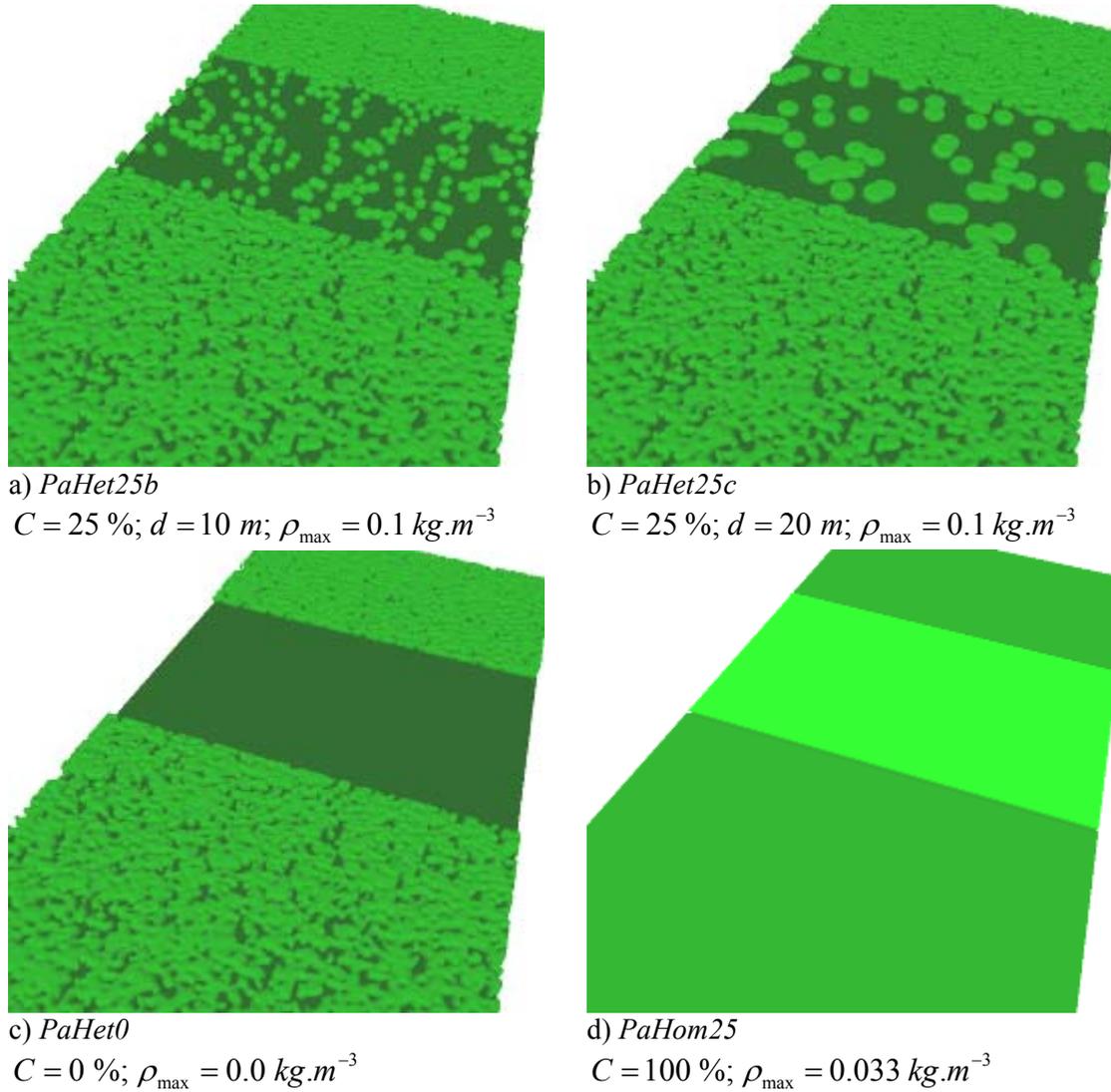


Fig. 3.19. Quelques configurations utilisées pour le calcul, vues de dessus

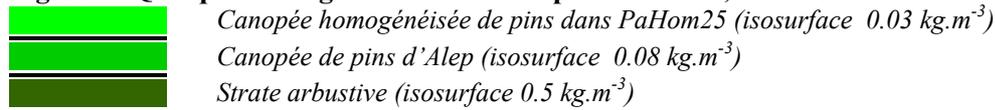


Tableau 3.8. Récapitulatif des différents points échantillonnés dans le domaine

	Noms	X (m)	Y (m)	Positionnement
Forêt	P1-j	160	$4j - 2$ pour $j \in [1;80]$	30h après la fin de la coupure
Coupure	P2-j	264	$4j - 2$ pour $j \in [1;80]$	2h dans la coupure
	P3-j	288	$4j - 2$ pour $j \in [1;80]$	4h dans la coupure
	P4-j	336	$4j - 2$ pour $j \in [1;80]$	8h dans la coupure
	P5-j	384	$4j - 2$ pour $j \in [1;80]$	12h dans la coupure
	P6-j	432	$4j - 2$ pour $j \in [1;80]$	16h dans la coupure
Forêt	P7-j	464	$4j - 2$ pour $j \in [1;80]$	2h après la fin de la coupure
	P8-j	488	$4j - 2$ pour $j \in [1;80]$	4h après la fin de la coupure
	P9-j	536	$4j - 2$ pour $j \in [1;80]$	8h après la fin de la coupure
	P10-j	584	$4j - 2$ pour $j \in [1;80]$	12h après la fin de la coupure
	P1-j	160	$4j - 2$ pour $j \in [1;80]$	30h après la fin de la coupure

Sorties de calcul

Des sorties de calcul ont été réalisées toutes les 50 itérations, ce qui représente une sortie toutes les deux secondes (fichiers *comp.out*). Ces données sont utilisées pour la visualisation des champs tri-dimensionnels, qu'ils soient instantanés ou moyens (moyennes réalisées sur la base de nos données échantillonnées à 0.5 Hz).

Un certain nombre de sorties de calcul ont été extraites. Il s'agit comme dans le cas de la validation (partie 3.2) de données ponctuelles moyennées dans le temps : composantes de la vitesse u , v et w ; grandeurs turbulentes (tke , flux de moment). Les points échantillonnés sont répartis dans la zone témoin et dans la coupure (**Tableau 3.8** et une partie des points **Fig. 3.18**).

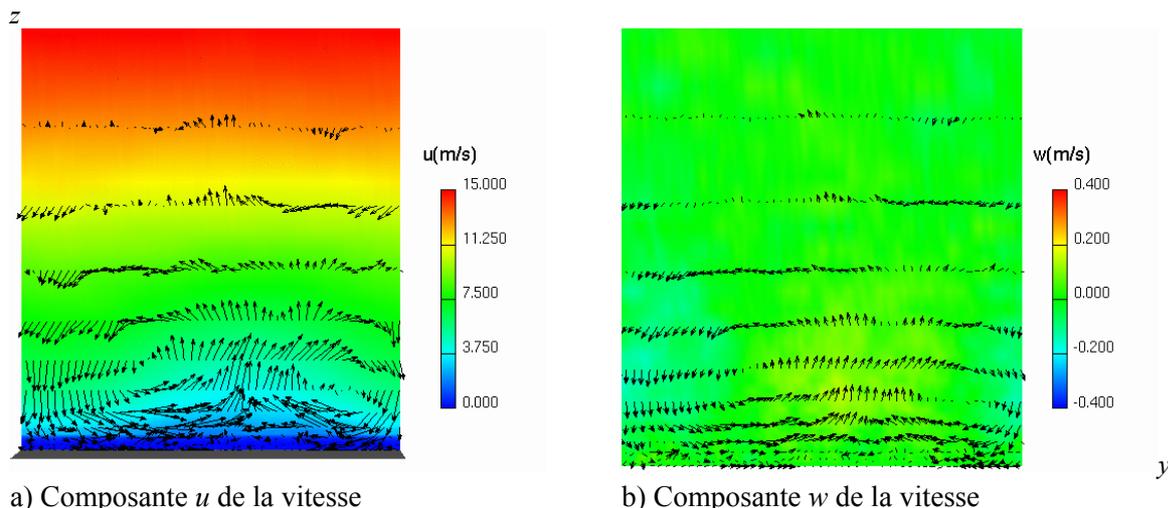


Fig. 3.21. *Pmhet75a* : vue frontale de l'écoulement incident (plan $x=360$ m) et des vortex liés aux « streaks ». Les dimensions (y,z) des zones représentées sont de $320m \times 396m$

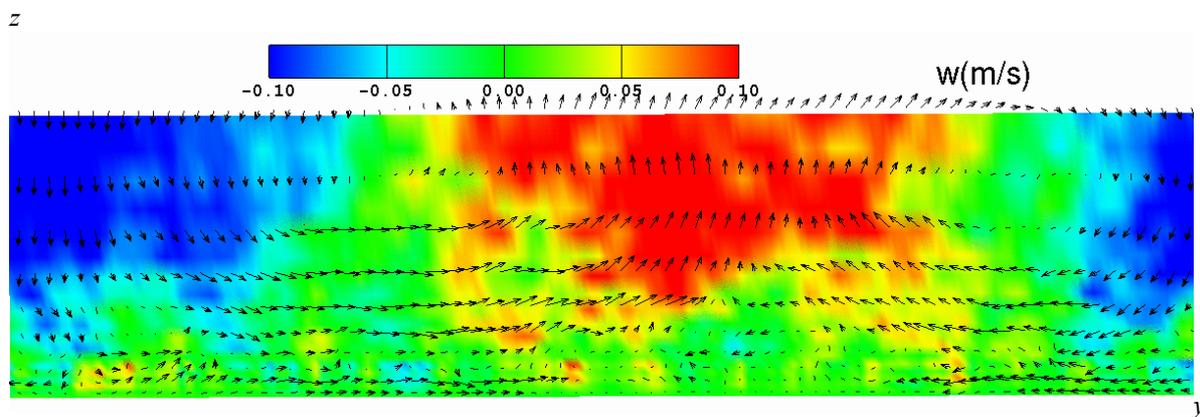


Fig. 3.22. *Pmhet75a* : vue frontale de l'écoulement incident (plan $x=360$ m) et des vortex liés aux « streaks ». Les dimensions (y,z) des zones représentées sont de $320m \times 84m$

4.3. Résultats

4.3.1. Résultats préliminaires

Les séries de simulations que nous avons réalisées ici mettent en évidence la présence de « streaks ». Avant de décrire plus en avant le phénomène, il convient de préciser que ce phénomène n'avait pas été observé dans les validations présentées au paragraphe 3. Ceci est dû au fait que les simulations de la partie 3 ont été réalisées avec des conditions limites latérales non cycliques (amortisseur de Rayleigh). Ce choix de conditions limites a été dicté par des dysfonctionnements dans la version « latérale cyclique » du code au moment de l'étude de la partie 3. Ces dysfonctionnements ont été corrigés entre cette étude et la précédente. Précisons qu'un certain nombre de tests ont permis de montrer que les deux versions (damping latéral et conditions latérales cycliques) fournissaient des champs moyens très similaires, la principale différence se manifestant par la présence des « streaks ».

Présence de « streaks »

Si l'on observe des champs moyennés y compris sur des périodes longues (**Fig. 3.20**, moyennés sur 3600 s), on observe une variabilité selon l'axe des y que l'on ne peut attribuer à des effets de l'hétérogénéité de la végétation. En effet, cette variabilité a une périodicité égale à la largeur du domaine et se traduit par un couloir d'écoulement « rapide » (de l'ordre du m/s) et un couloir plus lent (de l'ordre de 0.5 m/s).

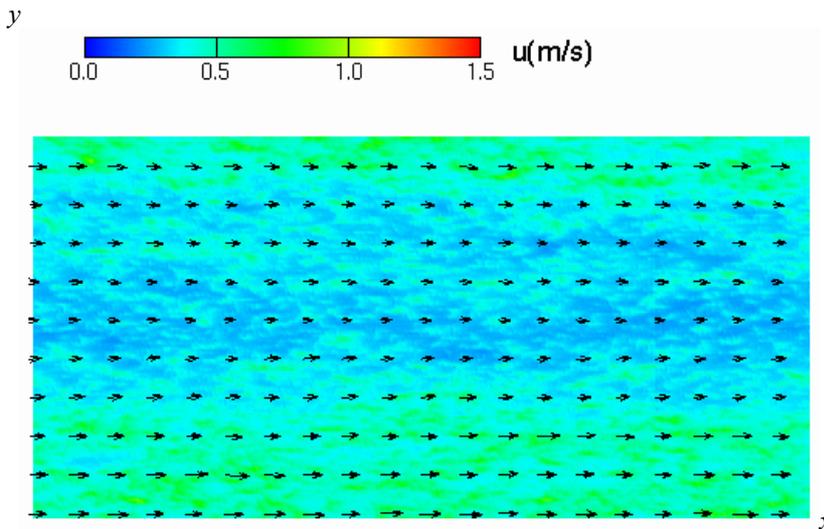


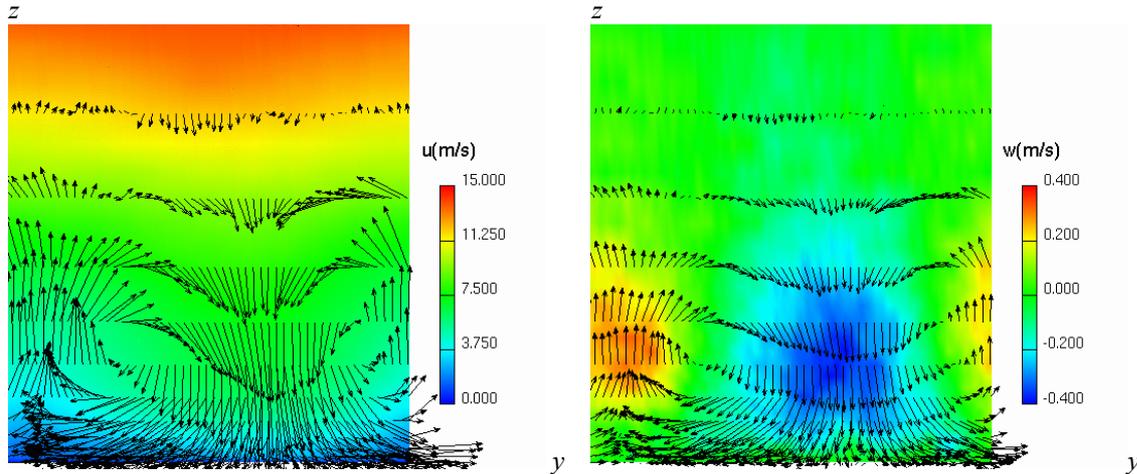
Fig. 3.20. Vue de dessus de la composante u de la vitesse dans l'écosystème pin Maritime à une hauteur de $z=9.6$ m (moyenne sur 3600 s) $d = 4$ m; $\rho_{\max} = 0.5$ kg.m⁻³

Cette large structure est en fait associée à la présence de deux tourbillons contra-rotatifs dans le plan (y,z) (**Fig. 3.21**). La composante u (**Fig. 3.21a**) de la vitesse est alors plus élevée dans la partie inférieure de la couche limite de surface pour laquelle la composante w (**Fig. 3.21b**) est négative. A l'inverse, elle est plus faible dans les zones pour lesquelles celle-ci est positive. L'amplitude maximale de ces vortex se situe dans les 150 premiers mètres de la CLA et leur centre est positionné entre 50 et 100 m de haut. Il convient de noter que l'amplitude de ces tourbillons est faible, puisque les composantes v et w de la vitesse n'excède pas 0.2 m/s, à des hauteurs où la composante u dépasse les 10 m/s.

Ces structures se déplacent très lentement au cours du calcul (de l'ordre de 1 m/min) et la position du centre des vortex par rapport aux frontières latérales varie d'un calcul à l'autre. Ces vortex induisent une modification importante des vents locaux dans la partie basse de la CLA (**Fig. 3.22**). On observe notamment que les composantes v et w peuvent être non nulles au bas de la canopée.

Par ailleurs, on observe que la présence d'une coupure tend à augmenter l'amplitude des tourbillons sur celle-ci. En effet, si l'on compare le cas témoin *PmHet75a* correspondant à la canopée sans coupure (**Fig. 3.21** et **3.22**) au cas de la coupure totale *PmHet0* (**Fig. 3.23** et **3.24**), l'amplitude des vitesses verticales sur la coupure est nettement plus élevée pour atteindre 0.4 m/s.

Comme nous le verrons dans la partie discussion, de telles structures ont déjà été observées à la fois numériquement et sur le terrain, même si leur durée de vie ne coïncide pas avec les observations de terrain.



a) Composante u de la vitesse

b) Composante w de la vitesse

Fig. 3.23. *Pmhet0* : vue frontale de l'écoulement incident (plan $x=360$ m) et des vortex liés aux streaks. Les dimensions (y,z) des zones représentées sont de $320m \times 396m$

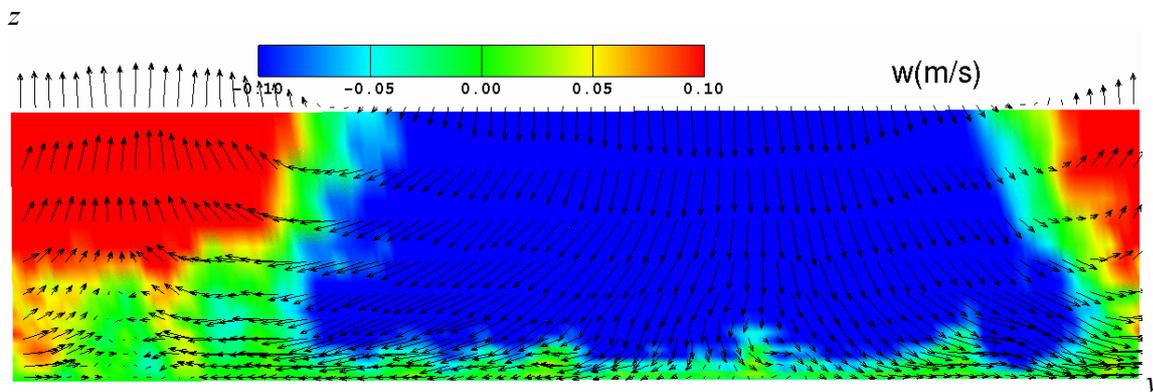


Fig. 3.24. *Pmhet0* : vue frontale de l'écoulement incident (plan $x=360$ m) et des vortex liés aux streaks. Les dimensions (y,z) des zones représentées sont de $320m \times 84m$

Validation de l'hypothèse du retour à l'équilibre sur la zone témoin et effet du type d'écosystème sur la zone témoin

La **Fig. 3.25** représente les profils moyens obtenus pour la composante u de la vitesse et le flux de moment uw' pour différentes configuration de végétation (*Het0*, *Het25a*, *Het25c*, *Het50a*, *Het75a*). Ces profils sont obtenus sur l'axe $x=160m$ pour la série de points $P_{1,j}$ (30h après la coupure) et les deux écosystèmes. On observe que les profils de vitesse moyenne obtenus à 30h pour les différentes configurations sont quasi identiques à celui de la configuration témoin sans coupure (*Het75a*) pour la composante u de la vitesse. Cette similarité des profils de vitesse est également valable lorsque la canopée a été intégralement supprimée sur la coupure (*Het0*), et ceci pour les deux écosystèmes.

L'hypothèse d'un retour à l'équilibre « témoin » après $30h$ est donc satisfaite pour la vitesse. Concernant les grandeurs turbulentes (ici le flux de moment), on n'observe également aucune différence dans la canopée ($z/h \leq 1$). En revanche, on observe une légère augmentation de la turbulence au toit de la canopée avec la diminution du recouvrement de la canopée sur la coupure. Ce phénomène est dû à la perturbation de la coupure. Des auteurs ont observé ce type de surestimation dans la partie « forêt », lors de l'expérience numérique de validation (partie 3 du présent chapitre). Cette absence de retour total à l'équilibre est attribuée à la longueur insuffisante du domaine. $30h$ ne permettent pas un retour total à l'équilibre du profil de turbulence. Cependant, les différences avec le cas témoin (*Het75a*) sont très faibles, voire quasi inexistantes dans le cas du pin d'Alep. De plus, notre objectif principal est de comparer des situations où la quantité de végétation sur la coupure est identique, mais allouée de manière plus ou moins hétérogène : notamment les cas *Het225*, *Het525*, *Het1025* et *Hom25*. Dans ces derniers cas les différences sont vraiment négligeables. Nous considérerons donc dans toute la suite que les profils obtenus en $x=160$ (P_1), correspondent à une situation de référence en canopée homogène. Les profils obtenus (avec les mêmes conditions de vent géostrophique) sont très différents dans les deux écosystèmes. Nous observons que l'écosystème à pin Maritime (dont le *LAD* est deux fois et demi plus élevé) se caractérise par des vitesses de vent plus faibles dans la canopée et présente une inflexion nettement plus marquée que l'écosystème à pin d'Alep. En particulier, le vent moyen dans la partie basse de la canopée y est beaucoup moins fort.

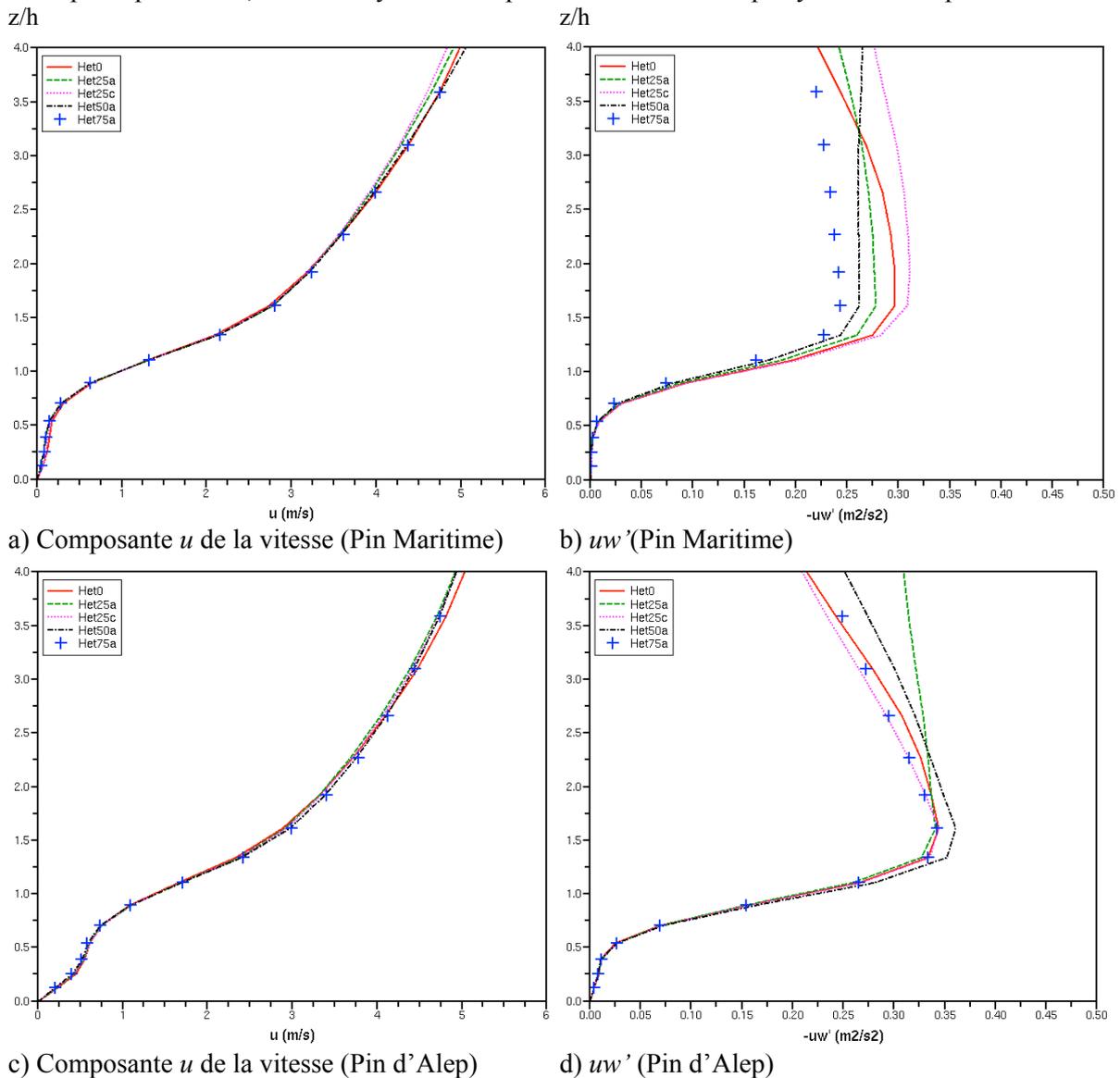


Fig. 3.25. Profils de u , et de uw' dans la zone de forêt dans différentes simulations, où la végétation présente sur la coupure est modifiée

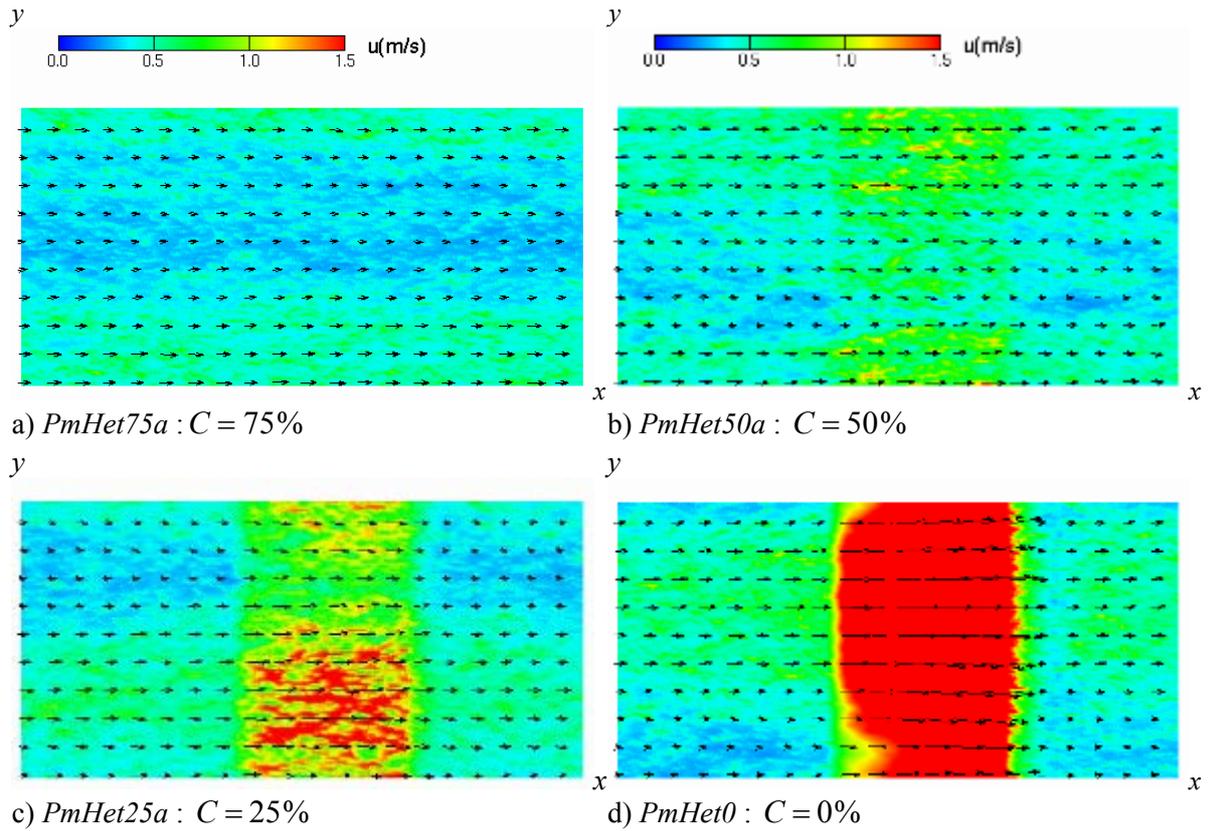


Fig. 3.26. Vue de dessus de la composante u de la vitesse dans l'écosystème pin Maritime à une hauteur de $z=9.6$ m (moyenne sur 3600 s) $d = 4$ m; $\rho_{\max} = 0.5 \text{ kg.m}^{-3}$

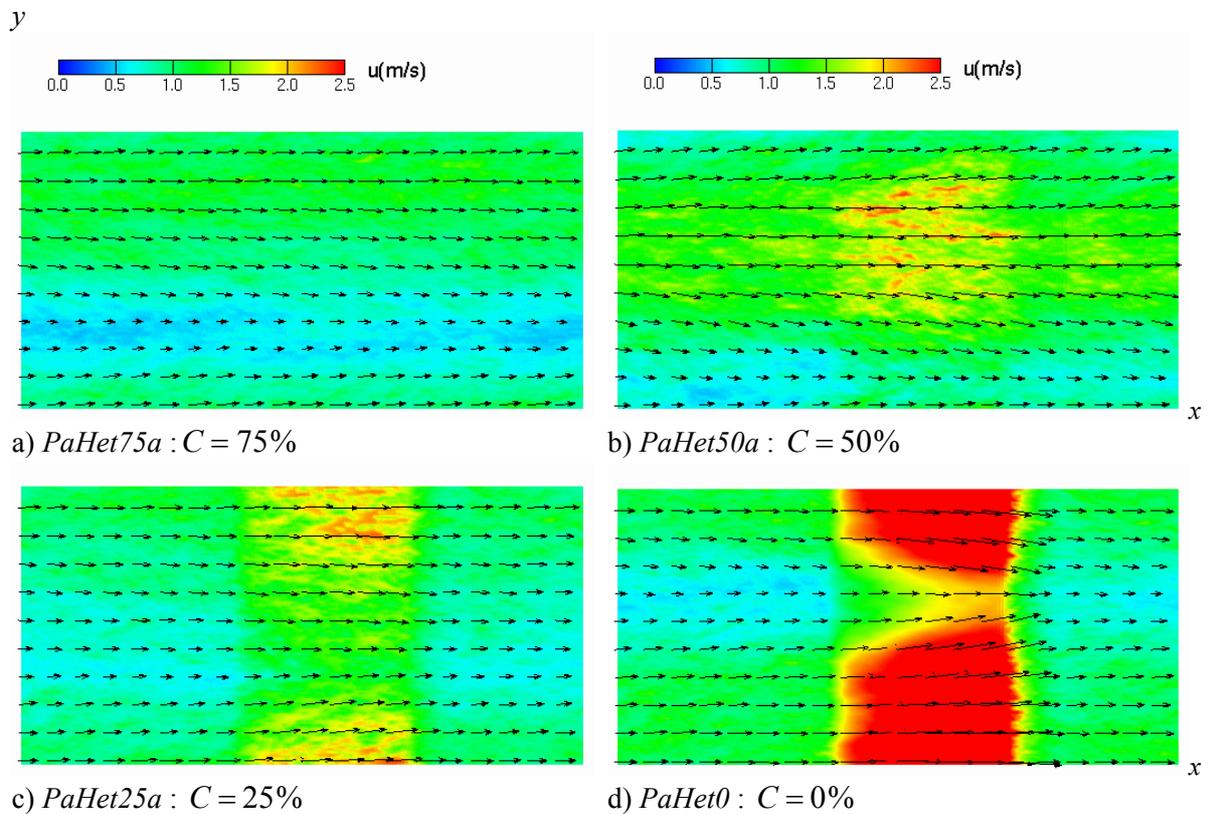


Fig. 3.27. Vue de dessus de la composante u de la vitesse dans l'écosystème Pin d'Alep à une hauteur de $z=9.6$ m (moyenne sur 3600 s) $d = 4$ m; $\rho_{\max} = 0.1 \text{ kg.m}^{-3}$

4.3.2. Effets induits par la coupure : influence du recouvrement

Représentation bidimensionnelle des effets du recouvrement

La **Fig. 3.26** montre des vues de dessus de coupes (xy) de la composante u de la vitesse pour différentes valeurs de recouvrement sur la coupure (de *Het0* à *Het75*). On observe une accélération du vent sur la zone correspondant à la zone de coupure, dont l'amplitude diminue avec le recouvrement. Ce phénomène est beaucoup plus marqué sur la **Fig. 3.26d**, où la coupure est totale.

On observe la même tendance dans l'écosystème à pin d'Alep, avec des vitesses observées significativement plus élevées dans l'écosystème à Pin d'Alep à recouvrement égal (**Fig. 3.27**). Par ailleurs, on observe que les coupures qui présentent un certain niveau d'hétérogénéité (**Fig. 3.26 et 3.27, a à c**), révèlent des patrons de vitesses hétérogènes, avec des zones où le vent est localement plus élevé et qui ne peuvent pas être attribués aux « streaks ». Ces hétérogénéités sont dues à l'hétérogénéité du combustible. Elles diminuent avec le recouvrement. En effet, nous observons qu'elles sont quasi négligeables pour *Het75a*, mais largement identifiables pour *Het25a*. Nous reviendrons sur ce point au paragraphe suivant.

Quantification de l'accélération de l'écoulement moyen le long de la coupure

Afin de mieux quantifier l'accélération du vent sur la coupure nous avons représenté la vitesse moyenne de l'écoulement en fonction de la distance au bord de la coupure dans les **Fig. 3.28**. Les points obtenus sur les graphiques correspondent aux points échantillonnés P_i pour i variant de 1 à 10. Ces vitesses moyennes sont présentées à deux hauteurs ($z=2.3$ m et $z=9.6$ m).

La tendance générale observée est une accélération progressive du vent sur la coupure et une décroissance en sortie de coupure. Cette accélération est d'autant plus forte que le recouvrement est faible. En effet, la vitesse est systématiquement plus élevée en *Het0* qu'un *Het25*, en *Het25* qu'en *Het50*, etc. En l'absence totale d'arbres (*Het0*), la vitesse de l'écoulement peut être jusqu'à 20 fois plus élevée au niveau du sol et 4 fois au sommet de la canopée. La présence d'un couvert, même modéré (*Het25a*, 25 %) suffit à maintenir des vitesses de 2 à 4 fois moins élevées que dans la coupure totale (*Het0*). Après la coupure, le retour à la situation d'équilibre est déjà bien amorcé 4h après la coupure dans la partie supérieure de la canopée ($z=9.6$ m). En revanche, au dessus de la strate arbustive ($z=2.3$ m), l'équilibre n'est toujours pas atteint après 10h. Par ailleurs, on notera que dans la zone située sous la canopée au-delà de la coupure ($z=2.3$ m), les vitesses moyennes peuvent être légèrement plus élevées que sur la coupure elle-même.

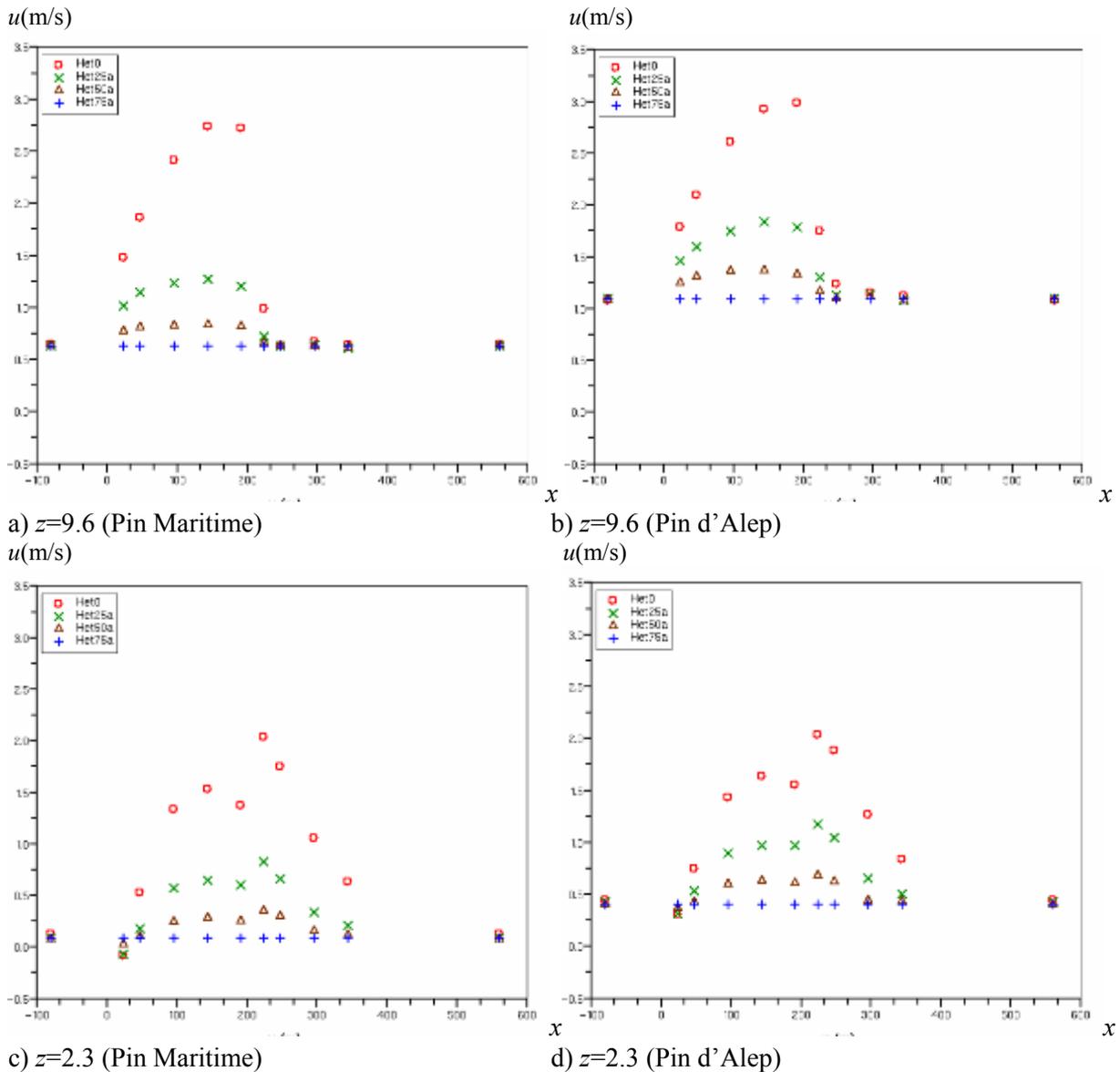


Fig. 3.28. Composante u de la vitesse en fonction de la distance au bord de la coupure à différentes hauteurs pour différents recouvrements

Quantification de l'accélération de l'écoulement moyen selon la verticale

Si l'on se focalise sur le comportement au milieu de la coupure, c'est-à-dire sur la série de points $P_{4,j}$, on observe que les effets induits par le recouvrement se manifestent entre 0 et $2h$, mais qu'ils sont le plus important autour des deux tiers de la hauteur de la canopée (**Fig. 3.29**). L'inflexion dans le profil est d'autant moins marquée que le recouvrement est faible, jusqu'à disparaître totalement lorsque celui-ci est nul.

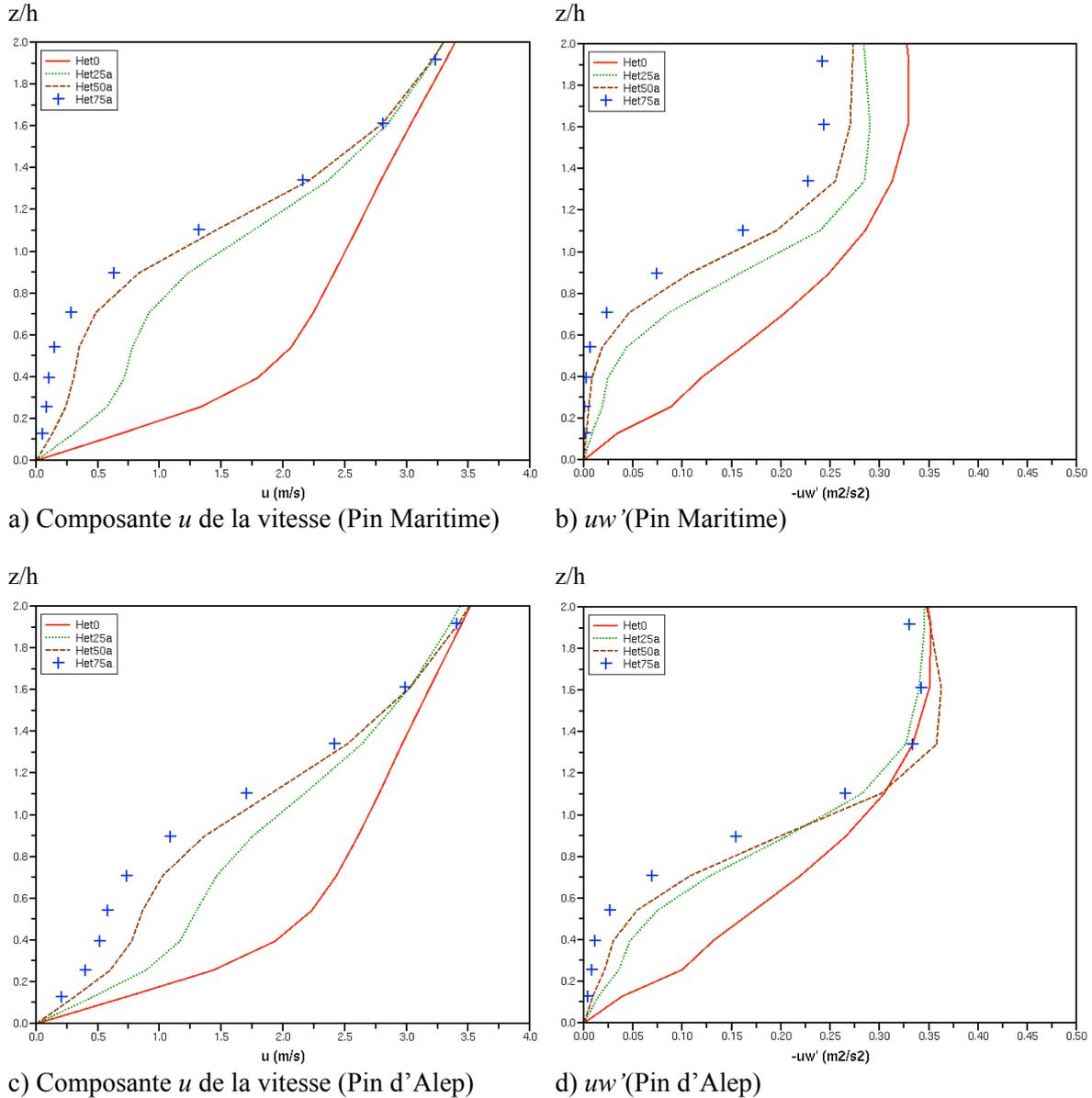


Fig. 3.29. Profils de vitesse moyenne u et de flux de moment uw' dans la zone de coupure (points P_4) pour des configurations de recouvrements variés.

4.3.3. Effets induits par la coupure : influence de structure de la végétation

Pour un recouvrement donné (25 %, par exemple), on peut représenter le comportement du vent sur la coupure pour des tailles d'hétérogénéité différentes (*Het25a*, *Het25b*, *Het25c*). Dans ces trois cas, la quantité de biomasse est identique (même *LAI*). On peut également comparer ces cas à un cas homogénéisé de même *LAI* (*Hom25*). La comparaison de ces quatre configurations permet d'évaluer l'effet de la structure spatiale du combustible.

Quantification des effets sur l'écoulement moyen le long de la coupure

Si l'on s'intéresse à l'évolution des vitesses moyennes le long de la coupure, pour ces quatre configurations (**Fig. 3.30**), on observe d'une manière générale des écoulements plus rapides dans les coupures présentant les hétérogénéités les plus marquées. En effet, les vitesses sont plus rapides dans *Het25c*, que dans *Het25b*, que dans *Het25a*. Le cas *Hom25* peut apparaître comme un cas limite, d'hétérogénéité infiniment petite. C'est dans cette configuration que la vitesse est la plus lente. Notons enfin que les différences tendent à s'accroître au fur et à mesure que l'on entre profondément dans la coupure. Les écarts sont alors les plus importants en bout de coupure et il est vraisemblable que ceux-ci continueraient de s'accroître si la coupure était plus large.

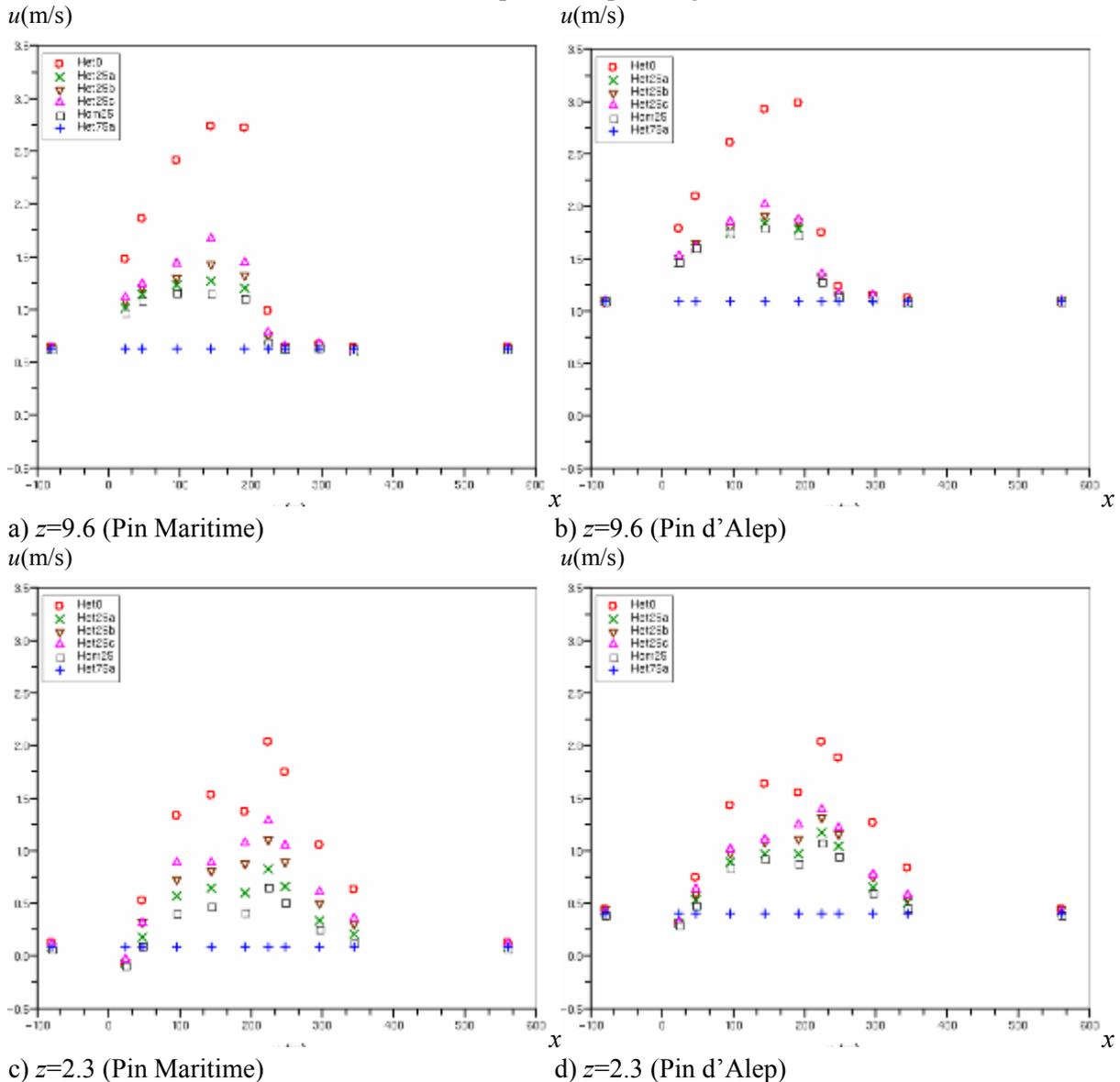
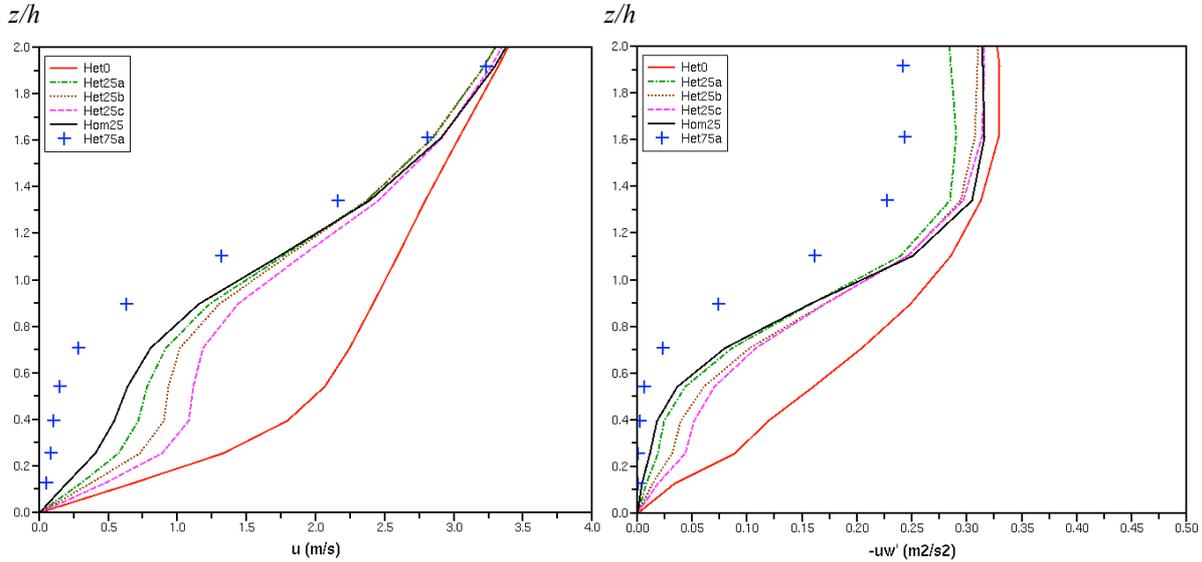


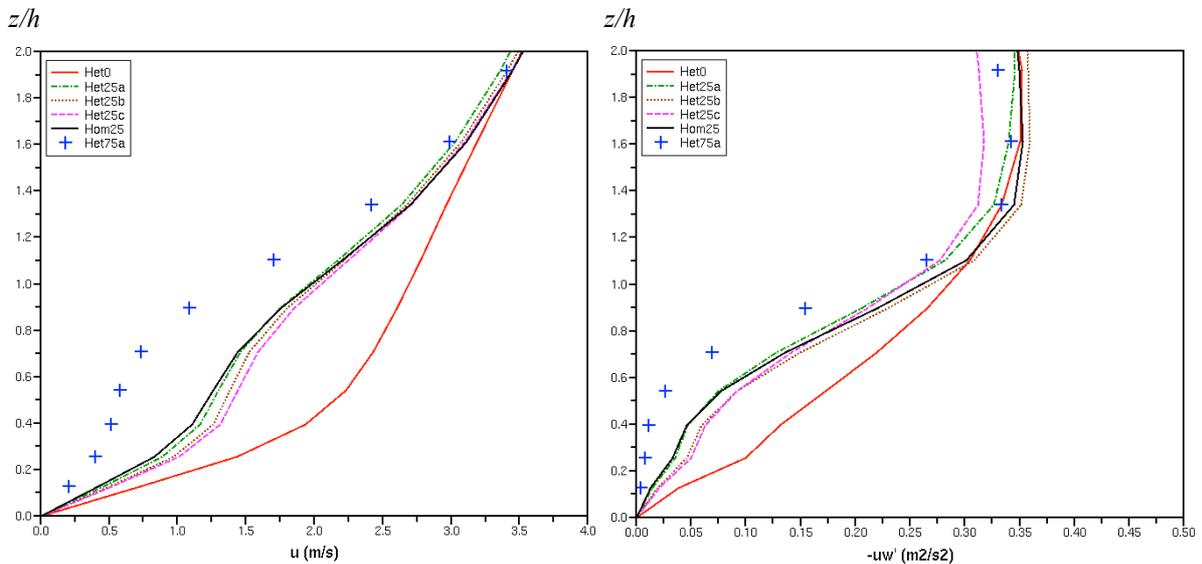
Fig. 3.30. Composante u de la vitesse en fonction de la distance au bord de la coupure à différentes hauteurs pour différentes tailles de patches

Quantification des effets sur l'écoulement moyen selon la verticale

Les profils verticaux des caractéristiques de l'écoulement moyen dans la coupure dans les quatre configurations sont représentés sur le Fig. 3.31. Les composantes u de la vitesse confirme que l'on trouve les vitesses les plus élevées dans les configurations présentant les plus grandes hétérogénéités. Ces effets sont les plus significatifs dans la partie inférieure de la canopée (deux tiers inférieurs). Par ailleurs, ils sont moins marqués dans la formation à Pin d'Alep que dans celle à Pin Maritime.



a) Composante u de la vitesse (Pin Maritime) b) uw' (Pin Maritime)



c) Composante u de la vitesse (Pin d'Alep) d) uw' (Pin d'Alep)

Fig. 3.31. Profils de vitesse moyenne u et de flux de moment uw' dans la zone de coupure (points P_4) pour des configurations de tailles d'agrégats variées.

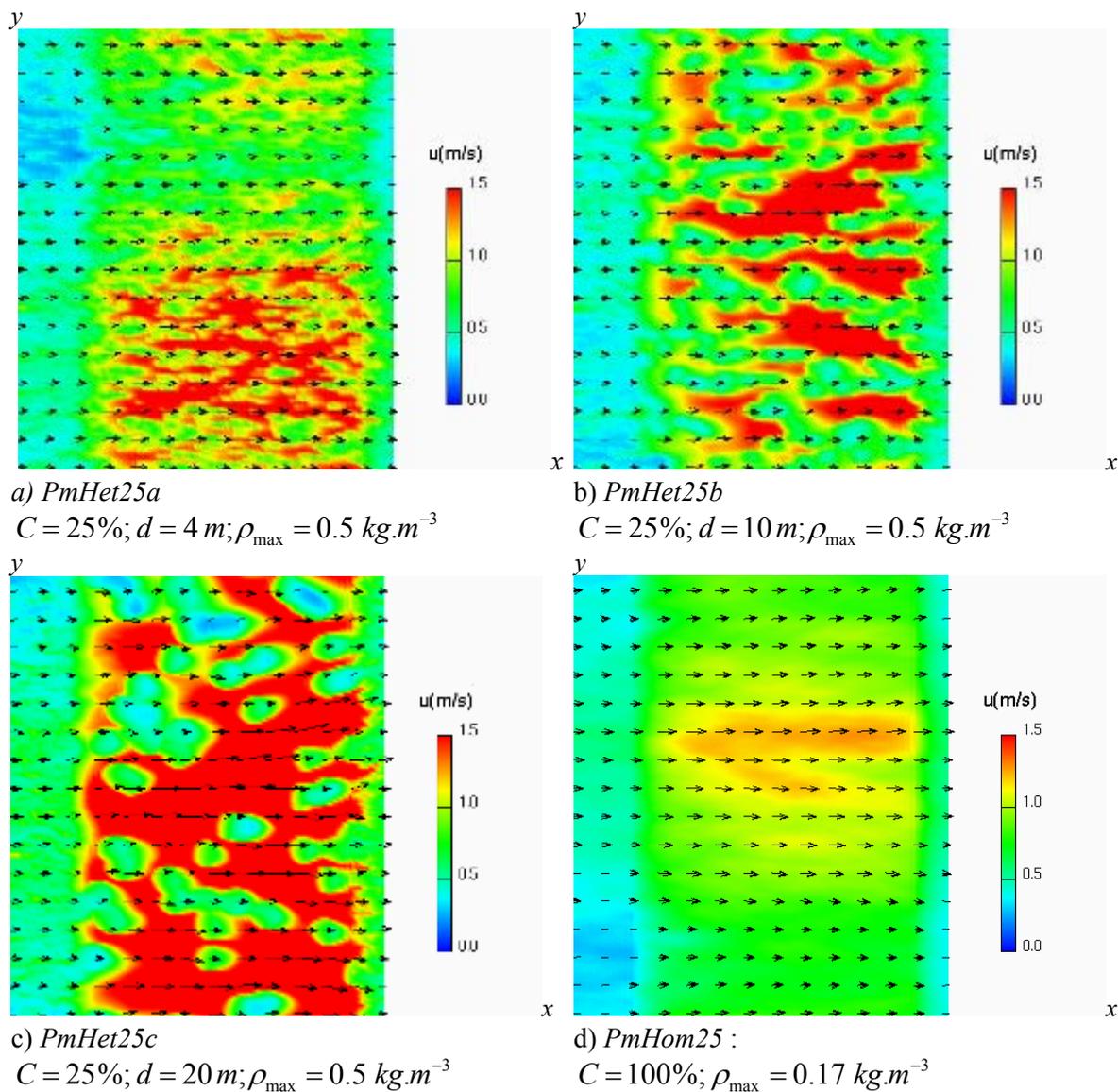


Fig. 3.32. Vue de dessus de la composante u de la vitesse à une hauteur de $z=9.6\text{ m}$ pour l'écosystème à pin Maritime

Représentation de l'hétérogénéité spatiale induite par la structure de la végétation

Les vues de dessus des **Fig. 3.26** et **3.27** suggèrent que les hétérogénéités spatiales observées dans les champs de vitesse des cas *a*, *b* et *c* sont dues à l'hétérogénéité spatiale de la végétation, mais leur amplitude est restreinte. Si l'on compare des vues de dessus de l'écoulement moyen sur les coupures dans des cas où la taille caractéristiques de l'élément de végétation est différente, on observe cette fois des patrons spatialement très hétérogènes (**Fig. 3.32** et **3.33**). Nous nous intéressons ici à l'influence sur la variabilité spatiale. On observe que plus la taille des hétérogénéités est grande (plus la taille des trouées est grande), plus les accélérations du vent concernent des zones connexes étendues. A l'inverse, dans le cas homogénéisé (**Fig. 3.32d** et **3.33d**), de tels couloirs de vent sont absents.

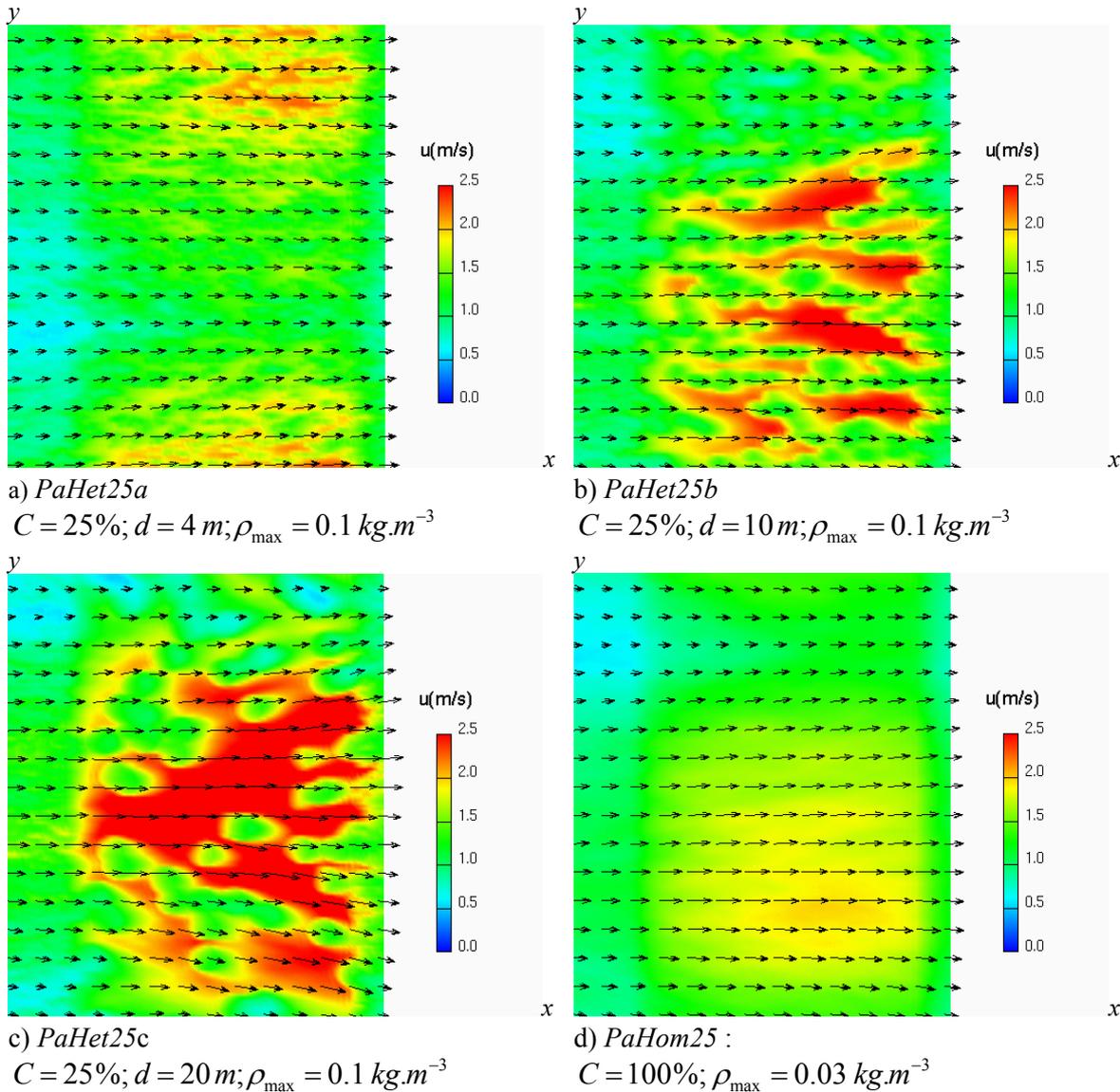
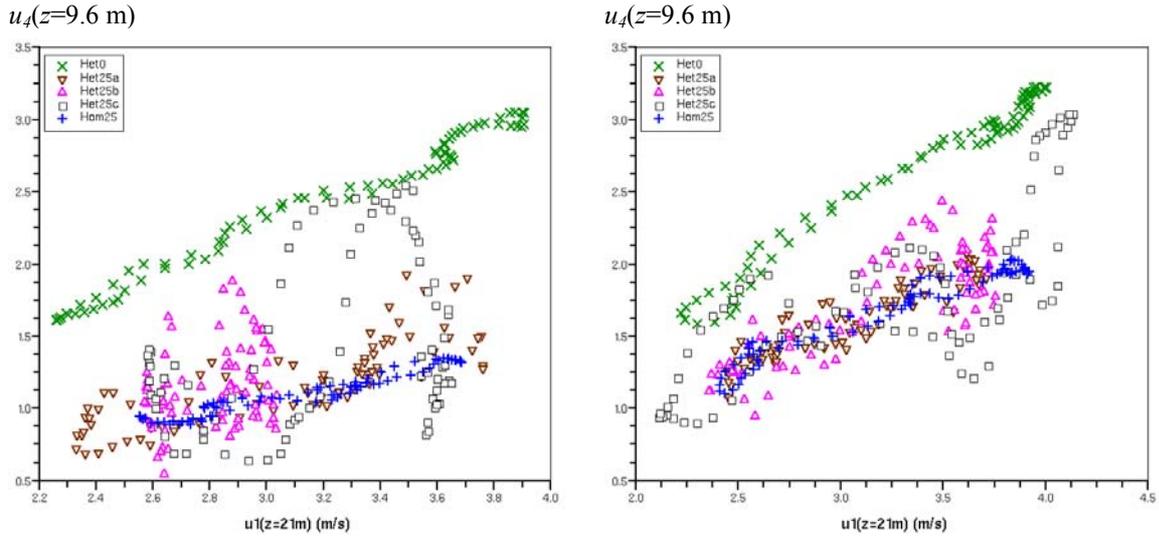
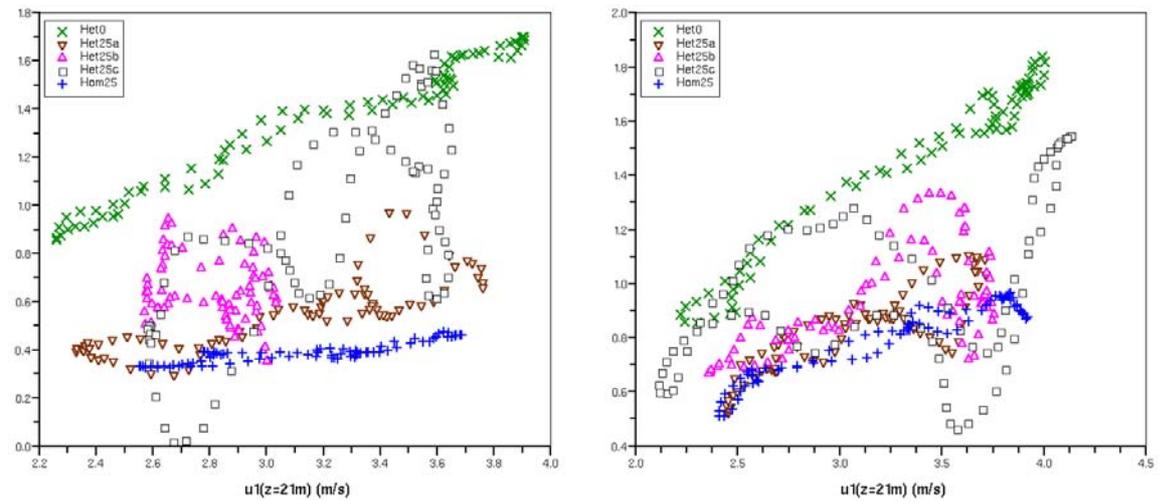


Fig. 3.33. Vue de dessus de la composante *u* de la vitesse à une hauteur de $z=9.6\text{ m}$ pour l'écosystème à pin d'Alep



a) $z=9.6$ m (Pin Maritime)
 $u_j(z=2.3 m)$

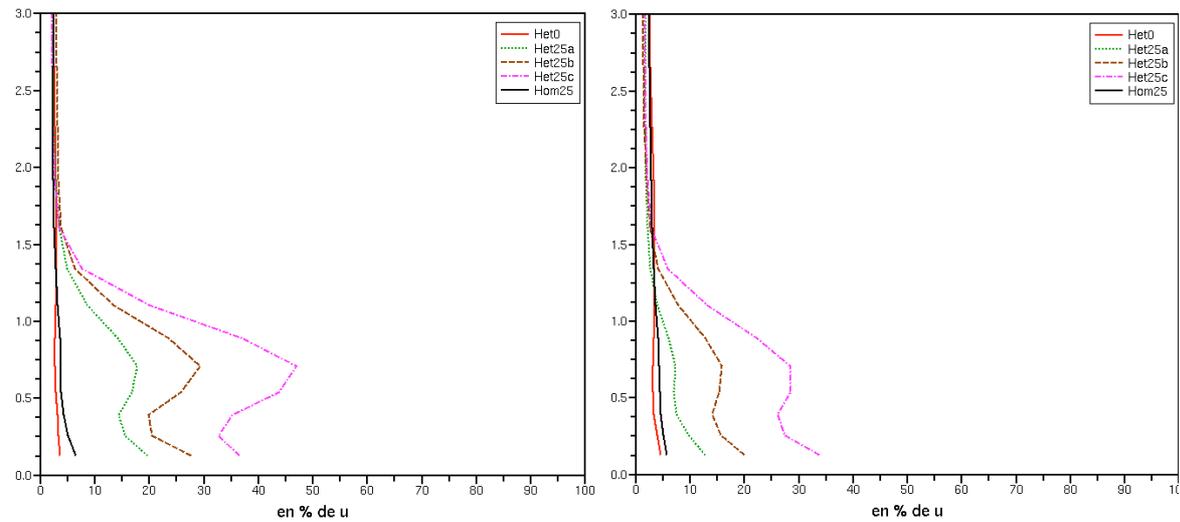
b) $z=9.6$ m (Pin d'Alep)
 $u_j(z=2.3 m)$



c) $z=2.3$ m (Pin Maritime)

d) $z=2.3$ m (Pin d'Alep)

Fig. 3.34. Correspondances entre les vitesses du vent moyen dans la coupure, en P_{4j} ($x=336$ m) avec les vitesses moyennes en P_{1j} ($x=160$ m $z=2h$) pour les différentes valeurs de j z/h



a) Pin Maritime

b) Pin d'Alep

Fig 3.35. Variabilité spatiale du champ de vitesse associée à la variabilité spatiale du combustible (P_{14} ; $x=336$ m)

Quantification des effets de l'hétérogénéité spatiale induite par la structure de la végétation

La quantification de cette variabilité spatiale due aux hétérogénéités de la végétation est rendue plus complexe par l'existence des « streaks ». En effet, les composantes moyennes de la vitesse varient selon l'axe des y à cause de la variabilité spatiale de la végétation, mais aussi à cause des « streak ».

Il est cependant possible d'isoler la « tendance » due aux streaks, du bruit dû à la variabilité spatiale. La **Fig. 3.34** représente, pour les deux écosystèmes, la vitesse moyenne du vent dans la coupure (au point $P_{4,j}(z)$ pour $z=2.3$ m et $z=9.6$ m) en fonction de la vitesse du vent en $P_{1,j}(2h)$, pour les différents valeurs de j . Cette dernière vitesse constitue une référence de la vitesse de l'écoulement qui entre sur la coupure en intégrant les streaks. On observe de fortes corrélations lorsque la coupure est homogène (*Het0*, *Hom25*) et des corrélations nettement plus mauvaises lorsque la coupure est hétérogène (*Het25a*, *Het25b*, *Het25c*). Nous associons le bruit autour de la tendance, à la variabilité due à la variabilité spatiale de la canopée.

La tendance due aux streaks peut être éliminée en retranchant aux valeurs obtenues en $P_{4,j}$ l'ajustement linéaire fonction de $P_{1,j}$. Il devient possible d'évaluer la variabilité due à la variabilité spatiale de la végétation. La **Fig. 3.35** représente l'écart type des variabilités de la composante u de la vitesse à 136 m du début de la coupure, après élimination de la tendance due aux streaks. L'écart type est représenté en pourcentage de la valeur moyenne de la composante u de la vitesse. On observe une variabilité ayant des valeurs inférieures à 5 % dans les zones où la végétation est absente (au dessus de la canopée) ou dans celles où celle-ci est homogène (cas *Het0* ou *Hom25*) et des valeurs qui peuvent atteindre 30 % dans la canopée pour les cas pour lesquels l'hétérogénéité est la plus marquée (*Het25c*). Notons également que cette variabilité augmente avec la taille des hétérogénéités. Enfin, les valeurs obtenues sont légèrement inférieures dans l'écosystème le moins dense (Pin d'Alep).



1. Satellite picture of organized boundary-layer clouds during a cold air outbreak over the North Sea. NOAA 7, AVHRR, 6.4.1988.

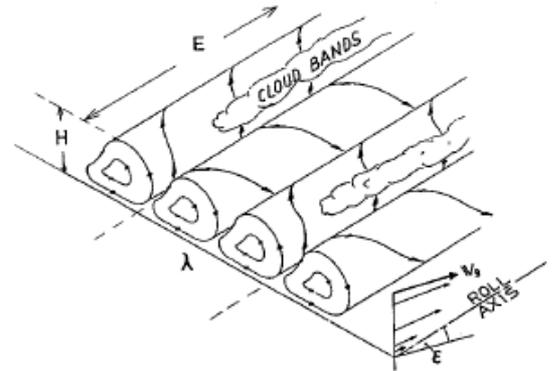


Fig. 2. Schematic of organized large eddies (horizontal roll vortices) in the PBL.

Fig. 3.36. Roll Vortices et nuages (Etling & Brown 1993)

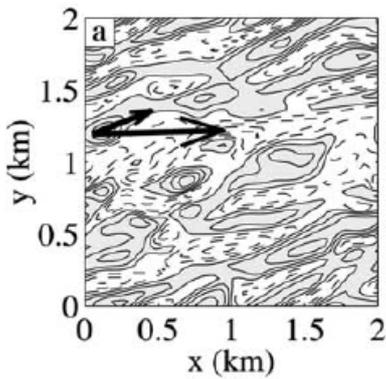


Fig. 3.37. Isocontour du champ des vitesses à 20 mètre de haut (Drobinski & Foster 2003)

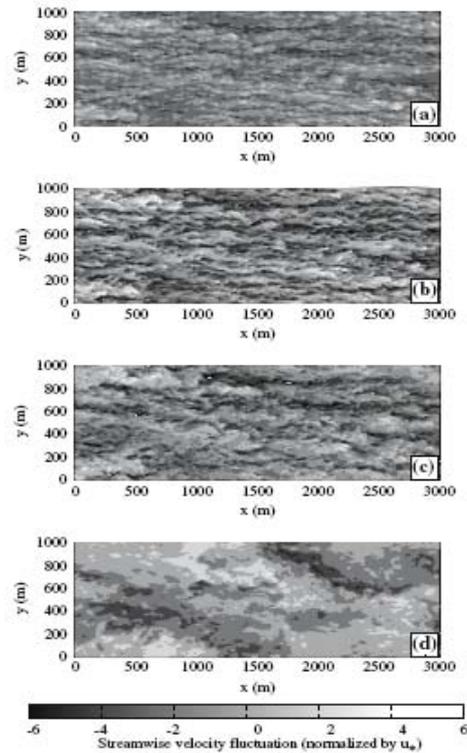


Figure 2. Snapshot of horizontal cross-sections (x - y) of the turbulent longitudinal (or streamwise) velocity u at $z=9$ m (a), $z=28$ m (b), $z=47$ m (c) and $z=153$ m (d). Negative u appears in dark shading and positive u in light shading.

Fig. 3.38. Streaks représentées à différentes altitudes (Foster *et al.* 2006)

4.4. Discussion

« Roll vortices » et « Streaks »

Les Roll vortices sont de grands vortex typiques de la PBL²⁷ évoluant dans un plan perpendiculaire à l'écoulement moyen, qui sont responsables de la formation de couloirs de nuages parallèles (Etling & Brown 1993, **Fig. 3.36**). Ils apparaissent principalement en atmosphère instable et plus rarement en atmosphère neutre. Le mécanisme associé à ces structures est le cisaillement. En cas d'atmosphère neutre, il peut générer une instabilité dite instabilité parallèle. Cependant, cette instabilité a été reproduite de manière transitoire en simulation LES (Deardorff 1972). Ces structures peuvent durer de quelques heures à plusieurs jours.

Les streaks sont des alternances de couloirs où la vitesse est faible et de couloirs où la vitesse est élevée dans la basse atmosphère. Ces structures se développent en condition neutre ou stable et ont tendance à disparaître en conditions instables. Les streaks sont associées à une forte rugosité du sol qui induit le cisaillement. Le mécanisme associé à la formation des streaks serait le blocage des tourbillons au voisinage du sol (Drobinski & Foster 2003). Leur espacement latéral est de l'ordre de plusieurs centaines de mètres et dépend de la vitesse de frottement (Deardorff 1972 ; Moeng & Sullivan 1994 ; Lin *et al.* 1996 ; Drobinski & Foster 2003). Elles se forment, évoluent et déclinent sur des périodes de temps relativement courtes et se reconstituent rapidement : leur échelle de temps typique est de l'ordre de quelques dizaines de minutes (Foster 1997 ; Lin *et al.* 1996 ; Drobinski *et al.* 1998 ; Drobinski & Foster 2003).

Des auteurs observent des streaks avec des simulations LES (**Fig. 3.37** et **3.38**, par exemple). Pour bien représenter ces structures, il est nécessaire d'utiliser des domaines importants (plusieurs kilomètres). A des échelles similaires à celle utilisée dans nos calculs, Watanabe (2004) observe des structures qu'il interprète comme étant des « streaks » au-dessus de son couvert (p 325, bas du premier paragraphe de la section 3.6.2). Dupont & Brunet (2007) observent également ces structures avec ARPS. Cependant, pour reproduire les phénomènes d'effondrement des streaks, il apparaît qu'il est nécessaire de simuler des domaines plus grands, notamment en ayant recours à de l'emboîtement de domaines (Dupont, communication personnelle). Dans nos simulations, comme dans celles de Watanabe (2004) ou Dupont & Brunet (2007), la dimension transversale du domaine est vraisemblablement insuffisante pour reproduire des streaks ayant un comportement parfaitement naturel. Il en résulte qu'à l'échelle de temps et d'espace où nous travaillons, ces streaks sont assez lents à se déplacer. Une solution à envisager à l'avenir est de réaliser de l'emboîtement de domaine de manière à s'abstraire des conditions limites périodiques. C'est ce que Sylvain Dupont réalise actuellement avec ARPS et les streaks qu'il obtient présentent des phases de développement et d'effondrement. Il faut noter que HIGRAD/FIRETEC a déjà été utilisé en couplage avec un modèle méso-échelle (COAMPS et RAMS, voir chapitre 0).

L'existence des streaks et le fait que HIGRAD/FIRETEC soit capable de les reproduire, même imparfaitement, illustrent l'intérêt de l'usage de modèles physiques susceptibles de représenter précisément les comportements atmosphériques de la basse couche de l'atmosphère. Par ailleurs, il faut noter que certains incendies produisent des dégâts sous forme de couloirs très réguliers (**Fig. 3.39**). Les streaks et leur interaction avec le panache sont susceptibles de jouer un rôle dans l'origine de ces couloirs.

²⁷ PBL : Planetary Boundary Layer



Fig. 3.39. Présence de couloir de dégâts (« crown streets »)

Le cas des très petites hétérogénéités

Les hétérogénéités à l'échelle de la pousse et plus généralement les hétérogénéités inférieures à 2 m n'ont pas été abordées dans cette partie. Nous n'avons en effet pas considéré qu'il soit souhaitable de se concentrer sur ces petites hétérogénéités et ceci pour plusieurs raisons.

D'abord, il faut noter que ces hétérogénéités sont en général largement inférieures aux distances caractéristiques liées aux forces de traînée. En effet, la distance caractéristique liée à la traînée est définie par :

$$l_D = \frac{2}{C_D \sigma_k \alpha_k} \quad (3.19)$$

Il en résulte que ces distances caractéristiques sont 2 à 4 fois supérieures à celles que l'on obtenait dans le cas du rayonnement. Cette longueur excède 5 m dans les canopées, ce qui incite à négliger toute forme d'hétérogénéité inférieure au mètre. De plus, le processus de cascade et l'effet de sillage se manifestent surtout par de la dissipation et des effets visqueux à ces échelles. On s'attend donc à un effet négligeable sur l'écoulement de la géométrie locale de la canopée.

Par ailleurs, un certain nombre de simulations numériques, dont celles réalisées avec FIRETEC (partie 3.3), ont été à même de reproduire fidèlement les données obtenues expérimentalement sur des canopées réelles, homogènes sur une large échelle, mais présentant une hétérogénéité locale (agrégation des feuilles autour des rameaux, feuilles de taille non négligeable...). Ceci laisse donc supposer que les effets induits par les toutes petites échelles sont soit correctement représentés par le modèle, soit négligeables. Dans tous les cas, les modèles de sous-maille existants dans les modèles LES paraissent suffisants pour reproduire correctement les champs à l'échelle de maille de 2 m. Enfin, les simulations numériques à très petites échelles qui ont été réalisées (Collin 2005) ont mis en évidence une très grande complexité numérique due au calcul explicite de la traînée (sur la base de formes géométriques et non sur la base d'une distribution de particules). Pour l'ensemble de ces raisons, nous avons décidé de ne pas explorer les effets d'hétérogénéités inférieures à 2 m (0.2h pour une canopée de 10 m de haut), c'est-à-dire de nous limiter à celles que l'on pouvait prendre en compte explicitement avec HIGRAD/FIRETEC sans raffinement supplémentaire du maillage.

Effet de la structure et du type de combustible sur l'écoulement

La diminution du recouvrement sur la coupure induit une accélération de l'écoulement moyen. Celui-ci peut être jusqu'à cinq fois plus rapide avec 25 % de recouvrement qu'avec 75 %. Cette accélération a lieu principalement dans les premiers 100 m de la coupure (8 à 10h). Ceci illustre simplement le fait qu'une diminution du recouvrement induit une réduction de la traînée moyenne qui assure donc une accélération de l'écoulement moyen. Cependant, à quantité de biomasse constante (*LAI* constant, donc traînée moyenne constante), on observe que la structure du combustible, du cas le plus homogène (qui correspond d'un point de vue théorique à des hétérogénéités infiniment petites, *Hom25*) aux plus grandes taches (*Hetc*), influe sur l'écoulement moyen. Celui-ci est en effet d'autant plus rapide que les agrégats sont gros. Puisque le recouvrement est constant, plus les agrégats sont importants et plus les trouées sont grandes. Les larges trouées laissent davantage pénétrer l'écoulement dans la canopée, alors que les plus petites (4 m pour *Heta*) se comportent de manière beaucoup plus proche du cas homogène. Cependant, ces différences ne sont significatives que pour les recouvrements faibles. En effet, pour un recouvrement de 75 % dans la partie témoin, aucune différence significative n'est observée entre le cas *Het25a* et le cas *Hom25* (**Fig. 3.25**), ce qui illustre qu'avec des recouvrements élevés, les variations locales de la structure du combustible n'ont qu'une faible influence. Ce résultat est conforme avec les observations de Patton (1997), dont les travaux dans des couverts denses ont montré que l'individualisation des couronnes d'arbres ne modifiait pas significativement les résultats de simulation par rapport au modèle de couvert parfaitement homogène.

A faible recouvrement, l'hétérogénéité spatiale de la végétation agit sur l'écoulement moyen, mais elle introduit également une hétérogénéité spatiale dans l'écoulement. En effet, les trouées étant de l'ordre de 1 à 5*h*, l'écoulement est alors tridimensionnel (Lee 2000). Dans nos simulations, l'amplitude de ces variations spatiales est significative, du même ordre de grandeur que celles qui peuvent être générées par les « streaks » par exemple. La méthode que nous avons mise en œuvre pour éliminer la tendance due aux « streaks » permet de quantifier cette variabilité spatiale. Nous avons ainsi mis en évidence que cette variabilité s'accroissait avec la taille des agrégats et que celle-ci présentait un pic au deux tiers de la hauteur de la canopée.

Tout au long de cette étude, nous avons comparé deux écosystèmes typiques du bassin méditerranéen : l'écosystème à pin d'Alep (peu dense) et l'écosystème à pin Maritime (dense). Pour un recouvrement égal, la traînée est deux fois et demie plus élevée dans l'écosystème à pin Maritime que dans celui à pin d'Alep. Cette différence se manifeste sur chacune des différentes composantes étudiées : la vitesse moyenne et la turbulence sont plus fortes dans le pin d'Alep, alors que l'inflexion du profil de vitesse est nettement moins marquée ; l'accélération entre la zone forêt témoin et la coupure à 25 % est moins forte dans le cas de la canopée de pin d'Alep (accélération d'un facteur 3 dans le pin d'Alep contre un facteur 5 dans le pin Maritime) ; par ailleurs, l'influence des structures spatiales est nettement moins marquée dans les forêts de pins d'Alep, que ce soit du point de vue de l'écoulement moyen, ou de l'hétérogénéité spatiale de l'écoulement.

Recommandations en matière de description du combustible

Les comparaisons entre combustibles homogénéisés et combustibles hétérogènes permettent de mettre en évidence les échelles de descriptions pertinentes pour reproduire correctement l'écoulement. En effet, lorsque les caractéristiques des écoulements des combustibles hétérogènes deviennent significativement différentes de celles des combustibles homogénéisés, cela signifie qu'une description de la végétation sous forme de combustible homogène devient insuffisante. Il apparaît que pour un recouvrement supérieur à 75 %, les différences entre canopées homogénéisées et canopées hétérogènes sont négligeables. Une description individualisée des enveloppes des houppiers n'est donc pas nécessaire pour de tels recouvrements. En revanche, les différences sont déjà significatives à 50 % et peuvent devenir très importantes en dessous de 25% de recouvrement. On notera également que les différences avec l'homogénéisé s'accroissent avec la taille des hétérogénéités (**Fig. 3.14**). Enfin, les faibles différences constatées entre le cas des hétérogénéités de 4 m et le cas homogénéisé sont assez faibles. Ceci nous conforte donc dans le fait que les hétérogénéités inférieures à 2 m sont négligeables.

Il apparaît donc que pour reproduire les écoulements avec un bon niveau de précision, il est nécessaire de décrire les canopées avec sur un maillage fin (de 2 m) dès lors que le recouvrement devient inférieur à 50 % et que les tailles caractéristiques des hétérogénéités excèdent 5 m. On notera que la précision de la description peut même être inférieure dans le cas d'écosystèmes peu denses comme dans celui à pin d'Alep, où la description fine n'apparaît nécessaire que pour les recouvrements inférieures à 40 % et les hétérogénéités de taille caractéristique supérieure à 10 m.

5. Conclusion

Le présent chapitre nous a conduit à mener une analyse bibliographique détaillée des écoulements dans la basse couche de l'atmosphère et de la manière de les modéliser. En s'appuyant sur les données expérimentales disponibles, nous avons validé le comportement du modèle HIGRAD/FIRETEC. Ce modèle s'avère en effet capable de résoudre explicitement les écoulements dans des canopées, y compris dans la situation complexe d'une coupure.

Fort de cette validation, nous avons conduit une série de simulations d'écoulements sur des coupures de combustible présentant différentes structures. Nous mettons en évidence que plus les canopées sont hétérogènes, plus l'écoulement moyen est rapide. En effet, la présence de trouées permet une meilleure pénétration de l'écoulement moyen dans la végétation. Ces effets sont d'autant plus importants que l'hétérogénéité spatiale est marquée (faible recouvrement, grande taille d'hétérogénéité). Ce résultat est à rapprocher du fait que les canopées hétérogènes transmettent mieux l'énergie par rayonnement que les canopées homogènes et que les effets de l'hétérogénéité y sont plus importants dans les canopées denses, à faible recouvrement et gros agrégats.

Ce chapitre illustre que les hétérogénéités spatiales sont susceptibles d'affecter l'écoulement de manière significative en l'absence de feu, et donc de modifier l'écoulement incident en présence de feu. Cependant, il est impossible à ce stade de conclure sur les effets combinés de l'hétérogénéité sur le rayonnement, l'écoulement incident et le panache lui-même. L'objectif du prochain chapitre est donc d'intégrer ces mécanismes grâce à FIRETEC, en réalisant des simulations de propagation du feu dans des configurations similaires à celles du présent chapitre. Les champs de vent calculés y seront utilisés pour spécifier les conditions ambiantes.

Bibliographie

- Albertson JD, Katul GG, Wiberg P (2001) Relative importance of local and regional controls on coupled water, carbon and energy fluxes. *Advances in Water Resources* **24**, 1103-1118.
- Albini FA (1985) A Model for Fire Spread in Wildland Fuels by Radiation. *Combustion Science and Technology* **42**, 229-258.
- Albini FA (1986) Wildland fire spread by radiation-a model including fuel cooling by natural convection. *Combustion Science and Technology* **45**, 101-112.
- Alvarez G, Flick D (1999) Analysis of heterogeneous cooling of agricultural products inside bins Part I : Aerodynamic study. *Journal of food engineering* **39 (3)**, 227-237.
- Amiro BD (1990) Comparison of turbulence statistics within three boreal forest canopies. *Boundary-Layer Meteorology* **51**, 99-121.
- Andrews PL (1986) "BEHAVE: Fire behaviour prediction and fuel modelling system – BURN subsystem, part 1". USDA Forest Service, Research paper INT-194. 130p.
- Ayotte KW, Finnigan JJ, Raupach MR (1999) A second order closure for neutrally stratified vegetative canopy flows. *Boundary-layer Meteorology* **90 (2)**, 189-216.
- Bossert JE, Linn RR, Reisner J, Winterkamp J, Dennison P, Roberts D (2000). Coupled atmosphere-fire behaviour model sensitivity to spatial fuels characterisation. In Third Symposium on fire and Forest Meteorology, 9-14 January 2000, Long Beach, California., pages 21-26. American Meteorological Society.
- Bradley M (2002) This model can take the heat. *Science and Technology Review*. <http://www.llnl.gov/str/November02/Bradley.html>
- Brunet Y, Finnigan JJ, Raupach MR (1994) A wind tunnel study of air flow in waving wheat: single-point velocity statistics. *Boundary-Layer Meteorology* **70**, 95–132.
- Brunet Y, Irvine MR (2000) The control of coherent eddies in vegetation canopies : streamwise structure spacing, canopy shear scale and atmospheric stability. *Boundary-Layer Meteorology* **94**, 139-163.
- Brunet Y (2000) Vent et turbulence en peuplements forestiers homogènes et hétérogènes. Journées d'études « la tempête, l'arbre et la forêts », 3 et 4 mai 2000, Bordeaux.
- Butler B, Forthofer J, Finney M, McHugh C, Stratton R, Bradshaw L (2006) 'The impact of high resolution wind field simulations on the accuracy of fire growth predictions.' V International Conference on Forest Fire Research. D. X. Viegas (Ed.), 2006.
- Catchpole WR, Catchpole EA, Butler BW, Rothermel RC, Morris CA, Latham DJ (1998) Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel. *Combustion Science and Technology* **131**, 1-37.
- Cescatti A, Marcolla B (2004) Drag coefficient and turbulence intensity in conifer canopies. *Agricultural and forest meteorology* **121**, 197-206.
- Chen JM, Black TA, Novak MD, Adams RS (1995) A wind tunnel study of turbulent airflow in forest clearcuts. In : Coutts MP, Grace J (Eds.), *Wind and Trees*. Cambridge University Press, pp. 71-87.
- Chen CY, Wang LL, Kurosaki Y (2002) Numerical simulations of heat transfer in porous media with effect of heterogeneities. *JSME International journal series B-fluids and thermal engineering* **45 (2)**, 315-312.
- Cheney NP, Gould JS, Catchpole WR (1998) Prediction of fire spread in grasslands. *International Journal of Wildland Fire* **8 (1)**, 1-13.
- Colineau S (1993) Etude expérimentale des mouvements cohérents turbulents au voisinage des couverts végétaux. Thèse.
- Colin PH. 2005. Evaluation numérique et expérimentale des effets de la structure de la végétation sur l'écoulement de la couche de surface atmosphérique. Thèse de l'Université de la Méditerranée Aix Marseille II. 246 pp.
- Crawley DM, Nickling WG (2003) Drag partition for regularly-arrayed rough surfaces. *Boundary-Layer Meteorology* **107**, 445-468.
- Cruz MG (2004) 'Ignition of crown fuels above a spreading surface fire'. Ph.D. Thesis, University of Montana, Missoula, MT. 240 p.
- Cunningham P, Goodrick SL, Hussaini MY, Linn RR (2005) Coherent vortical structures in numerical simulations of buoyant plumes from wildland fires. *International Journal of Wildland Fire* **14**, 61-75
- Deardorff JW (1972) Parameterization of the planetary boundary layer use in general circulation models. *Mon. Wea. Rev.* 93-106.
- Deardorff JW (1980) Stratocumulus-capped mixed layers derived from Three-Dimensional Model. *Boundary-Layer Meteorology* **18**, 495-527.
- Detering HW, Etling D (1985) Application of the E-ε turbulence model to the atmospheric boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology* **33**, 113-133.
- Dobinski P, Brown RA, Flamant PH, Pelon J (1998) Evidence of organized large eddies by ground-based Doppler lidar, sonic anemometer and solar. *Boundary-Layer Meteorology* **88(3)**, 343-361.

- Drobinski P, Foster RC (2003) On the origin of near-surface streaks in the neutrally-stratified planetary boundary layer. *Boundary Layer and Meteorology* **108** (2), 247-256.
- Dupont S, Brunet Y (2006) Simulation of turbulent flow in an urban forested park damaged by a windstorm. *Boundary-Layer Meteorology* **120**, 133-161.
- Dupont S, Brunet Y (2007a) Influence of foliar density profile on canopy flow: a large-eddy simulation study. *Agricultural and Forest Meteorology* (submitted).
- Dupont S, Brunet Y (2007b) Edge flow and canopy structure: a large-eddy simulation study. *Boundary-Layer Meteorology* (accepted).
- Dwyer MJ, Patton EG, Shaw RH (1997) Turbulent kinetic energy budgets from a LES of airflow above and within a forest canopy. *Boundary-layer meteorology* **84** (1), 23-43.
- Etling D, Brown RA. 1993. Roll Vortices in the Planetary Boundary Layer: A Review. *Boundary-Layer Meteorology* **21**, 215-248.
- Finnigan JJ, Brunet Y (1995) Turbulent airflow in forests on flat and hilly terrain. Wind and trees, edited by MP Coutts and J. Grace. Cambridge University Press.
- Finnigan J (2000) Turbulence in plant canopies. *Annual review of fluid mechanics* **32**, 519-571.
- Finnigan JJ, Belcher SE (2004) Flow over a hill covered with a plant canopy. *Quarterly journal of the royal meteorological society* **130** (596), 1-29.
- Fitzmaurice Li, Shaw RH, Paw UKT, Patton EG (2004) Three-dimensional scalar microfront systems in a LES of vegetation canopy flow. *Boundary-Layer Meteorology* **112**, 107-127.
- Foster RC (1997) Structure and energetics of optimal Ekman layer perturbations. *Journal of fluid mechanics* **333**, 97-123.
- Foster RC, Vianey F, Drobinski P, Carlotti P. 2006. Near-surface coherent structures and the vertical momentum flux in a large-eddy simulation of the neutrally-stratified boundary layer. *Boundary-Layer Meteorology* **120**, 229-255.
- Foudhil H, Brunet Y, Caltagirone JP (2005) A fine-scale k- ϵ model for atmospheric flow over heterogeneous landscapes. *Environmental Fluid Mechanics* **5** (3), 247-265.
- Gao W, Shaw RH, Paw UKT (1989) Observation of organised structures in turbulent flow within and above a forest canopy. *Boundary-Layer Meteorology* **47**, 349-377.
- Germano M, Piomelli U, Moin P, Cabot WH (1991) A Dynamic Subgrid-Scale Eddy Viscosity Model. *Physics of Fluids A*, 3(7), 1760-1765.
- Gillies JA, Nickling WG, King J (2002). Drag coefficient and plant form response to wind speed in three plant species: Burning bush (*Euonymus alatus*), Colorado Blue Spruce (*Picea pungens glauca.*), and Fountain Grass (*Pennisetum setaceum*). *Journal of geophysical research-atmospheres* **107** (D24), art 4760.
- Green SR (1992) Modelling Turbulence Air Flow in a Stand of Widely-Spaced Trees, *PHOENICS, J. Comp. Fluid Dynamics Applications* **5**, 294-312.
- Guan D, Zhang Y, Zhu T (2003) A wind-tunnel study of windbreak drag. *Agricultural and forest Meteorology* **118**, 75-84.
- Hopwood WP (1996) Observations and parametrization of momentum transfer in heterogeneous terrain consisting of regularly spaced obstacles. *Boundary layer meteorology* **81** (3-4), 217-243.
- Jimenez J, Moser RD (1998) LES : Where are we and what can we expect ? Paper 98-2891, AIAA. (Cité par Pope 2000)
- Kaimal JC, Finnigan JJ (1994) Atmospheric boundary layer flows. Their structure and measurements. Oxford University Press, New-York, 289 pp.
- Kanda M, Hino M (1994) Organized structures in developing turbulent-flow within and above a plant canopy, using a LES. *Boundary-layer meteorology* **68** (3), 237-257.
- Katul GG, Albertson JD (1998) An investigation of higher-order closure models for a forested canopy. *Boundary-Layer Meteorology* **89**, 47-74.
- Kuznetsov AV, Nield DA (2001) Effects of heterogeneity in forced convection in a porous medium : Triple layer or conjugate problem. *Numerical heat transfer part A- Applications* **40** (4), 363-385.
- Launder BE, Sharma BI (1974) Application of the energy-dissipation model of turbulence to the calculation of flow near a spinning disc. *Lett.Heat Mass Transf* **1**, 131-138.
- Launder BE (1990) Phenomenological modelling : present... and future ? In Lumney, JL. Whither turbulence? Turbulence at the crossroads. Springer-Verlag
- Lee X (2000) Air motion within and above forest vegetation in non-ideal conditions. *Forest ecology and management* **135**, 3-18.
- Li Z, Lin JD, Miller DR (1990) Air flow over and through a forest edge: a steady state numerical simulation. *Boundary Layer and Meteorology* **51**, 179-197.
- Lin CL, McWilliams JC, Moeng CH, Sullivan PP (1996) Coherent structures in a Neutrally-Stratified Planetary Boundary Layer. *Physic Fluids* **8**, 2626-2639.

- Linn RR, Cunningham P (2005) Numerical simulations of grass fires using a coupled atmosphere-fire model: basic fire behavior and dependence on wind speed. *Journal of Geophysical Research* **110**, D13107. 19pp.
- Linn RR, Canfield J, Winterkamp J, Cunningham P, Colman JJ, Edminster C, Goddrick SL (2005b) 'Numerical Simulations of Fires Similar to the International Crown Fire Modeling Experiment.' In: Proceedings of the Sixth Symposium on Fire and Forest Meteorology, American Meteorological Society, Canmore, Alberta, 25-27 October.
- Liu J, Chen JM, Black TA, Novak MD (1996) E- ϵ modelling of turbulent air flow downwind of a model forest edge. *Boundary-Layer Meteorology* **77**, 21-44.
- Lopez DL, Smith L (1996) Fluid flow in fault zones : Influence of hydraulic anisotropy and heterogeneity on the fluid flow and heat transfer regime. *Water resources research* **32** (10), 3227-3235.
- Lu CH, Fitzjarrald DR (1994) Seasonal and diurnal variations of coherent structures over a deciduous forest. *Boundary-Layer Meteorology* **69**, 43-69.
- Marcolla B, Pitacco A, Cescatti A (2003) Canopy architecture and turbulence structure in a coniferous forest. *Boundary-Layer Meteorology* **108**, 39-59.
- Meyers TP, Paw U KT (1986) Testing of a higher-order closure model for airflow within and above plant canopies. *Agriculture and Forest Meteorology* **37**, 297-311.
- Meyers TP, Baldocchi DD (1991) The budget of turbulent kinetic energy and momentum flux within and above a forest canopy. *Agriculture and Forest Meteorology* **53**, 207-222.
- Moeng CH, Wyngaard JC (1988) Spectral analysis of large-eddy simulations of the convective boundary layer. *Journal of the Atmospheric Sciences* **45**, 3573-3587.
- Moeng CH, Sullivan PP (1994) A comparison of shear-driven and buoyancy-driven planetary boundary-layer. *Journal of the Atmospheric Sciences* **51** (7), 999-1022.
- Morse AP, Gardiner BA, Marshall BJ (2002) Mechanisms controlling turbulence development across a forest edge. *Boundary layer meteorology* **103**, 227-251.
- Morvan D, Dupuy JL (2001) Modeling of fire spread through a forest fuel bed using a multiphase formulation. *Combustion and flame* **127**, 1981-1994.
- Nearly VS (2003) Numerical solution of fully developed flow with vegetative resistance. *J. of Engineering mechanics* **129** (5), 558-563.
- Nield DA, Kuznetsov AV (2003) Effects of gross heterogeneity and anisotropy in forced convection medium : layered medium analysis. *Journal of Porous Media* **6** (1), 51-57.
- Novak MD, Warland JS, Orchansky AL, Ketler R, Green S (2000) Wind tunnel and field measurements of turbulent flow in forests. Part I: uniformly thinned stands. *Boundary-Layer Meteorology* **95**, 457-495.
- Orszag SA, Staroselky I, Flannery WS, Zhang Y (1996) Introduction to renormalization group modeling of turbulence. In tB. Gatski, MY Hussaini and JL. Lumley. Simulation and Modeling of turbulent flows. Oxford University Press.
- Patton EG (1997). Large-Eddy Simulation of Turbulent Flow Above and Within a Plant Canopy. PHD Dissertation. University of California (Davis, USA). 145p.
- Patton EG, Shaw RH, Judd MJ, Raupach MR (1998) Large-eddy simulation of windbreak flow. *Boundary-Layer Meteorology* **87**, 275-306.
- Pimont F, Dupuy JL, Linn RR, Dupont S (2007) Wind-flows simulated with FIRETEC in a canopy and on a fuel-break. Soumis à *International Journal of Wildland Fire*.
- Poggi D, Katul GG, Albertson JD (2004a) Momentum transfer and turbulent kinetic energy budgets within a dense model canopy. *Boundary-Layer Meteorology* **111**, 589-614.
- Poggi D, Porporato A, Ridolfi L, Albertson JD, Katul GG (2004b) The effect of vegetation density on canopy sub-layer turbulence. *Boundary-Layer Meteorology* **111**, 565-587.
- Pope SB (2000) Turbulent flows. Cambridge University Press.
- Raupach MR, Bradley EF, Ghadiri H (1987) A wind tunnel Investigation Into Aerodynamic Effect of Forest Clearing on the nesting of Abbott's Boody on Christmas Island, Internal report, Csiro Centre for environmental Mechanics, Canberra.
- Raupach MR (1990) Similarity analysis of the interaction of bushfire plumes with ambient winds. *Math Comp. Modelling* Vol **13**. No **12**, 113-121.
- Raupach MR (1994) Simplified expressions for vegetation roughness length and zero plane displacement as functions of canopy height and area index. *Boundary-layer meteorology* **71**(1-2), 211-216.
- Raupach MR, Finnigan JJ, Brunet Y (1996) Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing-layer analogy. *Boundary-Layer Meteorology* **78**, 351-382.
- Rodi W, Ferziger JH, Breuer M, Pourquié M (1997) Status of large eddy simulation : results of a workshop. *Journal of Fluids Eng. Trans. ASME* **119**, 248-262. (cité par Pope 2000)
- Rothermel RC (1972) A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, General Technical Report INT-115, USDA Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.

- Shaw RH, Den Hartog G, Neumann HH (1988) Influence of Foliar Density and Thermal Stability on Profiles of Reynolds Stress and Turbulence Intensity in a Deciduous Forest. *Boundary-Layer Meteorology* **45**, 391-409.
- Shaw RH, Schumann U (1992) Large-eddy simulation of turbulent flow above and within a forest. *Boundary-Layer Meteorology* **61**, 47-64.
- Shaw RH, Patton EG (2003) Canopy element influences on resolved- and subgrid-scale energy within a large-eddy simulation. *Agricultural and Forest Meteorology* **115**, 5-17.
- Shen S, Leclerc MY (1997) Modeling the Turbulence Structure in the Canopy Layer. *Agricultural and Forest Meteorology* **87**, 3-25.
- Simms MA, Garven G (2004) Thermal convection in faulted extensional sedimentary basins : theoretical results from finite-element modelling. *Geofluids* **4 (2)**, 109-130.
- Su HB, Shaw RH, Paw UKT, Moeng CH, Sullivan PP (1998) Turbulent statistics of neutrally stratified flow within and above a sparse forest from large-eddy simulation and field observations. *Boundary-layer Meteorology* **88**, 363-397.
- Su HB, Shaw R H, Paw UKT (2000) Two-Point Correlation Analysis of Neutrally Stratified Flow Within and Above a Forest from Large-Eddy Simulation, *Boundary-Layer Meteorology* **94**, 423-460.
- Sugita F, Kishii T, Kuzuha Y, Yamanaka T (1998) A wind tunnel investigation of roughness properties over non homogeneous rough surfaces. *Hydrological processes* **12 (13-14)**, 2146-2161.
- Sullivan PP, McWilliams JC, Moeng CH (1994) A subgrid-Scale Model for Large-Eddy Simulation of Planetary Boundary-Layer flows. *Boundary-Layer Meteorology* **71**, 247-276 (Cité par Shaw 2003)
- Summita I, Olson P (2002) Rotating thermal convection experiments in a hemispherical shell with heterogeneous boundary heat flux : Implication for the Earth's core. *J Of Geophysical Research-Solid Earth* **107 (B8)**, Art 2169.
- Taylor PA (1988) Turbulent wakes in the boundary layer : 270-292. In Steffen, WL. Denmead, OT. Flow and transport in the Natural Environment : Advances and Applications, Springer-Verlag, Berlin.
- Van der Hoven I (1957) Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.007 to 900 cycles per hour. *Journal of Meteorology* **15**, 160-164.
- Vreman B, Geurts B, Kuerten H (1997) Large-eddy simulation of the turbulent mixing layer. *Journal of Fluid Mechanics* **339**, 357-390. (Cité par Pope 2000)
- Watanabe T (2004) Large-Eddy Simulation of Coherent Turbulence Structures Associated with Scalar Ramps Over Plant Canopies, *Boundary-Layer Meteorology* **112**, 307-341.
- Wilcox, DC. 1993. Turbulence modeling for CFD. La Canada, CA : DCW Industries
- Wilson NR, Shaw RD (1977) A higher order closure model for canopy flow. *Journal of Applied Meteorology* **16**, 1197-1205.
- Wilson JD, Finnigan JJ, Raupach MR (1998) A first-order closure for distributed plant-canopy flows, and its application to winds in a canopy on a ridge. *Quart. J Roy. Meteorol. Soc* **124**, 705-732.
- Wilson JD, Flesh TK (1999) Wind and Remnant Tree Sway in Forest Cutblocks. III. a Windflow Model to Diagnose Spatial Variation, *Agricultural and Forest Meteorology* **93**, 259-282.
- Yang B, Raupach M, Shaw RH, Paw UKT, Morse AP (2006a) Large-Eddy Simulation of Turbulent Flows across a forest edge: Part I, Flow Statistics. *Boundary-Layer Meteorology* **120**, 377-412.
- Yang B, Morse AP, Shaw RH, Paw UKT (2006b) Large Eddy Simulation of Turbulent Flow Across a Forest Edge. Part II: Momentum and Turbulence Kinetic Energy Budgets, *Boundary-Layer Meteorology* **121**, 433-457.

Chapitre 4. Comportement du feu dans des canopées hétérogènes avec FIRETEC

1. Introduction

Les résultats présentés au chapitre 1 ont mis en évidence un impact significatif des caractéristiques physiques de combustibles homogènes comme la fraction volumique, notamment en terme de vitesse de propagation et d'intensité du feu. La question de la propagation d'un feu dans un combustible spatialement hétérogène, c'est-à-dire dans un combustible de fraction volumique non constante dans l'espace, mérite donc d'être posée.

Elle correspond d'un côté à un enjeu théorique, puisque nous souhaitons déterminer :

- si les feux dans des combustibles hétérogènes seront plus ou moins rapides et intenses que des feux se propageant dans des combustibles de même fraction volumique moyenne,
- s'ils vont se propager en cime de la même manière,
- comment de grandes structures hétérogènes comme les coupures de combustible affectent le comportement du feu.

Elle correspond d'un autre côté à un enjeu pratique puisqu'il s'agit de fournir quelques éléments de réponses aux gestionnaires qui se posent des questions sur la manière d'aménager les coupures de combustibles. Il s'agit en effet d'affiner les préconisations en matière de description du combustible.

Au chapitre 2, nous avons abordé l'impact de l'hétérogénéité spatiale sur le transfert radiatif. Les travaux recensés dans la partie bibliographique montrent qu'un milieu turbide hétérogène tend à mieux transmettre l'énergie par rayonnement (énergie lumineuse par exemple). Cependant, dans le contexte de la propagation du feu, nous avons mis en évidence que ce n'était pas la transmission de l'énergie à longue distance qui était le mécanisme dominant. En effet, l'effet d'écran qui a lieu dans les agrégats, réduit l'irradiance à courte distance. Si l'on intègre les résultats obtenus à courte distance et à longue distance, on observe que l'effet à courte distance domine. Il en résulte que, du point de vue du transfert radiatif, les milieux hétérogènes sont moins favorables à la propagation du feu. Ces effets sont d'autant plus marqués que l'hétérogénéité est forte ; ils augmentent avec la densité et la taille des agrégats et diminuent avec leur recouvrement.

Au chapitre 3, nous avons traité l'impact de l'hétérogénéité spatiale sur les écoulements moyens, en l'absence de feu. Nous avons mis en évidence que plus les canopées sont hétérogènes plus l'écoulement moyen est rapide. En effet, la présence de trouées permet une meilleure pénétration de l'écoulement moyen dans la végétation. Ces effets sont d'autant plus marqués que l'hétérogénéité est forte (faible recouvrement, grande taille d'hétérogénéité). Le travail réalisé dans ce chapitre a donc permis de mettre en évidence et de quantifier les effets de la structure spatiale sur l'écoulement. On peut dresser un parallèle entre ces résultats et la transmission de l'énergie par rayonnement dans les canopées hétérogènes : en effet, de même que l'écoulement moyen est plus rapide dans les canopées hétérogènes que dans les canopées homogènes, l'énergie est davantage transmise à longue distance dans les canopées hétérogènes que dans les canopées homogènes. Pourtant, dans le cas du transfert radiatif, cet effet était contre-balançé par la réduction de la transmission à courte distance au sein des agrégats de végétation. On retrouve un phénomène comparable dans le cas des écoulements ; en effet, nous avons observé que si l'écoulement moyen est plus rapide en présence d'hétérogénéité, les valeurs de vitesse de vent au sein des agrégats ont tendance à être plus faibles que dans les canopées homogènes. Or c'est notamment au sein de ces agrégats que le feu va se propager. Le comportement du feu va donc dépendre de l'équilibre entre vent incident plus fort en moyenne et vent au sein des agrégats plus faible. Contrairement au cas du rayonnement (chapitre 2), nous n'avons pas intégré ces effets pour évaluer leur importance respective. En effet, l'écoulement est très fortement affecté par le feu lui-même. Il apparaît donc illusoire d'intégrer les effets obtenus sur l'écoulement en l'absence de feu.

Les approches présentées dans ces chapitres 2 et 3 ont le mérite de proposer des mécanismes explicatifs qui permettent de mieux comprendre l'évolution de l'environnement physique dans un contexte hétérogène. Cependant, elles n'intègrent pas les modifications de la source (et notamment la flamme) induites par la structure du combustible. En particulier, plus le recouvrement d'une strate est faible, moins celle-ci va participer à la propagation du feu de manière active, donc moins celle-ci est susceptible d'agir sur son comportement. Une approche intégrant l'impact de l'hétérogénéité sur les transferts radiatif et convectif, ainsi que sur la source est donc nécessaire pour évaluer les effets globaux.

Nous présentons donc ici des simulations réalisées avec FIRETEC dans des combustibles hétérogènes afin de fournir une réponse intégrée. Un enjeu de ce chapitre sera de déterminer si finalement, l'hétérogénéité favorise ou non la propagation et de proposer des échelles de description adaptées pour le combustible. Ces simulations de propagation du feu sont réalisées sur les configurations de coupures de combustible préalablement étudiées au chapitre 3, partie 4 ; les champs de vent que nous avons calculé sont utilisés comme conditions ambiantes pour la présente étude. Ces configurations hétérogènes permettent à la fois de comparer le comportement du feu sur des zones de recouvrement et de tailles de taches de végétation variées, mais elles permettent également d'envisager les effets d'hétérogénéités à l'échelle du paysage, comme les coupures de combustible, ainsi que le comportement du feu au niveau de ces transitions.

Tableau 4.1. Caractéristiques physiques du combustible

	Densité (kg.m ⁻³)	Rapport surface /volume σ (m ⁻¹)	Teneur en eau (%)	Bas de la canopée (m)	Hauteur (m)
Canopée: Pin d'Alep	0.1	10000	100	4.75	12
Pin Maritime	0.5	5000			
Sous bois	1.0	5000	70	4.75	0.5

(STAR=0.8, $\rho = 750 \text{ kg.m}^{-3}$)

Tableau 4.2. Caractéristiques spatiales du combustible

Cas d'étude	Ecosystème	Diamètres des agrégats (m)	Recouvrement (%)	Densité max (kg.m ⁻³)	LAI	Charge (kg.m ⁻²)
<i>PmHet75a</i>	Pin Maritime	4	75 %	0.5	7.2	2.7
Zone non traitée (Témoin)						
<i>PmHet50a</i>		4	50 %	0.5	4.8	1.8
<i>PmHet25a</i>		4	25 %	0.5	2.4	0.9
<i>PmHet25b</i>		10	25 %	0.5		
<i>PmHet25c</i>		20	25%	0.5		
<i>PmHom25</i>	∞	100 %	0.17			
<i>PmHet0</i>		-	0 %	0.0	0.0	0.0
<i>PaHet75a</i>	Pin d'Alep	4	75 %	0.1	2.9	0.54
Zone non traitée (Témoin)						
<i>PaHet50a</i>		4	50 %	0.1	1.9	0.36
<i>PaHet25a</i>		4	25 %	0.1	0.97	0.018
<i>PaHet25b</i>		10	25 %	0.1		
<i>PaHet25c</i>		20	25 %	0.1		
<i>PaHom25</i>		∞	100 %	0.033		
<i>PaHet0</i>			-	0 %	0.0	0.0

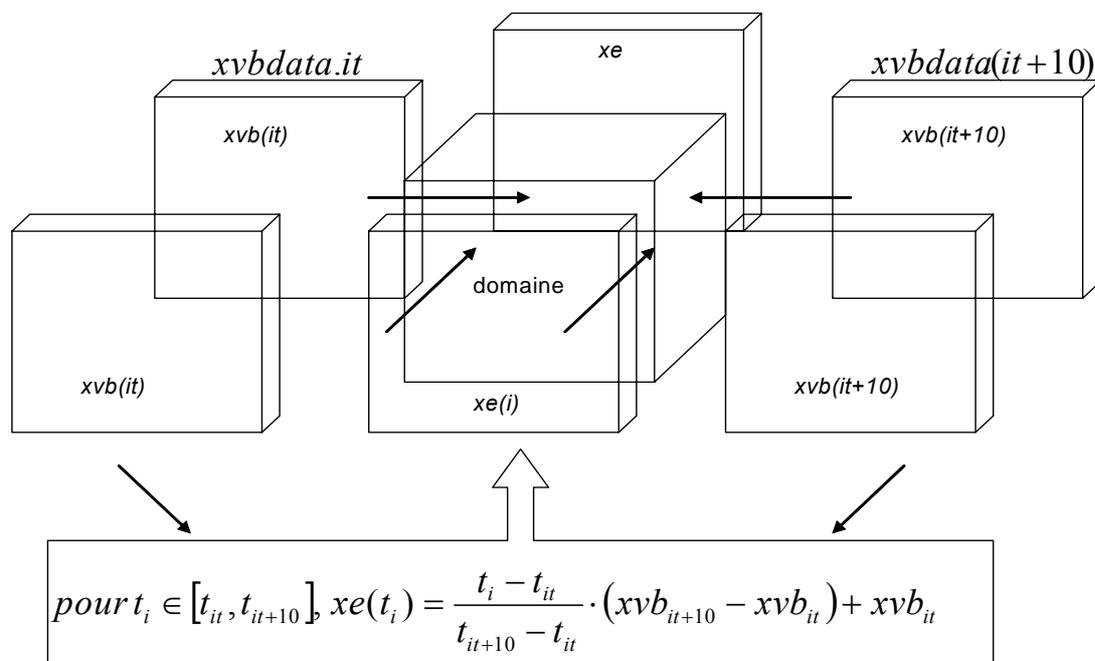


Fig. 4.1. Procédure de calcul du champ ambiant $xe(t)$ vers lequel sont relaxées les variables d'états de FIRETEC

2. Description du protocole

2.1. Description du combustible

Nous avons utilisé les mêmes caractéristiques physiques pour les écosystèmes à Pin d'Alep et à pin Maritime que dans le chapitre 3, partie 4 (**Tableaux 4.1 et 4.2**). Nous rappelons que ces configurations présentent une strate arbustive de 50 cm de haut et de densité de 1 kg.m^{-3} ; la strate arborée est composée de pins élagués à 4.75 m, qui varient par leur densité et leur rapport surface/volume. Les dimensions horizontales du domaine pour ces séries de simulations sont de $640 \text{ m} \times 320 \text{ m}$. Ce domaine se compose de deux zones témoins correspondant à une canopée non traitée, respectivement de 240 et 200 m, séparées par une coupure de combustible de 200 m de large sur laquelle uniquement la strate arborée est modifiée. On pourra se reporter au chapitre 3, partie 4 pour plus de détails. La prise en compte de la hauteur réelle de végétation au sein de la première maille passe par une modélisation en sous-maille décrite au paragraphe 4.5.5 du chapitre 0.

2.2. Caractéristiques des simulations

Conditions aux frontières

Dans les présents calculs, les champs de vent calculés au chapitre 3 sont utilisés pour simuler un champ ambiant aux frontières du domaine. Nous expliquons ici brièvement la procédure utilisée pour y parvenir. Les simulations d'écoulements du chapitre 3 ont été redémarrées sans feu après 3600 s de temps de simulation réel, mais avec un pas de temps réduit à 0.01 s (au lieu de 0.04 s au cours des simulations de vent du chapitre 3). Les variables d'état du modèle correspondant à une enveloppe extérieure du domaine sur cinq mailles d'épaisseur ($nx \in [1,5] \cup [316,320]$) ont été sauvegardées tous les 10 pas de temps (tous les dixièmes de seconde) dans des fichiers *xvbdata.it.*, avec *it* le numéro d'itération (**Fig. 4.1**). Ces fichiers sont ensuite utilisés pour faire évoluer à chaque itération les variables (ρ , u , v,w et T) du champ ambiant x_e vers lequel sont relaxées toutes les variables d'état du système lors d'un calcul en présence de feu. Cette procédure de relaxation est décrite au chapitre 0, paragraphe 4.5.4. Les composantes du champ ambiant x_e pour les itérations comprises entre *it* et *it+10* sont calculées en interpolant les valeurs des champs présents dans deux fichiers *xvbdata.it* et *xvbdata.(it+10)* précalculés (**Fig. 4.1**).

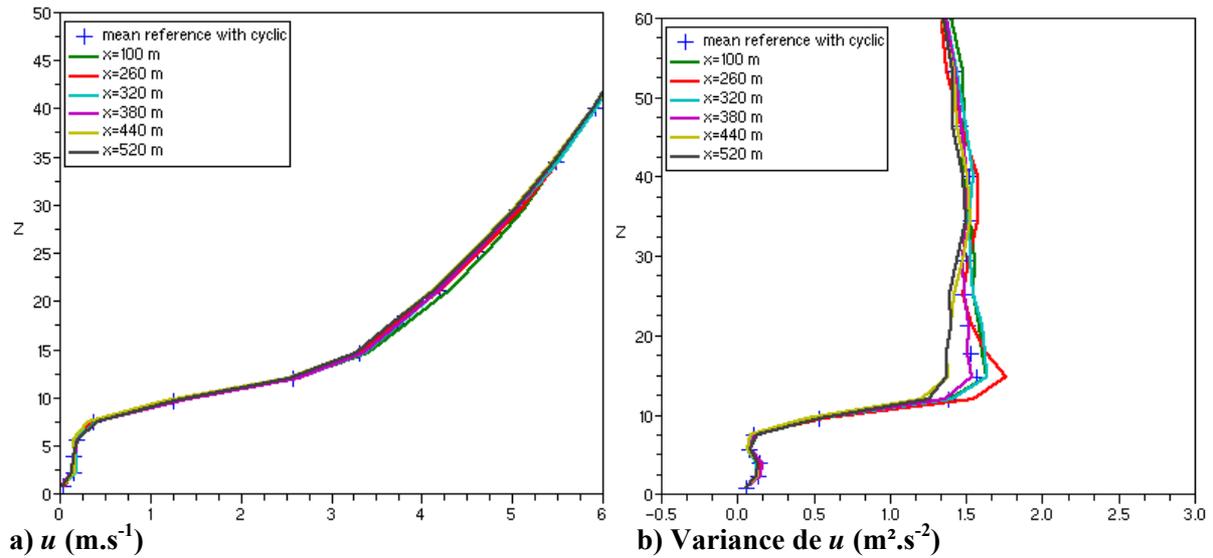


Fig. 4.2. Validation de la procédure de précalcul des champs (canopée homogène)

On compare vitesse moyenne et la turbulence pour différents points du domaine, avec la référence obtenue lors du calcul en conditions limites périodiques (croix bleues). La procédure utilisée permet de reconstituer un écoulement réaliste dans le peuplement, sans pour autant que les conditions limites soient périodiques, ce qui poserait un problème en présence de panache.



Fig. 4.3. International Crown Fire Modeling Experiment (ICFME)

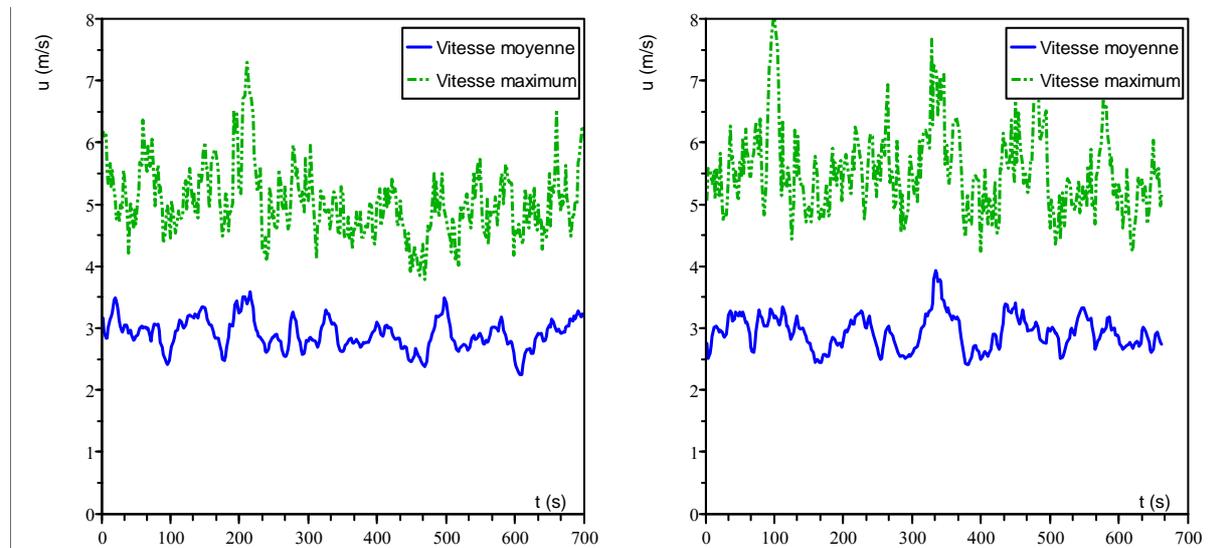


Fig. 4.4. Caractéristiques de l'écoulement à 2h (24 m)

Des comparaisons entre des résultats de simulation obtenus avec cette procédure et avec les conditions limites périodiques ont montré que les champs obtenus dans le domaine (en l'absence de feu) étaient très similaires à ceux obtenus avec des conditions limites cycliques (Extraits **Fig 4.2**). Ce résultat n'était pas évident compte tenu de la fréquence de mise à jour du champ xe , qui est plus petite que le pas de temps du calcul, et compte tenu du damping des variables d'état au voisinage des frontières.

Cette procédure permet donc de reconstituer correctement des champs ambiants réalistes à l'intérieur du domaine. Elle a été utilisée pour diverses applications : turbulence des canopées, mais aussi turbulence liée à une atmosphère instable, à du relief, etc.

Nous avons utilisé les champs de vent précalculés correspondant aux configurations **sans coupure de combustible** pour toutes les simulations (c'est-à-dire *PmHet75a* pour le pin Maritime et *PaHet75a* pour le pin d'Alep). Ceci permet de se placer dans des conditions de feu où le vent ambiant est identique dans toutes les configurations et s'abstraire ainsi de l'influence des rafales pour comparer les différentes configurations. Ce contrôle des conditions ambiantes simplifie considérablement l'analyse des résultats par rapport à des expériences de terrains.

Les calculs ont été réalisés selon cette procédure pour traiter les conditions limites sur x . Selon y , nous avons utilisé des conditions périodiques, afin de simuler un front de feu infiniment large. L'objectif de l'usage de ces conditions limites est de s'affranchir d'un contour de feu ayant une forme conditionnée par la ligne d'allumage, comme c'est le cas avec les fronts de longueur finie (**Fig 4.3**). En effet, les fronts finis compliquent considérablement les processus d'analyse liés au changement de combustible (transition zone témoin/coupure), ainsi que ceux liés aux hétérogénéités. Nous verrons cependant que l'usage de ces conditions autorise des déformations du front et des comportements fortement hétérogènes au sein de la parcelle. Les vitesses moyenne et maximale de l'écoulement imposées à la frontière amont à $z=24$ m sont montrées **Fig 4.4**.

Zone d'allumage

La zone d'allumage est définie par l'ensemble des mailles $(i, j) \in [30, 33] \times [1, 160]$; il s'agit d'un rectangle de six mètres de profondeur sur toute la largeur du domaine, à 60 m de la frontière au vent (**Fig. 4.5**). Cette ligne est compatible avec l'usage de conditions limites cycliques sur y .

Autres caractéristiques

Le maillage utilisé est le maillage standard de FIRETEC. La taille typique des mailles dans le combustible est de $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$ (cf. chapitre 1 et 3). Dans ces simulations numériques, le rayonnement est calculé avec la méthode de MonteCarlo ; la précision de l'algorithme a pu être validée (Travail de Gilles Scarella dans le cadre de FIREPARADOX). Les simulations ont été réalisées avec cent vingt huit processeurs. Le (« grand ») pas de temps utilisé pour ces simulations est de $dt=0.01$ s, compatible avec la procédure de lecture de champs précalculés. Les simulations ont généralement été réalisées sur 70000 pas de temps de calcul, soit un temps réel de 700 s.

2.3. Sorties de calcul

Des sorties de calcul ont été enregistrées toutes les 200 itérations, ce qui représente une sortie toutes les deux secondes (fichiers *comp.out*). Ces données sont utilisées pour visualiser les champs tri-dimensionnels instantanés avec *AVS*.

Des données caractéristiques de la propagation du feu ont été extraites de ces sorties. Les positions de la tête du feu au niveau des strates arbustive et arborée ont été calculées afin de déterminer les vitesses de propagation instantanées. La consommation totale de combustible dans le domaine par unité de temps $W_{tot}(t)$ ($\text{kg}\cdot\text{s}^{-1}$) permet d'accéder à l'intensité instantanée du feu par la formule :

$$I_B = H_c \times W_{tot} / L, \quad (4.1)$$

avec H_c la chaleur de combustion ($18000 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$) et L la largeur du front de feu (ici la largeur du domaine, soit 320 m compte tenu de l'usage des conditions limites cycliques sur y).

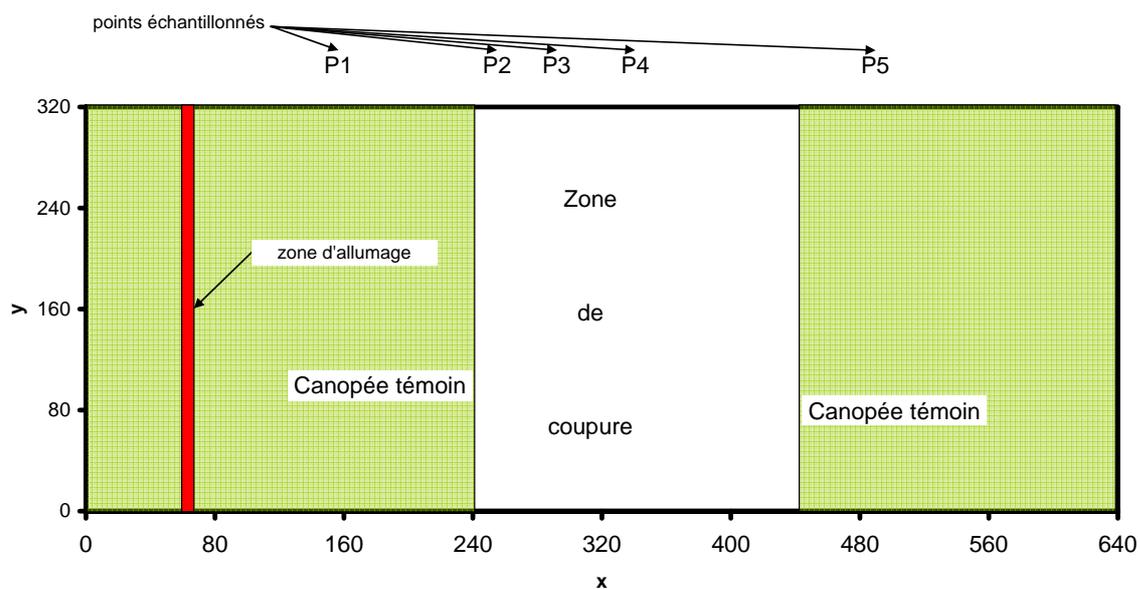


Fig. 4.5. Domaine de calcul (vue de dessus) et points échantillonnés

Tableau 4.3. Récapitulatif des différents points échantillonnés dans le domaine

	Noms	x (m)	y (m)	z (m)	Positionnement
Forêt	$P_{1,k}(j)$	190	$2j, \text{pour } j \in [1;160]$	$\{0.75, 9.6\}$	50 m avant la coupure
Coupure	$P_{2,k}(j)$	264	$2j, \text{pour } j \in [1;160]$	$\{0.75, 9.6\}$	24 m après le début de la coupure
	$P_{3,k}(j)$	290	$2j, \text{pour } j \in [1;160]$	$\{0.75, 9.6\}$	50 m après le début de la coupure
	$P_{4,k}(j)$	340	$2j, \text{pour } j \in [1;160]$	$\{0.75, 9.6\}$	100 m après le début de la coupure
Forêt	$P_{5,k}(j)$	490	$2j, \text{pour } j \in [1;160]$	$\{0.75, 9.6\}$	50 m après la fin de la coupure

Par ailleurs, nous avons également analysé des données ponctuelles, afin de mieux comprendre le comportement du feu. Elles concernent les températures du solide et du gaz, les vitesses des écoulements, la consommation de l'eau et du combustible ainsi que les transferts radiatif et convectif. Ces données ont été extraites en des points répartis dans la zone témoin et dans la coupure de combustible. Ces points sont répartis en quinze séries, chaque série correspondant à l'ensemble des points $P_{i,j}(j)$ disponibles selon l'axe y (160 points), pour des positions données selon x et z (**Tableau 4.3** ; les positions des lignes de points selon l'axe des x sont représentées **Fig. 4.5**).

Les cinq premières séries correspondent aux mailles d'indice $k=1$ (strate arbustive), situées avant, dans et après la coupure. Les cinq dernières séries correspondent aux mêmes données mais pour $k=6$ ($z= 9.6$ m, correspondant à la partie médiane de la strate arborée). Ces séries temporelles représentent l'évolution des grandeurs physiques ponctuelles, en fonction du temps.

Afin de s'abstraire des variations spatiales importantes dues au caractère tridimensionnel marqué que l'on observe dans ces simulations, nous avons moyenné les séries ponctuelles correspondant à un même couple (i,k) pour obtenir un comportement moyen en fonction d'une position du front donnée selon x . Avant d'effectuer ces moyennes, l'axe temporel des séries a été modifié de manière à imposer que la température franchisse le seuil de 350 K au temps $t=0$ s, pour chaque point échantillonné selon l'axe des x . Cet artifice permet d'examiner des comportements moyens, sans subir les perturbations dues aux comportements locaux. Les conditions cycliques sur y légitime l'utilisation d'une telle moyenne.

Mathématiquement, celle-ci peut s'écrire :

$$\text{Si } K_{i,j,k} = \{t \in \mathbb{N} / T_{i,j,k}(t) > 350 \text{ K}\}, \quad (4.2)$$

$$x_{i,k}(t) = \frac{\sum_{j \in [1,ny] / K_{i,j,k} \neq \emptyset} x_{i,j,k}(t - \min(K_{i,j,k}))}{\text{card}(\{j \in [1,ny] / K_{i,j,k} \neq \emptyset\})} \quad (4.3)$$

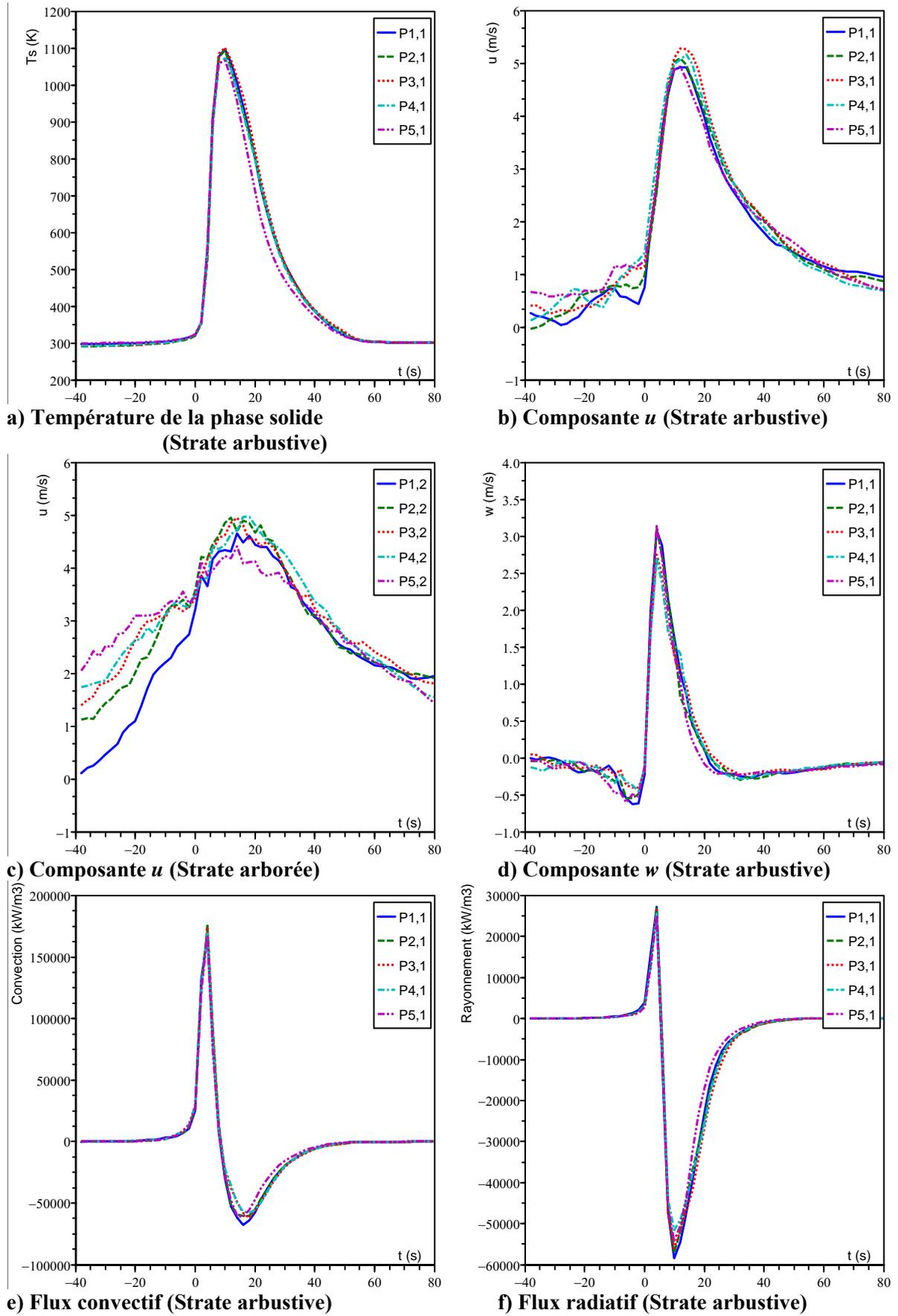


Fig. 4.6. Profils moyens de variables ponctuelles, enregistrés en (P_{1,1}, P_{2,1}, P_{3,1}, P_{4,1} et P_{5,1}) ou (P_{1,2}, P_{2,2}, P_{3,2}, P_{4,2} et P_{5,2}) sur la parcelle témoin (*PaHet75a*) dans l'écosystème à pin d'Alep

3. Résultats pour le pin d'Alep

A titre d'introduction, nous présentons des études détaillées des cas *PaHet75a* (cas de référence sans traitement) et du cas *PaHet0a* (c'est-à-dire de la coupure contenant uniquement une strate arbustive). La première étude nous permet de déterminer l'existence d'un régime de propagation établi. La seconde étude nous permet d'étudier le comportement du feu sur cette coupure, ainsi que les phases de transition qui précèdent l'entrée du front de feu sur la coupure et qui suivent sa sortie de la coupure. Nous introduisons ensuite l'effet du recouvrement, en comparant le cas de recouvrement nul, aux cas des recouvrements 25, 50 et 75 %, ce dernier constituant la référence (sans traitement). Enfin, nous étudions l'impact de la structure du combustible sur le comportement du feu dans le cas du recouvrement 25 % (avec des strates arborées présentant des taches de taille variable ou un combustible homogénéisé).

3.1. Comportement du feu dans le cas *PaHet75a* (cas témoin) : existence d'un régime permanent

L'analyse des grandeurs ponctuelles dans le cas témoin (*PaHet75a*) permet d'évaluer l'évolution du comportement du feu au fur et à mesure que le feu parcourt le domaine (**Fig 4.6**). La **Fig 4.6a** représente l'évolution des températures de la phase solide dans la strate arbustive. On retrouve des profils similaires à ceux présentés au chapitre 1 (feux de surface), avec une phase d'échauffement rapide, qui ne dure que quelques secondes. Ces profils de température échantillonnés dans le domaine sont quasi identiques.

Les **Fig 4.6b** et **c** représentent l'évolution des composantes u et w de la vitesse de l'écoulement dans la strate arbustive. Compte tenu des charges de combustibles qui demeurent relativement faibles, la composante u de la vitesse demeure positive avant le passage du feu ($t < 0$ s), ce qui signifie que le front de feu n'est pas suffisamment puissant pour aspirer de l'air frais sous son vent (feu de type « wind-driven »). Il convient de préciser que nous examinons ici un comportement moyen (moyenne sur l'axe perpendiculaire à la propagation) ; il est donc possible que le panache aspire localement de l'air sous son vent, mais l'air aspiré provient en moyenne de la zone au vent du panache. Comme pour la température, les profils de vitesse échantillonnés dans le domaine sont quasi identiques. On note cependant que la composante horizontale de l'écoulement entre 20 et 40 s avant le passage du feu tend à augmenter légèrement au cours du temps. Nous interprétons cette légère différence par une inclinaison progressive du panache au fur et à mesure que la longueur de la zone de trouée générée par le passage du feu augmente. Nous reviendrons sur l'inclinaison du panache dans les analyses qui suivent. Cette tendance est encore plus nette pour la composante u de la vitesse dans la canopée.

Enfin, les **Fig 4.6 d** et **e** montrent l'évolution des flux convectifs et radiatifs reçus par la phase solide. Ils présentent une phase d'échauffement pendant laquelle les flux sont positifs ($t < 5$ s), suivie d'une phase de refroidissement, pendant laquelle les flux sont négatifs ($t > 10$ s). Comme nous l'annoncions au chapitre 1, les profils de rayonnement sont plus réalistes, les calculs ayant été réalisés avec la méthode de MonteCarlo. On notera, au passage que les flux radiatifs sont nettement inférieurs aux flux convectifs. Ici encore, les profils de flux échantillonnés dans le domaine sont presque identiques.

Les comportements moyens obtenus en $P_{1,1}$ ($x=190$ m) sont donc très similaires aux comportements enregistrés aux autres points ($P_{2,1}$, $P_{3,1}$, $P_{4,1}$ et $P_{5,1}$). On peut en déduire que la propagation du feu est établie de manière stationnaire avant que le feu atteigne $x=190$ m. Les profils obtenus peuvent donc constituer une référence utile pour la comparaison avec les configurations avec traitements du combustible. Par ailleurs, nous notons que dans la zone étudiée ici (entre $x=190$ et $x=490$ m), aucune influence des frontières du domaine sur le déroulement de la simulation n'est observée.

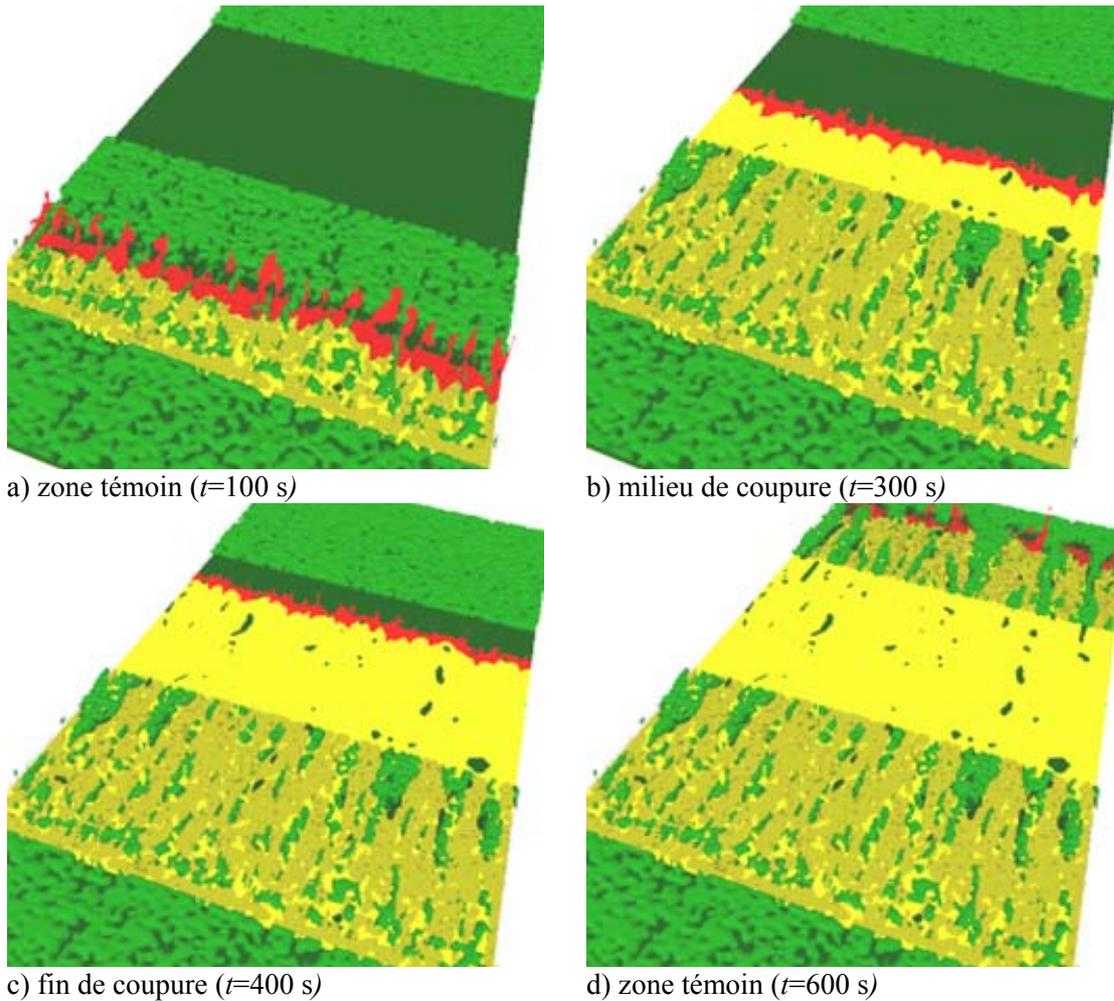


Fig. 4.7. Images instantanées du comportement du feu sur la coupe totale dans l'écosystème à pin d'Alep (*PaHet0a*)

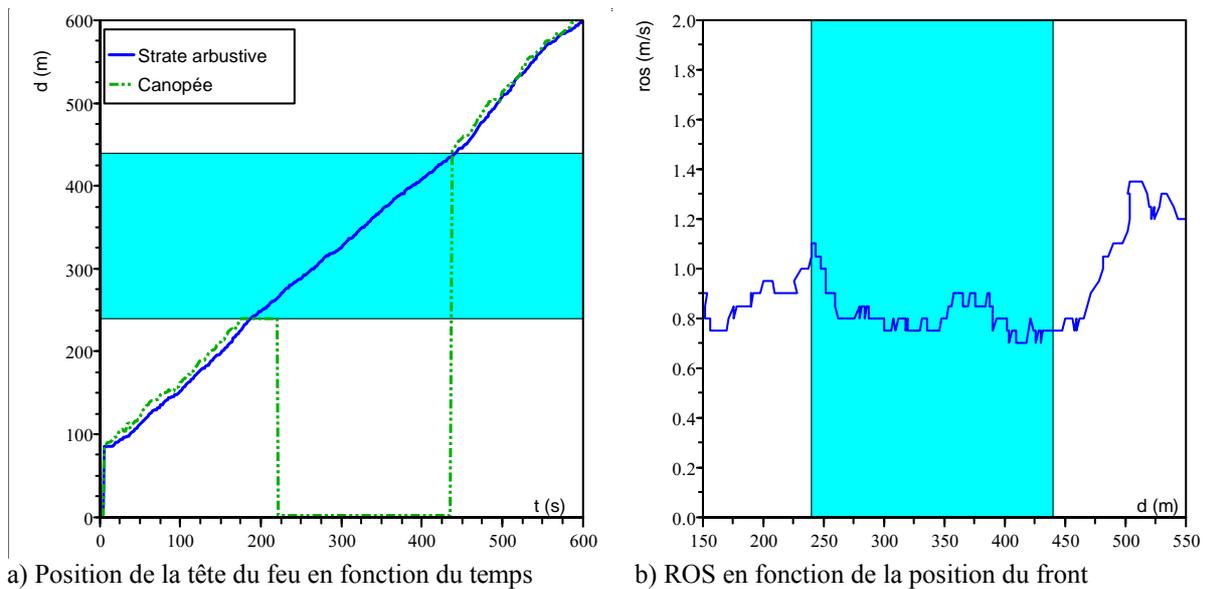
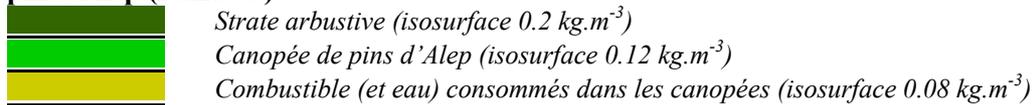


Fig. 4.8. Propagation du feu sur la coupe totale dans l'écosystème à pin d'Alep (*PaHet0a*).
La zone turquoise représente la coupe.

3.2. Comportement du feu dans le cas PaHet0a : effet de la coupure

Propagation du feu au cours de la simulation

Après la phase d'ignition qui dure 5 s, le feu commence à se propager dans la zone non traitée. Il parcourt celle-ci en environ 200 s. Le comportement du feu est de type « torching » sur toute la largeur du domaine, avec des inflammations locales des cimes (**Fig 4.7a**). Puis, le feu pénètre dans la zone de coupure et la parcourt en 220 s environ (**Fig 4.7b &c**). Ensuite, la zone de forêt située en aval de la coupure s'enflamme (**Fig 4.7d**). Ce schéma est reproduit dans l'ensemble des configurations étudiées. L'usage des conditions limites cycliques selon y permet de simuler un front de feu infiniment long. On observe sur la **Fig 4.7d** que les zones d'inflammation peuvent être hétérogènes selon l'axe des y , avec la formation de couloirs de dégâts, de largeur et de fréquence variées.

La **Fig 4.8a** décrit l'évolution de la position de la tête du front en fonction du temps, d étant mesuré selon l'axe des x . La courbe bleue correspond à la position du front dans la strate arbustive, alors que la courbe verte correspond à la position du front dans la strate arborée. La position du front de feu dans la strate arborée se situe toujours quelques secondes en avance de celle dans la strate arbustive dans les zones de forêts ($d < 240$ m et $d > 440$ m). Ceci signifie que le feu est légèrement en avance dans la strate arborée par rapport à la strate arbustive. Lorsque le feu se trouve dans la coupure (zone turquoise), la valeur de d devient égale à 0, car il n'y a pas de combustible dans la strate arborée (donc pas de combustible inflammé). La **Fig 4.8a** permet d'identifier une légère diminution de la pente de la courbe de position de la tête du feu (c'est-à-dire de la vitesse de propagation), au sein de la coupure, et une augmentation de celle-ci une fois la coupure franchie. Ces tendances légères sont plus facilement identifiables sur la **Fig 4.8b**, qui représente l'évolution de la vitesse de propagation instantanée maximale (toutes strates confondues) en fonction de la position du front d dans le domaine. On observe que l'entrée du front sur la coupure (matérialisée par la bande turquoise) s'accompagne d'une augmentation temporaire du ROS, qui atteint 1.2 m.s^{-1} . La valeur de la vitesse est à peu près stabilisée autour de 0.8 m.s^{-1} sur la coupure (avec une légère augmentation en milieu de coupure). Une fois la coupure franchie, une accélération nette de la vitesse de propagation est observée. Nous verrons plus loin que cette accélération peut être attribuée à une vitesse plus importante du vent au sol et en cime due à l'absence de canopée dans la zone de coupure. Les vitesses de propagation obtenues dans la zone témoin et sur la coupure sont élevées, compte tenu de la vitesse du vent relativement modérée. Il en est de même dans les autres simulations de l'étude et nous reviendrons sur ce point dans la partie discussion.

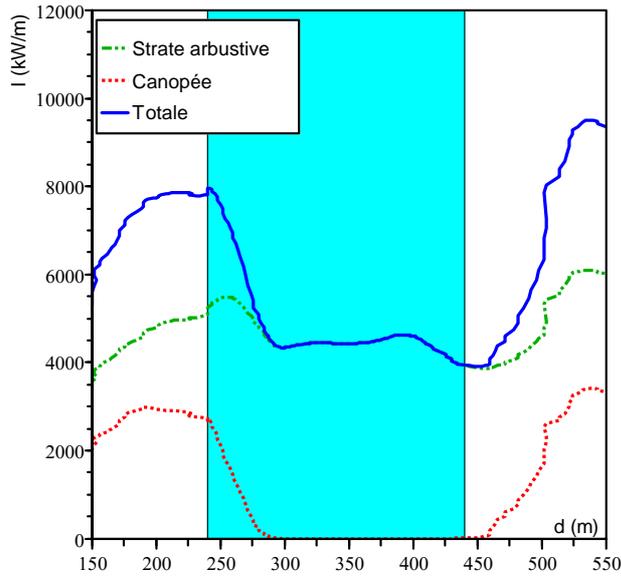


Fig. 4.9. Intensité du feu sur la coupe totale dans l'écosystème à pin d'Alep (*Pahet0*)

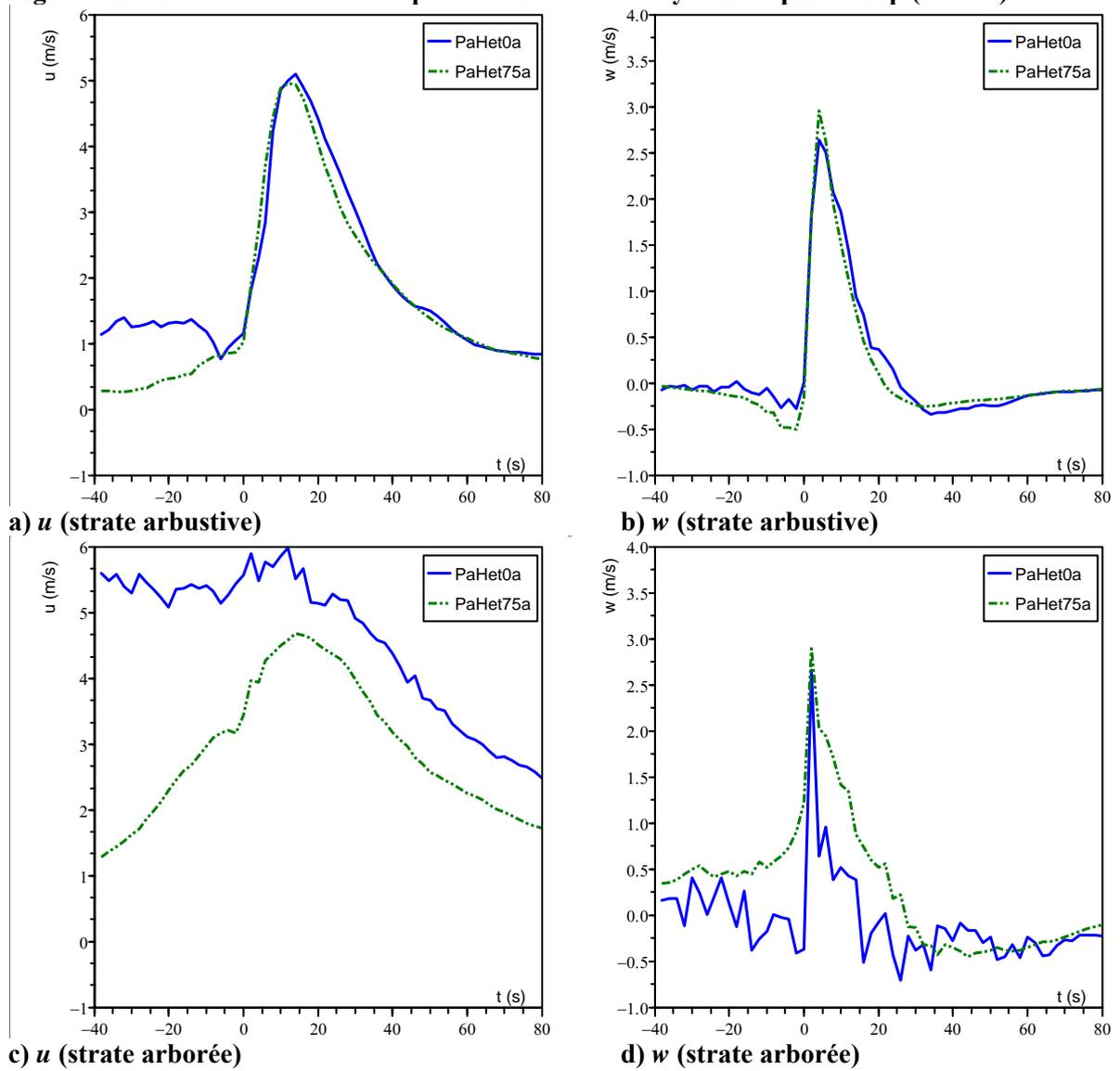


Fig. 4.10. Composantes de la vitesse de l'écoulement dans la coupe (*Pahet0*) et dans la parcelle témoin (*Pahet75a*), dans les strates arbustive (Point $P_{4,1}$) et arborée (Point $P_{4,2}$)

Intensité du feu

La **Fig 4.9** représente l'évolution de l'intensité du feu en fonction de la position de la tête du front sur la coupure. Celle-ci est calculée sur la base de la consommation instantanée de combustible, moyennée sur 10 s. La courbe bleu représente l'intensité totale (kW.m^{-1}), alors que les courbes verte et rouge représentent respectivement l'intensité produite par la combustion de la strate arbustive et celle produite par la combustion de la canopée. Puisque la canopée n'est pas enflammée lorsque le feu se trouve dans la coupure, l'intensité totale coïncide exactement avec celle due à la strate arbustive.

Dans la zone précédant la coupure, on observe une phase d'augmentation continue des intensités, qui correspond à un élargissement progressif de la profondeur du front fréquemment observé, que ce soit en laboratoire ou sur le terrain. Celle-ci se stabilise lorsque le feu arrive à 50 m de la coupure. Dès que la coupure est abordée, on observe une diminution de la part de l'intensité due aux cimes, même si celle-ci n'atteint la valeur 0, que lorsque le feu a parcouru 50 m à l'intérieur de la coupure. On observe également que l'arrivée du feu sur la coupure s'accompagne d'une augmentation temporaire de la part de l'intensité due à la combustion de la strate arbustive, avant de diminuer pour se stabiliser à une valeur proche de 4000 kW.m^{-1} ; celle-ci est inférieure de près de 1000 kW.m^{-1} à la valeur obtenue sous canopée. La valeur de l'intensité totale passe de près de 8000 kW.m^{-1} en zone non traitée à seulement 4000 kW.m^{-1} sur la coupure. Une fois la coupure franchie, la part de l'intensité due à la combustion de la canopée réaugmente, ainsi que celle due à la strate arbustive. L'intensité totale atteint alors 10000 kW.m^{-1} , avant de diminuer vers des valeurs proches de celles qui caractérisaient le feu avant que celui-ci n'aborde la coupure.

On notera que le feu a le temps de parcourir 50 m dans la coupure avant que son intensité n'ait diminué. Une partie de cette intensité provient de la combustion de la canopée qui se poursuit en amont de la coupure, pendant que le front pénètre sur la coupure. On notera également une légère augmentation de l'intensité du feu dans la strate arbustive, qui contribue à ralentir la diminution de l'intensité totale.

Caractéristiques de l'écoulement sur la coupure

L'utilisation des grandeurs ponctuelles moyennées permet d'analyser les variables du modèle en lissant les variations spatiales très importantes observées d'une maille à l'autre lors des simulations. Les **Fig 4.10a** et **4.10c** représentent l'évolution de la vitesse moyenne de l'écoulement dans la strate arbustive et au dessus de celle-ci, pour la simulation *PaHet0a* en milieu de la coupure (Points $P_{4,1}$ et $P_{4,2}$) et pour la simulation témoin (*PaHet75a*). Au niveau du sol (**Fig 4.10a**), nous observons au passage du front de feu ($t=0$ s) une accélération forte de l'écoulement similaire à ce que nous observons pour les feux de surface au chapitre 1, en raison de la dilatation des gaz échauffés. Les vitesses sont positives avant l'arrivée du front ($t < 0$ s), ce qui traduit un comportement « wind-driven » au niveau des parties haute et basse du panache ; un tel comportement apparaît compatible avec les charges relativement restreintes des strates arbustive et arborée. L'écoulement est cependant nettement plus rapide avant le passage du feu en présence de coupure. Ceci s'explique par la réduction forte de la traînée, induite par la suppression du combustible dans la strate arborée (cf. Chapitre 3). Au dessus de la strate arbustive (**Fig 4.10c**), cette tendance est nettement plus marquée avec un écoulement dépassant les 5 m.s^{-1} avant le passage du feu.

Concernant la composante w de la vitesse de l'écoulement, celle-ci est nettement négative avant le passage du feu dans la zone témoin au niveau de la strate arbustive, alors qu'elle reste voisine de 0 sur la coupure (**Fig 4.10b**). Au dessus de la strate arbustive (**Fig 4.10d**), la composante w oscille autour de 0 sur la coupure, avant le pic correspondant au passage du front principal ; en revanche, en présence de canopée, celle-ci est nettement positive. Ceci peut être attribué au fait que la canopée enflammée de la simulation témoin (*PaHet75a*) produit un panache qui occupe une longueur plus importante selon x ; en effet, le front de feu est plus profond en raison de la quantité de combustible plus importante, ce qui induit une montée de la composante verticale de la vitesse plus progressive.

En présence de coupure, le panache est donc couché, avec une composante horizontale nettement positive et une composante verticale qui oscille autour de 0. Dans la simulation témoin, les composantes horizontales et verticales de la vitesse sont positives et leurs ordres de grandeur sont similaires en amplitude, ce qui traduit un panache plus relevé en présence de canopée.

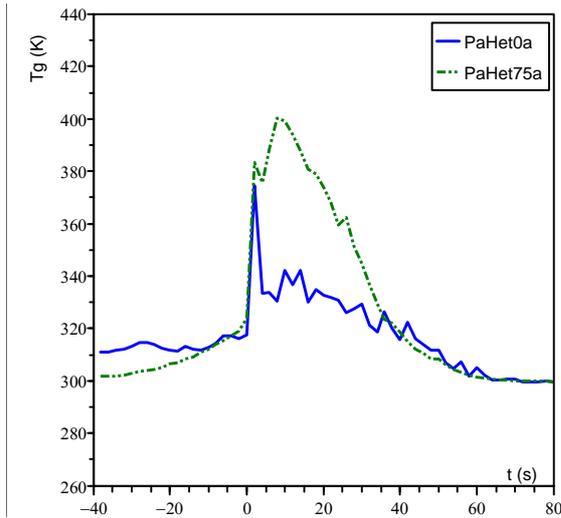
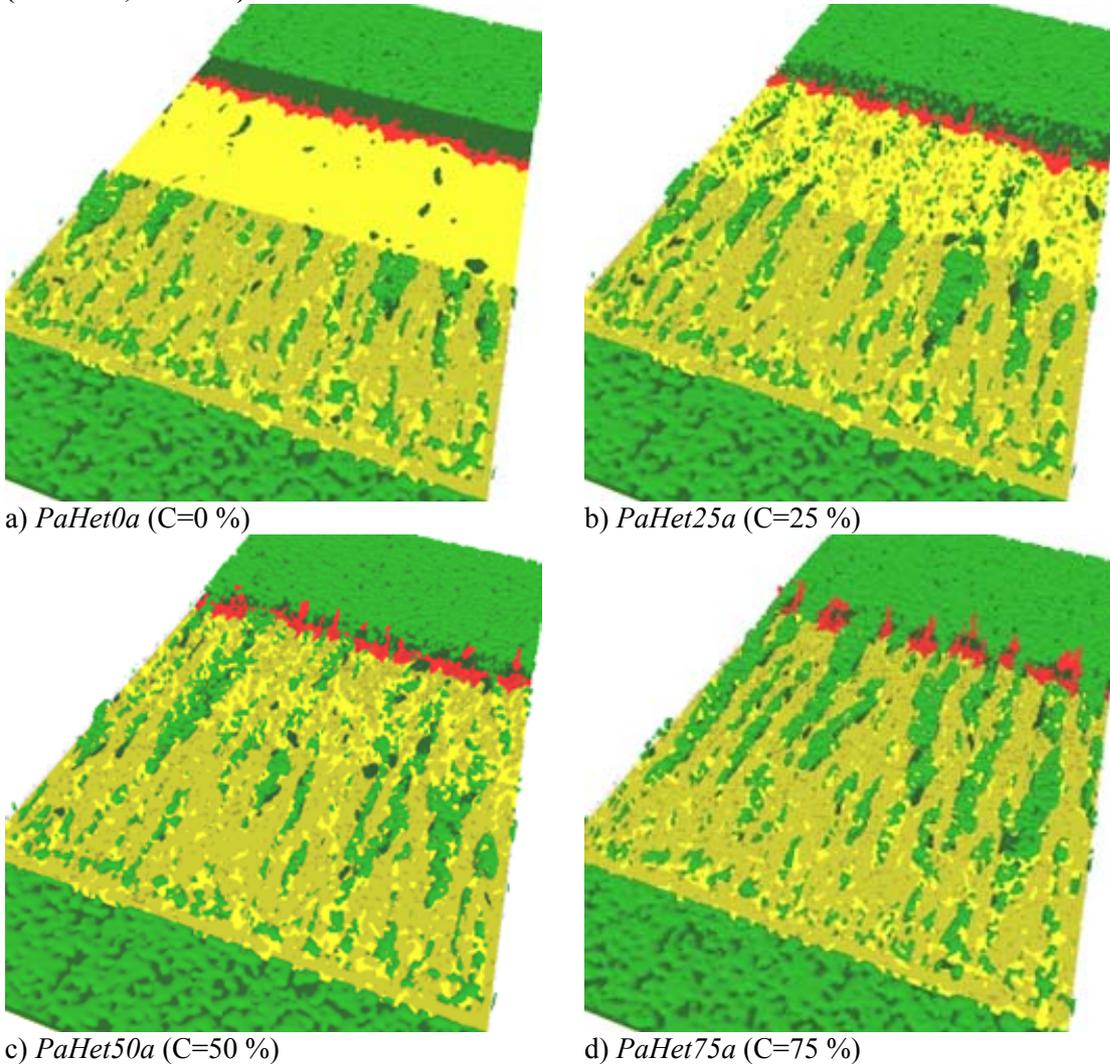


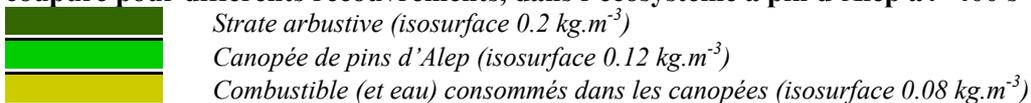
Fig. 4.11. Températures de la phase gazeuse au dessus de la strate arbustive dans la coupure (*PaHet0a*) et dans la parcelle témoin (*PaHet75a*) dans l'écosystème à pin d'Alep au point $P_{4,2}$ ($x=340$ m; $z=9.6$ m)



c) *PaHet50a* (C=50 %)

d) *PaHet75a* (C=75 %)

Fig. 4.12. Images instantanées du comportement du feu lors du passage du front en fin de coupure pour différents recouvrements, dans l'écosystème à pin d'Alep à $t=400$ s



Températures atteintes sur la coupure

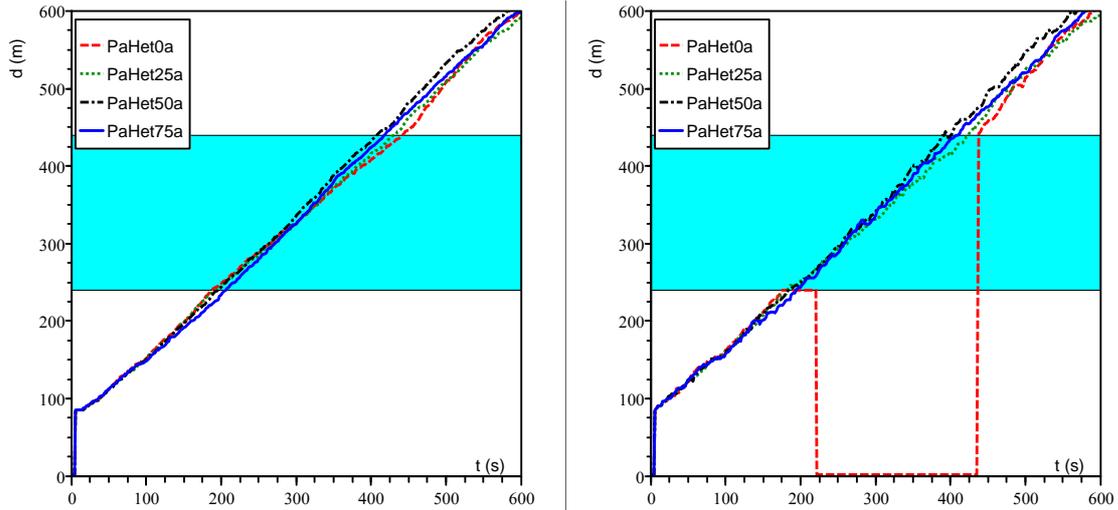
La **Fig 4.11** représente l'évolution de la température de la phase gazeuse au dessus de la strate arbustive (Point P_{4,2}) pour les simulations *PaHet0* et pour la simulation témoin (*PaHet75a*). Nous rappelons qu'il s'agit de la température moyenne au sein de mailles d'environ 6 m³. La température de la phase gazeuse augmente nettement au passage du front de feu, avec un pic autour 380 K sur la coupure. Néanmoins, cette valeur diminue très brutalement pour revenir ensuite progressivement à une température ambiante. En revanche, dans le cas témoin, la présence d'une canopée qui s'enflamme par endroit conduit à avoir une température élevée pendant une durée beaucoup plus importante. Cette modification de la position de l'extension de la zone en combustion induit une modification profonde de la nature de l'écoulement au dessus de la strate arbustive.

3.3. Impact du recouvrement

Les simulations qui sont analysées maintenant varient par le recouvrement de la strate arborée sur la coupure. Celui-ci varie de 0 % (*PaHet0a*) à 75 % (*PaHet75a*) en passant par 25 et 50 % (*PaHet25a* et *PaHet50a*).

Propagation du feu

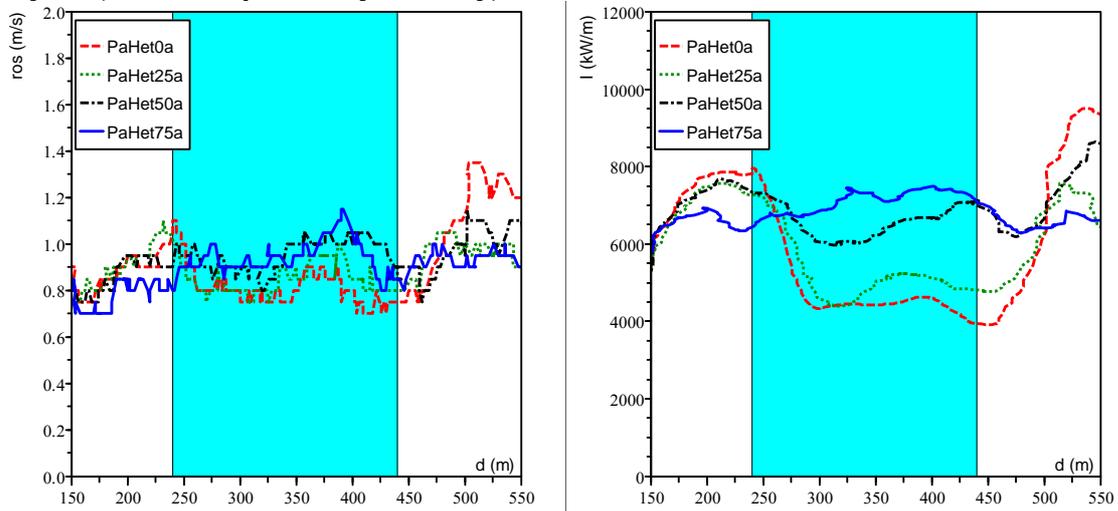
La **Fig 4.12** représente des images instantanées des simulations au moment où le feu arrive en fin de coupure, pour les différentes valeurs de recouvrement testées sur la coupure. On observe que les fronts de feu ont parcouru environ la même distance pendant 400 s. Les cas où le recouvrement de la canopée n'est pas nul (**Fig 4.12b à c**), se caractérisent par des flammes localement plus hautes que le cas de la coupure totale (*PaHet0a*). Dans les trois cas présentant une canopée, on observe des couloirs de dégâts ; ceux-ci sont d'autant plus visibles que le recouvrement est élevé. Bien que les champs de vents incidents soient similaires d'une simulation à l'autre, les positions des couloirs ne sont pas identiques, même si certaines similitudes peuvent être observées, notamment en amont de la coupure.



a) Dans la strate arbustive

b) Dans la strate arborée

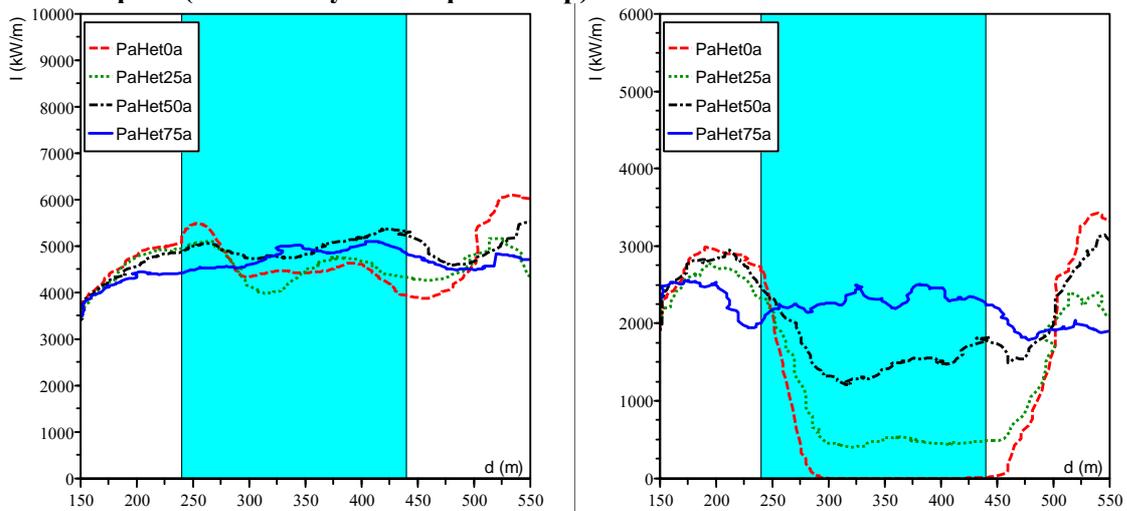
Fig. 4.13. Position de la tête du front de feu pour différentes valeurs de recouvrement sur la coupure (dans l'écosystème à pin d'Alep)



a) Vitesse de propagation

b) Intensité totale

Fig. 4.14. Caractéristiques de la propagation du feu pour différentes valeurs de recouvrement sur la coupure (dans l'écosystème à pin d'Alep)



a) Strate arbustive

b) Strate arborée

Fig. 4.15. Contributions des différentes strates à l'intensité du feu pour différentes valeurs de recouvrement sur la coupure (dans l'écosystème à pin d'Alep)

La **Fig 4.13** représente la position de la tête du feu dans les strates arbustive **(a)** et arborée **(b)**. Le recouvrement influe très peu sur les distances parcourues par le feu. On pourra noter que les feux se propageant sur des coupures à 50 et 75 % de recouvrement sont très légèrement plus rapides que ceux se propageant sur les coupures à 0 et 25 %. Cette tendance est d'ailleurs confirmée sur la **Fig 4.14a** qui représente les vitesses de propagation. On observe par ailleurs que la vitesse de propagation tend à diminuer sur la coupure, même si celle-ci réaccélère en milieu de coupure. Lorsque le feu quitte la coupure, celui-ci accélère de nouveau.

Intensité

En terme d'intensité totale (**Fig 4.14b**), il apparaît que les intensités sur la coupure sont d'autant plus élevées que le recouvrement est fort. L'intensité du feu sur la coupure à 25 % de recouvrement (*PaHet25a*) est légèrement plus élevée (5000 kW.m^{-1}) que celle sur la coupure totale *PaHet0a* (4000 kW.m^{-1}). Par ailleurs, l'intensité sur la coupure à 50 % (*PaHet50a*) est quasiment aussi élevée que celle sur la zone témoin (*PaHet75a*), avec des valeurs de respectivement 6500 kW.m^{-1} et 7500 kW.m^{-1} . La réduction du combustible disponible est, dans ce cas, partiellement compensée par la légère accélération du feu. Ces valeurs sont nettement supérieures aux valeurs obtenues dans le cas de coupure de combustible de recouvrement inférieur ou égal à 25 %.

Comme dans le cas *PaHet0a*, on observe que le feu a le temps de parcourir 50 m environ sur la coupure, pour que l'intensité diminue de manière conséquente. Par ailleurs, nous observons que les phases de transition forêt/coupure et coupure/forêt s'accompagnent d'une augmentation de l'intensité et d'une accélération du feu. L'augmentation de l'intensité au delà de la coupure est la plus marquée dans le cas de la coupure totale (*PaHet0a*) et dans celui de la coupure à 50 % de recouvrement (*PaHet50a*).

La **Fig 4.15** représente les contributions respectives à l'intensité totale des strates arbustive et arborée. La contribution de la strate arbustive est assez stable dans le temps, une fois l'accroissement initial de la largeur du front établi. On observe cependant une diminution sur la coupure de cette intensité dans les cas de recouvrement 0 et 25 % par rapport aux cas de 50 et 75 %. Comme dans le cas *PaHet0a*, les phases précédant l'entrée du front sur la coupure et succédant à la sortie de celui-ci, s'accompagnent d'augmentations de l'intensité. La valeur moyenne de cette intensité est d'environ 4500 kW.m^{-1} et elle oscille entre 4000 kW.m^{-1} (sur la coupure à faible recouvrement) et 6000 kW.m^{-1} (sortie de coupure). La contribution de la canopée à l'intensité totale diminue sur la coupure de manière d'autant plus importante que le recouvrement en combustible est faible ; elle varie entre 0 kW.m^{-1} et 2500 kW.m^{-1} , selon le recouvrement. En sortie de coupure, on notera que l'augmentation de cette contribution peut être très significative par rapport au cas témoin, notamment dans les cas *PaHet0a* et *PaHet50a*.

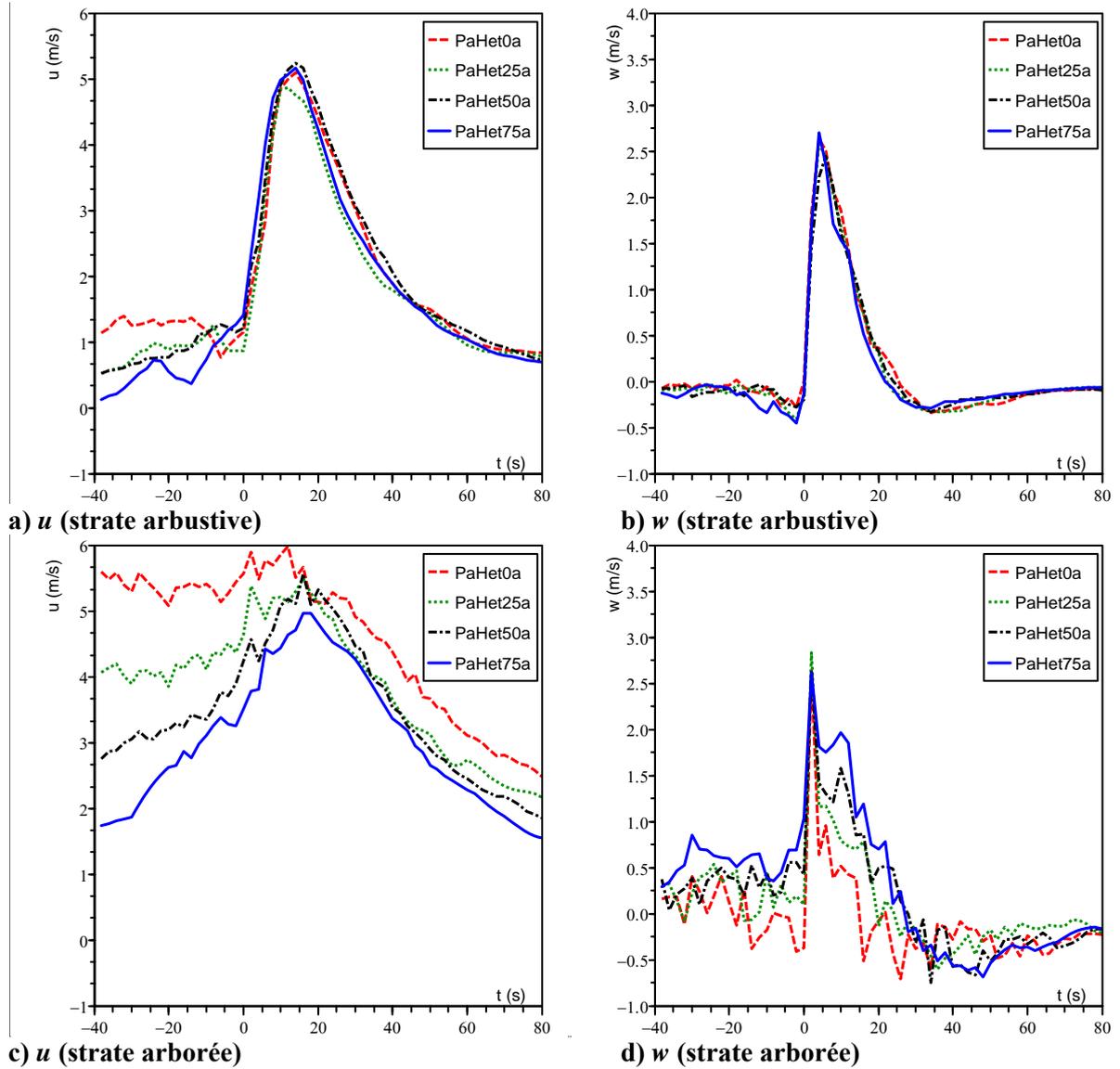


Fig. 4.16. Comparaison des composantes de la vitesse de l'écoulement sur la coupe pour différentes valeurs de recouvrement, dans les strates arbustive ($P_{4,1}$) et arborée ($P_{4,2}$)

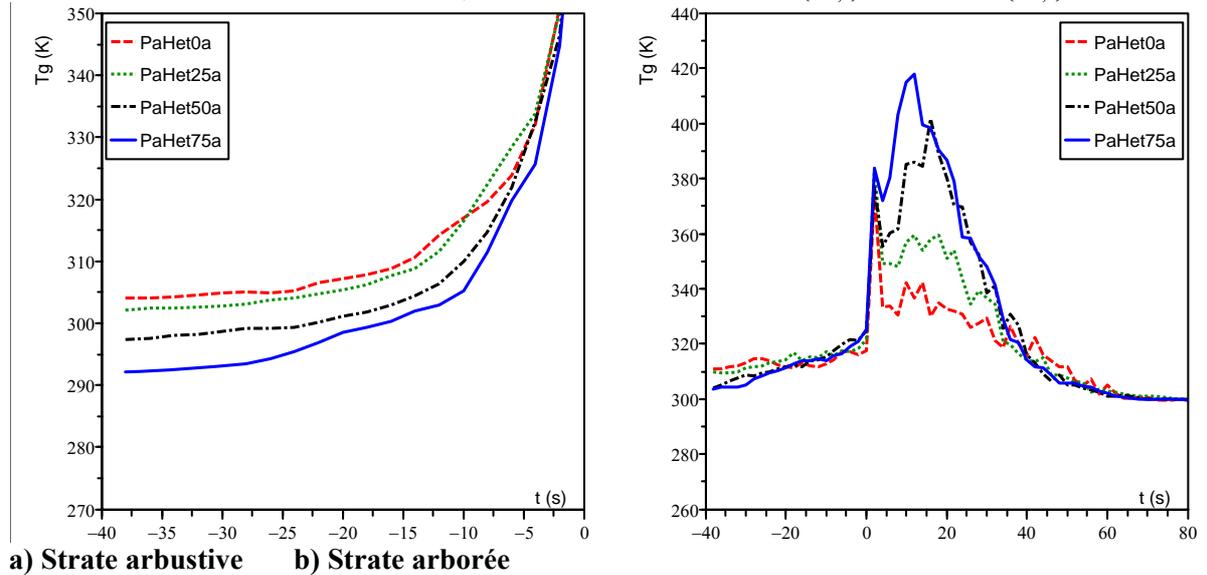


Fig. 4.17. Températures de la phase gazeuse sur la coupe pour différentes valeurs de recouvrement, dans les strates arbustive ($P_{4,1}$) et arborée ($P_{4,2}$)

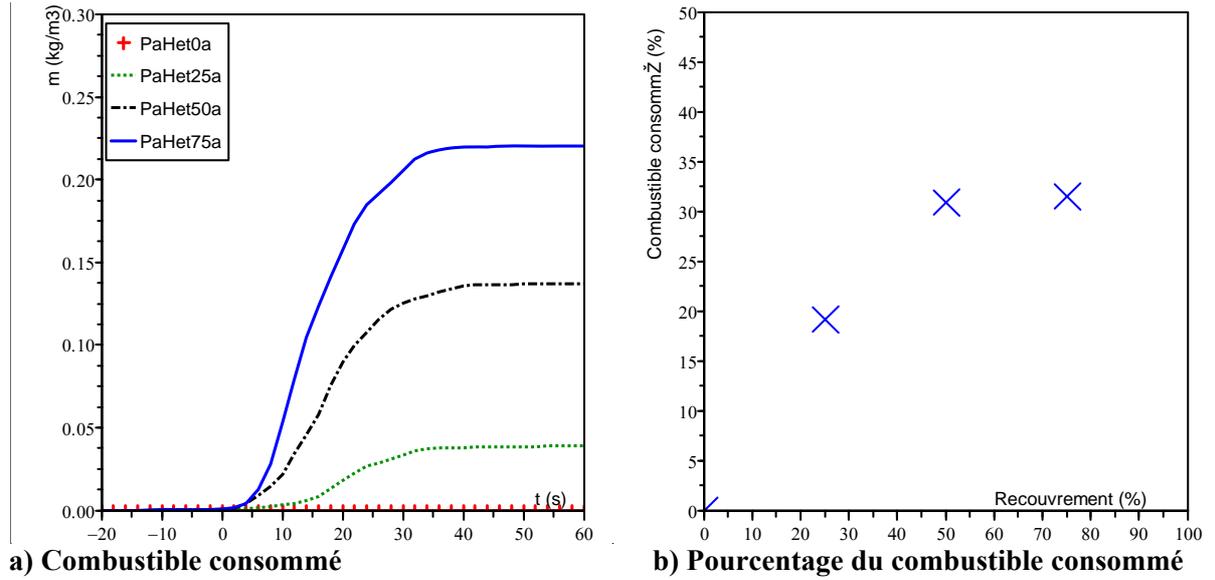
Caractéristiques de l'écoulement sur la coupure

La **Fig 4.16** représente les composantes u et w de l'écoulement dans les strates arbustive et arborée. La composante u de la vitesse est d'autant plus élevée avant le passage du feu que le recouvrement est faible. C'est le cas à la fois dans la strate arbustive et dans la canopée. Concernant la composante w , celle-ci oscille autour de 0 en l'absence de canopée, alors qu'elle est positive dans la canopée. L'amplitude de cette composante semble peu sensible au recouvrement, pour autant que celui-ci soit non nul, alors que la composante horizontale diminue avec le recouvrement. On en déduit que le panache est d'autant plus relevé que le recouvrement est important.

Cette interprétation confirme et étend celle proposée au paragraphe 3.2, à propos de la coupure totale : l'augmentation de biomasse induit une augmentation du ratio entre les forces de flottabilité et les forces advectives, pour provoquer un redressement du panache.

Températures atteintes sur la coupure

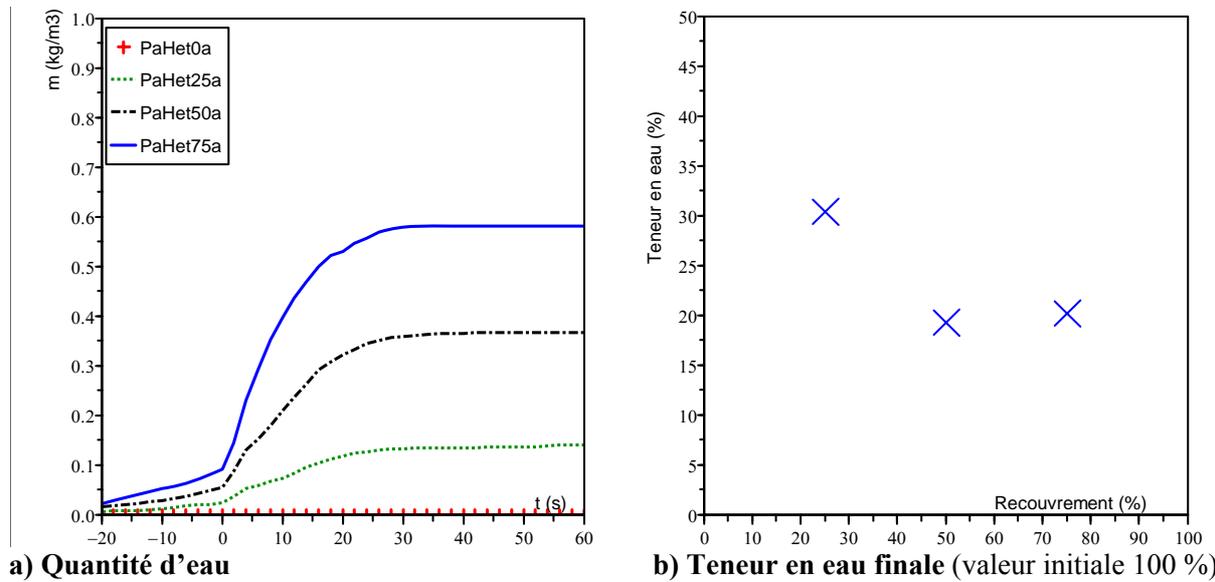
La **Fig 4.17a** représente l'évolution des températures moyennes de la phase gazeuse dans la strate arbustive. L'échauffement final est très brutal et se produit principalement durant les dernières secondes précédant l'inflammation. Il est cependant intéressant de noter que les températures sont d'autant plus élevées que le recouvrement est faible au niveau de la strate arbustive. On pourra attribuer ces différences de températures au fait que le panache est d'autant plus couché que le recouvrement est faible, ce qui favorise une élévation de la température avant l'arrivée du front. La **Fig 4.17b** présente les valeurs des températures moyennes obtenues dans la coupure au milieu de la canopée. On observe que ces températures moyennes sont d'autant plus élevées que le recouvrement est important. Ceci traduit le fait que la zone en combustion est d'autant plus importante que le recouvrement important.



a) Combustible consommé

b) Pourcentage du combustible consommé

Fig. 4.18. Consommation du combustible de la canopée de pin d'Alep en fonction du recouvrement (en $P_{4,2}$)



a) Quantité d'eau

b) Teneur en eau finale (valeur initiale 100 %)

Fig. 4.19. Evolution de la teneur en eau de la canopée de pin d'Alep en fonction du recouvrement (en $P_{4,2}$)

Sévérité du feu sur la coupure

La **Fig 4.18a** représente la quantité de combustible consommée en moyenne en $P_{4,2}$, c'est-à-dire en milieu de coupure. La quantité de combustible disponible avant le passage du feu est proportionnelle au recouvrement, puisque les densités locales au sein des houppiers sont identiques dans toutes les simulations. La consommation de combustible a lieu principalement pendant les 30 s succédant au début de l'échauffement ($t=0$ s). On observe que les valeurs absolues des pentes (combustible consommé par unité de temps) sont d'autant plus élevées que la quantité de combustible est importante. La quantité totale de combustible consommée augmente également avec le recouvrement. En terme de pourcentage de combustible consommé, par rapport au combustible disponible (**Fig 4.18b**), on observe une différence quantitative importante entre le cas de recouvrement 25 %, où cette part de combustible consommée est inférieure à 20 %, alors qu'elle dépasse les 30 % pour les valeurs de recouvrement plus élevées. Cette consommation moins forte du combustible peut être attribuée à la mise à distance des houppiers qui est significative dans le cas 25 %, alors qu'elle demeure très limitée pour les valeurs de recouvrement plus élevées.

La **Fig 4.19a** représente la quantité d'eau évaporée dans le combustible, en milieu de coupure et dans la canopée. Les pentes sont moins raides que dans la **Fig 4.18a**, ce qui illustre que l'évaporation est un processus beaucoup plus progressif que la consommation du combustible. Celle-ci débute en effet plusieurs dizaines de secondes avant l'arrivée du front par échauffement à distance, alors que le combustible sec n'est consommé qu'après le début de la combustion. Une part très importante de l'eau est évaporée au passage du feu, même si le combustible ne s'enflamme que partiellement. La **Fig 4.19b** représente la teneur en eau finale moyenne du combustible dans le peuplement après passage du feu. Comme pour le combustible consommé, on observe une différence qualitative importante entre les cas à plus de 50 % de recouvrement et le cas à 25 % de recouvrement, pour lequel la teneur en eau moyenne dépasse les 30 %. La sévérité du feu (dégât écologique dans le peuplement) est donc moindre.

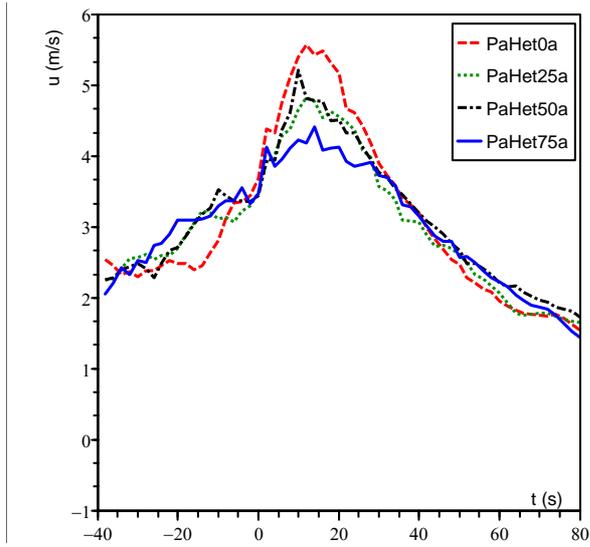


Fig. 4.20. Composante u de la vitesse de l'écoulement en aval de la coupure ($P_{5,2}$, $x=490$ m) pour différentes valeurs de recouvrement

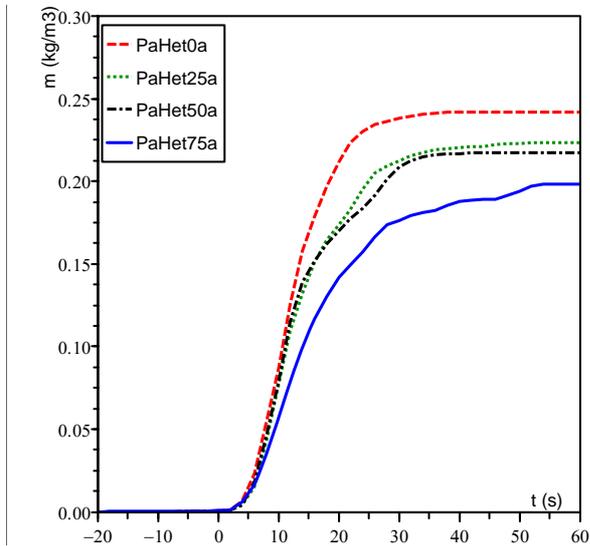


Fig. 4.21. Consommation de la strate arbustive au-delà de la coupure ($P_{5,1}$, $x=490$ m) pour différentes valeurs de recouvrement

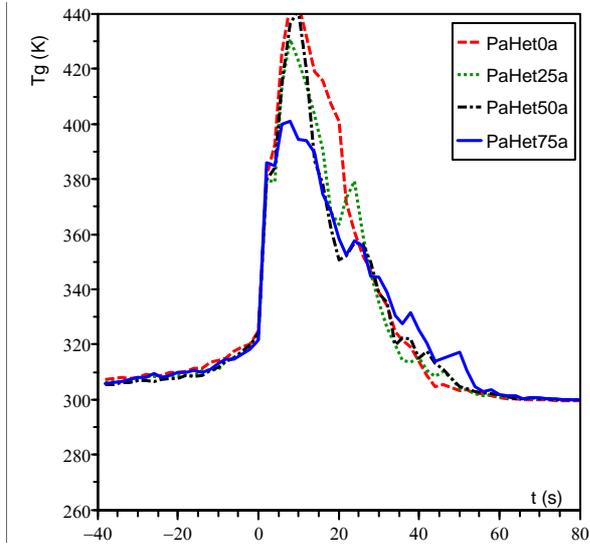


Fig. 4.22. Températures de la phase gazeuse en aval de la coupure ($P_{5,2}$, $x=490$ m) pour différentes valeurs de recouvrement

Comportement en aval de la coupure de combustible

D'une manière générale, il apparaît que le feu est plus rapide et plus intense lorsque le front quitte la coupure de combustible que dans la zone témoin (**Fig 4.14** et **4.15**). La **Fig 4.20** représente les composantes u de la vitesse de l'écoulement 50 m après la fin de la coupure dans la canopée. On observe que les vitesses de l'écoulement en avant du front et dans le panache sont globalement plus élevées dans les cas où la strate arborée a été réduite sur la coupure (en particulier dans le cas de la coupure totale *PaHet0a*) que dans le cas témoin. Les pics de vitesse de l'écoulement sont plus importants dans les cas *PaHet0a* et *PaHet50a*, qui sont les plus intenses.

La consommation de la strate arbustive est d'autant plus grande que l'éclaircie sur la coupure est forte ; elle est également beaucoup plus rapide (**Fig 4.21**).

La **Fig 4.22** représente les températures obtenues 50 m après la coupure au milieu de la canopée. Les températures atteintes sont plus importantes dans la canopée pour les cas avec traitement que sans traitement.

L'ensemble de ces caractéristiques traduisent une sévérité et une intensité moyenne du feu plus importante. La **Fig 4.12** montre que le front qui aborde la partie non traitée en aval de la coupure est beaucoup plus continu dans les cas où la réduction de la canopée sur la coupure est la plus importante, ce qui se traduit par des dégâts étendus à l'ensemble de la canopée.

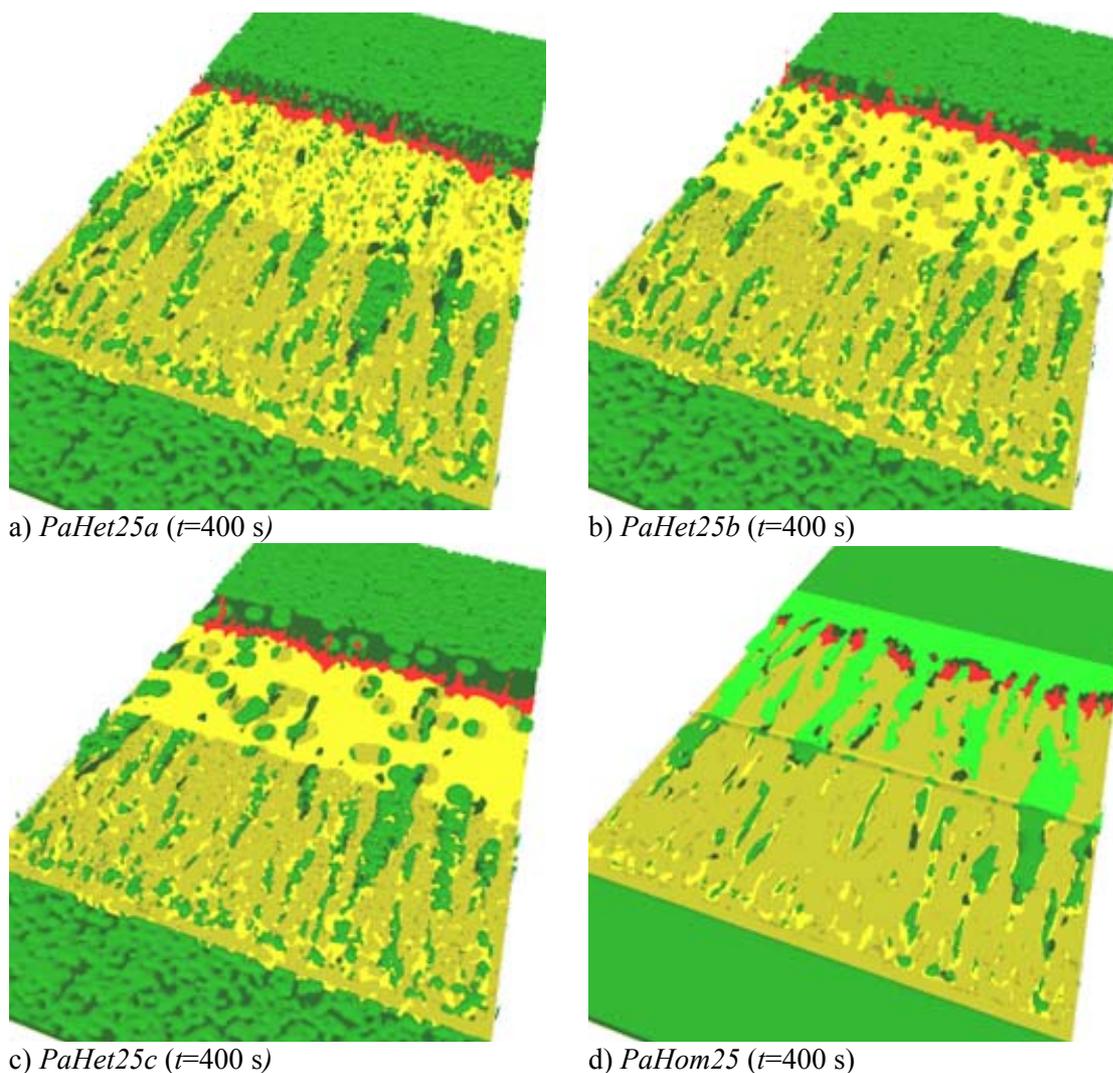
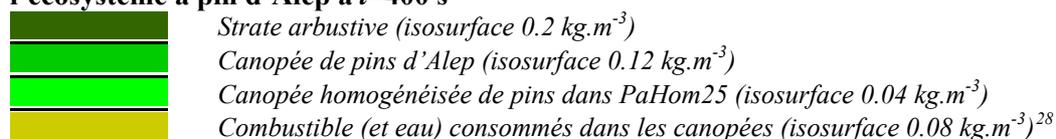


Fig. 4.23. Images instantanées du comportement du feu lors du passage du front en fin de coupe pour différentes structures de végétation (équivalent à un recouvrement de 25 %), dans l'écosystème à pin d'Alep à $t=400$ s



²⁸ sauf *PaHom25* dans la zone de coupe : isosurface 0.023 kg.m^{-3}

3.4. Impact de la structure du combustible (pour un recouvrement équivalent à 25 %)

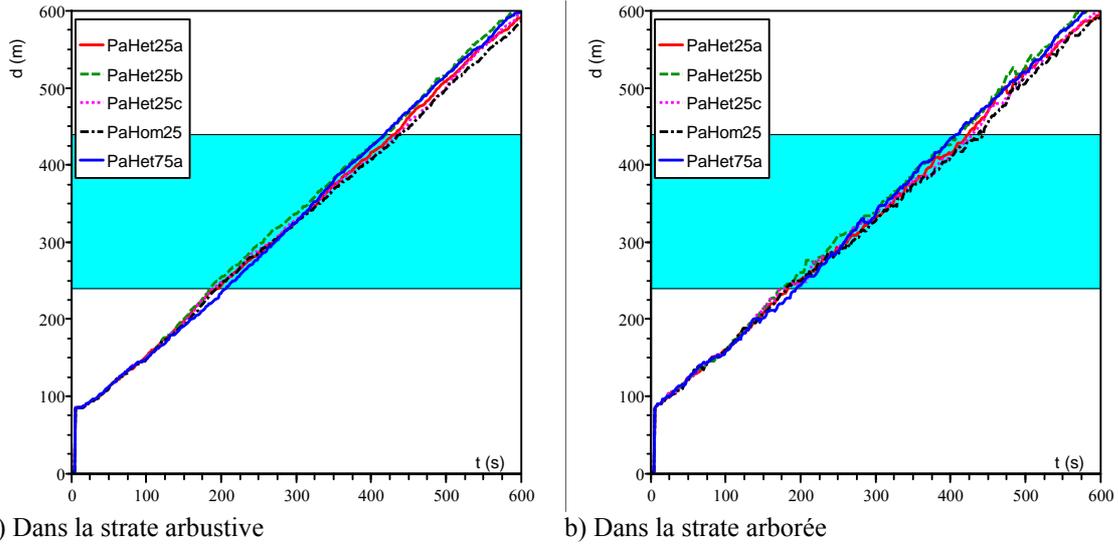
Les simulations qui sont analysées maintenant varient par la structure de la strate arborée sur la coupure. Dans tous les cas, les charges moyennes sont identiques et décrivent une canopée de pin d'Alep de recouvrement 25 %. La taille des taches de combustible dans la strate arborée peut être de 4 m (*PaHet25a*), 10 m (*PaHet25b*) ou 20 m (*PaHet25c*). Nous comparons aussi ces cas à une strate arborée homogénéisée (*PaHom25*). Ces différentes configurations correspondent toutes à une même quantité de combustible sur la coupure ; c'est uniquement la manière de l'allouer qui a été modifiée.

Propagation du feu

La **Fig 4.23** représente des visualisations instantanées des simulations au moment où le feu arrive en bout de coupure, pour ces structures de strates arborées variées. On observe que les fronts de feu ont parcouru à peu près la même distance pendant 400 s. La structure de la canopée n'influe donc pas de manière significative sur les vitesses de propagation moyenne.

Le comportement de type « torching » est encore plus net qu'en amont de la coupure, avec des passages en cime très localisés. Ces flammes localement plus hautes sont surtout observées dans les cas *PaHet25b* et *PaHet25c* et dans une moindre mesure, dans le cas *PaHet25a*. Le comportement du cas homogénéisé se rapproche davantage de celui d'un feu de surface ; la consommation de la biomasse en cime est très faible et aucune flamme n'est visible au dessus de la canopée.

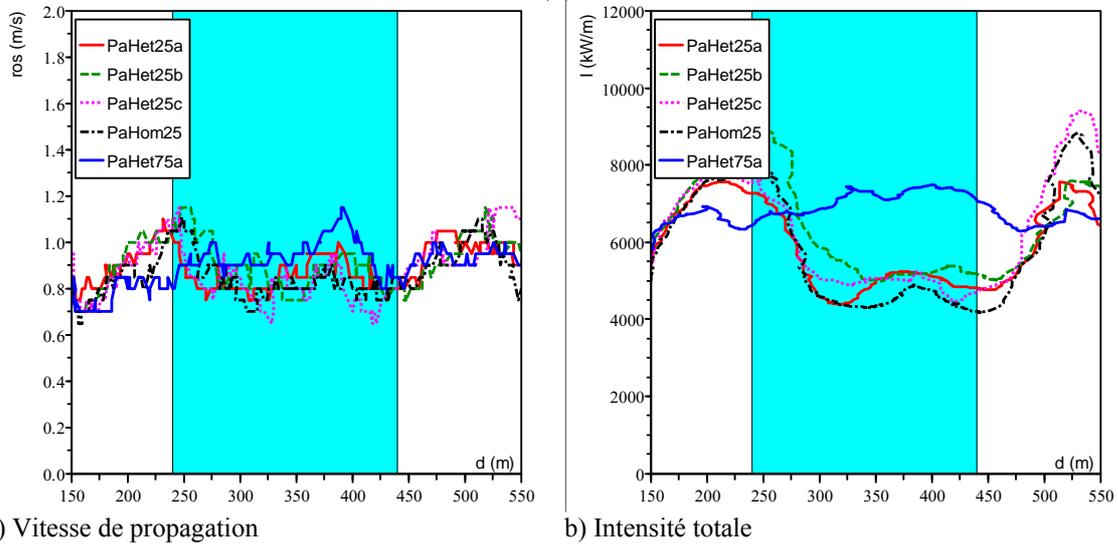
Dans les quatre cas, on observe des couloirs de dégâts et des dégâts fortement hétérogènes. Bien que les champs de vents incidents soient similaires d'une simulation à l'autre, les positions des couloirs ne sont pas identiques même si certaines similitudes peuvent être observées, notamment en amont de la coupure. Les tailles de flammes sont assez similaires, sauf dans le cas homogénéisé, où celles-ci sont plus faibles.



a) Dans la strate arbustive

b) Dans la strate arborée

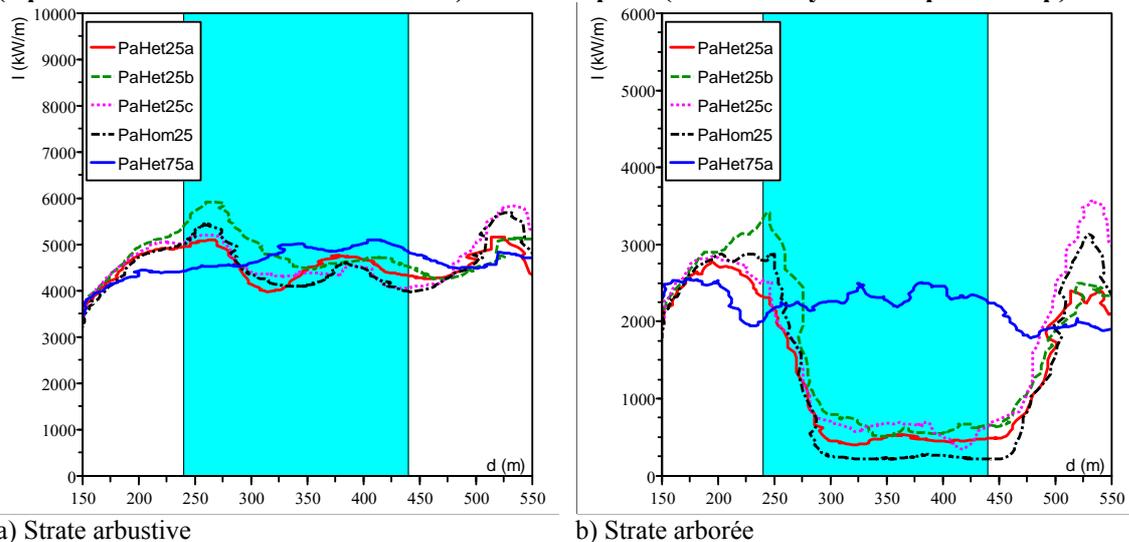
Fig. 4.24. Position de la tête du front de feu pour différentes structures de végétation (équivalent à un recouvrement 25 %) sur la coupure (dans l'écosystème à pin d'Alep)



a) Vitesse de propagation

b) Intensité totale

Fig. 4.25. Caractéristiques de la propagation du feu pour différentes structures de végétation (équivalent à un recouvrement 25 %) sur la coupure (dans l'écosystème à pin d'Alep)



a) Strate arbustive

b) Strate arborée

Fig. 4.26. Contributions des différentes strates à l'intensité du feu pour différentes structures de végétation (équivalent à un recouvrement 25 %) sur la coupure (dans l'écosystème à pin d'Alep)

La **Fig 4.24** représente la position de la tête du feu dans les strates arbustive **(a)** et arborée **(b)**. La structure du combustible influe peu sur les distances parcourues. La propagation est légèrement plus rapide dans le cas des taches de 10 m (*PaHet25b*) que dans le cas homogénéisé (*PaHom25*), mais ces différences ne sont pas significatives, comme le confirme la **Fig 4.25a** qui représente les vitesses de propagation. On observe de nouveau que la vitesse de propagation tend à diminuer sur la coupure, et que la sortie de coupure se traduit par une accélération du feu.

Intensité

En terme d'intensité totale (**Fig 4.25b**), il apparaît que les intensités sur la coupure des cas traités sont très significativement inférieures à celles du cas témoin. L'intensité totale du feu totale sur la coupure homogénéisée (*PaHom25*) est légèrement inférieure à celle des cas de recouvrement 25 % (*PaHet25a, b et c*). Entre ces trois derniers cas, les différences ne semblent pas significatives. La diminution de l'intensité qui succède à l'arrivée du feu sur la coupure se produit en général encore pendant que le feu parcourt les cinquante premiers mètres, même si dans le cas *PaHet25b*, près de 100 m sont nécessaires. On pourra attribuer cette différence, à l'intensité significativement plus forte avant la coupure dans cette simulation.

Ces simulations mettent de nouveau en évidence que les phases de transition forêt/coupure et coupure/forêt s'accompagnent d'augmentations de l'intensité et d'accélération du feu. Au-delà de la coupure, ce sont les simulations *PaHet1025c* et *PaHom25* dans lesquelles les intensités sont les plus élevées.

L'intensité du feu produite par la strate arbustive (**Fig 4.26a**) ne présente pas de différences significatives selon les différentes structures. L'intensité du feu produite par la strate arborée sur la coupure homogénéisée (*PaHom25*) est de l'ordre de 250 kW.m^{-1} , ce qui est significativement inférieur à celles des cas de recouvrement 25 % (*PaHet25a, b et c*), qui fluctuent entre 450 kW.m^{-1} et 800 kW.m^{-1} . Entre ces trois derniers cas, les différences ne semblent pas significatives. Cette différence quantitative confirme l'impression visuelle d'un feu moins intense dans le cas homogénéisé, du type feu de surface (**Fig 4.26b**).

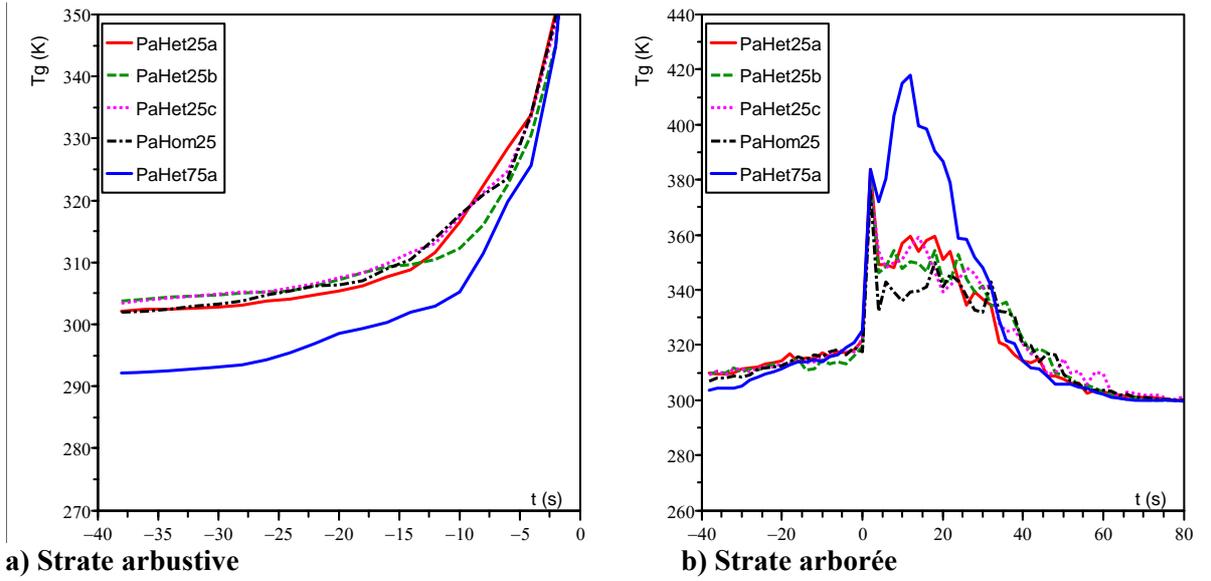


Fig. 4.27. Températures de la phase gazeuse sur la coupure, pour différentes structures de combustible (recouvrement équivalent à 25 %), dans les strates arbustive ($P_{4,1}$) et arborée ($P_{4,2}$)

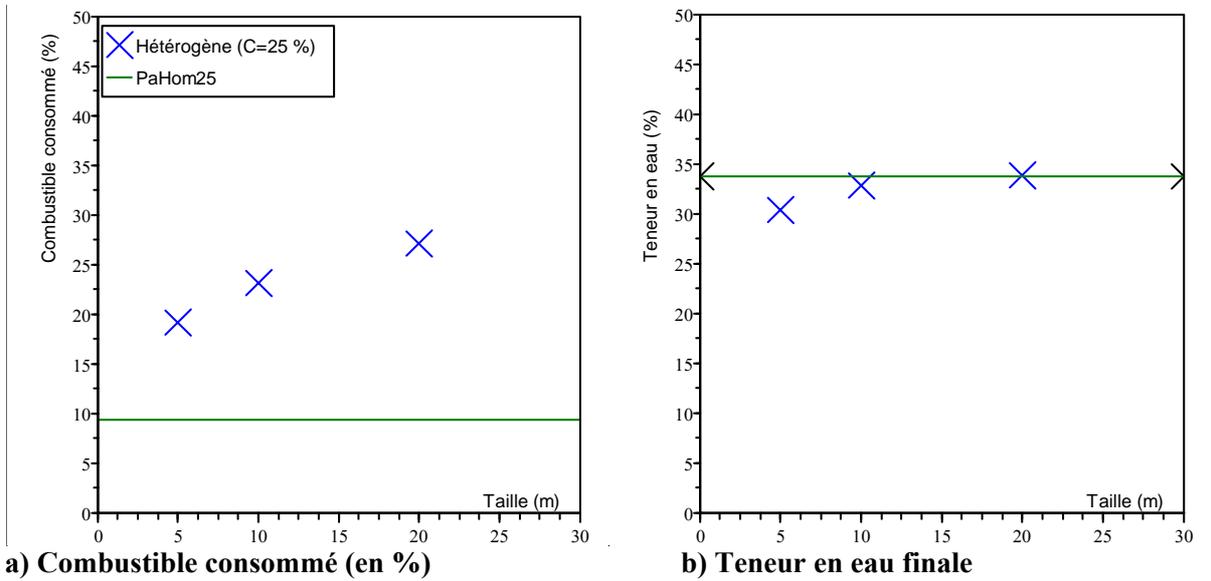


Fig. 4.28. Caractéristiques du combustible après le passage du front de feu sur la coupure ($P_{4,2}$), pour différentes structures de combustible (recouvrement équivalent à 25 %)

Températures atteintes sur la coupure

La **Fig 4.27** représente les températures de la phase gazeuse au niveau de la coupure, obtenues dans les différentes structures de combustible, dans les strates arbustive (**a**) et arborée (**b**). On n'observe pas de différences significatives dans les températures au niveau de la strate arbustive, même si ces températures sont nettement plus élevées que dans le cas témoin, en raison de l'inclinaison du panache. En revanche, dans la canopée, les températures du cas homogénéisé (*PaHom25*) semblent plus faibles d'une vingtaine de degré en moyenne par rapport aux cas hétérogènes.

Sévérité du feu sur la coupure

La **Fig 4.28a** représente le combustible consommé dans la canopée sur la coupure dans les différentes structures de combustible. On observe que le combustible consommé dans les cas de combustibles hétérogènes varie entre 18 et 28 %, alors qu'il se maintient en dessous de 10 % dans le cas du combustible homogénéisé. Le combustible de la strate arborée est donc moins consommé dans le cas homogène, ce qui se traduit par une intensité du feu et des températures dans la canopée plus faible. En revanche, au niveau de la teneur en eau finale du combustible, on n'observe pas de différences significatives avec une teneur en eau finale comprise entre 30 et 34 %, dans les différents cas.

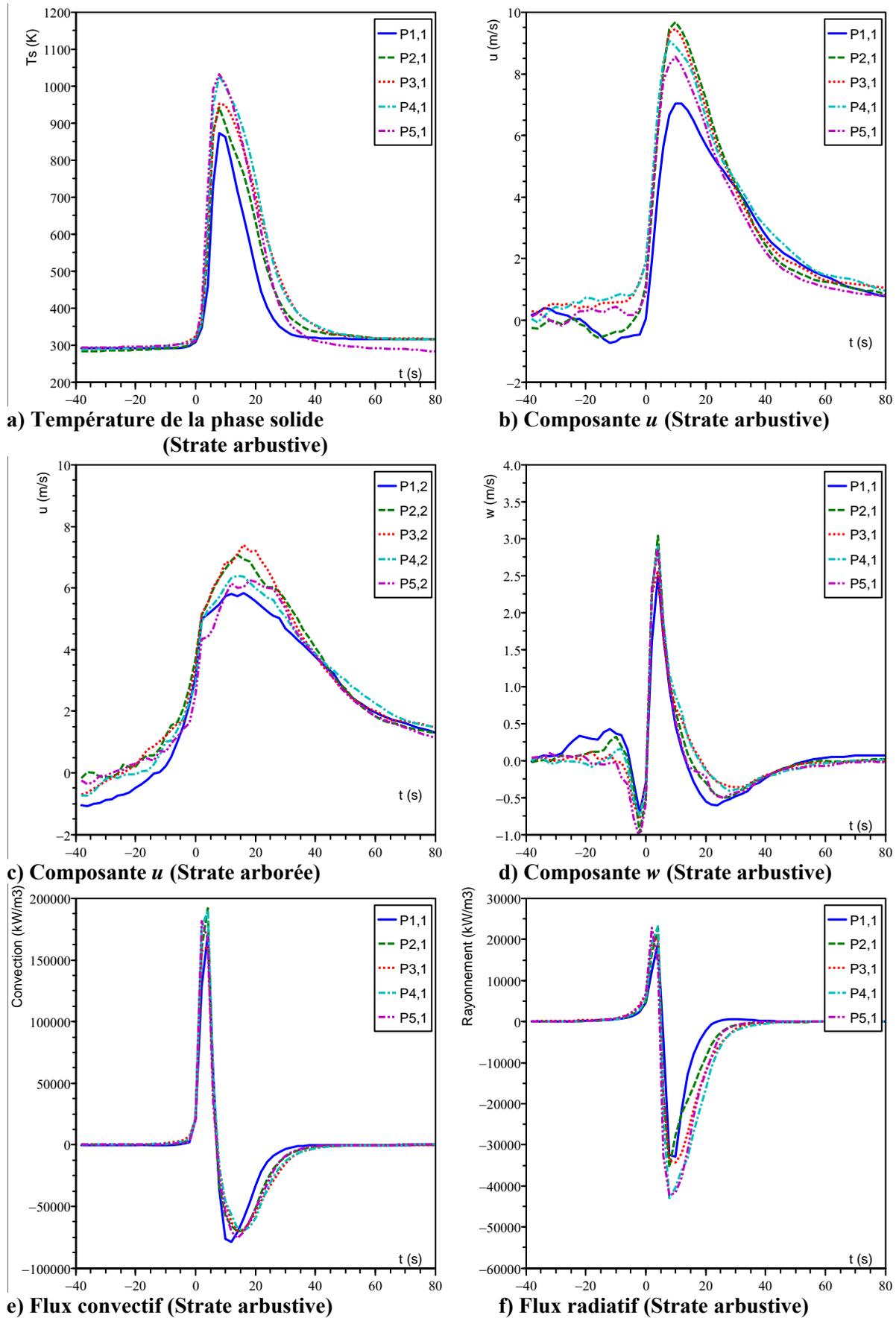


Fig. 4.29. Profils moyens de variables ponctuelles, enregistrés en (P_{1,1}, P_{2,1}, P_{3,1}, P_{4,1} et P_{5,1}) ou (P_{1,2}, P_{2,2}, P_{3,2}, P_{4,2} et P_{5,2}) sur la parcelle témoin (*PmHet75a*) dans l'écosystème à pin Maritime

4. Résultats pour le pin Maritime

Comme dans le cas de l'écosystème à pin d'Alep, nous présentons en introduction une analyse détaillée du cas témoin (*PmHet75a*) et du cas de la coupure totale (*PmHet0a*). Nous introduirons ensuite l'effet du recouvrement (comparaison des cas *PmHet0a*, *PmHet25a*, *PmHet50a* et *PmHet75a*) et de la structure du combustible (comparaison des cas *PmHet25a*, *PmHet25b*, *PmHet25c* et *PmHom25a*).

4.1. Comportement du feu dans le cas *PmHet75a* (cas témoin) : existence d'un régime permanent

Comme pour le cas du pin d'Alep, l'analyse du cas témoin (*PmHet75a*) permet de déterminer un comportement de référence dans le pin Maritime. La **Fig 4.29a** représente l'évolution des températures de la phase solide dans la strate arbustive. On retrouve des profils similaires à ceux du paragraphe 3 pour le pin d'Alep. A partir de $x=250$ m ($P_{2,1}$), les profils deviennent très similaires. Les **Fig 4.29b** et **d** représentent l'évolution des composantes de la vitesse de l'écoulement dans la strate arbustive. Là encore, les courbes sont très similaires dès lors que x est supérieur à 250 m. La composante u de la vitesse dans la strate arborée (**Fig 4.29c**) comprend des valeurs négatives avant le passage du feu, ce qui veut dire que le panache au niveau de la canopée est suffisamment puissant pour aspirer de l'air frais en provenance de l'aval du front. La densité du peuplement est telle que le feu est du type « plume dominated », bien que la densité de la strate arbustive soit limitée.

Les **Fig 4.29e** et **f** montrent l'évolution des flux convectifs et radiatifs reçus par la phase solide. Comme dans le cas du pin d'Alep, les profils de rayonnement semblent réalistes avec une phase d'échauffement à laquelle succède une phase de refroidissement compte tenu de l'utilisation de la méthode de MonteCarlo. On notera, au passage que le transfert radiatif est nettement inférieur au transfert convectif. Pendant l'échauffement, le transfert convectif domine le transfert radiatif d'un ordre de grandeur, mais cette dominance est beaucoup plus relative pendant le refroidissement.

Les comportements obtenus à partir de $x=250$ m ($P_{2,1}$) sont très similaires à ceux observés aux autres points ($P_{3,1}$, $P_{4,1}$, et $P_{5,1}$). On peut en déduire que la propagation du feu s'établit de manière stationnaire avant que le feu atteigne $x=250$ m. En revanche, elle n'est pas encore établie en $x=190$ m, alors que le feu a déjà parcouru plus de 100 m. Les quatre profils obtenus au-delà de $x=250$ m seront utilisés dans la suite comme référence pour les comparaisons avec les simulations réalisées en présence de traitements du combustible sur les coupures.

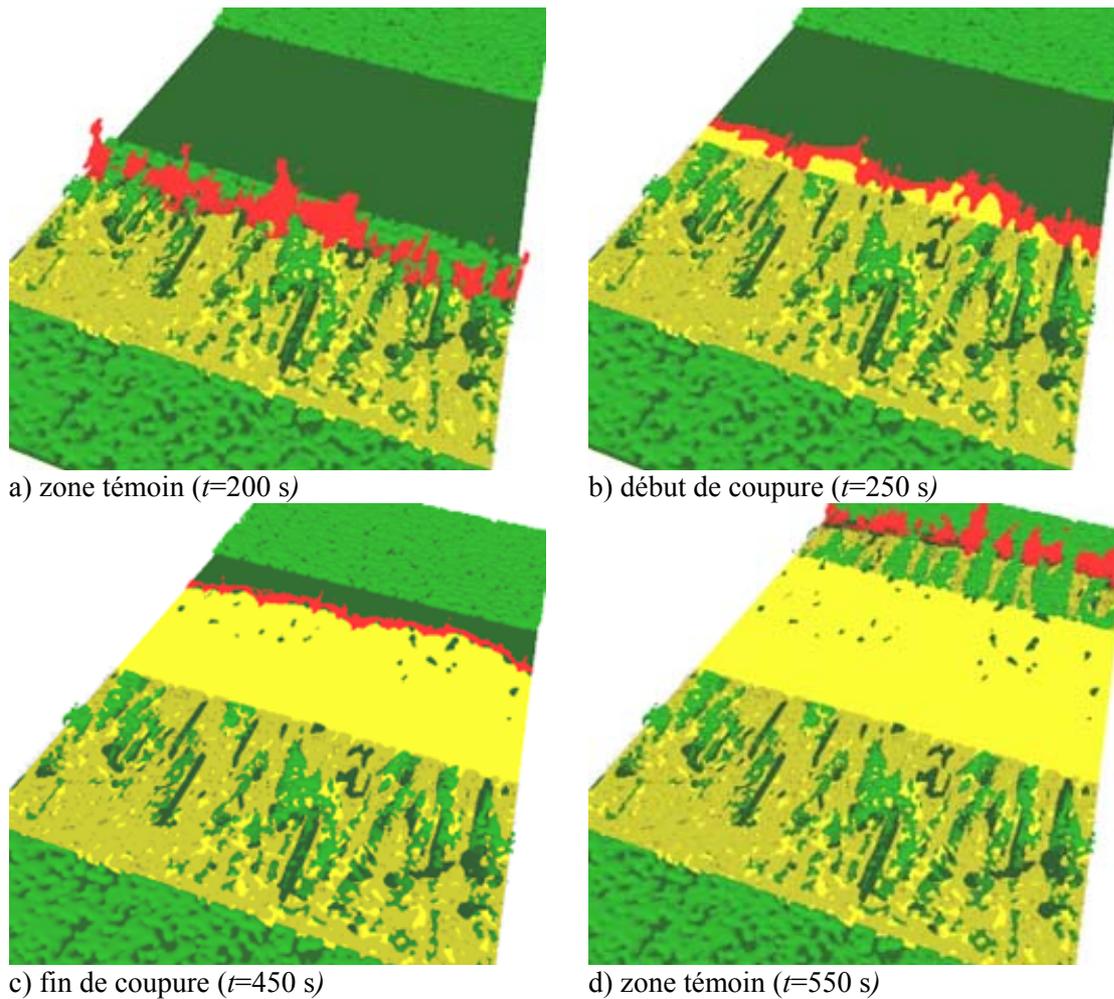


Fig. 4.30. Images instantanées de la propagation du feu sur la coupure totale dans l'écosystème à pin Maritime (*PmHet0*)

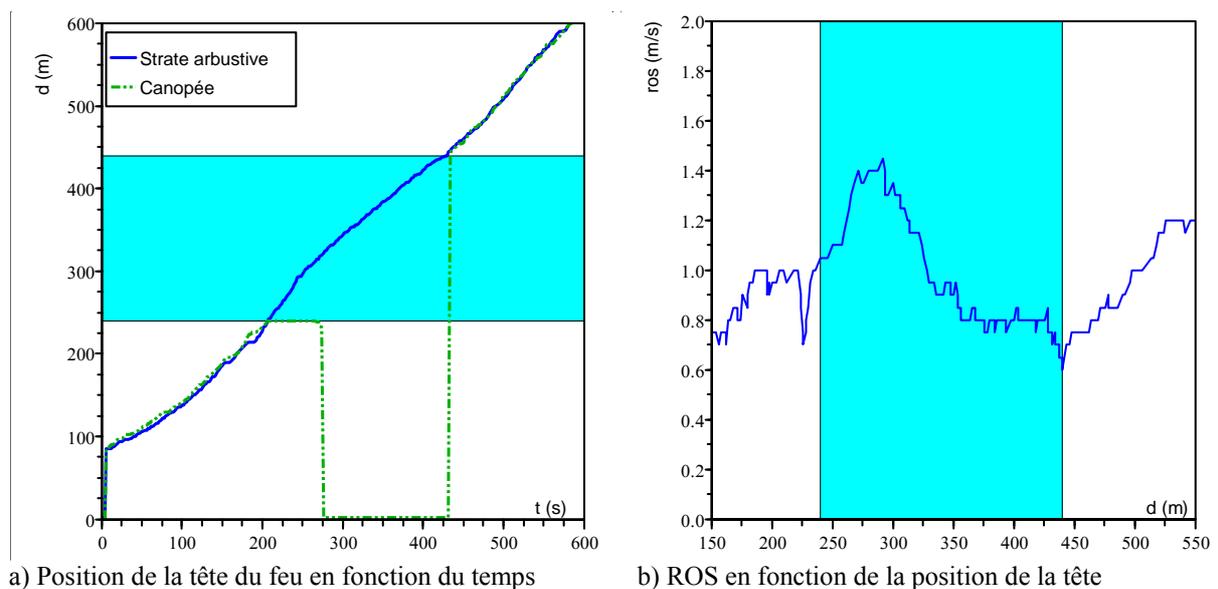
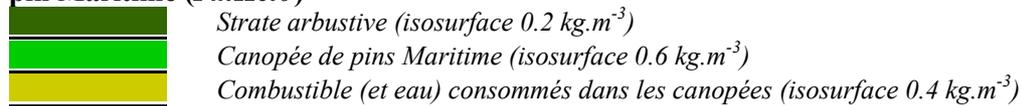


Fig. 4.31. Propagation du feu sur la coupure totale dans l'écosystème à pin Maritime (*PmHet0a*). La zone turquoise représente la coupure.

4.2. Comportement du feu dans le cas *PmHet0a* : effet de la coupure

Propagation du feu au cours de la simulation

Le feu se propage dans la zone non traitée, qu'il parcourt en environ 220 s. Comme dans le cas du pin d'Alep, les dégâts sont visiblement hétérogènes. Cependant, la taille des flammes est plus importante et l'activité en cime nettement plus importante. Le comportement du feu est ici plutôt de type « crowning » (**Fig 4.30a**). Le feu pénètre ensuite sur la coupure et la parcourt en environ 250 s (**Fig 4.30b &c**). Au-delà de la coupure, le feu passe de nouveau en cime (**Fig 4.30d**). Ce schéma est reproduit dans l'ensemble des configurations étudiées.

La **Fig 4.31a** décrit l'évolution de la position de la tête du front en fonction du temps. La courbe bleue correspond à la position du feu dans la strate arbustive, alors que la courbe verte correspond à la position du feu dans la canopée. Lorsque le feu se trouve dans la partie coupure, la valeur de d stagne à 240 m pendant environ 70 s, avant de devenir égale à 0. Cette phase de stagnation traduit une durée de combustion du pin Maritime nettement plus longue que celle du pin d'Alep, qui ne durait qu'une vingtaine de seconde.

L'accélération qui se produit en début de coupure est plus nette que dans le pin d'Alep (**Fig 4.31a**). La durée de cette phase d'accélération coïncide avec la période pendant laquelle la strate arborée située en amont de la coupure est en combustion. La vitesse du front augmente de près de 40 % (**Fig 4.31b**), atteignant temporairement 1.4 m.s^{-1} . La valeur de la vitesse est à peu près stabilisée autour de 0.8 m.s^{-1} sur la coupure (comme dans le pin d'Alep). Une fois la coupure franchie, une accélération nette de la vitesse de propagation est observée, mais moins forte qu'en début de coupure (1.2 m.s^{-1}).

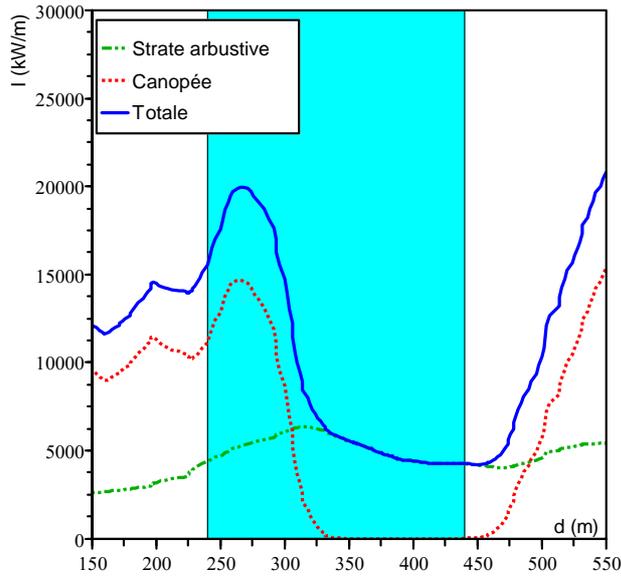


Fig. 4.32. Intensité du feu sur la coupure totale dans l'écosystème à pin Maritime (*PmHet0a*)

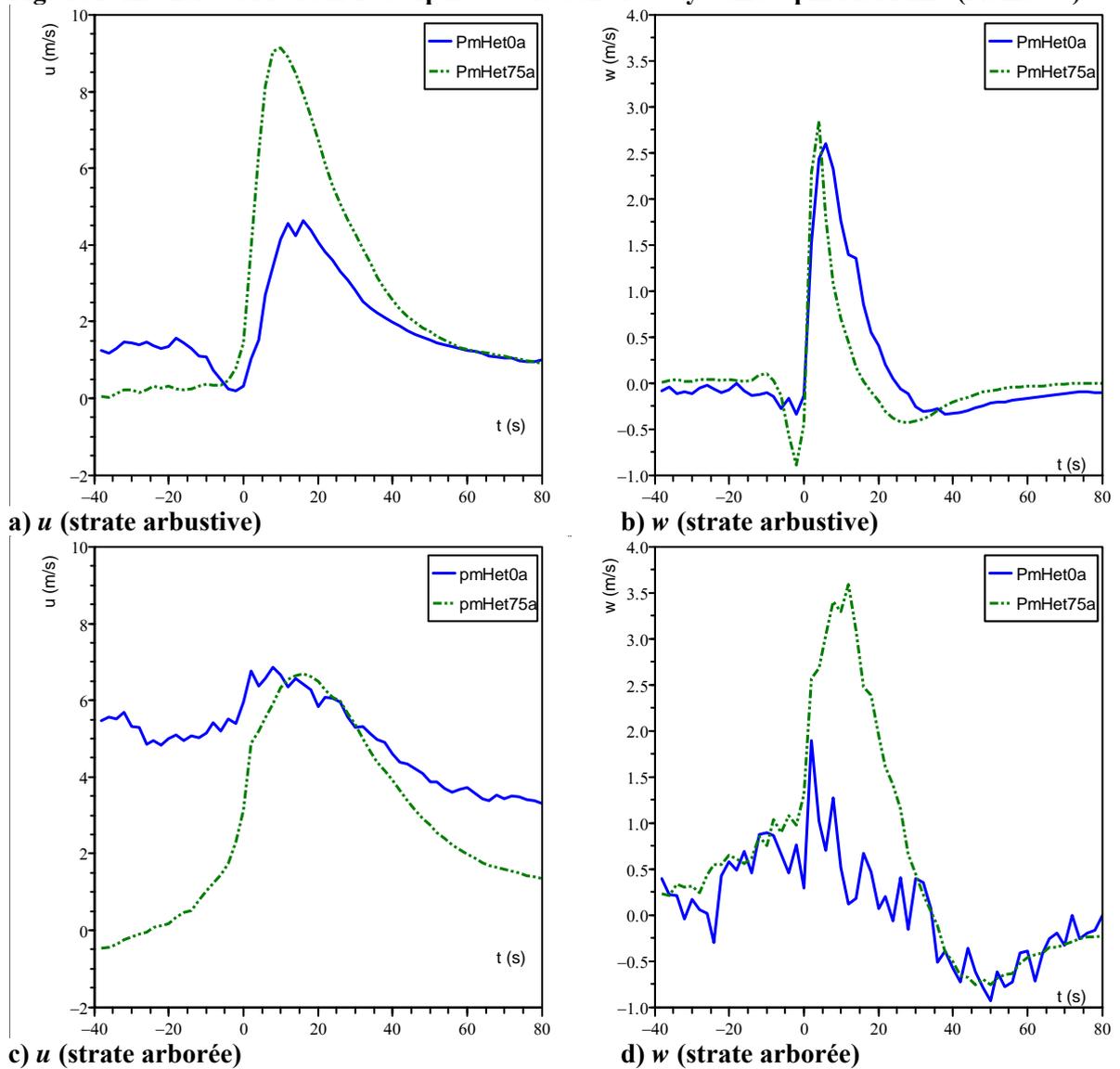


Fig. 4.33. Comparaison des composantes de la vitesse de l'écoulement dans la coupure (*PmHet0*) avec celle de la parcelle témoin (*PmHet75a*), dans les strates arbustive ($P_{4,1}$) et arborée ($P_{4,2}$)

Intensité du feu

La **Fig 4.32** représente l'évolution de l'intensité du feu en fonction de la position de la tête du front sur la coupure. La courbe bleue représente l'intensité totale (kW.m^{-1}), alors que les courbes verte et rouge représentent respectivement les intensités produites par la combustion des strates arbustive et arborée. Puisqu'aucune canopée n'est inflammée lorsque le feu se trouve sur la coupure, l'intensité totale coïncide exactement avec celle produite par la combustion de la strate arbustive. Dans la zone précédant la coupure, on observe une phase d'augmentation des intensités qui correspond à un élargissement progressif de la profondeur du front. Ensuite, la part de l'intensité produite par la canopée aux abords de la coupure augmente, avant de diminuer à nouveau. Cette intensité n'atteint la valeur 0, que lorsque le feu s'est déjà propagé sur 50 m à l'intérieur de la coupure. On observe également que l'entrée du feu sur la coupure s'accompagne d'une augmentation temporaire de la part de l'intensité due à la combustion de la strate arbustive, qui atteint près de 6000 kW.m^{-1} , avant de diminuer pour se stabiliser à une valeur proche de 4000 kW.m^{-1} . La valeur de l'intensité totale passe de près de $15\text{-}20000 \text{ kW.m}^{-1}$ en zone non traitée à seulement 4000 kW.m^{-1} sur la coupure. Une fois la coupure franchie, la part de l'intensité due à la combustion de la strate arborée réaugmente, ainsi que celle due à la combustion de la strate arbustive. L'intensité totale atteint alors 25000 kW.m^{-1} . Le domaine de simulation n'est pas suffisamment long pour observer le retour à des valeurs proches de celles correspondant aux régimes précédant la coupure.

Caractéristiques de l'écoulement sur la coupure

Les **Fig 4.33a** et **c** représentent l'évolution de la vitesse moyenne de l'écoulement dans les strates arbustive et arborée pour la simulation *PmHet0a* au milieu de la coupure et pour la simulation témoin (*PmHet75a*). Dans la strate arbustive sur la coupure (**Fig 4.33a**), la composante de la vitesse est en permanence positive, ce qui traduit un comportement « wind-driven ». Comme dans le pin d'Alep, l'écoulement est nettement plus rapide avant le passage du feu en présence de coupure, ce qui se traduit par un panache couché.

Concernant la composante w de la vitesse de l'écoulement au niveau de la strate arbustive, celle-ci est négative juste avant l'arrivée du front dans la zone témoin, alors qu'elle reste voisine de 0 sur la coupure (**Fig 4.33b**). Plus haut dans la canopée (**Fig 4.33d**), la composante w oscille autour de valeurs faiblement positives sur la coupure, avant de passer par le pic correspondant au passage du front principal. En présence de canopée, cette composante est nettement positive. Comme dans le cas du pin d'Alep, ceci peut être attribué au fait que le panache est plus profond dans la simulation témoin (*PmHet75a*).

Comme dans le pin d'Alep, le panache est donc nettement plus couché en présence de la coupure de combustible que dans la zone témoin.

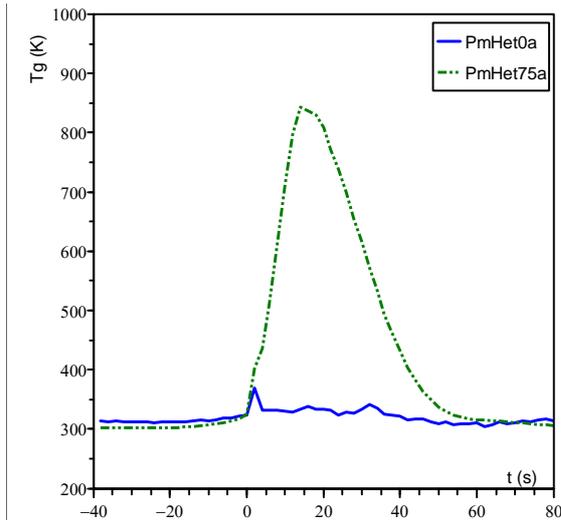


Fig. 4.34. Comparaison de la température dans la phase gazeuse de la canopée dans la coupure (*PmHet0*) et dans la parcelle témoin (*PmHet75a*)

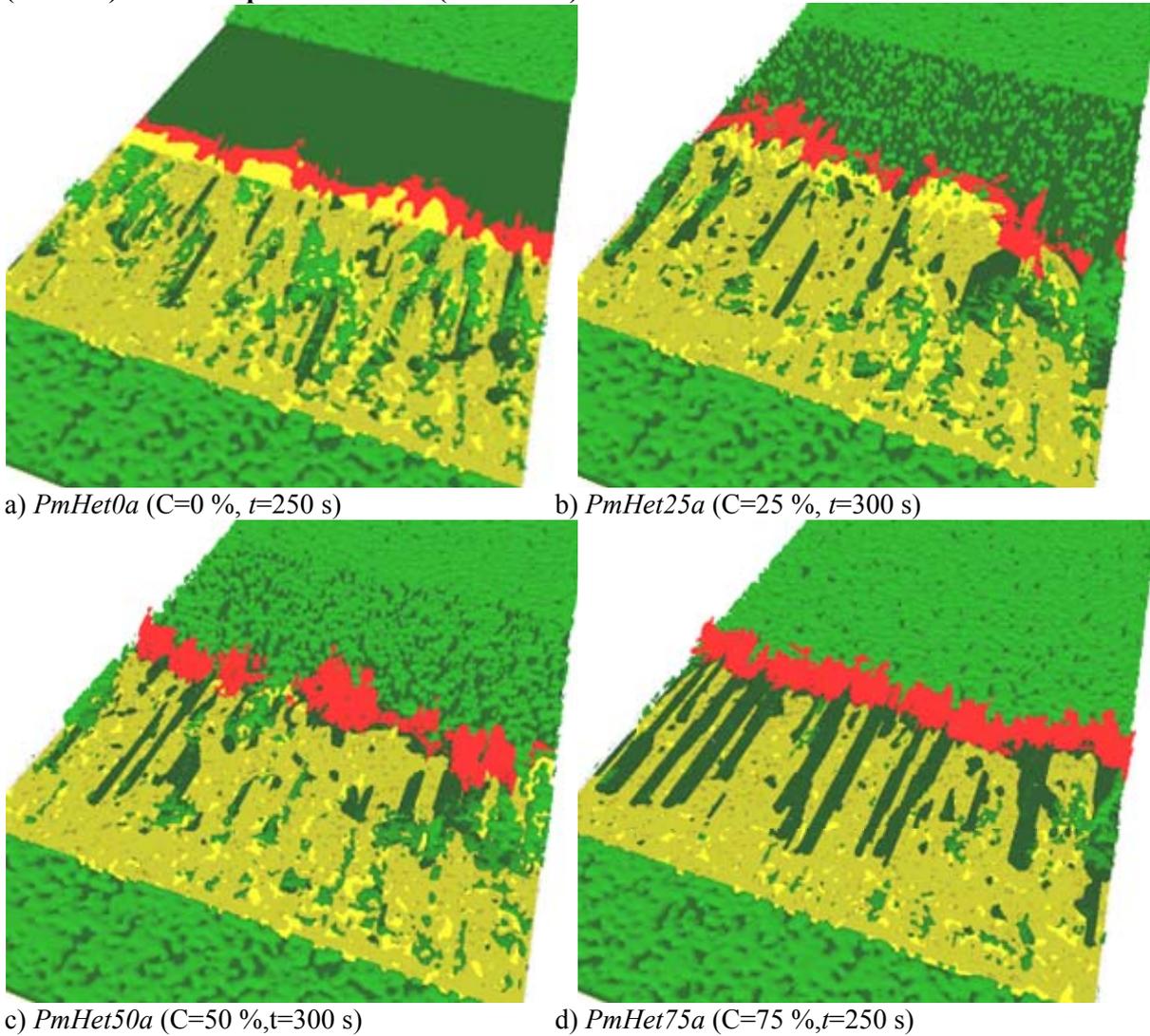
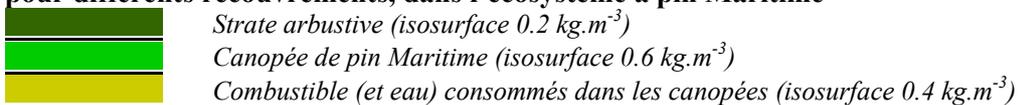


Fig. 4.35. Images instantanées de la propagation du feu lors de son passage en début de coupure pour différents recouvrements, dans l'écosystème à pin Maritime



Températures atteintes sur la coupure

La **Fig 4.34** représente l'évolution de la température de la phase gazeuse dans la canopée pour la simulation *PmHet0* au milieu de la coupure et pour la simulation témoin (*PmHet75a*). Le profil obtenu pour *PmHet0* est proche de celui que l'on obtenait pour *PaHet0* (Pin d'Alep). En revanche, en présence de la canopée de pin Maritime, les températures atteintes par le gaz au passage du front de feu sont largement supérieures avec un pic autour de 800 K. Cet échauffement dure environ une minute. La présence d'une canopée qui s'enflamme induit une modification des températures nettement plus profonde dans le cas du pin Maritime que dans le cas du pin d'Alep au dessus de la strate arbustive. Cette valeur moyenne élevée atteinte par le pic de température, confirme qu'une grande partie de la canopée s'est enflammée et que nous sommes en présence d'un feu de cime.

4.3. Impact du recouvrement

Les simulations qui sont analysées maintenant varient par le recouvrement de la strate arborée au sein de la coupure (de 0 à 75 %).

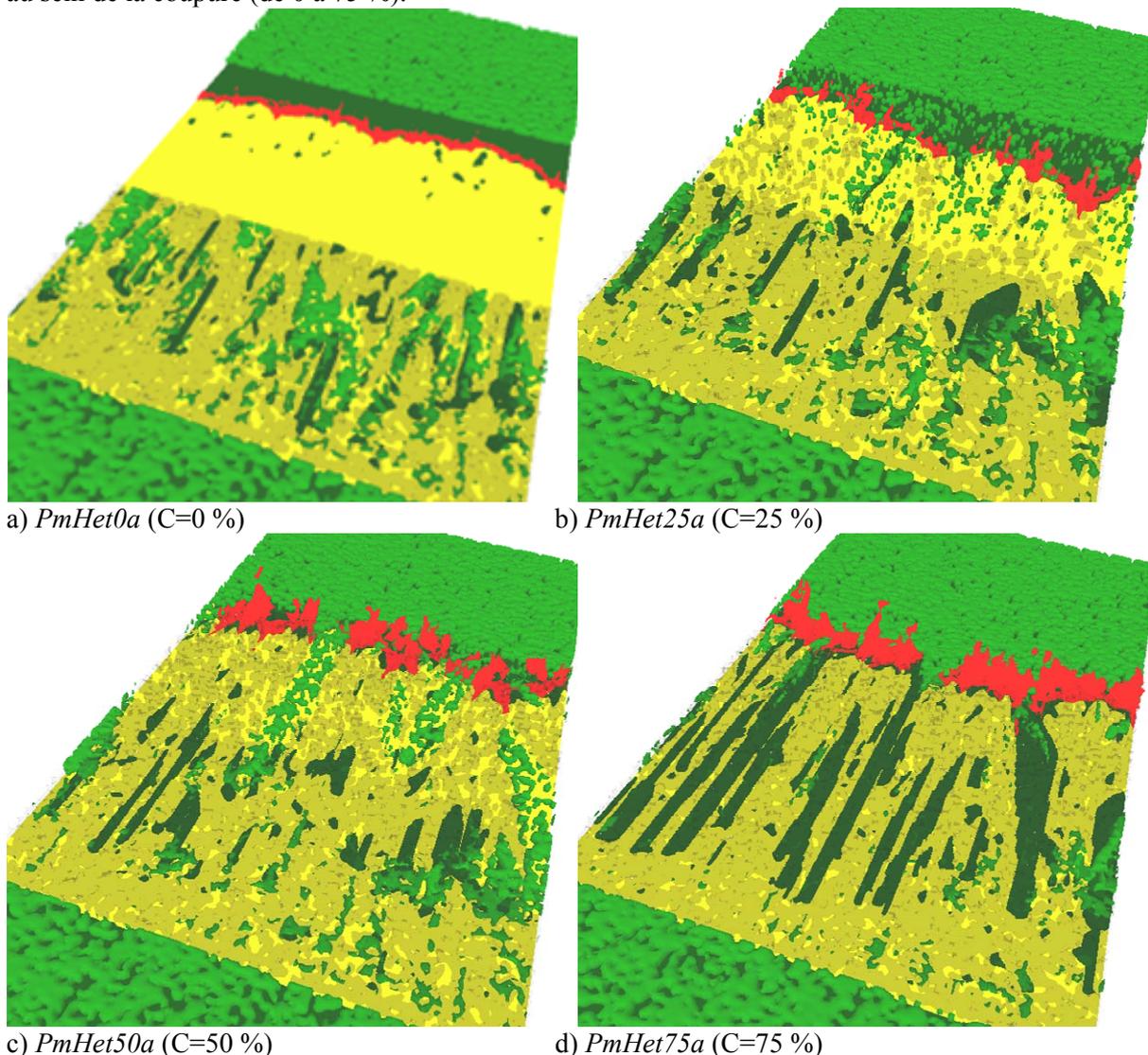
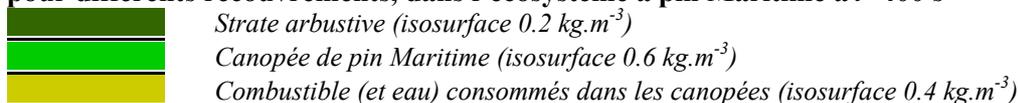
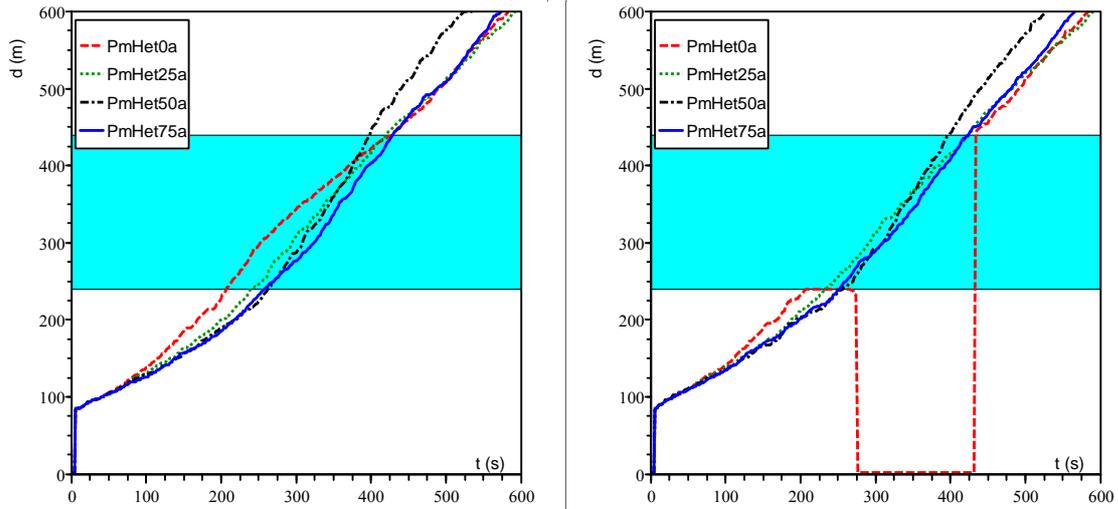


Fig. 4.36. Images instantanées de la propagation du feu lors de son passage en fin de coupure pour différents recouvrements, dans l'écosystème pin Maritime à $t=400$ s

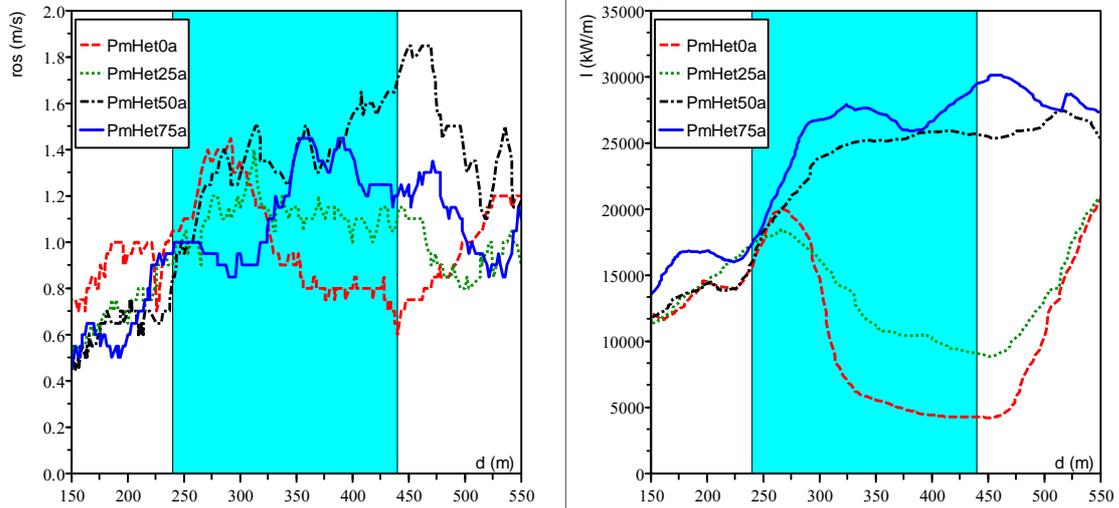




a) Dans la strate arbustive

b) Dans la strate arborée

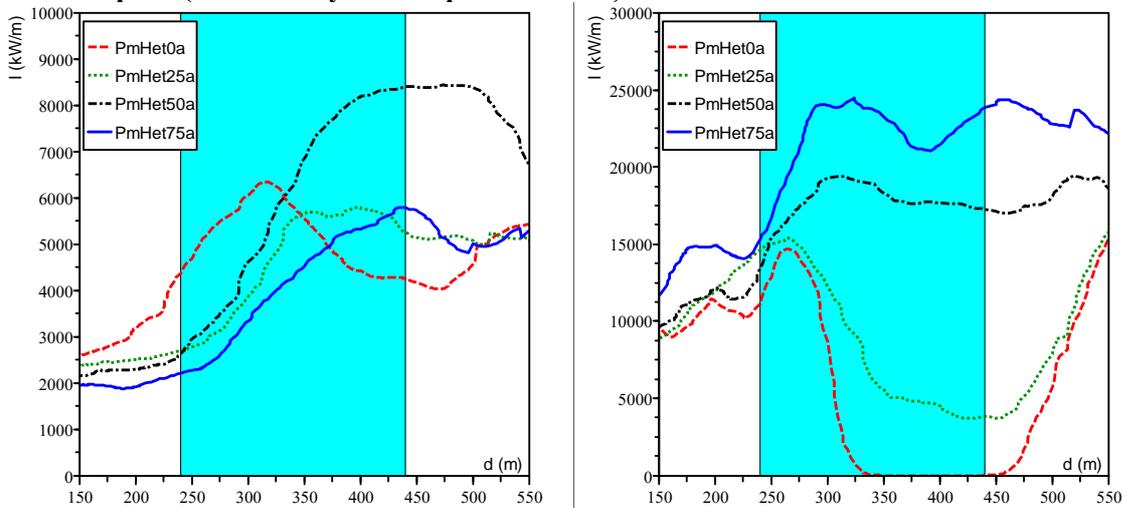
Fig. 4.37. Position de la tête du front de feu dans les différentes strates pour différentes valeurs de recouvrement sur la coupure (dans l'écosystème à pin Maritime)



a) Vitesse de propagation

b) Intensité totale

Fig. 4.38. Caractéristiques de la propagation du feu pour différentes valeurs de recouvrement sur la coupure (dans l'écosystème à pin Maritime)



a) Strate arbustive

b) Strate arborée

Fig. 4.39. Contribution des différentes strates à l'intensité du feu pour différentes valeurs de recouvrement sur la coupure (dans l'écosystème à pin Maritime)

Propagation du feu

La **Fig 4.35** représente des images instantanées des simulations au moment où le feu arrive en début de coupure, pour des recouvrements variés sur la coupure (de 0 à 75 %). Les cas où le recouvrement de la canopée n'est pas nul (**Fig 4.35b à d**), se caractérisent par des flammes ponctuellement plus hautes que le cas de la coupure totale (*PmHet0a*).

La **Fig 4.36** représente le front de feu arrivant en fin de coupure pour le même jeu de simulations. On observe que les fronts de feu ont parcouru environ la même distance pendant 400 s. Si l'on compare cette figure à la précédente, on observe que les tailles de flammes sont nettement inférieures dans les cas où le recouvrement de la canopée est de 0 et 25 % (**Fig 4.36a et b**), alors que celles-ci demeurent sensiblement identiques dans les cas de recouvrement 50 et 75 % (**Fig 4.36c et d**).

Dans les trois cas présentant une canopée, on observe des couloirs de dégâts ; ceux-ci sont les plus marqués que le recouvrement est le plus fort. Bien que les champs de vents incidents soient similaires d'une simulation à l'autre, la position des couloirs n'est pas identique même si certaines similitudes peuvent être observées, notamment en amont et sur la coupure.

La **Fig 4.37** représente la position de la tête du feu dans les strates arbustive (**a**) et arborée (**b**). On observe que le recouvrement influe peu sur les distances parcourues sur l'ensemble du domaine, sauf dans le cas du feu se propageant sur des coupures à 50 % de recouvrement (qui était déjà plus légèrement plus rapide dans le cas du pin d'Alep). Si l'on s'en tient à l'analyse des vitesses sur la coupure proprement dite (**Fig 4.38a**), on observe que les vitesses les plus faibles sont prédites sur la coupure totale (voisine de 0.8 m.s^{-1}), qu'elles sont légèrement supérieures sur la coupure à 25 % et dans le cas témoin (voisine de 1.2 m.s^{-1} en moyenne), et qu'elles sont significativement plus élevées sur la coupure à 50 % (voisine de 1.5 m.s^{-1} en moyenne).

Intensité

En terme d'intensité totale (**Fig 4.38b**), on observe une différence quantitative très importante entre les cas de recouvrement 0 et 25 % et les cas de recouvrement 50 et 75 %. L'intensité est en effet considérablement réduite par la coupure pour les recouvrements faibles, alors que l'intensité de la coupure à 50 % demeure quasi identique à celle du témoin. Il semblerait que la diminution du combustible disponible soit dans ce cas compensée par une accélération du feu. Dans les cas où la présence induit une réduction efficace de l'intensité (*PmHet0a* et *PmHet25a*), on observe qu'il faut que le feu ait parcouru environ 100 m sur la coupure pour que la diminution soit maximale.

Par ailleurs, nous observons que les phases de transition forêt/coupure et coupure/forêt s'accompagnent d'augmentations de l'intensité et d'accélération du feu, comme dans le cas du pin d'Alep.

La **Fig 4.39** représente les contributions respectives du combustible des strates arbustive et arborée à l'intensité totale. La contribution de la strate arbustive est assez stable dans le temps, une fois l'accroissement initial de la largeur du front établi. On observe cependant une diminution sur la coupure de cette intensité dans les cas de recouvrement 0 et 25 % par rapport aux cas de 50 et 75 %. La valeur moyenne de cette intensité est d'environ 4500 kW.m^{-1} et elle oscille entre 4000 kW.m^{-1} (sur la coupure à faible recouvrement) et 6000 kW.m^{-1} (sortie de coupure). La contribution du combustible de la canopée à l'intensité totale sur la coupure diminue d'autant plus que le recouvrement est faible. La valeur de l'intensité due à la canopée sur la coupure varie entre 0 kW.m^{-1} et 22500 kW.m^{-1} , selon le recouvrement. Ces valeurs sont nettement plus élevées que l'intensité produite par la strate arbustive ou même que celle produite par la canopée de pins d'Alep. On observe que la coupure avec 25 % de recouvrement permet de maintenir cette intensité en dessous du seuil de 5000 kW.m^{-1} pendant les 100 derniers mètres de la coupure.

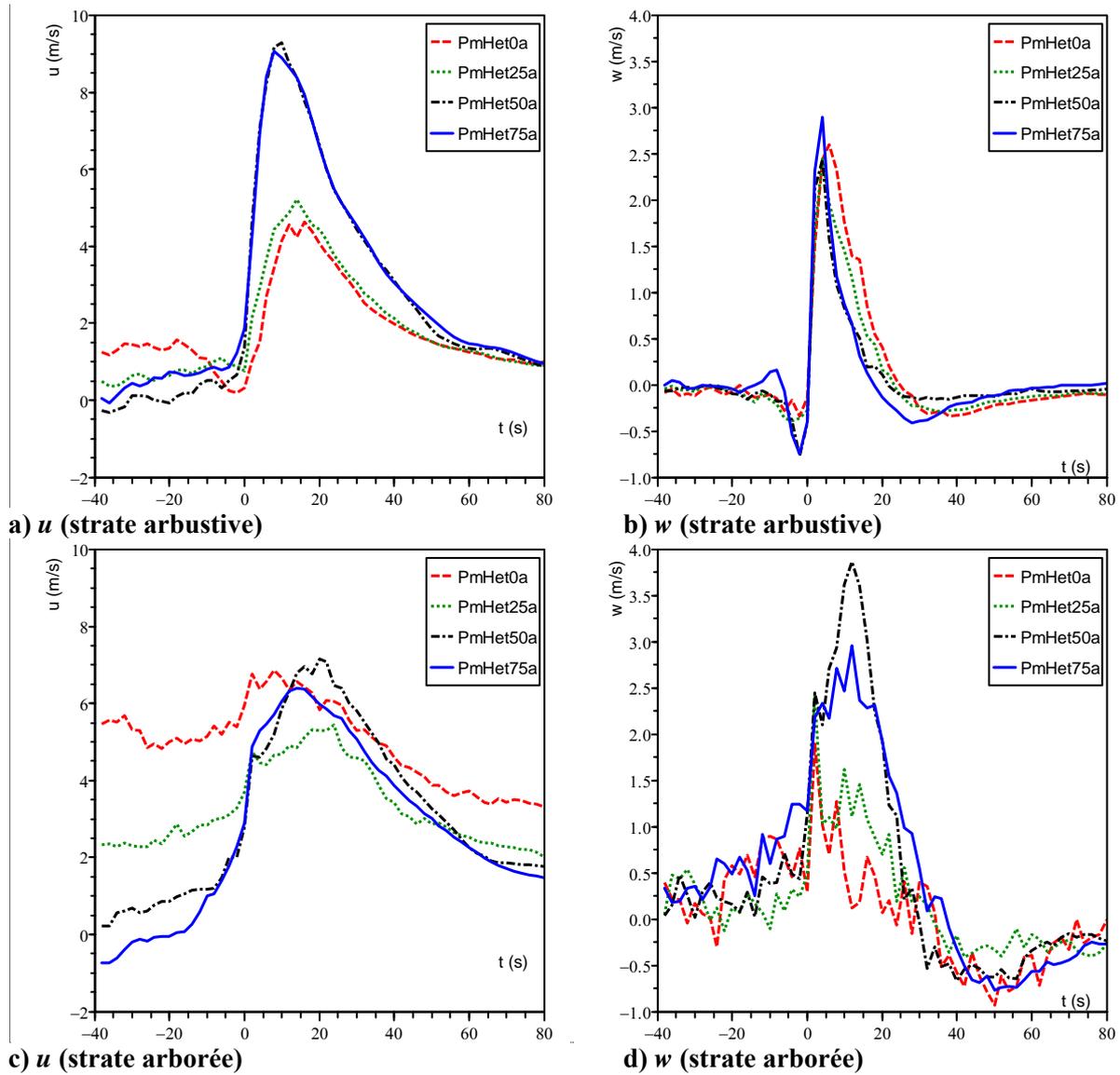


Fig. 4.40. Comparaison des composantes de la vitesse de l'écoulement dans la coupe pour différentes valeurs de recouvrement, dans les strates arbustive ($P_{4,1}$) et arborée ($P_{4,2}$)

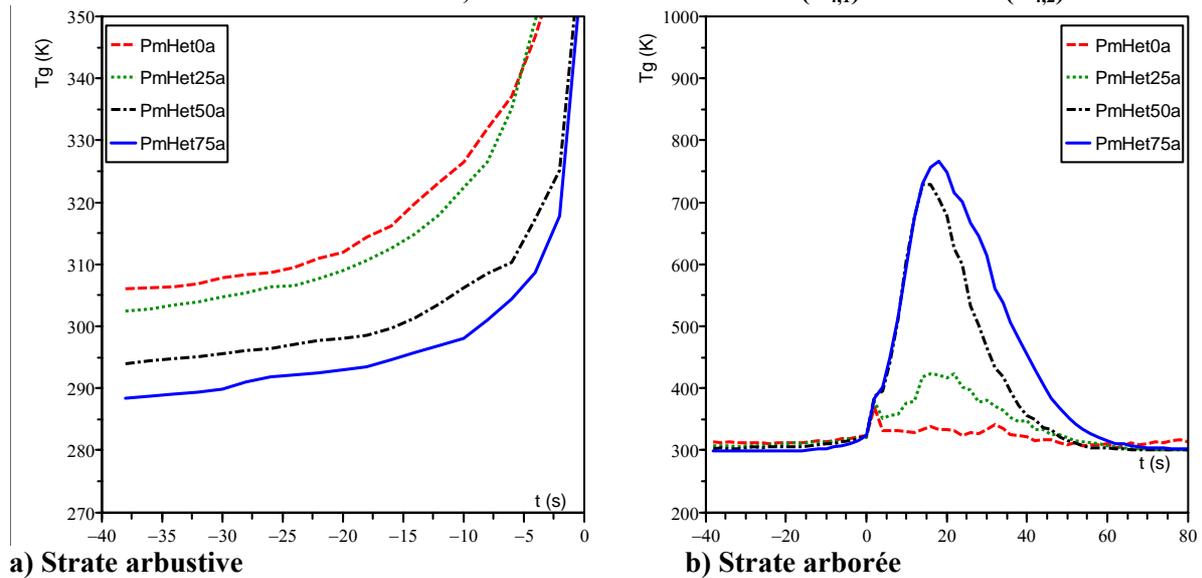


Fig. 4.41. Températures de la phase gazeuse sur la coupe pour différentes valeurs de recouvrement, dans les strates arbustive ($P_{4,1}$) et arborée ($P_{4,2}$)

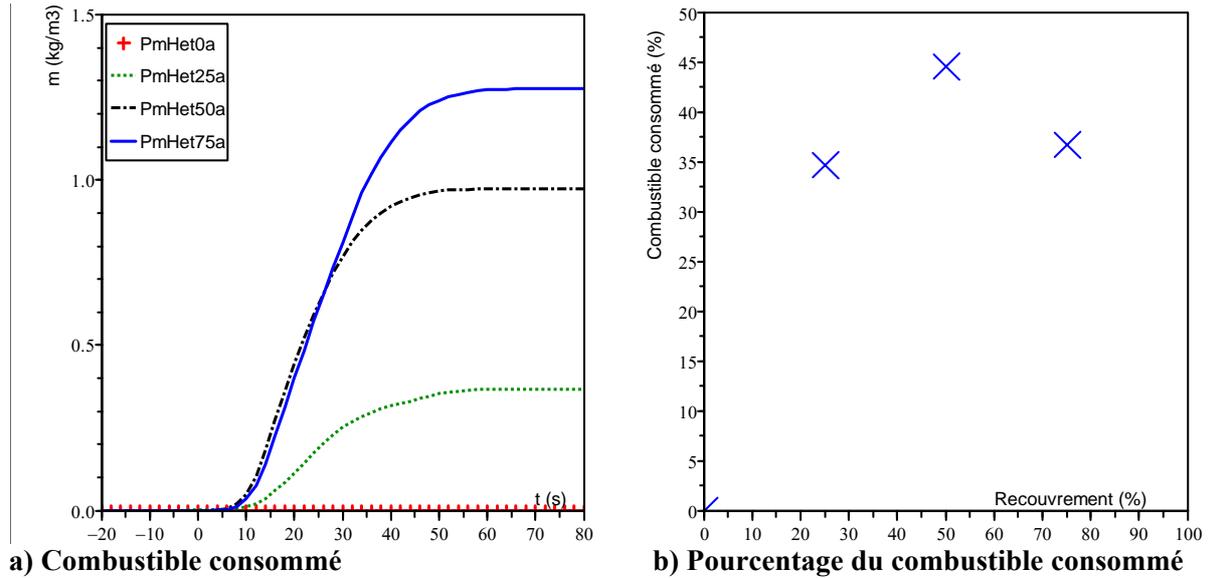
Caractéristiques de l'écoulement sur la coupure

Les **Fig 4.40 a, b, c et d** représentent les composantes u et w de l'écoulement dans les strates arbustive et arborée. La composante u de la vitesse est d'autant plus élevée avant le passage du feu que le recouvrement est faible. C'est le cas à la fois près du sol et dans la canopée. On notera en particulier que seul le cas à recouvrement 75 % présente des composantes u négatives, même si c'est presque le cas pour le recouvrement de 50 %.

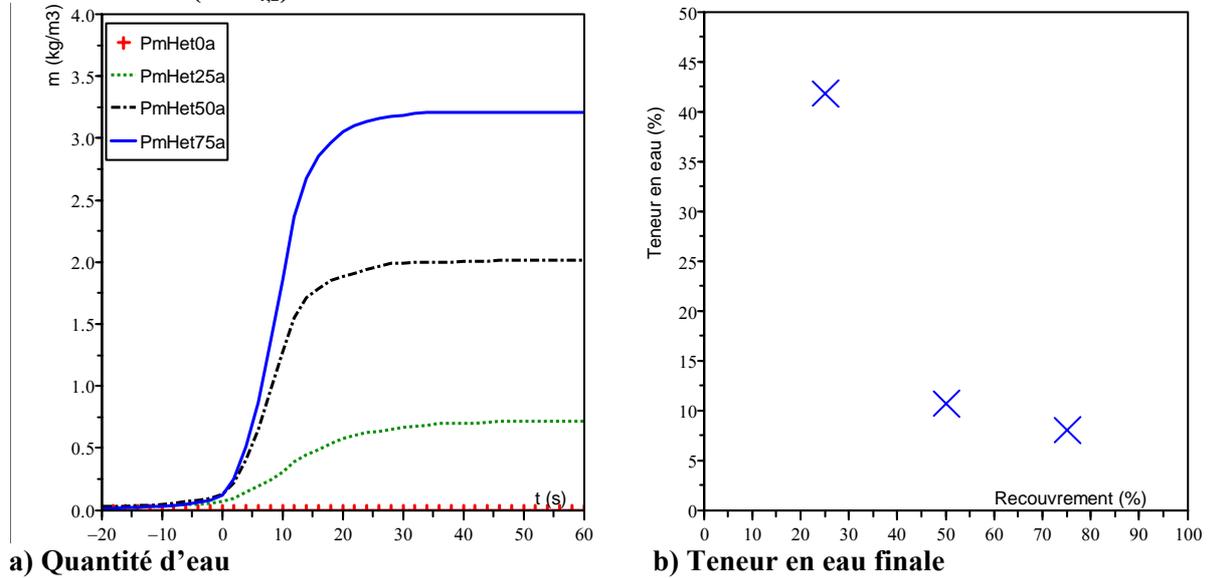
Dans la canopée, la composante w de la vitesse est très significativement plus élevée dans les cas de recouvrement 50 et 75 % par rapport aux cas 0 et 25 % lors du passage du front, ce qui traduit un panache beaucoup plus puissant.

Températures atteintes sur la coupure

La **Fig 4.41a** représente l'évolution des températures moyennes dans la strate arbustive. Comme pour le pin d'Alep, les températures dans la strate arbustive sont d'autant plus élevées que le recouvrement est faible. On pourra attribuer ces différences de températures au fait que le panache est d'autant plus couché que le recouvrement est faible, ce qui favorise une élévation de la température près du sol avant l'arrivée du front. La **Fig 4.41b** présente les valeurs des températures moyennes obtenues dans la coupure au niveau du milieu de la canopée. On observe que ces températures moyennes sont d'autant plus élevées que le recouvrement est important. Ceci traduit le fait que la zone en combustion est d'autant plus importante que le recouvrement est important. La différence quantitative entre les cas de recouvrement 25 et 50 % est très significative.



a) Combustible consommé b) Pourcentage du combustible consommé
 Fig. 4.42. Consommation du combustible de la canopée de pin Maritime en fonction du recouvrement (en $P_{4,2}$)



a) Quantité d'eau b) Teneur en eau finale
 Fig. 4.43. Evolution de la teneur en eau de la canopée de pin Maritime en fonction du recouvrement (en $P_{4,2}$)

Sévérité du feu sur la coupure

La **Fig 4.42a** représente le combustible consommé dans la strate arbustive en milieu de coupure. La consommation de combustible a lieu principalement pendant les 40 s succédant au début de l'échauffement ($t=0$ s). On observe que les pentes (combustible consommé par unité de temps) sont nettement plus raides dans les cas 50 et 75 % que dans le cas 25 %. Cependant, le pourcentage de combustible consommé par rapport au combustible disponible est finalement peu différent dans ces trois cas (**Fig 4.42b**).

La **Fig 4.43b** représente la teneur en eau finale moyenne du combustible dans le peuplement après passage du feu. On observe une différence qualitative importante entre les cas à plus de 50 % de recouvrement et le cas à 25 % de recouvrement, pour lequel la teneur en eau moyenne dépasse les 40 % dans les cas de recouvrement plus élevé. La sévérité du feu (dégât écologique dans le peuplement) est donc moindre.

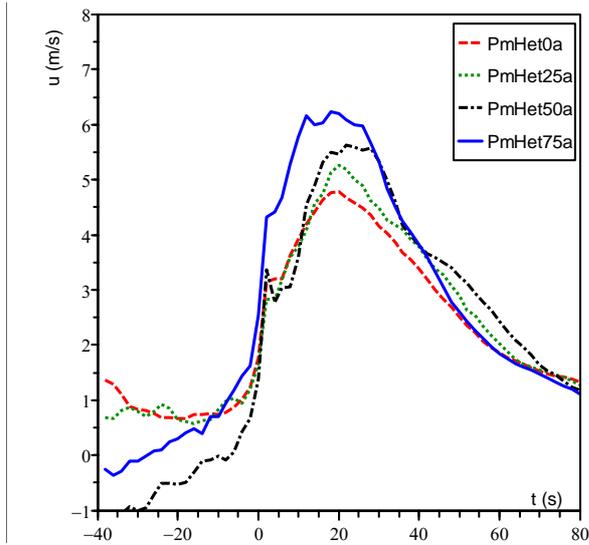


Fig. 4.44. Composante u de la vitesse de l'écoulement en aval de la coupure ($P_{5,2}$; $x=490$ m) pour différentes valeurs de recouvrement

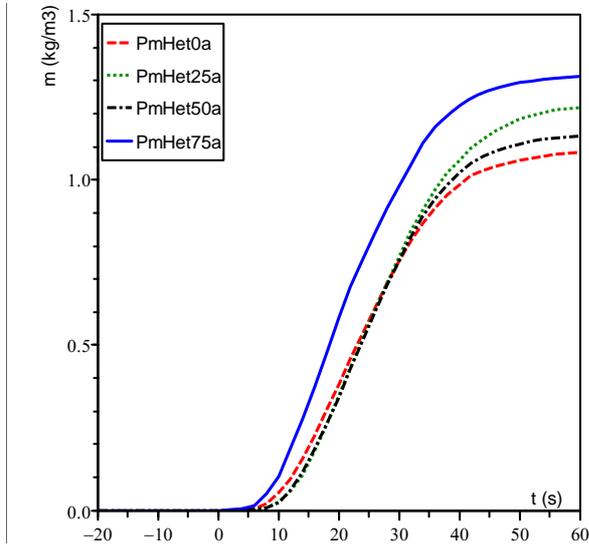


Fig. 4.45. Consommation de la strate arbustive au-delà de la coupure ($P_{5,1}$; $x=490$ m) pour différentes valeurs de recouvrement

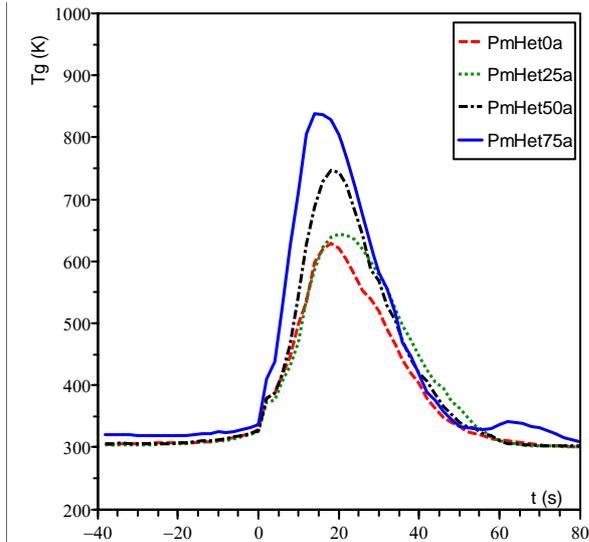


Fig. 4.46. Températures de la phase gazeuse en aval de la coupure ($P_{5,2}$; $x=490$ m) pour différentes valeurs de recouvrement

Analyse du comportement en sortie de la coupure

Les feux des simulations *PmHet50a* et *PmHet75a* sont nettement plus intenses après la coupure que ceux de *Pmhet0a* et *PmHet25a*. Ceci se traduit par un comportement « plume dominated » pour les premiers (**Fig 4.44**), une consommation de la strate arbustive plus rapide (pour *PmHet75a*, **Fig 4.45**) et des températures plus élevées (**Fig 4.46**).

4.4. Impact de la structure du combustible (pour un recouvrement équivalent à 25 %)

La **Fig 4.47** représente des images instantanées des simulations au moment où le feu aborde le début de la coupure, pour des structures variées sur la coupure (taille de taches de 4 m, 10 m, 20 m à recouvrement 25 % et combustible homogénéisé). La **Fig 4.48** représente les mêmes simulations au moment où le front de feu arrive en fin de coupure. Ces différentes configurations correspondent toutes à une même quantité de combustible sur la coupure. Les feux en début de coupure se caractérisent tous par des flammes très hautes, en particulier le cas *PmHom25*, où l'on observe un embrasement général des cimes. On notera que la simulation *PmHet25b* produit un feu plus intense que les autres simulations hétérogènes dans la partie droite de la coupure. Pour une raison non identifiée (mis à part le fait que les tirages d'arbres ne sont pas identiques dans les parties non traitées d'une simulation à l'autre), il semble que le feu se soit propagé avec un taux de combustion plus faible dans la partie située en amont de la coupure dans les simulations *PmHet25a* et *PmHet25c*.

En bout de coupure, les tailles de flammes ont fortement diminué, même si l'on observe du « torching » dans les configurations hétérogènes. Dans la configuration homogénéisée, le feu demeure très actif.

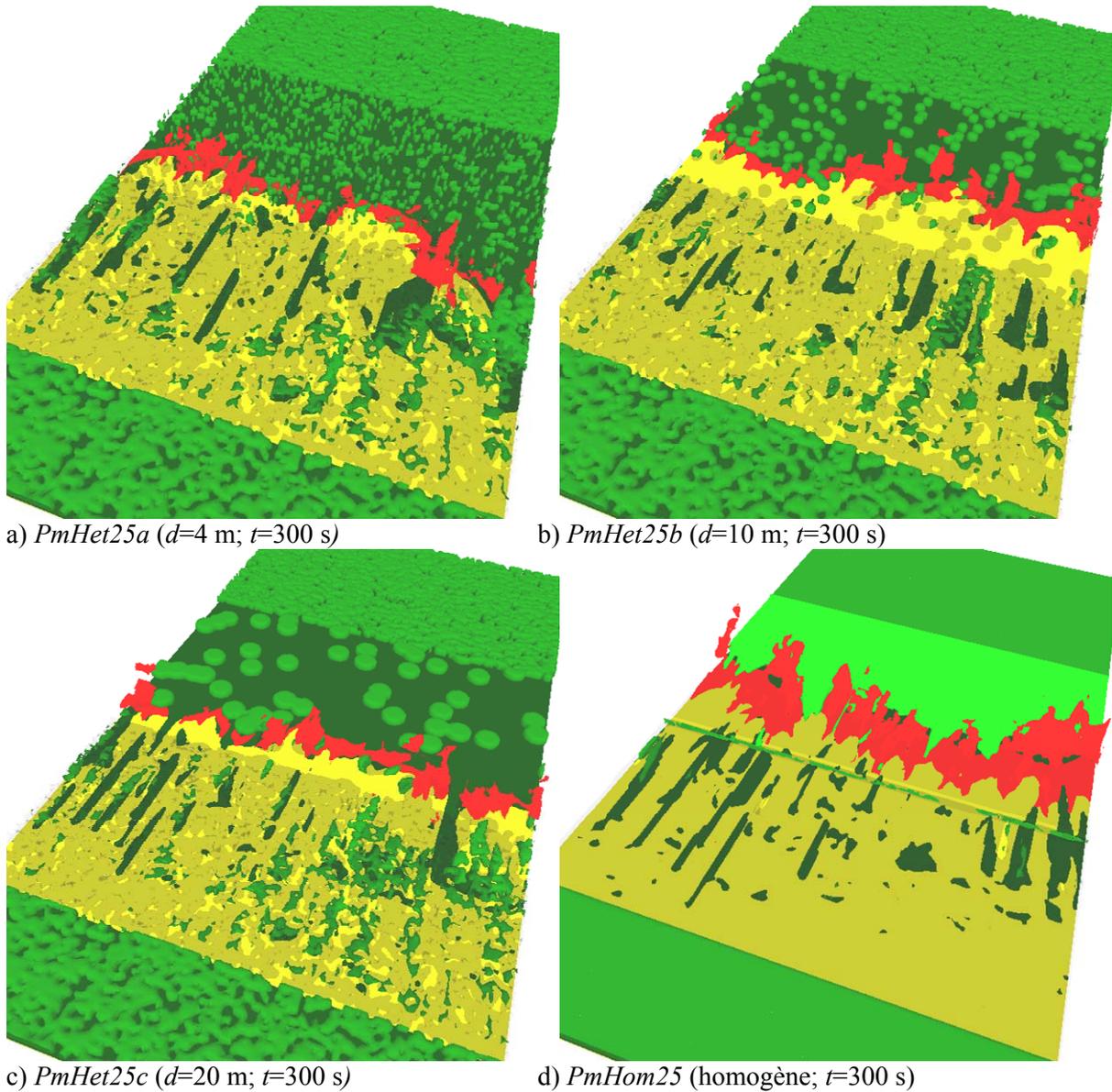
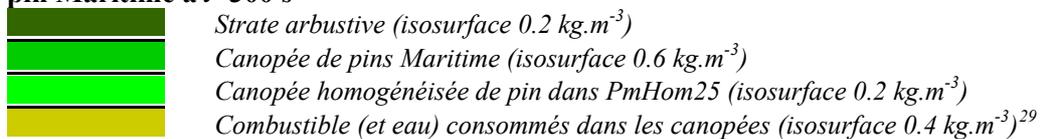


Fig. 4.47. Images instantanées de la propagation du feu lors de son passage en début de coupure pour différentes structures de végétation (équivalent recouvrement 25 %), dans l'écosystème à pin Maritime à $t=300$ s



²⁹ sauf *PmHom25* dans la zone de coupure : isosurface 0.115 kg.m^{-3}

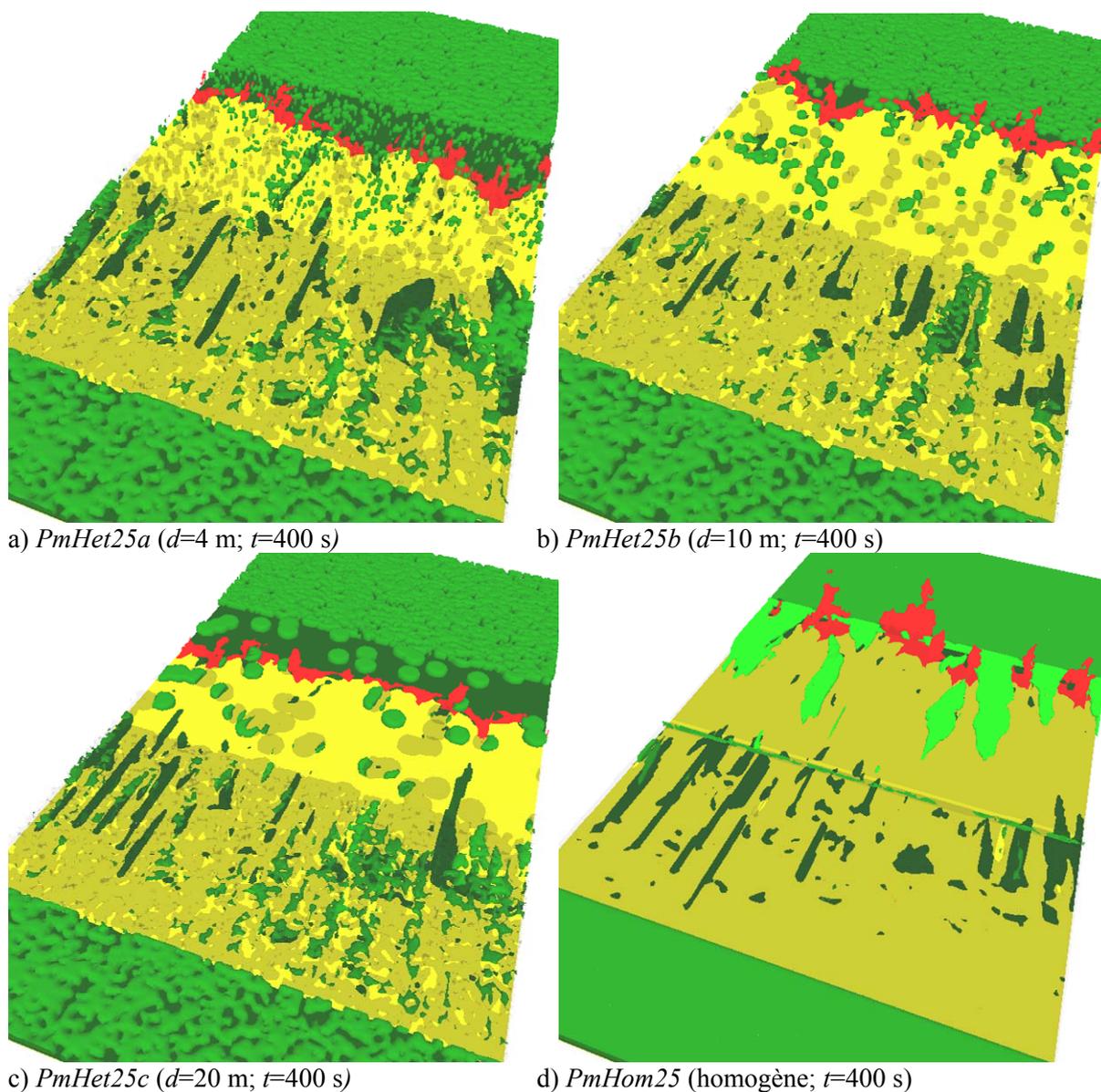
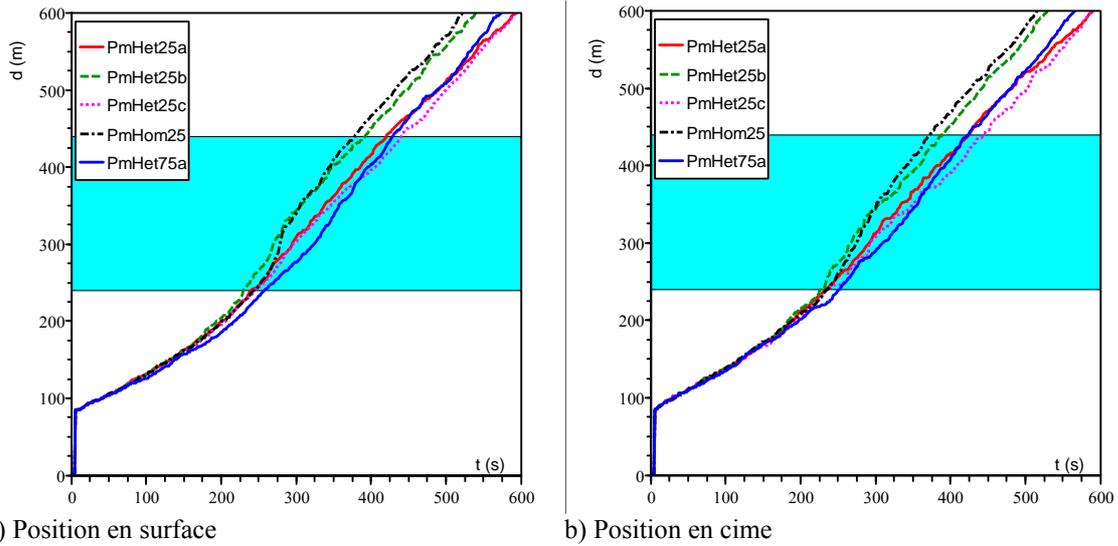


Fig. 4.48. Images instantanées de la propagation du feu lors de son passage en fin de coupure pour différentes structures de végétation (équivalent recouvrement 25 %), dans l'écosystème à pin Maritime à $t=400$ s

	<i>Strate arbustive (isosurface 0.2 kg.m^{-3})</i>
	<i>Canopée de pins Maritime (isosurface 0.6 kg.m^{-3})</i>
	<i>Canopée homogénéisée de pin dans <i>PmHom25</i> (isosurface 0.2 kg.m^{-3})</i>
	<i>Combustible (et eau) consommés dans les canopées (isosurface 0.4 kg.m^{-3})³⁰</i>

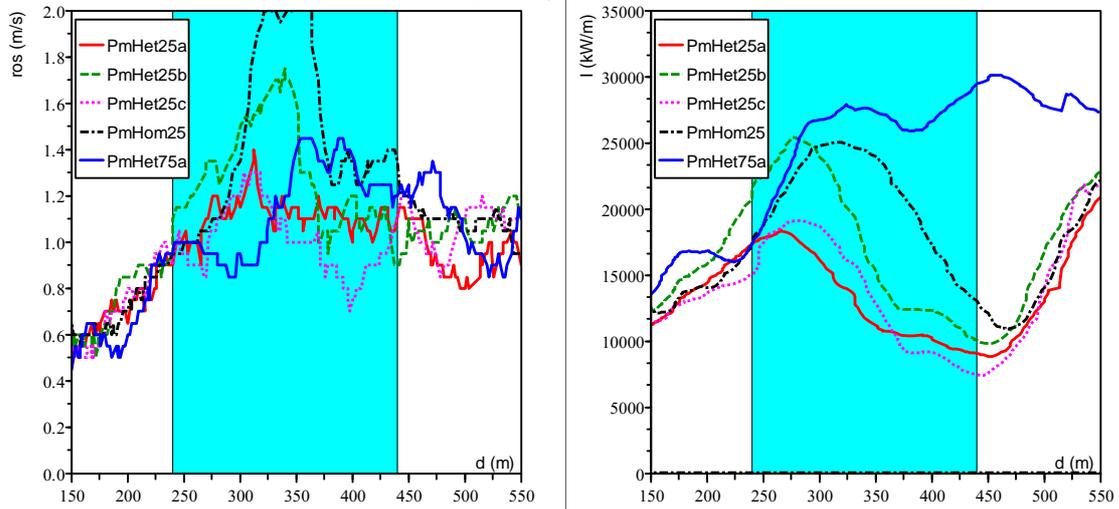
³⁰ sauf *PmHom25* dans la zone de coupure : isosurface 0.115 kg.m^{-3}



a) Position en surface

b) Position en cime

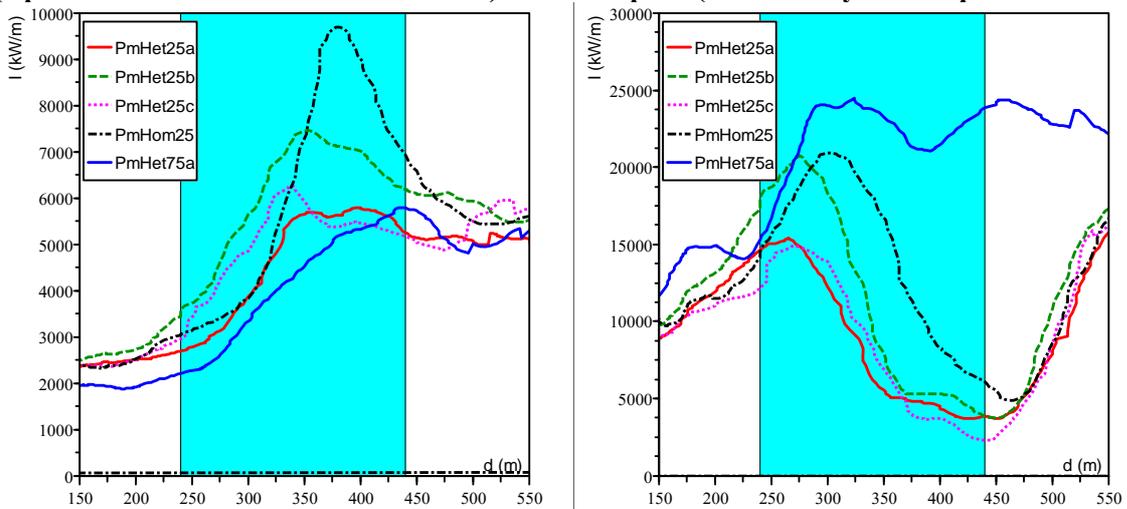
Fig. 4.49. Position de la tête du front de feu pour différentes structures de végétation (équivalent à un recouvrement de 25 %) sur la coupure (dans l'écosystème à pin Maritime)



a) Vitesse de propagation

b) Intensité totale

Fig. 4.50. Caractéristiques de la propagation du feu pour différentes structures de végétation (équivalent à un recouvrement de 25 %) sur la coupure (dans l'écosystème à pin Maritime)



a) Combustible de surface

b) Combustible de cime

Fig. 4.51. Contribution des différentes strates à l'intensité du feu pour différentes structures de végétation (équivalent à un recouvrement de 25 %) sur la coupure (écosystème à pin Maritime)

La **Fig 4.49** représente la position de la tête du feu dans les strates arbustive **(a)** et arborée **(b)**. On observe que la structure du combustible influe faiblement sur les distances parcourues. La propagation est légèrement plus rapide dans le cas des taches de 10 m (*PmHet25b*) et dans le cas homogénéisé (*PmHom25*), que dans les autres simulations. Ces différences sont principalement dues à une forte accélération du front en début de coupure dans ces deux simulations (**Fig 4.50a**, qui représente les vitesses de propagation), que nous expliquons par une propagation établie en cime sur toute la largeur de la coupure, alors que la partie droite est partiellement épargnée dans les cas *PmHet25a* et *PmHet25c*. On observe de nouveau que la vitesse de propagation tend à diminuer sur la coupure. En terme d'intensité totale (**Fig 4.50b**), il apparaît que les intensités sur la coupure des cas traités sont très significativement inférieures à celles du cas témoin. L'intensité totale du feu sur la coupure homogénéisée (*PmHom25*) est nettement supérieure à celles des cas de recouvrement 25 % (*PmHet25a*, *b* et *c*). Entre ces trois derniers cas, les différences ne semblent pas significatives. La diminution de l'intensité lors de l'arrivée du front sur la coupure se produit en général avant que le feu ait parcouru les cents premiers mètres de la coupure, sauf dans le cas *Pmhom25*, où l'intensité nécessite près de 200 m pour diminuer. On pourra attribuer cette différence à l'homogénéisation du combustible ; le recouvrement de 100 % du combustible homogénéisé entretient le feu de forte intensité, bien que la quantité de combustible soit inférieure à celle de la zone témoin. Par ailleurs, le feu est très rapide, ce qui implique qu'une partie importante des canopées de la zone de coupure est encore en combustion lorsque le feu a parcouru les 100 premiers mètres de la coupure (allongement de la profondeur du front).

Dans ces simulations, au-delà de la coupure, les valeurs d'intensité sont comparables dans les différentes simulations. L'effet attribué à la transition est donc moins prononcé que dans le pin d'Alep.

Les intensités du feu produites par le combustible de la strate arbustive ne présentent pas de différences significatives avec les différentes structures de combustible (**Fig 4.51a**), si ce n'est une augmentation très nette en début de coupure dans le cas *PmHom25*, que l'on associera à l'accélération du front. L'intensité du feu produite par le combustible des canopées sur la coupure homogénéisée (*PmHom25*) décroît de 25000 à 12000 kW.m⁻¹ entre le début et la fin de la coupure. Les valeurs d'intensité produite par la strate arborée sont significativement supérieures à celles des cas de recouvrement 25 % (*PmHet25a*, *b* et *c*), qui se stabilisent rapidement en dessous de 12000 kW.m⁻¹. Entre ces trois derniers cas, les différences ne semblent pas significatives, même si on observe des différences quantitativement importantes entre le cas *PmHet25a* et *PmHet25b*. Nous attribuons ces différences au comportement en amont de la coupure qui diffère entre ces deux simulations : dans le cas *PmHet25a*, une part importante de la canopée située sur la droite ne s'enflamme que partiellement, contrairement au cas *PmHet25b*, ce qui implique que l'intensité moyenne du front qui aborde la coupure est bien inférieure.

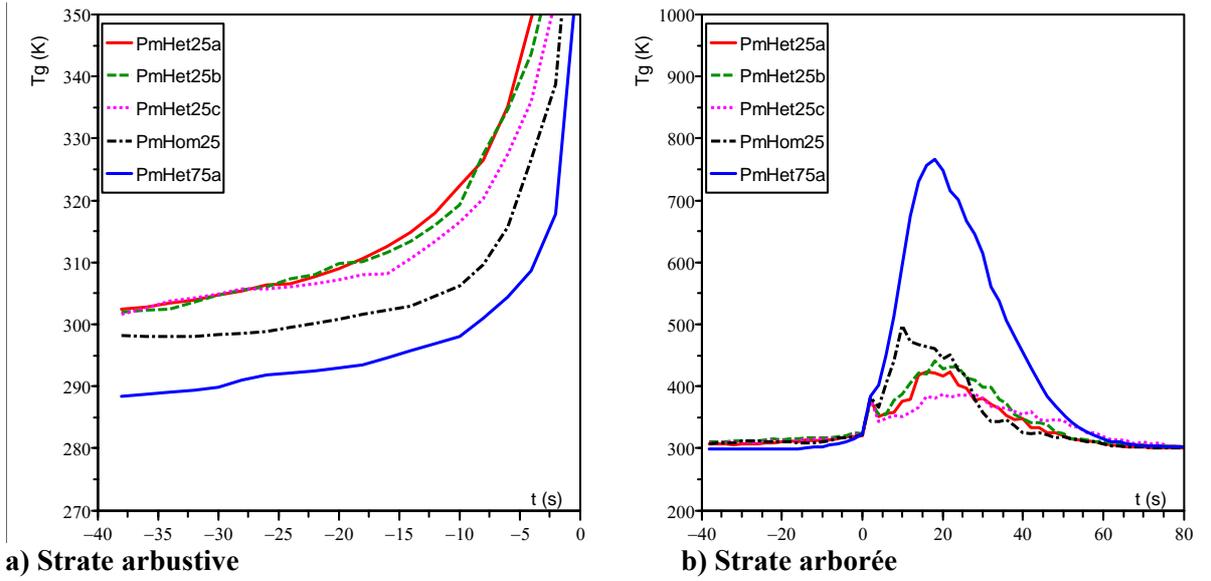


Fig. 4.52. Températures de la phase gazeuse sur la coupure, pour différentes structures de combustible (recouvrement équivalent à 25 %), dans les strates arbustive ($P_{4,1}$) et arborée ($P_{4,2}$)

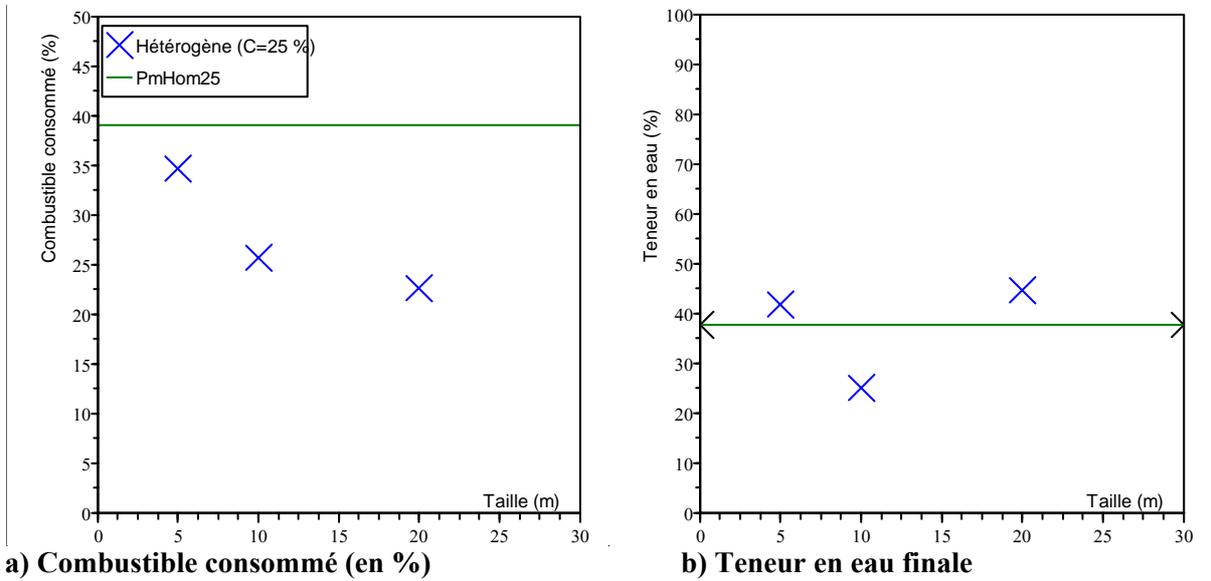


Fig. 4.53. Caractéristiques du combustible après le passage du front de feu sur la coupure, pour différentes structures de combustible en $P_{4,2}$ (recouvrement équivalent à 25 %)

La **Fig 4.52** représente les températures de la phase gazeuse dans la coupure obtenues dans les différentes structures de combustible, dans les strates arbustive et arborée. On n'observe pas de différences significatives dans les températures au niveau du combustible de surface. En revanche, dans la canopée les températures du cas homogénéisé (*PmHom25*) semblent significativement plus élevées.

La **Fig 4.53a** représente le combustible consommé dans la canopée sur la coupure dans les différentes structures de combustible. On observe que le combustible consommé dans les cas de combustibles hétérogènes varie entre 23 et 35 %, alors qu'il se maintient au dessus de 38 % dans le cas du combustible homogénéisé. Ceci illustre les différences que nous observions pour l'intensité du feu produite par la consommation des strates arborées. En revanche, au niveau de la teneur en eau finale du combustible (**Fig 4.53b**), on n'observe pas de différences significatives avec une teneur en eau finale comprise entre 26 et 44 %.

5. Discussion

Le comportement du feu sur les coupures de combustible constitue un enjeu important pour la prévention des incendies de forêts. Malgré cela, les coupures de combustible ont été très peu étudiées. On notera l'existence de quelques études de cas, qui sont en général des retours d'expérience sur des cas réels (Lambert *et al.* 1999) et également quelques travaux de modélisation. L'étude de Dupuy & Morvan (2005) s'intéresse au comportement du feu sur quelques coupures de pin d'Alep, avec le modèle FIRESTAR. Cependant, ces simulations sont bidimensionnelles, dans un contexte où le comportement tridimensionnel du feu peut jouer un rôle important (couloir de dégâts...). De plus, la transition zone de forêt/coupure n'est pas étudiée. Linn *et al.* (2005a) étudient avec FIRETEC, l'impact de l'éclaircie sur un peuplement de pin ponderosa. Pimont *et al.* (2006) étudient l'impact du recouvrement et de la taille des bosquets d'arbres dans différents écosystèmes. Nous reprendrons d'ailleurs les résultats de cette étude réalisée avec une version antérieure de FIRETEC sur des domaines beaucoup plus limités en discussion. Dans ces deux dernières études, les transitions forêt/coupure ne sont pas prises en compte. Les travaux de Van Wagner (1977) et de Scott & Reinhardt (2001) proposent une autre approche basée sur le « potentiel de propagation du feu en cime » ; ils s'appuient sur la théorie des panaches et des températures d'inflammation pour établir des probabilités de « crowning », en fonction des caractéristiques de la propagation du feu dans la strate arbustive. Par ailleurs, on notera l'existence de travaux récents sur l'impact de l'agencement des coupures à l'échelle du paysage, mais qui postulent l'impact de chaque coupure individuellement (Finney *et al.* 2007). Il apparaît donc que les travaux portant sur l'efficacité des coupures sont relativement rares. C'est principalement parce qu'il existe peu d'outils capables de traiter cette question, que celle-ci est peu abordée.

Confrontation des prédictions aux expériences de terrain

Concernant les valeurs d'intensité du feu, Trabaud (1989) rapporte des travaux de Van Wagner de 1983 qui fournissent une échelle de valeurs concernant l'intensité des feux. Selon cet auteur, les intensités observées dans les feux de cimes s'échelonnent en général entre 8000 et 40000 kW.m⁻¹, avec des événements exceptionnels pouvant aller jusqu'à 150000 kW.m⁻¹. Dans nos simulations, les valeurs obtenues s'échelonnent entre 7000 kW.m⁻¹ pour les feux peu actifs dans le pin d'Alep à 25-30000 kW.m⁻¹ pour les feux les plus intenses dans le pin Maritime. Ces valeurs se situent dans la gamme inférieure des valeurs citées par Trabaud, ce qui apparaît raisonnable, compte tenu des valeurs relativement modérées du vent dans nos simulations (12-13 km.h⁻¹ en vitesse moyenne et 25-29 km.h⁻¹ en vitesse maximum).

Concernant les valeurs de vitesses de propagation, des données expérimentales sont disponibles dans Stocks *et al.* (1986) et Taylor *et al.* (2004). Dans la première étude, il s'agit de propagation du feu dans des peuplements immatures de jack pine (*Pinus banksiana*). Pour les feux ayant eu lieu avec des vitesses de vent comprises entre 11 et 16 km.h⁻¹, les vitesses de propagation varient entre 0.2 et 0.5 m.s⁻¹. Dans la seconde étude, pour les feux ayant eu lieu avec des vitesses de vents comprises entre 10 et 16 km.h⁻¹, les valeurs de vitesse de propagation varient entre 0.7 et 1.5 m.s⁻¹. Dans ces deux études, la teneur en eau du combustible est voisine de 100 %, ce qui correspond à la valeur utilisée dans nos simulations ; les fractions volumiques sont de l'ordre de 2 10⁻⁴, ce qui correspond à une valeur intermédiaire entre celle du pin d'Alep et celle du pin Maritime. Ce qui frappe avant tout dans ces deux études, ce sont les différences d'ordre de grandeurs obtenues dans les vitesses de propagation. Les vitesses de propagation que nous obtenons dans nos simulations sont plutôt élevées (de l'ordre du m.s⁻¹). Elles sont supérieures à celles d'autres études réalisées avec des versions antérieures de FIRETEC (Pimont *et al.* 2006). Les ordres de grandeur que nous obtenons sont cependant tout à fait comparables avec l'étude de Taylor *et al.* (2004). Cette dernière étude présente clairement les vitesses de vent décrites comme étant des moyennes et précise que la variabilité du vent peut être importante autour de cette valeur moyenne. Par exemple, lors d'expériences où la vitesse moyenne du vent est de l'ordre de 11 km.h⁻¹, les rafales atteignent 20 km.h⁻¹. Ces rafales ne sont pas du tout mentionnées dans les expériences de Stocks (1986).

Il convient toutefois de noter que dans les expériences que nous citons, la strate arbustive présente une continuité assez forte avec les canopées, alors que dans nos simulations, une séparation nette existe entre sous-bois et strate arborée. Pour cette raison, les valeurs de vitesse de propagation que nous obtenons nous semblent élevées.

Parmi les raisons pouvant expliquer ces vitesses élevées, nous simulons ici les caractéristiques d'un front infiniment long, alors que les expériences de terrain concernent toujours des fronts de feu finis qui peuvent être de taille assez réduite (40 m de long, pour seulement 100 m de propagation dans les expériences de Stocks par exemple) ; la longueur du front est également limitée à 50 m dans les simulations de Pimont *et al.* (2006). Cet argument est conforté par le fait que lors des simulations expérimentales du Canada de Taylor *et al.* (2004), le front de feu se propage beaucoup plus rapidement en milieu de domaine que sur les bords des parcelles ; on peut donc raisonnablement penser que le feu se propagerait plus rapidement en présence d'un front plus large, d'autant que cette tendance a déjà été observée et reproduite dans le cas de feux de prairies (Linn & Cunningham 2005a). En effet, un front de feu infiniment long sur y signifie qu'il ne peut pas y avoir de refroidissement du feu par des entrées d'air latérales, alors qu'elles sont nécessairement présentes dans les expérimentations. Il sera important dans la suite du présent travail d'évaluer le rôle des conditions cycliques latérales dans les vitesses élevées observées.

Cependant, la longueur finie du front de feu dans les expériences n'est vraisemblablement pas la seule à invoquer. La présente étude est la première réalisée avec la nouvelle version de FIRETEC, intégrant un grand nombre de modifications (rayonnement, turbulence, traînée, implémentation des conditions limites), ainsi que des solutions techniques nouvelles (précalcul des écoulements et de la turbulence, conditions limites périodiques selon y). Ces modifications sont susceptibles d'entraîner cette sur-estimation des vitesses. Parmi elles, il convient de noter que les champs de vent sont ici fluctuants, avec des écoulements résolus dont la vitesse varie spatialement et temporellement.

Nous allons cependant voir que nous retrouvons l'ensemble des tendances qualitatives de simulations de Pimont *et al.* (2006), réalisées avec l'ancienne version de FIRETEC et qui présentaient des vitesses de propagation plus faibles.

Deux écosystèmes, deux comportements

Les simulations présentées ici concernent deux écosystèmes ; la canopée du premier est peu dense, alors que celle du second est très dense (cinq fois plus dense). Dans ces deux écosystèmes, les vitesses de propagation sont similaires, mais les intensités bien différentes. Elles n'excèdent pas 8000 kW.m^{-1} dans le pin d'Alep et dépassent les 25000 kW.m^{-1} dans le pin Maritime. Au-delà de ces différences quantitatives importantes, nous observons également des différences qualitatives.

D'abord, le feu dans les canopées de pin Maritime présente certaines caractéristiques des feux « plume dominated », avec une aspiration d'air frais par le panache provenant de l'aval du front et pas uniquement de l'amont. A l'inverse, les feux dans les canopées de pin d'Alep sont du type « wind driven », avec un front de feu poussé par le vent, sans aspiration d'air en aval.

Par ailleurs, le feu dans le pin d'Alep est de type « torching », avec des flammes qui dépassent localement la strate arborée, mais qui se limitent à la strate arbustive la plupart du temps.

Au chapitre 1, nous avons mis en évidence l'existence d'un seuil sur la densité du combustible permettant une propagation établie en cime. Dans le cas du pin d'Alep (densité 0.075 kg.m^{-3}), nous retrouvons un comportement de type « torching » par vent faible, alors que dans le pin Maritime (densité 0.375 kg.m^{-3}), nous avons un comportement de type « crowning », ce qui est concordant avec les résultats de l'étude du chapitre 1. En revanche, les vitesses obtenues avec le front de feu infini et la nouvelle version de FIRETEC sont nettement plus élevées.

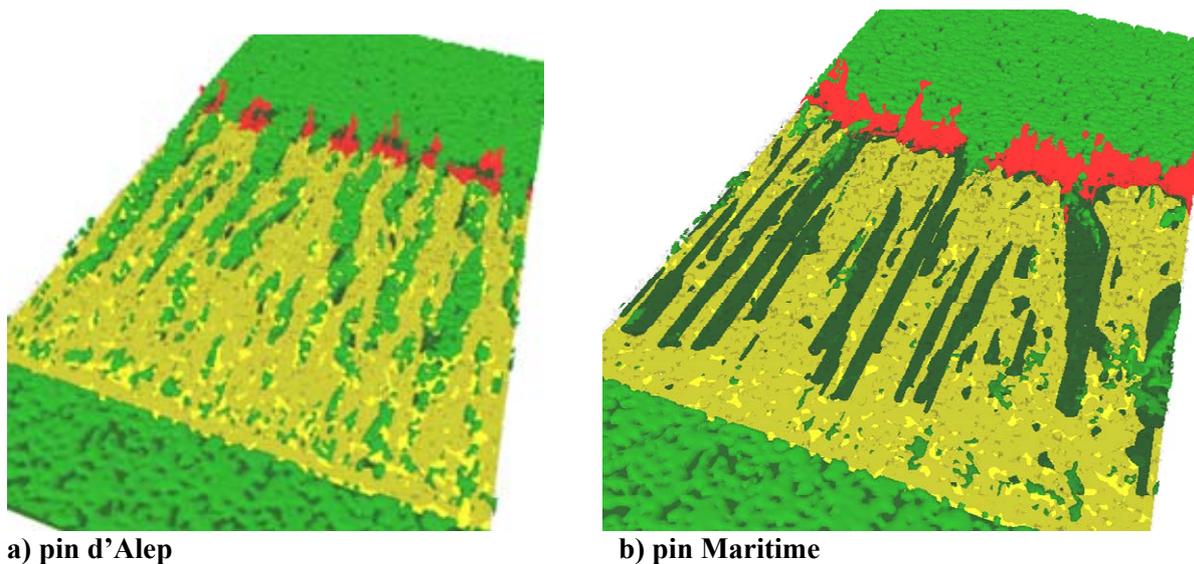


Fig. 4.54. Consommation du combustible dans les simulations témoins des deux écosystèmes

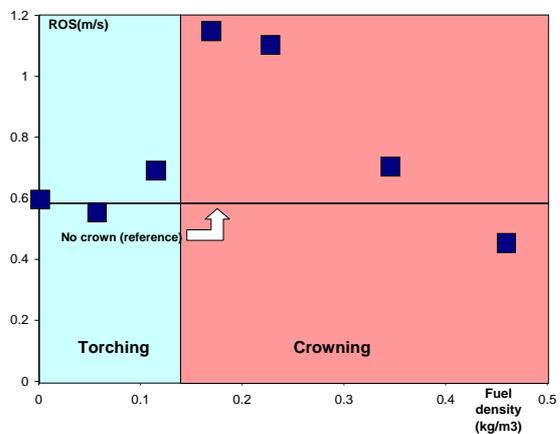


Fig. 4.55. Seuil entre torching et crowning en fonction de la densité du combustible (Conférence de Coimbra 2006)



Fig. 4.56. Présence de couloirs de dégâts (« crown streets »)

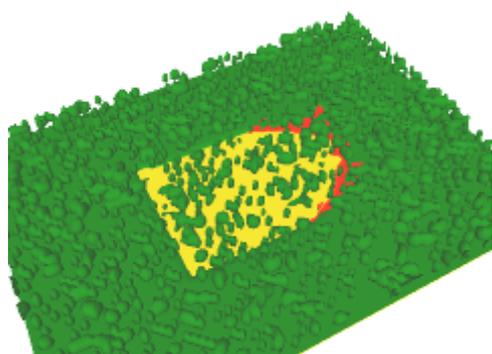
Concernant la sévérité du feu dans le peuplement des simulations sans coupure de combustible (recouvrement 75 %), les dommages aux arbres sont plus importants dans le cas du pin Maritime, avec environ 40 % de la canopée consommée contre 30 % dans le pin d'Alep (pourtant moins dense), et surtout par une teneur en eau finale de 7 %, contre 20 % dans le pin d'Alep. La température au milieu du houppier (moyenne selon y) atteint 750 K dans le pin Maritime contre 400 K dans le pin d'Alep. Ces données indiquent que le feu est moins sévère en moyenne dans le peuplement de pin d'Alep. Si l'on confronte ces résultats avec les images de la **Fig. 4.54**, il apparaît que les dégâts sont plus hétérogènes dans le pin d'Alep avec de longs couloirs épargnés par le feu, notamment à cause du « torching ». Nous reviendrons sur ces dégâts hétérogènes au paragraphe suivant.

Hétérogénéité des dégâts/Hétérogénéité du comportement

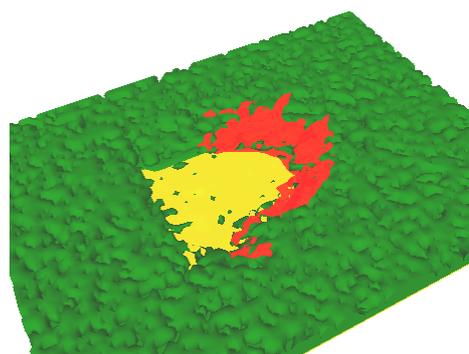
Dans ces simulations ainsi que dans celles présentées au chapitre 1, FIRETEC produit des dégâts hétérogènes y compris dans des végétations peu hétérogènes (**Fig. 4.54 PaHet75a**, par exemple) et même dans des végétations complètement homogènes (**Fig 4.23d PaHom25a** dans la partie de forêt, par exemple). Ce comportement typiquement tridimensionnel est à associer à la présence de vortex contre-rotatifs dans le plan (y, z). Il a déjà été observé dans des feux de terrains et les bandes générées sont susceptibles de mesurer plusieurs centaines de mètres de long (**Fig 4.55**).

Dans les simulations de pin Maritime, on constate que ce comportement présentant des couloirs touche également la strate arbustive, alors que ce n'était pas le cas dans le pin d'Alep (**Fig 4.60**). Dans le pin Maritime, les intensités sont nettement plus élevées que dans le pin d'Alep, créant localement des aspirations plus fortes, capables de maintenir du combustible imbrûlé dans la strate arbustive.

Par ailleurs, on observe également une hétérogénéité des comportements du feu dans des parcelles a priori très similaires. En effet, les arbres générés par l'éditeur de scène sont aléatoirement répartis ce qui veut dire que la position des arbres dans les parcelles témoins peut varier d'une simulation à l'autre. En général, on observe des caractéristiques de propagation très similaires dans les différentes simulations. On notera par exemple, dans le cas du pin d'Alep, que les distances parcourues par le front de feu coïncident exactement pendant les cent premières secondes de calculs (jusqu'à environ 100 m de la coupure de combustible) et que les patrons de dégâts sont également quasi identiques. En revanche, on observe des cas dans lesquels le comportement peut être fortement modifié. Il s'agit de cas simulés dans l'écosystème à pin Maritime, où le feu est très intense et où le comportement du feu local dans la canopée peut affecter l'ensemble de la simulation. On notera par exemple que dans les parties situées en amont de la coupure dans les simulations *PmHet25a*, *PmHet25b* et *PmHet25c*, le feu se comporte de manière contrastée avant d'aborder la coupure : dans les cas *PmHet25a* et *PmHet25c*, une large tache située dans la partie droite du domaine est relativement épargnée par le feu, produisant ensuite en début de coupure un feu de moindre intensité que dans le cas *PmHet25b*. Ce type de comportement reste rare, mais son existence suggère la complexité des interactions en jeu dans ce type de configuration.



a) Torching (recouvrement 25 %)



b) Crowning (Recouvrement 75 %)

Fig. 4.62. Torching/crowning en fonction du recouvrement pour du pin Maritime (Conférence de Coimbra, 2006)

Hétérogénéité du combustible à l'échelle du paysage : impact des coupures de combustible

Les coupures de combustibles constituent des hétérogénéités fortes à l'échelle du paysage. Dans nos simulations, elles induisent une modification profonde de la végétation sur une bande de 200 m de long.

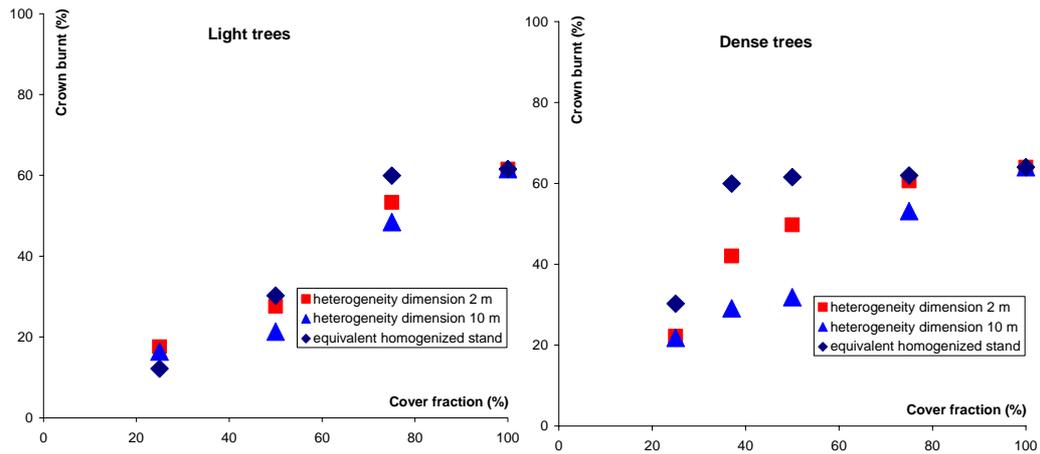
Dans les deux écosystèmes étudiés, on observe qu'une éclaircie conduisant à un recouvrement de 50 % est inefficace. En effet, les intensités obtenues dans les cas *PaHet50a* et *PmHet50a* sont très voisines de celles des parcelles témoins, de recouvrement 75 %. La diminution du combustible disponible semble être compensée par une légère accélération du feu et une consommation du combustible au moins équivalente (pin d'Alep), voire supérieure (pin Maritime) en pourcentage. Les profils de température de la phase gazeuse dans la canopée sont également similaires. De plus, la teneur en eau finale dans le combustible est quasi identique dans les deux cas, ce qui suggère que la sévérité du feu est équivalente.

En revanche, le comportement sur les coupures présentant 25 % de recouvrement est bien différent : on observe une phase de décroissance de l'intensité qui dure le temps que le feu pénètre d'une cinquantaine de mètres dans la coupure dans le cas du pin d'Alep, et de cent mètres dans le cas du pin Maritime. L'intensité se stabilise alors à une valeur inférieure de 30 % à celle de la simulation témoin dans le pin d'Alep, et surtout de 60 % dans le cas du pin Maritime. Il convient toutefois de noter que c'est la coupure totalement purgée de sa strate arborée qui présente l'intensité la plus faible. Nous avons déjà observé la présence d'un seuil de recouvrement voisin de 50 %, au-delà duquel le comportement du feu s'établissait en feu de cime pour les simulations présentées à la conférence de Coimbra (**Fig 4.62**).

La présence d'une hétérogénéité à l'échelle du paysage comme une coupure peut donc induire une modification profonde du comportement du feu. Il faut cependant noter que l'établissement d'un régime stationnaire n'est pas instantané (100 à 150 m dans les canopées ; 50 à 100 m sur les coupures). On notera également que les transitions s'accompagnent de changement de comportement. En effet, l'intensité du feu comme les vitesses de propagation sont plus élevées dans les zones qui précèdent et suivent la coupure, que dans la simulation témoin. Ce changement de comportement peut être associé à une accélération de l'écoulement (en bout de coupure notamment), ainsi qu'à une augmentation de la turbulence qui favorise le mélange, donc la réaction de combustion.

Concernant la physique du feu sur la coupure elle-même, il apparaît que le panache est d'autant plus incliné que le recouvrement est faible. Dans le contexte de la lutte, un panache très incliné présente un danger supérieur, car l'échauffement de la phase gazeuse intervient bien avant l'arrivée du front, ce qui complique la tâche des pompiers pour atteindre le front de feu lui-même. Dans nos simulations, les températures enregistrées près du sol dans la phase gazeuse sont significativement plus élevées en avant du front dans le cas de la coupure que dans le cas de recouvrement 25 %, bien que ce dernier soit plus intense.

L'objectif de nos simulations étant avant tout d'évaluer les effets des hétérogénéités locales de la strate arborée, le combustible de la strate arbustive n'a pas été modifié dans la zone de coupure. Sur les véritables coupures de combustible, la strate arbustive est régulièrement réduite, au moyen de débroussaillage mécanique ou du brûlage dirigé. Cependant, nos simulations mettent en évidence que la réduction du combustible dans la strate arborée a un effet significatif sur l'intensité totale du feu. Les travaux qui portent sur les canopées (éclaircie, élagage) présentent l'intérêt d'être plus durables que le débroussaillage de la strate arbustive, qu'il faut reproduire tous les deux à trois ans ; on considère en effet que la strate arbustive s'est régénérée au bout de six ans.



a) Pin d'Alep

b) Pin Maritime

Fig. 4.63. Pourcentage de canopée consommée (Conférence de Coimbra, 2006)

Hétérogénéité du combustible à l'échelle locale : influence de la taille des taches, de l'homogénéisation du combustible

Nous avons vu au paragraphe précédent que la notion de recouvrement était un élément très important de la description du combustible pour décrire la propagation du feu. Cependant, le recouvrement est une notion qui permet de passer de quantité de combustible locale (biomasse contenue dans les arbres) à une quantité totale (biomasse totale). On peut donc se demander si la seule description de la quantité de biomasse totale au sein de la parcelle n'est pas suffisante pour reproduire le comportement du feu. Dans les simulations qui précèdent, nous avons simulé le comportement du feu sur des parcelles à 25 % de recouvrement, avec des tailles de taches de 4, 10 et 20 mètres (*Het25a,b* et *c*), ainsi que le même combustible homogénéisé à l'échelle de la parcelle (*Hom25*). La comparaison des simulations dans les parcelles décrites à l'échelle du houppier et dans la parcelle homogénéisée permet d'évaluer l'importance que revêt cette description, et en particulier l'importance de la notion de recouvrement.

Si l'on s'intéresse au comportement du feu dans la zone de forêt située en amont de la coupure dans les différentes configurations, on observe que le comportement du feu de *Hom25* est très voisin de celui des configurations hétérogènes, que ce soit en termes de vitesse de propagation ou d'intensité. On en déduit donc qu'une description du combustible à l'échelle du houppier dans la strate arborée est inutile dans le cas d'un recouvrement de 75 %. On notera que les comportements sont différents en certains points (en fonction de la position des couloirs), mais que le comportement global est identique. Ces résultats sont en accord avec ceux préalablement obtenus, et présentés à la conférence de Coimbra ; la **Fig 4.63** représente pour les deux écosystèmes les pourcentages de canopée consommée en fonction du recouvrement et de la taille des agrégats (avec un cas homogénéisé en diamants bleu marine). On observe qu'avec 75 % de recouvrement les différences au niveau du combustible consommé sont très réduites. En s'appuyant sur les simulations de cette étude et de la présente, on déduira que la description détaillée du combustible au sein d'une strate arborée ayant un recouvrement très fort, constitue un raffinement inutile.

Dans les cas de recouvrement faible (25 %), les résultats diffèrent selon l'écosystème. Dans le pin d'Alep, le fait de procéder à une homogénéisation dans un combustible déjà peu dense conduit à obtenir un combustible insuffisamment dense pour assurer la propagation du feu. Dans la simulation *PaHom25*, le combustible est simplement consommé par le passage du feu de surface et aucune flamme n'est visible dans la canopée. L'intensité produite par la strate arborée n'excède pas 250 kW.m^{-1} , ce qui est plus de deux fois moins élevée que dans les cas *PaHet25a, b* et *c*. Enfin, les températures moyennes sont inférieures d'une dizaine de degrés. Ces résultats sont en accord avec ceux préalablement obtenus (**Fig 4.63a**). A l'inverse, dans le pin Maritime, l'homogénéisation conduit à une augmentation de la vitesse de propagation, de l'intensité (jusqu'à 100 % en milieu de coupure), de la distance nécessaire à la diminution de l'intensité et bien évidemment des températures et du combustible consommé. Pour cette dernière caractéristique, cette tendance est une nouvelle fois identique à celle des résultats préalables (**Fig 4.63b**). Il apparaît donc que l'homogénéisation produit un effet inverse de celui des faibles densités (de type pin d'Alep), dont l'amplitude est nettement plus importante. On en déduira donc qu'à 25 % de recouvrement, l'homogénéisation du combustible est à proscrire. Une prise en compte du recouvrement, en plus de la charge de combustible totale apparaît donc indispensable.

Concernant les cas de recouvrement intermédiaire, nous n'avons pas réalisé les simulations homogénéisées correspondant au cas 37 % et 50 % dans la présente étude, comme nous l'avions fait pour la conférence de Coimbra. A l'époque, les domaines étaient considérablement plus petits. Ils ne permettaient pas d'envisager d'hétérogénéité à l'échelle du paysage, mais permettaient de multiplier les simulations ; dans la présente étude, nous avons donc dû restreindre le nombre de configurations envisagées. Nous comptons réaliser les simulations complémentaires dans le futur, afin de compléter le jeu de simulation. Si l'on s'en tient aux résultats de l'étude préliminaire (**Fig 4.63**), il apparaît que l'homogénéisation ne doit pas non plus être conduite pour les cas de recouvrements inférieurs à 50 %. Dans ces cas, les écarts entre hétérogène et homogène sont encore plus significatifs. Ceci peut apparaître paradoxal, car la végétation présente une moins forte hétérogénéité dans les cas de recouvrement 50 %, que dans ceux de recouvrement 25 %. Cependant, plus le recouvrement est faible, moins la strate arborée contribue à la propagation du feu, donc moins elle influence celle-ci ; l'effet de son hétérogénéité est donc moins fort, puisque le comportement du feu est principalement contrôlé par le combustible de surface. Nous sommes en présence d'un « trade-off » (compromis) entre hétérogénéité du combustible et contribution du combustible à la propagation du feu.

Concernant les effets de la structure à petite échelle de la végétation, la comparaison des cas présentant des tailles de taches de 4, 10 et 20 m, n'a pas montré de différences significatives. On notera cependant que la sévérité du feu semble décroître avec la taille des taches dans le pin Maritime, puisque le pourcentage de combustible consommé passe de 39 % dans le combustible homogénéisé, à successivement 35, 25 et 23 % dans les parcelles de taches 4, 10 et 20 m. On note qu'une saturation de la taille des taches apparaît autour de 10 m. Ces résultats sont qualitativement assez proches de ceux obtenus à Coimbra (**Fig 4.63b**). Dans les simulations réalisées à 37 et 50 %, ces tendances étaient plus nettes.

Intérêt de la démarche de modélisation

Ce type d'étude illustre l'intérêt de la démarche de modélisation. En effet, conduire des feux expérimentaux sur des parcelles comme celles de notre étude numérique présente des difficultés immenses. En premier lieu, il est quasiment impossible en France de réaliser des brûlages en conditions sévères. Ensuite, ce type d'expériences (comme celles réalisées au Canada), nécessite la création de bandes de sécurité et la mise à disposition d'équipes de lutte très importantes pendant des durées dépassant considérablement la simple durée du brûlage. Ce dernier point est notamment compliqué par les exigences en termes de conditions ambiantes : les écoulements doivent être aussi similaires que possibles pour pouvoir conclure à un effet quelconque.

L'expérience numérique ne remplace évidemment pas l'expérience de terrain et nécessite certains éléments de validation. Cependant, elle permet de tester un certain nombre de scénarios qui permettent de synthétiser les idées et d'anticiper les effets potentiels.

Par ailleurs, un autre intérêt de l'approche numérique est de bénéficier d'hypothèses simplificatrices. La présence du front infini dans notre étude (qui limite la déformation et les effets latéraux), l'usage de conditions ambiantes exactement identiques d'une simulation à l'autre (température, écoulement), sont autant d'éléments qui facilitent les comparaisons, là où les expériences de terrains nécessitent des dizaines de réalisations pour mettre en évidence des résultats significatifs. Pour autant, l'interprétation des résultats n'est pas toujours évidente. L'exemple des comportements différents en amont de la coupure dans le pin Maritime est difficile à interpréter. Cependant, les hypothèses utilisées pour le calcul nous permettent d'affirmer qu'elles ne sont pas dues à un écoulement ambiant différent. Cet argument aurait pourtant vraisemblablement été invoqué pour expliquer ces différences de comportement dans le cas d'expériences de terrain.

La démarche de modélisation permet enfin de tester certaines hypothèses simplificatrices pour la modélisation elle-même. Notre étude permet par exemple de conclure que l'homogénéisation du combustible de la strate arborée fortement hétérogène ne peut plus être conduite dès lors que les recouvrements sont faibles, sous peine de mauvaise évaluation de l'intensité et de la sévérité du feu.

6. Conclusion

Les travaux présentés dans ce chapitre constituent une démarche innovante par plusieurs aspects. En premier lieu, les configurations traitées intègrent pour la première fois des transitions entre forêt et coupure de combustible et entre coupure de combustible et forêt, au sein de domaines permettant de traiter des hétérogénéités à l'échelle du paysage. Elles ont permis d'illustrer les changements de comportement du feu qui pouvaient être attendus en présence de ces structures. Ensuite, ces simulations intègrent des champs de vent ambiants réalistes dans une simulation de feu de forêt. Enfin, elle utilise la notion de front infini et des moyennes spatiales et temporelles permettant d'appréhender un comportement moyen d'un feu ayant un comportement tridimensionnel.

Ces travaux ont été réalisés avec la toute dernière version de FIRETEC et un certain nombre d'améliorations du code y ont été intégrées. La contrepartie d'utiliser des outils en cours de développement est bien sûr le manque de recul que nous avons par rapport aux prédictions de cette version. Nous avons notamment mentionné le fait que les vitesses de propagation obtenues nous paraissaient élevées, compte tenu du vent choisi.

Du point de vue de l'hétérogénéité du combustible, notre étude a mis en évidence l'importance de la notion de recouvrement. Il ne suffit pas de connaître la quantité de combustible disponible à l'échelle d'une parcelle pour prédire correctement l'intensité et la vitesse de propagation, en particulier lorsque le recouvrement de la strate arborée est faible. Les différences obtenues sont plus fortes dans l'écosystème le plus dense, ce qui est conforme aux résultats des chapitres 2 et 3, qui mettaient en évidence des effets d'autant plus importants que le recouvrement était fort. Concernant la structure du combustible à plus petite échelle, les impacts sur les intensités et vitesses de propagation sont faibles. Ces résultats sont identiques à ceux d'une étude préalable traitant un plus grand nombre de configurations (sur des domaines plus restreints). En terme de sévérité (et de combustible consommé en particulier), les dégâts diminuent avec la taille des hétérogénéités, ce qui veut dire que le feu est d'autant plus sévère que le peuplement est homogène. Cependant, les effets sont assez faibles pour des recouvrements de l'ordre de 25 %, car le recouvrement n'est pas assez important pour permettre une propagation établie en cime. Le combustible hétérogène de la strate arborée n'est pas celui qui assure la propagation du front, même s'il y contribue. L'étude réalisée pour la conférence de Coimbra mettait en évidence des effets allant dans ce même sens pour des recouvrements plus élevés (37 et 50 %), mais dont l'amplitude était plus importante, car le comportement du feu était moins passif dans la strate hétérogène.

Bibliographie

- Dupuy JL, Morvan D (2005) Numerical study of a crown fire spreading toward a fuel break using a multiphase physical model. *International Journal of Wildland Fire* **14** (2), 141-151
- Finney MA, Selia RC, McHugh CW, Ager AA, Bahro B, Agee JK (2007) Simulation of long-term landscape-level fuel treatment effects on large wildfires. *International Journal of Wildland Fire* **16**, 712-727.
- Lambert B, Casteignau D, Costa M, Etienne M, Guiton J-L, Rigolot R (1999). Analyse après incendie de six coupures de combustible. Réseau Coupures de Combustible. Editions de la Cardère, 85 p.
- Linn RR, Winterkamp J, Colman JJ, Edminster C, Bailey J (2005a) Modeling interactions between fire and atmosphere in discrete element fuel beds. *International Journal. of Wildland Fire* **14**, 37-48.
- Linn RR, Cunningham P (2005a) Numerical simulations of grass fires using a coupled atmosphere-fire model: basic fire behavior and dependence on wind speed. *Journal of Geophysical Research* **110**. **D13107**. 19pp.
- Linn RR, Canfield J, Winterkamp J, Cunningham P, Colman JJ, Edminster C, Goddrick SL (2005b) Numerical Simulations of Fires Similar to the International Crown Fire Modelling Experiment. In: Proceedings of the Sixth Symposium on Fire and Forest Meteorology, American Meteorological Society, Canmore, Alberta, 25-27 October
- Pimont F, Linn RR, Dupuy JL, Morvan D (2006) Effects of vegetation description parameters on forest fire behavior with FIRETEC. *Forest Ecology and Management* **234S (S120)**, 12p.
- Scott JH, Reinhardt ED (2001) Assessing crown fire potential by linking models of surface and crown fire behaviour. USDA-Forest Service, Rocky Mountain Research Station Research Paper RMRS-RP-29. (Fort Collins, CO)
- Stocks BJ (1987) Fire behavior in immature jack pine. *Canadian Journal of Forest Research* **17**, 80-86.
- Taylor SW, Wotton BM, Alexander ME, Dalrymple GN (2004) Variation in wind and crown fire behaviour in a northern jack pin-black spruce forest. *Canadian Journal of Forest Research* **34**, 1561-1576.
- Trabaud L (1989) Les feux de forêts. Editions France Sélection. 278 p.
- Van Wagner CE (1977) Conditions for the start and spread of crown fire. *Canadian Journal of Forest Research* **7**, 23-34.

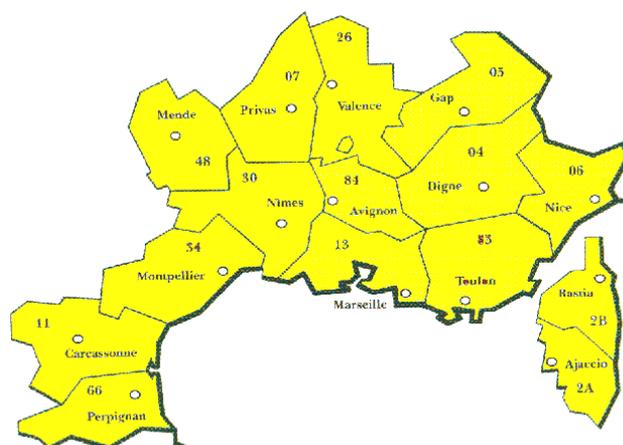


Fig. 5.1. Départements de la Zone de Défense Sud

Chapitre 5. Recommandations aux gestionnaires

1. Introduction

La modélisation du feu est une discipline délicate, car elle cherche à décrire l'évolution d'un système naturel complexe fortement perturbé, dans un contexte où les enjeux sociaux, économiques et humains sont très importants.

Les besoins des gestionnaires en matière de modélisation sont multiples. L'enjeu le plus important concerne l'évaluation du risque. La prédiction de l'intensité du feu constitue une composante essentielle du risque. Cette évaluation est notamment indispensable à la réalisation de Plan de Prévention du Risque Incendies de Forêts (PPRIF), qui sont requis depuis 2001 dans la zone de Défense Sud³¹ (DPFM 2001) et plus généralement dans les départements, où le risque est objectif (déterminé par la Commission Départementale des Risques Majeurs). Le second enjeu est l'évaluation et l'amélioration de la politique de prévention des incendies (coupures de combustible, débroussaillage, brûlage dirigé). Chaque année, des crédits importants sont alloués par l'Etat (25 M€) et les collectivités territoriales pour réaliser et entretenir les ouvrages de prévention. Faute de connaissance de base, ces travaux sont réalisés de manière empirique et les gestionnaires des espaces publics et privés sont demandeur de connaissances plus fondamentales pour mieux réaliser ces travaux.

Les gestionnaires sont demandeurs de modèles faciles d'utilisation, rapides et présentant une interface conviviale. Le modèle BEHAVE correspond à ces trois caractéristiques et est largement utilisé dans le monde entier par des bureaux d'études et des gestionnaires pour la prédiction du risque. Néanmoins, les dysfonctionnements graves rencontrés avec ce modèle ont conduit bon nombre de professionnels à abandonner son utilisation et une polémique sévit actuellement aux Etats-Unis au sein même du Forest Service. Par ailleurs, ce modèle ne permet pas d'évaluer l'impact de travaux de prévention car le combustible n'est pas spatialisé à petite échelle. Les modèles physiques ont été développés depuis une quinzaine d'années pour pallier les défauts des modèles empiriques et semi-empiriques. Bien qu'ils ne soient ni faciles d'utilisation, ni rapides et qu'ils soient généralement dépourvus d'interface conviviale, ces modèles peuvent fournir des résultats utiles. L'usage de ce type de modèle nécessite l'implication de spécialistes de la modélisation, qui peuvent travailler en partenariat avec des non-spécialistes. Cette situation présente un parallèle avec celle des prédictions dans le domaine météorologique, où des spécialistes font fonctionner des modèles très complexes pour fournir aux utilisateurs des résultats plus ou moins finalisés ; on pourra d'ailleurs noter que la nature de ces modèles atmosphériques est assez proche de celle des modèles physiques de propagation du feu puisqu'ils reposent sur une résolution des équations de Navier-Stokes. Dans la partie qui suit (partie 2), nous montrons trois études réalisées en 2007 en partenariat avec un bureau d'étude (MTDA), l'Office National des Forêts (ONF) et dans le cadre d'un projet du GIS³² Incendie. Ces études constituent avant tout des études de faisabilité, qui illustrent la possibilité d'utiliser dès maintenant les modèles physiques dans un contexte appliqué, que ce soit au niveau de la prédiction du risque ou de l'évaluation des politiques de prévention.

Par ailleurs, bien que le travail de thèse soit avant tout théorique et académique, un certain nombre de résultats apportent des connaissances nouvelles susceptibles d'intéresser directement le gestionnaire. Les parties qui suivent constituent une synthèse de ces connaissances. La partie 3 synthétise les enseignements du travail en terme d'échelle de description du combustible et d'effet de l'hétérogénéité. Ensuite, Le travail détaillé qui a été mené sur les écoulements, que ce soit dans les canopées naturelles homogènes ou hétérogènes permet de fournir certaines informations susceptibles d'intéresser les praticiens du brûlage dirigé (partie 4). La partie 5 est dédiée aux enseignements à tirer des simulations du chapitre précédent sur le traitement des coupures de combustible.

³¹ Loi 2001-602 du 9 juillet 2001 d'orientation forestière

³² Groupement d'intérêt scientifique

Les types de combustibles

Source : MTDA

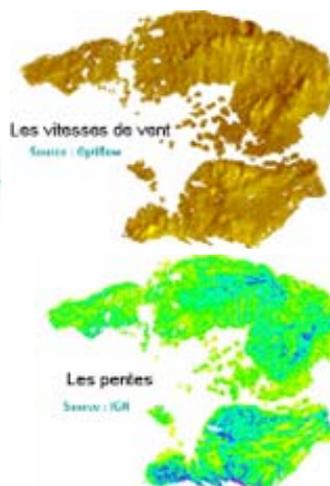
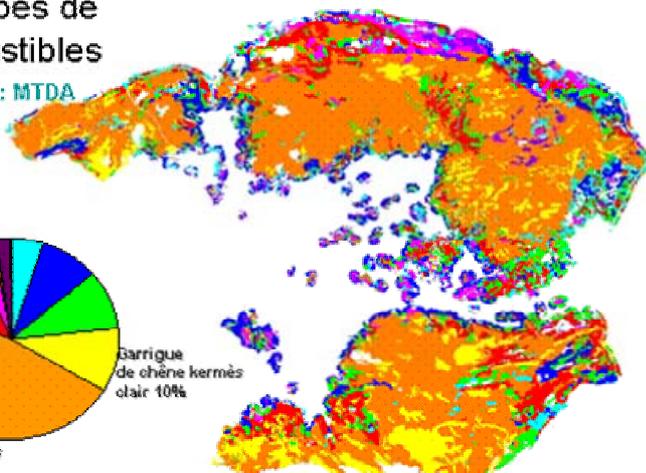
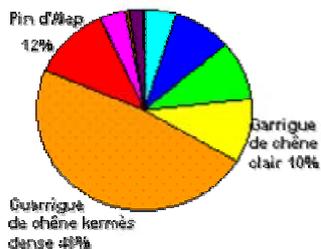


Fig 5.1. Cartographie du combustible, de la vitesse du vent et des pentes pour la réalisation du PPRIF de Marseille (Source MTDA)

Les intensités

Source : MTDA

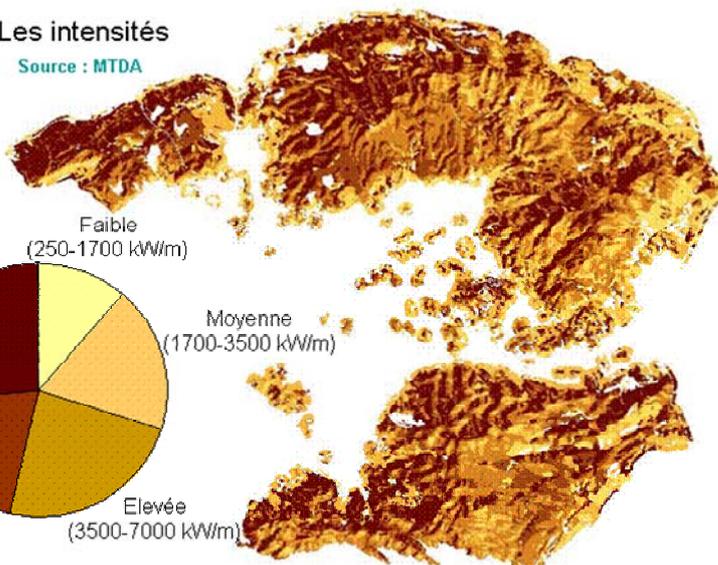
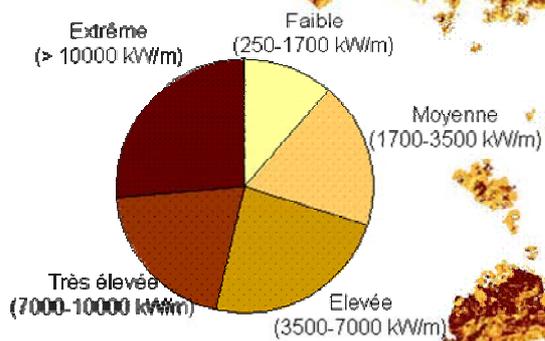


Fig 5.2. Cartographie du Risque Incendie, réalisée sur la base de calculs réalisés avec FIRETEC pour la conception du PPRIF de Marseille (Source MTDA)

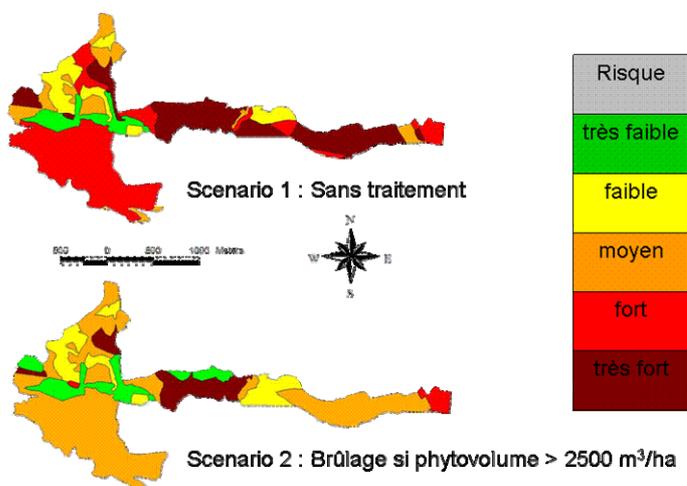


Fig. 5.3. Niveau de risque sur les grandes coupures du Petit Luberon en fonction de deux scénarios de brûlage

2. Quelques études concrètes réalisées au cours de la thèse

Prédictions des intensités du feu pour le Plan de Prévention des Risques Incendies de Forêts de la ville de Marseille (MTDA et INRA)

Le plan de Prévention des Risques Incendies de Forêts de la ville de Marseille (Bouche du Rhône) a été réalisé par le bureau d'études MTDA (Aix-en-Provence). Trente sept milles hectares ont été cartographiés sur la base de neuf types de combustibles, dont trois dominants (**Fig 5.1**). Le calcul de l'intensité du feu a été réalisé à titre expérimental avec FIRETEC par J-L Dupuy et moi-même dans les trois types de combustible dominants dans une large gamme de pentes et de vent. Des relations paramétriques ont été déduites des résultats par MTDA pour les étendre à tous les cas possibles. En croisant, les données de combustible, de pente et de vent (**Fig 5.1**), il a été possible d'établir la cartographie du risque de la **Fig 5.2**.

Etude prospective des effets du brûlage dirigé sur le risque dans le Luberon (Stage de Chloé Oliveri, en partenariat avec l'ONF)

L'ONF³³ réalise des plans de brûlage sur le massif du Luberon. L'INRA a réalisé une étude sur l'évolution du risque incendie en fonction de différents scénarios sur la fréquence des brûlages (Oliveri 2007). La **Fig 5.2** représente un exemple de cartographie du risque obtenue grâce à des simulations réalisées avec FIRETEC. Ce travail a nécessité environ un mois de travail pour la partie « calcul », réparti entre Gilles Scarella, Jean-Luc Dupuy et moi-même. Les résultats de ces calculs ont été analysés de manière à proposer une analyse sur l'efficacité du brûlage dirigé en fonction de la fréquence des traitements.

Etude de l'impact de différents traitements du combustible dans l'écosystème mélangé chêne vert/pin d'Alep (Projet du GIS Incendie)

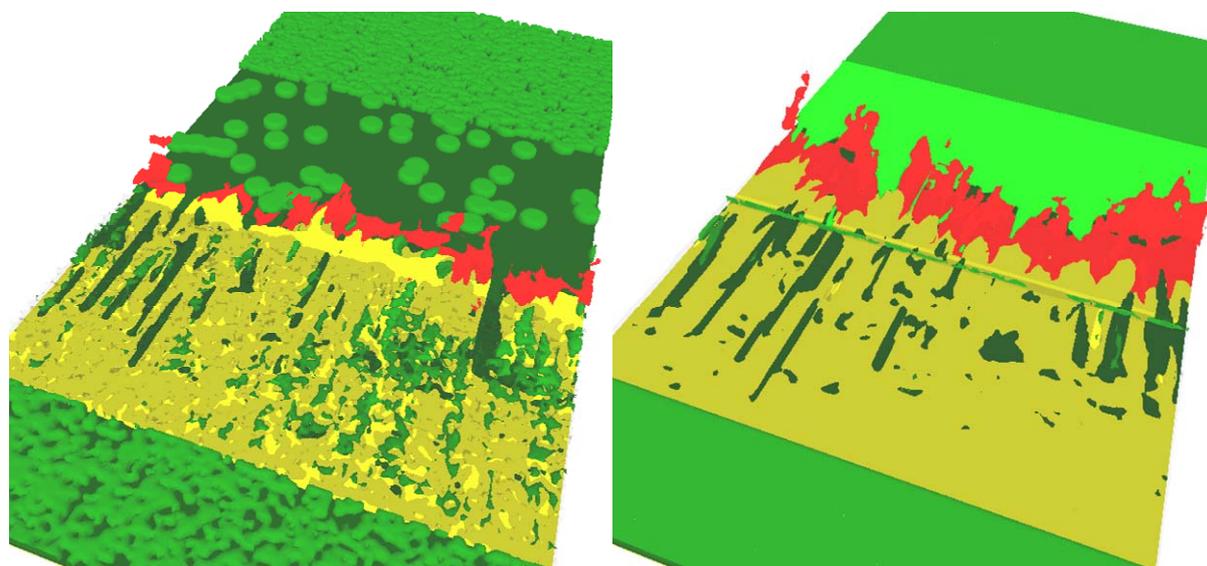
Dans ce projet, nous avons comparé les intensités du feu obtenues dans l'écosystème chêne vert/pin d'Alep en fonction de trois niveaux de traitements :

- suppression de la strate arbustive,
- suppression de la strate arbustive et de la strate arborée de pin d'Alep
- suppression de la strate arbustive et de la strate arborée de chêne vert.

C'est ce dernier traitement qui s'est avéré le plus efficace, en grande partie car les pins d'Alep étaient davantage élagués (naturellement) que les chênes verts. Ce traitement assurait donc une mise à distance entre combustible de surface et bas de la strate arborée beaucoup plus significative.

FIRETEC a beaucoup évolué durant les deux dernières années (rayonnement, écoulement, reformulation de l'implémentation des conditions limites, combustible multi-famille...). Une phase de test est donc nécessaire avant de multiplier ce type d'études qui n'ont été réalisées qu'à titre expérimental. Il est encore trop tôt pour recommander une utilisation opérationnelle. Cependant, dans le cadre de travaux de recherche/développement, de nombreux calculs devraient être réalisés avec FIRETEC pour alimenter le simulateur qui sera réalisé dans le cadre du programme européen FIRE PARADOX.

³³ Office National des Forêts.



a) *Combustible hétérogène*

(Recouvrement 25 %, Bosquets 20 m)

d) *Combustible homogénéisé*

Fig. 5.4. Effet de l'homogénéisation du combustible dans des simulations de propagation du feu sur une coupure (pin Maritime)

3. Echelle de description du combustible pour un modèle physique

Si l'on veut reproduire le comportement d'un feu avec un modèle quelconque, il est nécessaire de lui fournir de l'information qualitative et quantitative sur l'ensemble des paramètres ayant une influence sur le comportement du feu. Parmi les plus connus, on notera la vitesse du vent et la teneur en eau de la végétation, mais aussi la structure spatiale du combustible. Il est donc nécessaire de fournir au modèle une description du combustible suffisamment fine pour que les variations spatiales qui vont agir de manière significative sur le comportement du feu soient prises en compte. A l'inverse, spatialiser le combustible à des échelles où la répartition spatiale n'a plus d'influence sur la propagation du feu constitue une perte de temps du point de vue de la description.

Les calculs de propagation du feu utilisant des modèles physiques sont réalisés sur des maillages bi ou tridimensionnels de l'espace physique. Nous avons classé en introduction et au chapitre 0 les différents modèles selon trois échelles de description :

- Catégorie *S*, de l'ordre de la dizaine de centimètres
- Catégorie *M*, de l'ordre du mètre
- Catégorie *L*, de l'ordre de quelques dizaines de mètres

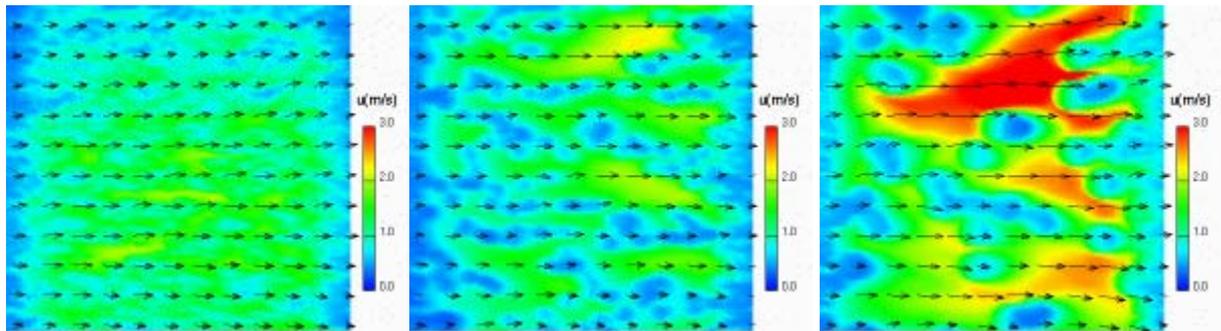
Nous rappelons que le maillage typique de FIRETEC pour les calculs haute résolution est de 2 m (catégorie *M*).

Les résultats présentés dans les différents chapitres et notamment dans le chapitre 4, suggèrent que lorsque la strate arborée présente un fort recouvrement (de l'ordre de 75 %, par exemple), la représentation de la végétation à l'échelle des houppiers n'est pas nécessaire pour reproduire correctement le comportement du feu. Cependant, une homogénéisation de la strate arborée est à proscrire dès lors que le recouvrement de cette strate est faible (de l'ordre de 25 %, par exemple). La **Fig 5.4** illustre par exemple l'augmentation d'intensité produite par l'homogénéisation du combustible, avec des flammes beaucoup plus hautes et une consommation du combustible plus élevée. Il apparaît donc important de décrire les hétérogénéités à l'échelle du houppier, de manière à simuler des propagations du feu dans des bosquets de densité réaliste. La structure d'agrégation de ces bosquets a une importance relative. En effet, elle influe peu sur les vitesses de propagation. Concernant les intensités, on observe des effets limités aux recouvrements faibles (inférieurs à 25 %), car le comportement du feu demeure assez passif par rapport à la strate arborée. Dans un écosystème peu dense comme le pin d'Alep, l'homogénéisation induit une légère sous-évaluation de l'intensité, la strate arborée ne présentant localement pas suffisamment de matière après homogénéisation pour s'enflammer (feu de surface) ; à l'inverse, dans le cas du pin Maritime, il y a suffisamment de matière pour assurer un feu de cime ; l'homogénéisation induit une sur-évaluation de l'intensité. Dans un milieu de type coupure de combustible, un modèle n'intégrant pas le fait que la structure du combustible est morcellée ne pourra donc pas rendre correctement compte de la propagation du feu. Concernant les recouvrements intermédiaires (entre 25 et 50 %), des résultats préliminaires qui mériteraient d'être développés, montrent que le combustible consommé (donc l'intensité) peut diminuer lorsque l'on augmente la taille des bosquets et la distance entre ceux-ci. Nous recommandons donc dans ce dernier cas une description individualisée des houppiers, avec une définition précise de leur recouvrement dans la strate arborée, associée à un paramètre définissant l'agrégation de ceux-ci (indice de Falks par exemple).

Les modèles de catégorie *M* ont une résolution suffisante pour prendre en compte les hétérogénéités à l'échelle du houppier dans les canopées. L'introduction d'un coefficient (*4STAR*) permet de prendre en compte l'agrégation à l'échelle de la pousse pour ce qui est du transfert radiatif. Ce coefficient varie généralement entre 0.5 et 1 (notamment selon la position verticale de la pousse) et peut être déterminé pour chaque espèce par mesures optiques ou modélisation. Concernant les strates arbustives, la prise en compte de la hauteur effective de chaque strate est nécessaire pour que les valeurs de fraction volumique locale soient correctement évaluées. Seuls les modèles de type *S*, sont capables de prendre en compte ce type de résolution de manière directe, mais un modèle de type *M* comme FIRETEC est capable de modéliser cette hauteur efficace par une modélisation de sous maille (pour le calcul de la traînée et, dans une version en cours de développement, pour le transfert radiatif). Compte tenu des densités plus fortes que l'on rencontre dans les strates arbustives, on s'attend à avoir des effets de l'hétérogénéité de tailles plus petites que dans les canopées, car l'amplitude des effets augmente avec la densité. Cependant les strates arbustives sont naturellement plus homogènes que les strates arborées. De plus, les travaux de prévention consistent en général en une suppression totale ou en une réduction homogène de la strate arbustive³⁴, ce qui n'induit pas une augmentation du niveau d'hétérogénéité, comme cela peut être le cas dans les strates arborées. Nous proposons de les prendre en compte via un coefficient d'agrégation en sous maille dans le calcul du transfert radiatif (chapitre 2). Les hétérogénéités de taille supérieure, comme par exemple celles des strates arbustives hétérogènes de chêne kermès peuvent être introduites directement dans un modèle de type *M*.

Concernant les modèles de type *L*, nous avons mentionné que l'homogénéisation du combustible sur plusieurs dizaines de mètres pouvait induire des changements profonds du comportement du feu. Il apparaît donc que ceux-ci doivent absolument introduire des paramètres décrivant les effets de l'agrégation du combustible et notamment de son recouvrement, en plus de ceux décrivant la quantité de combustible, dès lors que les canopées deviennent hétérogènes (recouvrement inférieur à 50 % notamment). Compte tenu de la non linéarité des phénomènes et des changements de régimes que peuvent induire la structure de la végétation (feu de surface/feu de cime ; feu « plume-dominated »/feu « wind driven »), ces paramètres sont vraisemblablement difficiles à introduire. Dans ce contexte, l'utilisation de modèles de type *S* ou *M* peut aider à définir ces paramètres. Enfin, en présence d'hétérogénéité à l'échelle du paysage, le comportement du feu devient non stationnaire, avec des phénomènes de transition complexes. Les modèles de type *L* ne sont pas à même de modéliser ces transitions, même s'ils sont très largement utilisés à ces échelles. Il conviendra donc de considérer avec prudence les résultats qu'ils fournissent en présence de changement majeur de la structure du combustible, en intégrant le fait que les changements de comportement sont progressifs.

³⁴ On notera cependant que certaines espèces qui rejettent de souche comme le chêne kermès peuvent présenter des faciès assez hétérogènes après débroussaillage.



a) 15 m ($\sim h$)

b) 40 m ($\sim 4h$)

c) 80 m ($\sim 8h$)

Fig. 5.5 Vent moyen sur des coupures de recouvrement 25 %, pour des tailles caractéristiques de trouées variées

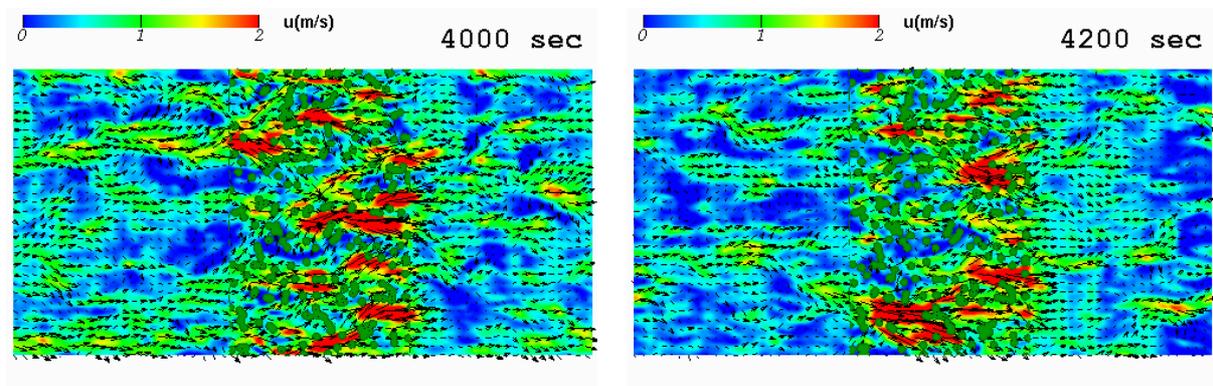


Fig. 5.6 Vue du ciel de l'écoulement dans les zones de forêt et sur la coupure

Afin de faciliter la visualisation, les arbres présents en zone de forêt (de part et d'autre de la coupure) n'ont pas été représentés (canopée à 75 % de recouvrement). La taille caractéristique des agrégats de houppiers sur la coupure est de 10 m. La coupure mesure 200 m de largeur.

4. Application au brûlage dirigé des études de l'écoulement

L'utilisation de modèles comme FIRETEC n'est à priori pas tellement adaptée à l'étude de la propagation d'un brûlage dirigé européen. En effet, ces brûlages sont généralement réalisés dans des conditions où le vent est faible (voire non établi) et les conditions d'humidité et de température extérieure telles que ces feux sont peu intenses. Les feux sont en limite de propagation, nécessitant de nombreux réallumages avec les torches, et leur propagation est parfois assurée par des mécanismes très complexes comme la conduction entre les éléments de litière. La modélisation est encore loin d'apporter des réponses satisfaisantes dans des situations aussi complexes. La situation est bien différente aux Etats-Unis ou au Canada, où des brûlages dirigés que l'on qualifierait en Europe d'incendies sont capables de parcourir des superficies très importantes. FIRETEC est bien adapté à ce type de simulations.

Concernant les brûlages dirigés de faible intensité réalisés en Europe, les praticiens sont finalement peu demandeurs de connaissance par rapport à la propagation et s'intéressent davantage aux effets des brûlages, ou à l'impact de leur pratique sur le risque dans les milieux (cf. paragraphe 2, Etude sur les coupures du massif du Luberon). Cependant, le comportement des brûlages sous canopée reste complexe du fait de l'intermittence de la turbulence et des rafales produites par la canopée elle-même. Les études que nous avons conduites au chapitre 3 permettent d'apporter quelques éléments concrets, dans les canopées homogènes mais aussi sur les coupures hétérogènes, sur lesquelles sont fréquemment pratiqués les brûlages.

Cas des canopées homogènes

Dans les canopées homogènes de type pin d'Alep et surtout pin Maritime, le vent ressenti au niveau du sol est très largement atténué par la présence de la canopée. Le vent moyen au niveau du sol peut être jusqu'à dix fois plus faible à 2 m de haut qu'au toit de la canopée (**Fig 3.25**). Ainsi, un feu de surface peu intense peut se transformer rapidement en un violent feu de cimes. Il convient donc de mesurer la vitesse du vent en terrain découvert avant de démarrer le brûlage. Un certain nombre de travaux dont les nôtres mettent en évidence qu'il est nécessaire de se trouver à une distance horizontale supérieure ou égale à trente fois la hauteur de la canopée d'une lisière pour retrouver en aval un vent typique des terrains découverts. Cependant l'accélération du vent se manifeste principalement sur les cinq à dix premiers h de la lisière. Le milieu d'une clairière de $10h$ constitue donc déjà une référence correcte pour évaluer la force du vent réel, mais en dessous de cette dimension, on risque de considérablement sous estimer la force du vent réel.

Le vent sous les canopées est caractérisé par de l'intermittence et des fluctuations en direction et force qui sont très importantes (**Fig 3.15**). L'amplitude des fluctuations augmentant avec le vent au dessus du couvert, une augmentation des fluctuations ressenties sous le couvert pourra être associée à une augmentation du vent ambiant.

Cas des canopées hétérogènes (coupures arborées notamment)

Les coupures arborées constituent des zones privilégiées pour l'usage du brûlage dirigé, car la réduction du couvert limite le risque de transition en cime. De plus, ce sont des zones sur lesquelles l'entretien doit être régulier, ce qui légitime l'emploi d'un moyen peu coûteux comme le brûlage dirigé. Cependant, la présence d'hétérogénéité relativement grande peut induire des accélérations brutales de la vitesse du vent en quelques mètres et présente donc des risques particuliers. Cette variabilité est à la fois spatiale et temporelle.

La **Fig 5.5** illustre la variabilité spatiale que l'on peut rencontrer sur l'écoulement dans des canopées de pin Maritime pour des trouées de tailles variables. Lorsque les trouées sont de l'ordre de h , on observe peu d'effets de la structure du combustible sur l'écoulement. Autour de $4h$, on observe des poches dans lesquelles la vitesse de l'écoulement est significativement plus faible. Ces poches correspondent à des agrégats de végétation de l'ordre de 10 m (environ h). Mais c'est surtout à partir de $10h$, que les trouées sont suffisamment grandes pour générer des accélérations vraiment significatives. Par ailleurs, des changements rapides peuvent intervenir dans les zones de trouées en quelques minutes. On notera en particulier comment la vitesse de l'écoulement diminue très fortement dans la zone centrale de la coupure en 200 s (**Fig 5.6**).

5. Effets des coupures de combustible

L'hétérogénéité du combustible a été envisagée à plusieurs échelles dans nos différents travaux. L'utilisation de FIRETEC au chapitre 4 a permis d'aborder l'impact des hétérogénéités à l'échelle du paysage que constituent les coupures de combustible.

Les différentes coupures de combustible que nous avons considérées ne sont pas au sens propre de véritables coupures de combustible, puisque la réduction du combustible n'affecte que la strate arborée, la strate arbustive étant identique à celle de la zone témoin. Ce choix a été dicté par les objectifs académiques de notre travail, puisque notre objectif était de déterminer l'impact sur le comportement du feu des hétérogénéités dans le peuplement ; modifier la strate arbustive par rapport aux zones témoins aurait donc introduit un biais dans notre étude. Les configurations étudiées sont donc davantage à rapprocher de coupures mal entretenues, c'est-à-dire de coupures dont la strate arbustive n'est pas régulièrement réduite. On considère en effet que la strate arbustive met six ans à se reconstituer après traitement.

Malgré cette limite, notre étude met en évidence quelques caractéristiques intéressantes du comportement du feu sur les coupures. D'abord, elle est à notre connaissance la première à envisager la transition d'un feu établi dans un peuplement vers une coupure, ainsi que la transition de la coupure vers le peuplement non traité. C'est notamment la grande taille du domaine (640 m de long) qui autorise cette approche complète du problème. Elle met en évidence que les phénomènes de transition ne sont pas instantanés, puisque une réduction efficace de l'intensité n'intervient qu'après que le feu ait parcouru de 50 à 100 m sur la coupure. Un tel résultat semble légitimer le choix de 200 m des coupures de combustible réalisées en France ; en effet, le personnel de lutte est en général positionné sur la piste qui occupe le milieu de la coupure, c'est-à-dire située à 100 m de la lisière. Il faut cependant préciser que le vent est modéré dans notre étude (de l'ordre de 10 km.h⁻¹ avec des rafales à 20 km.h⁻¹). On peut donc s'attendre à une réduction de l'intensité du feu se produisant sur une plus grande distance en présence de vent plus fort. En revanche, dans le cas d'une coupure bien débroussaillée, on s'attend à ce que le feu de cime devienne plus rapidement un feu de surface et que son intensité diminue plus rapidement. Cette étude est donc clairement insuffisante pour conclure sur la question de la largeur des coupures. Il nous semble pourtant important de constater que l'ordre de grandeur choisi est compatible avec celui suggéré par le modèle. On pourra également noter que le modèle suggère que les coupures de combustible doivent être plus larges en présence de combustible dense comme le pin Maritime, par rapport à du pin d'Alep. Enfin, nos simulations mettent en évidence une augmentation de l'intensité du feu par rapport à la zone de forêt, juste avant que le feu aborde la coupure et surtout, après que le feu a franchi la coupure et aborde le peuplement en aval.

Un autre aspect important de l'étude concerne le niveau de recouvrement. Dans les deux écosystèmes présentés, il a été clairement démontré qu'une réduction du recouvrement de la strate arborée de 75 à 50 % ne produisait aucun effet notable en terme d'intensité ou de vitesse de propagation. En revanche, l'intensité est nettement réduite sur la coupure à 25 % de recouvrement et l'est encore davantage sur la coupure ne présentant plus aucune strate arborée. Il apparaît donc important de procéder à des réductions très importantes du recouvrement d'arbres si l'on veut des coupures efficaces. Une étude plus détaillée du comportement du feu de la coupure à 25 % de recouvrement et de celle dépourvue de strate arborée, montre que, bien que l'intensité soit supérieure dans le premier cas, les températures calculées au niveau de la strate arbustive (donc du personnel de lutte) sont nettement plus élevées en avant du front en l'absence de canopée. Ceci est dû à une inclinaison plus forte du panache en l'absence d'arbres au dessus de la strate arbustive. Concernant les recouvrements intermédiaires entre 25 et 50 %, une étude préliminaire suggère qu'une mise à distance des bosquets en les agrégeant jusqu'à des taches de 10 m est plus efficace en termes de réduction du combustible consommé et d'intensité du feu. De nouveaux tests sont nécessaires pour apporter une conclusion plus solide.

En terme de coût de réalisation des coupures, le débroussaillage systématique de la strate arbustive est très efficace en terme de réduction de l'intensité, cependant il comporte l'inconvénient d'être peu durable ; son entretien nécessite en effet des interventions fréquentes. La réduction du recouvrement de la strate arborée ne permet pas une réduction de l'intensité de feu jusqu'à des niveaux très faibles, mais elle permet quand même une réduction importante de l'intensité du feu (de 25-

30000 kW.m⁻¹ à 5000 kW.m⁻¹ dans le pin Maritime). Par ailleurs, elle présente l'intérêt d'être beaucoup plus durable.

Bibliographie

DPFM (2001) La mise en œuvre des plans de prévention du « risque incendies de forêts » dans la Zone de Défense Sud. Délégation à la Protection de la Forêt Méditerranéenne, 87 p.

Oliveri C (2007) Le brûlage dirigé, parade au risque d'incendie : étude prospective dans le Luberon. Mémoire de fin d'études de l'ENITA de Bordeaux, 54 p.

Conclusion et perspectives

Parvenu au terme de l'exposé, il convient d'évaluer les contributions de ce travail à la connaissance des effets des caractéristiques de la végétation sur le comportement du feu et à la modélisation des incendies en général.

Auparavant, nous souhaitons replacer le travail exposé dans le contexte qui l'a initié et où il s'est peu à peu développé. Ce contexte est très pluridisciplinaire, puisqu'il mêle transfert radiatif dans les canopées, écoulements dans les canopées, modélisation du combustible et politique de prévention des incendies.

Déroulement de la thèse

Ma thèse a été précédée par un stage d'une durée d'un mois au Los Alamos National Laboratory en septembre 2004³⁵ durant lequel j'ai commencé à travailler avec FIRETEC. La thèse a ensuite débuté début 2005 par une appropriation progressive de compétences dans le domaine des feux de forêts, pour lequel il n'existe pas de formation académique. J'ai également travaillé avec FIRESTAR, notamment dans le cadre d'une comparaison entre les résultats des deux modèles.

La thèse portant sur l'hétérogénéité du combustible, il a été nécessaire de décrire la végétation à différentes échelles. En complément aux données collectées par l'équipe PEF, nous avons poursuivi un partenariat initié en DEA avec Yves Caraglio du CIRAD-AMAP de Montpellier, autour de la modélisation architecturale du combustible. Ces travaux, ainsi que quelques simulations réalisées avec FIRESTAR ont été présentés à la conférence MEDPINE de Bari en 2005. Cet aspect du travail a permis de préciser les ordres de grandeurs de caractéristiques de différents combustibles, de manière à aborder l'ensemble de la gamme de caractéristiques physiques rencontrées en situation réelle.

Le début de thèse a été orienté vers les travaux portant sur le transfert radiatif. C'est dans ce contexte qu'ont été développés les travaux concernant les hétérogénéités les plus petites, présentés au chapitre 2. Ces travaux ont été présentés à l'ICFFR de Coimbra en 2006 et ont évolué, jusqu'à la soumission d'un article soumis à IJWF.

Le premier comité de pilotage avait souligné la nécessité de procéder à une étude de sensibilité des effets des caractéristiques de la végétation en conditions homogènes, avant d'aborder les cas hétérogènes. Quelques simulations ont été réalisées avec FIRESTAR, mais c'est surtout avec FIRETEC que les études ont été menées (chapitre 1). Le partenariat avec le LANL s'est intensifié tout au long de la thèse, notamment grâce à un accès à distance à leurs moyens de calcul (calculs massivement parallèles), mais aussi au travers de conférences téléphoniques bimensuelles. Une étude préliminaire sur les effets de l'hétérogénéité de la végétation a été conduite, dont les résultats ont également été présentés à la conférence de Coimbra.

L'intensification des travaux menés avec FIRETEC a permis d'identifier certaines limites du modèle, notamment en ce qui concerne les écoulements en présence de canopée et le calcul du rayonnement. La présence d'Yves Brunet dans le comité de thèse et le soutien de Sylvain Dupont, également membre de l'INRA EPHYSE de Bordeaux a permis de mettre en œuvre, après un important travail bibliographique, une validation du modèle d'écoulement (en l'absence de feu). Un projet d'article concernant ces travaux a été soumis à l'IJWF. Dans la suite de ce travail, il nous est apparu que l'écoulement en présence d'hétérogénéités de structure dans les forêts était peu abordé. Étant donné l'importance du vent dans le contexte de la propagation des incendies, nous avons mené une étude des caractéristiques de l'écoulement sur des coupures hétérogènes. Cette étude est présentée au chapitre 3. Une procédure permettant l'emploi des champs précalculés comme conditions ambiantes de vent dans le domaine en présence de canopée a dans le même temps été développée avec les collègues américains et notamment Jesse Canfield. Concernant le rayonnement, les problèmes ont été résolus en collaboration avec Gilles Scarella, par la réalisation d'un nouvel algorithme basé sur la méthode de MonteCarlo.

³⁵ dans le cadre d'une mission à l'étranger lors de ma dernière année à l'Ecole Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts

Disposant d'une version de FIRETEC corrigeant l'ensemble des problèmes connus, nous avons repris l'étude des canopées hétérogènes, mais sur des domaines beaucoup plus grands intégrant une coupure hétérogène (chapitre 4), abordant ainsi les hétérogénéités à l'échelle du paysage.

La dernière année m'a également donné l'occasion de participer à la réalisation de quelques études appliquées, sommairement décrites au chapitre 5 (PPR, brûlage dirigé, GIS incendie).

Les différentes compétences techniques nécessaires au travail (en mécanique des fluides, en programmation avec fortran, en calculs parallèles, en utilisation des machines parallèles et en visualisation avec des logiciels comme Tecplot et surtout AVS) ont été acquises au fur et à mesure de la thèse.

Bilan des résultats en matière de comportement du feu

Les incendies de forêts se propagent au sein d'un combustible dont les caractéristiques physiques affectent le comportement, au même titre que les conditions atmosphériques et topographiques. L'étude présentée au chapitre 1, a mis en évidence un impact significatif de la fraction volumique (qui exprime la densité du combustible) sur la vitesse de propagation et l'intensité du feu. La vitesse de propagation décroît avec la fraction volumique ; cette tendance a été validée par quelques données expérimentales disponibles sur les litières. A l'inverse, l'intensité du feu augmente avec la fraction volumique. Par ailleurs, notre étude a mis en évidence que le comportement du feu pouvait passer de « wind-driven » à « plume dominated » selon la fraction volumique pour une vitesse de vent donnée. En présence de canopée, cette dernière pilote également le seuil de propagation entre « torching » et « crowning ». Le fort impact de cette variable qui décrit la spatialisation du combustible, justifie la pertinence de notre interrogation concernant l'effet de la distribution spatiale du combustible, telle qu'elle est abordée dans les autres chapitres.

Le chapitre 2 propose une approche originale, inspirée de la bibliographie sur le rayonnement solaire dans les canopées, pour aborder les problèmes d'homogénéisation du combustible dans le calcul du transfert radiatif. Ce chapitre a mis en évidence l'influence de certaines caractéristiques du combustible (coefficient d'absorption local) et de l'hétérogénéité spatiale (recouvrement, taille des hétérogénéités) sur l'échauffement radiatif qui pilote une partie du comportement du feu. Les végétations les plus hétérogènes produisent une diminution de l'irradiance moyenne du combustible par rapport aux combustibles hétérogènes lors de la propagation du feu. Une distribution insuffisamment détaillée de la structure spatiale tend donc à augmenter la vitesse de propagation. Dans les canopées, une description de l'enveloppe des houppiers et la définition d'un coefficient d'agrégation à l'échelle de la pousse s'avèrent suffisantes pour une évaluation précise du transfert radiatif ; les détails de la distribution locale au sein du houppier, en dehors de l'agrégation à l'échelle de la pousse sont négligeables. Concernant les strates arbustives, nous proposons une formule pour évaluer l'importance des effets attendus de l'hétérogénéité. Lorsque ceux-ci sont importants, une méthode d'homogénéisation est proposée.

Le chapitre 3 aborde le calcul des écoulements en présence de canopée, sous la forme d'une résolution explicite de la majeure partie de la turbulence (large eddy simulation). Un travail de validation du modèle est proposé, sur la base de données expérimentales recueillies dans la littérature dans des canopées homogènes et hétérogènes. Ces résultats illustrent l'influence très significative de grandes coupures de combustible sur la nature des écoulements. En s'appuyant sur ce travail, une investigation des effets de l'hétérogénéité de la végétation sur l'écoulement a été conduite de manière systématique. Pour une biomasse donnée, les résultats obtenus mettent en évidence que l'hétérogénéité du combustible induit une augmentation significative de la vitesse de l'écoulement moyen par rapport aux configurations homogènes. Les effets obtenus sont d'autant plus importants que le recouvrement et la taille des hétérogénéités sont élevés et que les agrégats de végétation sont denses. Comme au chapitre 2, il apparaît qu'une description à l'échelle des houppiers est suffisante pour reproduire les écoulements au sein des canopées ; celle-ci devient nécessaire dès lors que le recouvrement est inférieur à 50 %.

Les chapitres 2 et 3 traitent de la modification de l'environnement physique (transfert radiatif, écoulement incident) associée à des combustibles hétérogènes. Cependant, la structure spatiale du combustible induit également des modifications de la source de chaleur (flamme, combustible). De plus, le panache produit par le feu induit également des modifications de l'écoulement. Dans le chapitre 4, nous utilisons FIRETEC pour simuler la propagation du feu sur des coupures hétérogènes. L'étude présentée se limite à une force de vent et deux écosystèmes, mais présente l'intérêt d'intégrer l'ensemble des mécanismes sur lesquels l'hétérogénéité du combustible agit. De cette étude, il ressort qu'une homogénéisation du combustible est à proscrire dans le cas des faibles recouvrements, alors que celle-ci ne pose pas de problème dans le cas de recouvrements élevés. Cette conclusion est conforme aux résultats des chapitres 2 et 3. Cependant, on observe une différence de comportement selon le type d'écosystème envisagé : dans le pin Maritime, l'homogénéisation se traduit par une augmentation de l'intensité et des dégâts, alors que c'est le contraire pour le pin d'Alep, qui est moins dense. Pour ce dernier, l'homogénéisation conduit à des valeurs de la densité locale insuffisante pour permettre une propagation établie. Le recouvrement apparaît comme une grandeur cruciale pour la description du combustible à l'échelle de la parcelle. En effet, si une réduction du recouvrement de 75 à 50 % ne modifie pas significativement le comportement du feu, une réduction à 25 %, voire même à 0 % (suppression de la strate arborée) réduit très significativement les intensités prédites. Par ailleurs, le niveau de sévérité du feu (% de canopée consommée, teneur en eau finale du combustible) diminue de manière importante lorsque l'on réduit le recouvrement. Cependant, cette diminution de l'intensité et de la sévérité s'accompagne d'une inclinaison progressive du panache, qui induit des températures plus élevées en avant du front, qui peuvent être préjudiciables à la lutte. L'augmentation de la taille des hétérogénéités et l'augmentation des distances entre les agrégats (à recouvrement constant) s'accompagnent d'une diminution de la sévérité du feu dans le cas de l'écosystème à pin maritime. Cette diminution est limitée ; cependant des résultats préliminaires suggèrent qu'elle pourrait être plus significative pour des recouvrements voisins de 50 %.

Le chapitre 5 constitue une courte synthèse des différents enseignements de notre travail qui présentent une utilité pour le gestionnaire. Les études appliquées qui ont été réalisées au cours de la thèse y sont sommairement décrites ; elles mettent en évidence l'applicabilité des modèles physiques. Un second paragraphe résume les préconisations en terme d'échelle de description que nous faisons à l'issue du travail, en particulier en fonction des différentes classes de modèles existants. Certains résultats de l'étude des écoulements sur les coupures sont appliqués à la pratique du brûlage dirigé, notamment en terme de comportement de l'écoulement en présence de trouées. Enfin, quelques recommandations sont fournies, quant à la réalisation des coupures de combustible.

Contribution à la modélisation du feu

Bien que la modélisation du feu ne soit pas l'objectif principal de cette thèse, le travail réalisé avec les modèles a conduit aux développements de certains aspects des modèles et de leur usage.

L'intégration de l'hétérogénéité du combustible dans le calcul du transfert radiatif proposée au chapitre 2 constitue un travail de modélisation à part entière. Les apports de ce travail ont été décrits au paragraphe précédent.

Des méthodologies concernant le traitement des données issues de calculs tridimensionnels ont été mises en oeuvre. En effet, les résultats de simulations en 3D présentent des variations spatiales importantes qui compliquent considérablement l'interprétation des résultats. Pour pallier cette difficulté, nous avons développé un processus de moyenne des profils après décalage de l'axe temporel (chapitre 4). Par ailleurs, une sélection des grandeurs physiques les plus pertinentes a été réalisée.

Nous avons déjà évoqué les travaux co-réalisés sur le code de calcul du rayonnement dans FIRETEC. Concernant la modélisation des écoulements, un travail bibliographique important et la contribution de spécialistes de l'INRA EPHYSE et du LANL ont conduit à la mise en oeuvre d'une méthodologie qui a permis de reproduire fidèlement des écoulements expérimentaux dans des canopées. Dans le contexte de la modélisation du feu, ce travail était novateur. Il a d'ailleurs été partiellement repris par Sofiane Meradji pour la validation de FIRESTAR 3D. La manière d'intégrer ces champs de vent aux simulations de propagation du feu est le fruit d'une collaboration avec nos collègues du LANL.

Perspectives

A court terme, une perspective immédiate du travail est la poursuite de l'étude des configurations présentées au chapitre 4, notamment dans le contexte des recouvrements intermédiaires, pour lesquels l'étude préliminaire a montré que les effets de l'hétérogénéité pouvaient être importants. Cependant, l'utilisation de la nouvelle version du modèle dans la dernière étude a conduit à des résultats de vitesse de propagation plus élevés que ce que nous attendions, bien que les valeurs obtenues semblent cohérentes en ordre de grandeur avec certaines données expérimentales. Cette remarque suggère l'importance du travail de validation des résultats qu'il convient de conduire, en particulier au fur et à mesure de l'évolution des modèles et des hypothèses de travail (front de feu infini notamment, dans cette dernière étude).

Au cours de notre travail, nous avons montré que l'utilisation des modèles physiques pouvait permettre de répondre à certaines questions que se posent les gestionnaires (évaluation de l'intensité, impact de la politique de prévention). Il conviendra à l'avenir de développer ce qui est présenté ici comme des études de faisabilité, en multipliant les configurations étudiées (combustible, vent, relief). De telles études, qui gagneraient à être conduites en confrontation permanente avec des experts de terrain, devraient permettre de dégager des grands principes, qui sont seulement suggérés par notre travail. Par ailleurs, la question de la sévérité du feu a été légèrement abordée dans le chapitre 4 (combustible consommé, teneur en eau finale). Les prédictions que sont capables de fournir les modèles physiques (flux rayonnés, températures de la phase gazeuse et de la phase solide, teneur en eau) peuvent constituer une piste intéressante pour l'évaluation des dommages écologiques associés, notamment en matière de mortalité. Ces derniers sont en effet souvent déterminés de manière empirique, voire même postulés dans les études qui concernent l'évolution des écosystèmes en présence d'incendie. Couplés à des modèles de dynamique de peuplements, les modèles physiques pourraient permettre de mieux comprendre l'évolution des écosystèmes, en présence ou non d'actions de prévention.

Concernant la recherche en matière de modélisation, nos études ont mis en évidence que les phénomènes en jeu se produisent à des échelles spatiales relativement importantes (transition forêt/zone traitée, distance d'établissement d'un régime permanent pour un front large, etc). De plus, ils peuvent interagir avec des phénomènes atmosphériques typiques de la basse couche de l'atmosphère (streaks, atmosphère thermiquement instable, etc). Il conviendra donc de poursuivre l'augmentation des échelles abordées. Nous avons mentionné que HIGRAD/FIRETEC avait déjà été utilisé de manière couplée avec des modèles atmosphériques comme RAMS ou COAMPS. Nous pensons que cette piste mérite d'être suivie pour les calculs à grande échelle. Elle permettra en effet de s'abstraire de l'usage des conditions limites périodiques pour le calcul des écoulements, afin de traiter des domaines ne présentant pas de périodicité potentielle (paysages très hétérogènes, présence de relief...) et de reproduire de manière parfaitement réalistes des processus atmosphériques comme les streaks.

Annexe I. *Pinus halepensis* Architectural Analysis for Fuel Modelling. Par Caraglio, Pimont et Rigolot (Proceedings of MEDPINE 3, Bari 2005)

Pinus halepensis Mill. Architectural Analysis for Fuel Modelling

Y. Caraglio*, F. Pimont**, E. Rigolot**

*INRA-CIRAD

Unité de Modélisation des Plantes
TA40/PS2, 34398 Montpellier, France
Phone : (+33) 4 67 61 65 48,
Fax : (+33) 4 67 59 38 58
e-mail : yves.caraglio@cirad.fr

**Institut National de la Recherche
Agronomique

Unité de Recherches Forestières
Méditerranéennes
Equipe Prévention des Incendies de Forêts
20 Avenue A. Vivaldi, 84000 Avignon,
France
Phone : (+33) 4 90 13 59 35,
Fax : (+33) 4 90 13 59 59
e-mails : pimont@avignon.inra.fr &
rigolot@avignon.inra.fr

Abstract

A fire behaviour model based on the complete physical and multiphase approach has been developed in order to study fuel treatment efficiency at the wildland urban interface. The fire behaviour model is currently running in 2 dimensions (x, z) and requires a complete description of the vegetation in a 25 cm x 25 cm grid. In each elementary cell of this grid, fuel families have to be identified and quantified. The finest fuel families (twigs less than 6 mm and leaves or needles) have to be described in priority, because they are the most important fuel particles for fire behaviour. The main physical, chemical and thermal properties of each fuel family has to be known and the volume fraction enables to quantify its presence in a given cell.

Pinus halepensis stands are fire prone communities very common in South Eastern France. The architectural approach was applied to describe *Pinus halepensis* fine fuel distribution in order to build up inputs for the fire model.

Architectural analysis aims at a comprehensive and dynamic understanding of plant growth through the

analysis of the major successive morphological events that happen during plant development from germination to death.

The plant architectural software AMAPsim developed by Cirad which relies on both qualitative and quantitative tree architecture description and leads to realistic 3D computing trees can be used to complement fuel characterization. From the computerized plant architecture model it is possible to access and extract various physical parameters. These spatialized data then could be used in fire propagation model.

This paper focuses on *Pinus halepensis* fine fuel characterization with using AMAP tools. The AMAP methodology is presented as well as the data collected for plant growth and architecture modelling. Results on the main features of *Pinus halepensis* architecture are presented as well as Aleppo pine simulations of individual plants in order to extract fuel parameters. The first results of fire simulations in Aleppo pine stands are presented and the capabilities and limits of such an approach for fuel modelling are discussed.

Keywords: fuel model, fuel distribution, *Pinus halepensis*, architecture

1. Introduction

Mediterranean wildlands are regularly threatened by fire. Fuel build up in forest areas due to agricultural abandonment combined with the development of wildland-urban interface areas together with severe drought episodes over recent past years (global climatic change) have increased the potential fire hazard in such areas. Fire prevention becomes a priority and needs management tools. Because experimentation is often difficult, modelling approach is a way to prospect, test and compare mitigation operations like fuel-break design. The most popular fire models [1, 2, 3, 4] do not describe explicitly vegetation patterns. This approach is adapted for modelling fire behaviour in homogeneous vegetation layers but not in typical Mediterranean fuel complexes. Mediterranean vegetation presents several levels of heterogeneity, due to ecological factors (plants organisation in the community, natural stratification and horizontal gradient), fuel management effects (thinning, fuel break), and fuel distribution within individuals plants (vertical and lateral gradient in plant architecture, aggregation factor in shoot or twig). Physically-based fire

propagation models like FIRESTAR [5, 6] or FIRETEC [7, 8] enable to take into account spatial fuel patterns and vegetation heterogeneity.

This study focuses on heterogeneity due to fuel distribution within plants. Fire propagation is mainly due to the thinnest elements of vegetation, essentially leaves or needles and smallest twigs. In the frame of the European program FIRESTAR, a methodology of fuel description based on destructive measurements was developed [9] using a physical 25 cm cell mesh. This method is mainly adapted to the description of shrubs and small trees, but cannot be easily used for mature trees due to their wide dimensions. In this last case, architectural approach [10] can be helpful, because it entails to build virtual trees, twig by twig and needle by needle.

Architectural analysis [11, 12] aims at a comprehensive and dynamic understanding of plant growth through the analysis of the major successive morphological events that happen during plant development from germination to death. The plant architectural software AMAPsim developed by Cirad [13] relies on both qualitative and quantitative tree architecture description and leads to realistic 3D computed trees that can be used to describe fuel spatial patterns. The method is applied here to *Pinus halepensis*, which is a wide-spread species in Mediterranean ecosystems [14]. *Pinus halepensis* communities are fire prone ecosystems with high post-fire regenerative abilities [15], which turns it as a priority vegetation type for fuel management.

In this study, the different steps to build architectural models are described, starting from morphological and architectural analysis, complemented with sampling and field measurements, and ending with the analysis and modelling phase. Part of the work on *Pinus halepensis* architectural analysis had already been described in [16]. With the new perspective of fuel modelling, additive measurements were implemented to improve the prediction of fine fuel volume fraction of our study site. From architectural model outputs, vegetation files were built to implement fire propagation simulation with FIRESTAR. Because FIRESTAR is so far a 2D model, only 2D data were extracted from virtual trees. Simulations on young and mature stands were run and analysed in order to assess the added value of the architectural approach for fuel description namely in a 3D fire modelling perspective.

2. Material and method

2.1. Plant architecture: general methodology and application to *Pinus halepensis* Mill. (*Pinaceae*)

a) General Methodology

Using 3D virtual plants in order to extract fuel parameters requires not only a realistic physiognomy but especially a realistic structure in terms of number and size of axes. In order to obtain such realistic virtual plants, three main steps are required.

Plant architectural analysis

Architectural analysis [11, 12] aims at a comprehensive and dynamic understanding of plant growth through the analysis of major successive morphological events that happen during plant development from germination to death. This approach points out the topological importance in morphological and growth expressions.

Field measurements and data analysis

Based on architectural description, specific botanical sampling and measurements are realised. They focus on the annual shoots that are the main plant structural entities.

All these field measurements are transferred to computer, as tree-structured data, using a specific coding language (Multi scale Tree Graph and AMAP Modelling Language, [17]) that allows to explore and to analyse these measurements with AMAPmod software tools [18]. Methods for analysing plant architecture are based on stochastic modelling of meristem activity. Growth, branching and mortality are the elementary processes taken into account [19]. These methods provide means for quantifying the morphological trends identified by the qualitative architectural analysis.

Simulation of tree architecture

Using concepts derived from architectural analysis and comprehensive approach of plant development, simulation software called AMAPsim [13] is mainly based on the concepts of “morphological trends” and “physiological age” [10]. Plant development is simulated using an automaton whose successive states are ordered along a “reference axis” [20]. This automaton mimics (i) the physiological ageing of meristem expressions and other botanical entities during ontogeny, and (ii) the morphological trends that exist at different levels of organization within the

plant [21]. A software called ForestFire based on a spatial discretisation method was used to extract different classes of virtual plant elements according to species, diameter class, type of organ, dead or alive parts.

b) Life history and morphological traits of Aleppo pine

Aleppo pine is a coniferous Mediterranean tree. Its monopodial and orthotropic axes show rhythmic and indeterminate growth. Annual periodic growth results in new part of leafy axis (*i.e.* growth unit **GU**, [22]). Branching is expressed one year after the arising of lateral buds which are grouped in a tier of lateral axes at the upper part of each growth units. Aleppo pine follows architectural Rauh’s model as defined by [23]. Aleppo pine architectural characteristics can be described during its ontogeny. From germination to juvenile stage, apical meristems of Aleppo pine axes produce internodes and leaves. The form and morphological features of leafy organs change all along the stem (Figure 1a) from photosynthetic aciculate leaves (Figure 1b) to scale leaves (Figure 1c). Then photosynthetic assimilation is realized by two big leaves ("needles") borne on very short lateral axes ("brachyblasts") localised in the axil of scale leaves ("bracts"). This modification is completed two or three years after germination.

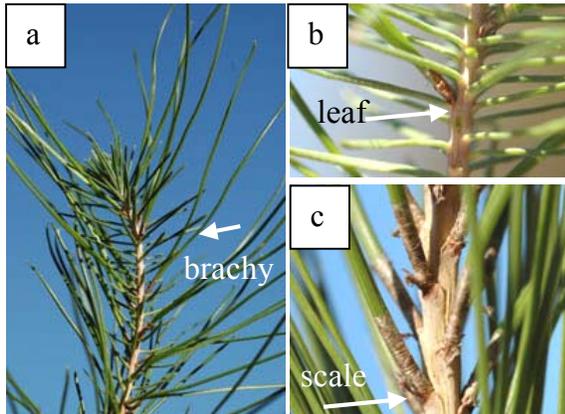


Figure 1. Young stem showing scarcely brachyblasts (a) and the transition between leaf (b) and scale (c) in the axil of which a brachyblast is developing.

The axes growth extension presents rest phases more or less marked during the first years (summer and winter period, dry or cold conditions) and are materialized by a rosette of young leaves at the extremity of the axis. These rest phases become

regularly marked by a scaly apical bud as the brachyblast expression becomes generalised.

Young Aleppo pines show a polycyclic behavior [24]. Within a year, an annual shoot (**AS**) can produce one or more successive flushes (growth units), the number of which varies from one to four according to (i) location within the plant structure and (ii) ecological conditions. The general growth unit organisation is shown on figure 2a. Nevertheless, each GU shows a particular set of morphological characters according to its position along the annual shoot (Figure 2b). Morphological characters of Aleppo pine GU had been quantified by [16], who showed that the first GU produced in the year was always the smallest and bore the female cones. Another feature was the length ratio between the leafy (zone 2) and the scaly part (zone 1).

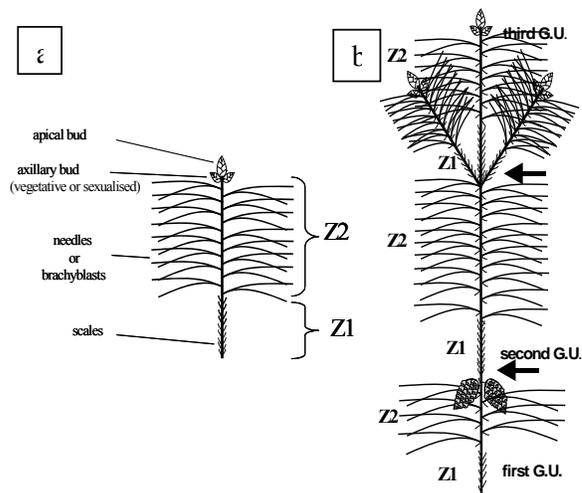


Figure 2. (a) General growth unit organisation showing leafy zone (Z2) and scaly zone (Z1). (b) Tricyclic annual shoot organisation (three flushes in a year).

A strong apical dominance leads to a highly organised structure around the main stem. All Aleppo pine axes are orthotropic and with rhythmic growth and branching. Nevertheless, morphological differences between axes are significant and allow to clearly identify trunk, branches, twigs, and especially in regard to polycyclism and sexuality features (Figure 3). The fully established branched system can then be summarised in terms of a very simple set of axes categories which defines the specific elementary architecture of each plant architectural unit [10] representing the most theoretical tree hierarchy and its fundamental organisation.

trunk	branches	twigs	ramlets	short axes (brachyblasts)
orthotropic	orthotropic	orthotropic	orthotropic	ageotropic
indefinite growth	indefinite growth	indefinite growth	~definite growth	definite growth
	delayed branching	delayed branching	delayed branching	immediate branching
three to ten axillary productions female cone	two to six axillary productions female cone	until two axillary productions male cones	no axillary production	no axillary production
polycyclic up to four cycles	polycyclic up to three cycles	polycyclic up to two cycles	monocyclic	monocyclic



Figure 3. Architectural unit of *Pinus halepensis*: architectural elements characteristics and schematic representation of elementary architecture

Atypically in the coniferous group of pines, adult trees of Aleppo pine (like Scot pine) edifies a real crown using a reiterative strategy [11]: it duplicates its elementary architecture. This phenomenon appears through the possible development of branches (one or more) as strong as the main stem. It results in a perennial fork which constitutes the base of the tree crown. This phenomenon is repeated through times: reiterated structures are each time smaller and AS organisation becomes progressively less branched, more frequently sexualised (female cones) and bicyclic (two GUs). With ageing, reiteration occurs more frequently. ASs are even smaller and finally end as monocyclic, male and unbranched shoots. On unbranched axes of the old Aleppo pine crown, new axes can sometimes develop from apical meristem of specialized determinate brachyblast. This mechanism offsets the lack of lateral buds with this brachyblast dedifferentiation. Finally, figure 4 summarizes the global architectural sequence of development in association with AS organization of main axes.



Figure 4. Architectural sequence of development of *Pinus halepensis*: (from left to right) architectural unit step, main stem duplication, crown edification (adult tree), crown size stabilisation (mature tree).

2.2. Calibration

The existing architectural model using AMAPsim software had been built with data on *Pinus halepensis* from various sites [16]. Volume fractions of finest fuel families are significant parameters for fire behaviour. Since architectural model was not designed to estimate accurately needles number per unit of volume, complementary measurements were performed by CIRAD-AMAP and INRA-URFM-PIF in January 2005.

a) Data collection

Six pines were selected in a mixed pine-oak stand close to Pic Saint Loup mountains in South Eastern France (43°47'36" N ; 03°50'11" E). Well growing trees with no evidence of disease were selected among a wide range of DBH (Table 1). Pine age was determined by sampling a disc on each stem. After drying and sanding down of the discs, rings were counted to deduce tree age. Surprisingly, despite of the wide range of tree diameters, five pines out of six were nearly 35 years old.

Table 1. Characteristics of the 6 sampled trees

Diameter class (cm)	Tree	DBH (cm)	Height (m)	HCB (m)	Age (years)
[10-20[	1	17.0	13.0	7.0	34
	2	16.3	14.0	6.7	39
[20-30[	1	24.1	14.7	5.6	37
	2	21.0	12.0	6.8	38
[30-40[	1	32.8	15.8	7.0	39
	2	34.6	17.0	9.0	55

DBH: Diameter at Breast Height ; HCB: Height of Crown Base

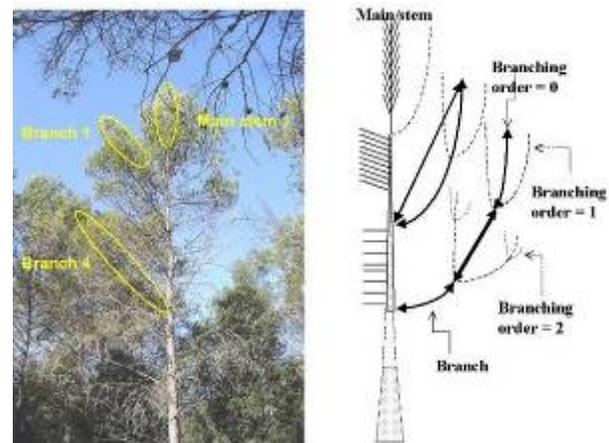


Figure 5. (a) Sampling parts of the tree. (b) Description of branching system.

On each sampled tree, the main stem and four main branches were selected (one on each quarter of the living crown height, Figure 5). When tree had several main stems, up to 3 of them were selected. Main stems were noted 0 and branches were noted from 1 to 4 from the top to the bottom of the crown. Thus, low values of branch type correspond to main branches. On each main branch or stem, 4 secondary branches were selected, with branching order varying from 0 (apical shoot of the main branch) to three (Figure 5b). All growth units of all leafy annual shoots of each secondary branch were described in the following way (Figure 2a):

- Measurement of scaly zone (Z1): length,
- Measurements or estimations on leafy zone (Z2): length, number of needle fascicles still present and visual estimation of the fraction of fallen needles.

Diameter of annual shoots and branches were also measured.

To recognize the two kinds of structural limits (growth unit and annual shoot), morphological markers were essentially used. The most useful was the presence of tier of branches that delimited GUs. The presence or the scars of female cone indicate the first GU of an AS. When no sexuality was expressed, tier of branches with diameter bigger than following or preceding revealed the limit between two AS. Strongest branches were generally born on the last GU of the year (traumatism excepted) and issued from buds which were waiting during winter period (delayed branching, [24]). When parts of unbranched axis were measured, the delimitation of AS required the observation of scales scars (corresponding to bud form). Because unbranched GU frequently corresponded to monocyclic AS, the identification of scales scars was sufficient (Figure 6c). Sometimes polycyclic AS doesn't bear female cone or could be unbranched ; in this case, the length of scales scars internodes was considered: it is larger in the GU limit (Figure 6b) than in the AS one (winter, Figure 6a). Male catkins were also used: they let raised scars that delimited the GU of monocyclic sexualized (the spring one, Figure 6d). The sequence of GU length is also an indicator, the first GU being generally the shortest. All these characters have to be combined together.

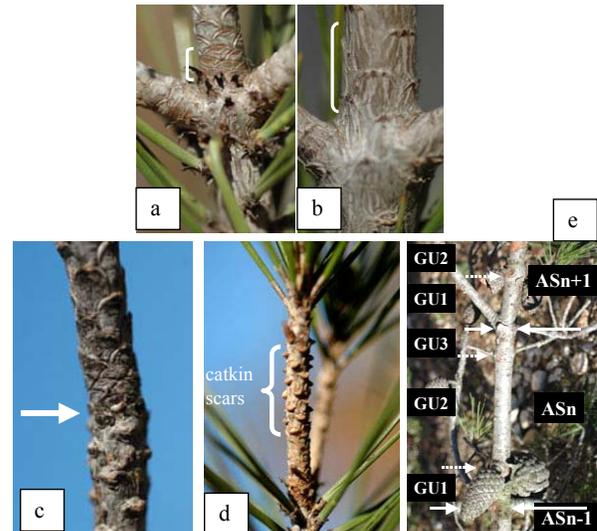


Figure 6. Inter (a) and intra (b) annual limits. (c) Limit on monocyclic unbranched annual shoot. Specific scars let by male catkins on monocyclic annual shoots. (e) Tricyclic annual shoot illustrates female cones on the first shortest growth unit (GU1), largest branches on the last growth unit (GU3) of the annual shoot.

b) Data analysis

Data analysis was focused on the main architectural characteristics in order to improve the existing *Pinus halepensis* model in a fuel description perspective. When no evidence of fallen needles were found on a given growth unit, **internode length** was calculated on the base of the ratio of the Z2 leafy part length and the number of fascicles. Internode length is the key factor to predict needles number. Indeed, AMAPsim simulates the **length of Z2 leafy part** and calculates the number of fascicles with the base of internode length. In order to analyse the distribution of lengths of the leafy part of the growth unit, histograms were built and negative binomial regression were fitted using AMAPmod software. **Annual shoot length** (sum of length of the different growth units for a given year) was calculated. Annual shoot length was fitted as a function of branching order of the secondary branch the shoot is on (Figure 5b). Annual shoot length was also fitted as a function of branch type (from 0 for main stems, to 4 for lowest branches).

Frequency of number of growth cycles per year was calculated. Presence of **polycyclism** on annual shoots was modelled with logistic regression (R software) as a function of branching order. Percentage of fascicle presence as a function of age of shoot were also

calculated using a logistic regression. It entailed to evaluate **life period of needles**.

c) Extractions and calibration

All these data were compared to Aleppo pine AMAPsim model extractions. Because a virtual plant was computed by AMAPsim software, its equivalent topology could be obtained as a multi-scale tree graph (MTG) [17], a tree structured data compatible with statistical analyse (AMAPmod software). Virtual plant were computed at the same age than fields observation (35 years old). Among many stochastic realizations, three virtual trees were selected (one in each sampled diameter class). From the MTG of each virtual tree, same data than field measurements were extracted. In order to calibrate the model, but to minimize the number of parameters to modify, analyse was focused on the relation between number of leaves and the GU leafy part length (Z2). When comparisons were not satisfactory, parameters of the models were changed to fit better with sampled data.

2.3. Fuel simulation and fire simulation

a) Fuel simulations

In the FIRESTAR fuel modelling process, fuel is described with several fuel families: leaves and needles (dead and alive) and twigs split in several classes of diameter. Only the finest fuel classes are taken into account: very thin (<2mm), thin (2-6mm), medium (6-25 mm) [9]. FIRESTAR vegetation files describe, for each fuel family, the properties (Table 2) and volume fraction of vegetation in a 2D mesh. Mesh size is mostly of 25 cm, except in the first 50 cm height layer where the mesh size is 5 cm. These data were collected in the frame of FIRESTAR European program by INRA Avignon.

Extractions of 10 and 35 year old pines modelled by AMAPsim, were used to build vegetation files. Main characteristics of these trees are described in table 3.

Table 3: Characteristics of virtual trees used for vegetation files

	<i>Age (years)</i>	<i>Height (m)</i>	<i>HCb (m)</i>	<i>Average (max) VF of needles</i>	<i>Average (max) VF of twigs</i>
Pine10	10	2.25	0.45	330 (1274)	19 (118)
Pine35	35	9.75	3.25	75 (1467)	6 (331)

HCb: Height of Crown Base ; VF : average Volume Fraction (maximum) in $10^6 m^3/m^3$

2D slices in the medium part of the crown of a virtual pine were extracted. The same crown pattern was used to create a virtual scene with the expected tree density for both young and mature virtual pines (Figure 7a and 8a with a 60% cover). In the case of mature pine, a homogeneous kermes oak (*Quercus coccifera*) understorey of 75 cm high was displayed under the Aleppo pine canopy. *Quercus coccifera* properties are described in table 2. Moreover, the canopy was present only on the second half of the domain, in order to create an ignition zone of pure shrub land. To evaluate the effect on fire behaviour of fine fuel distribution within pine crown, we also built two other representations of pine canopy with coarse crown shapes: a stand with several simplified pine crowns (rectangular boxes of homogeneous vegetation with same height, same width and same average volume fraction than virtual trees, Figure 7b and 8b), and stand with an homogenized crown layer (homogeneous layer with same height, Figure 7c and 8c). These different fuel models were three different ways to represent a same total fuel load.

Table 2: Main properties of different fuel families

<i>Family</i>	<i>Area to volume ratio (m^2/m^3)</i>	<i>Density (kg/m^3)</i>	<i>Fuel moisture content</i>
<i>P. halepensis</i> needles	10 000	850	100 %
<i>P. halepensis</i> small twigs	1000	900	100 %
<i>Q. coccifera</i> leaves	6000	820	70 %
<i>Quercus coccifera</i> twigs (0 to 2 mm)	3000	900	70 %
<i>Quercus coccifera</i> twigs (2 to 6 mm)	1000	900	70 %

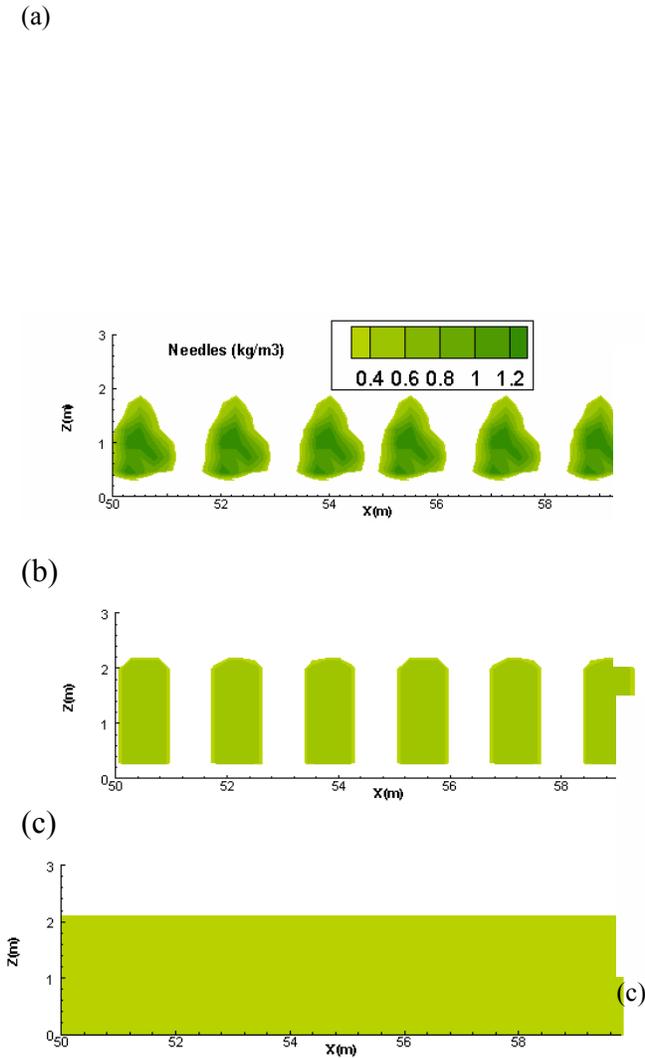


Figure 7. Bulk density of young pines stand with (a) virtual trees, (b) homogenized trees, (c) homogenized stand, in FIRESTAR input file

These files were built for several values of cover fraction: 25%, 40%, 60%, 80% and 100%. In the case of mature stand with understorey, a pure shrub land of kermes oak was also added in order enable surface fire spreading.

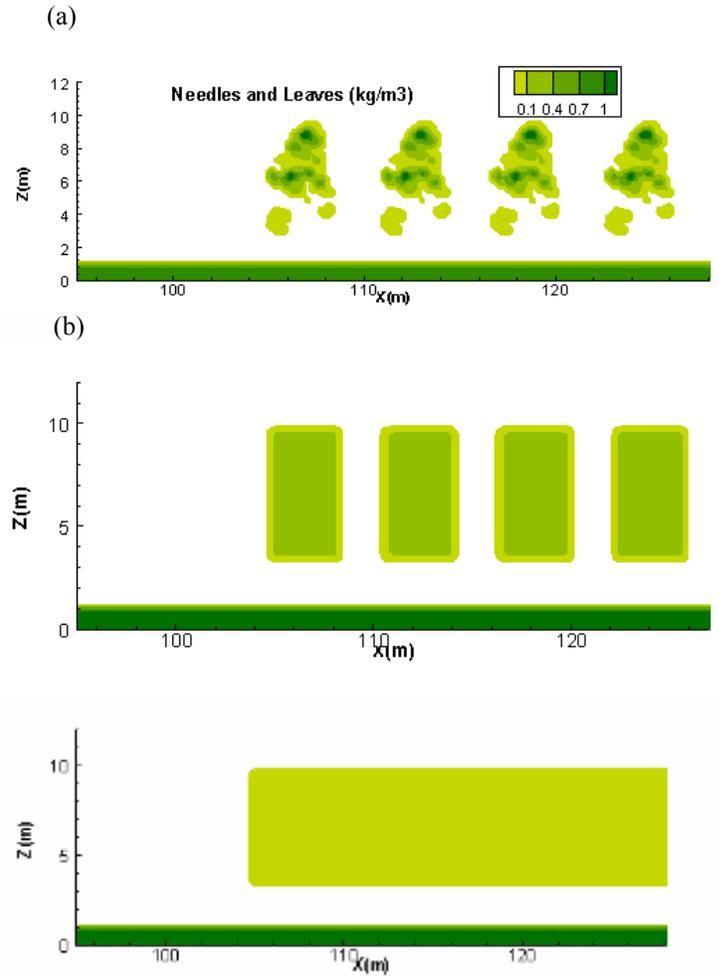


Figure 8. Bulk density of mature pines stand with (a) virtual trees, (b) homogenized trees, (c) homogenized stand, in FIRESTAR input file

b) Fire simulations

FIRESTAR physically based fire propagation model is a 2D fluid mechanical code [5]. It includes radiative transfer and description of chemical reactions (evaporation, pyrolysis and combustion). Simulations were run on a SGI computer with four processors at INRA-URFM-PIF Avignon. Outputs were analysed with Tecplot 9.0. Domain dimensions for fire simulation with FIRESTAR 2D were 225 meters length and 40 meters height. Wind conditions were selected with a log wind profile and a value of 6 m/s at 10 meter above ground level.

To compare fire characteristics in different cases, rate of spread, flame height and fire intensity were analysed as a function of pines cover fraction. These indicators are the most used in literature [25, 26]. Rate of spread was calculated following the most downwind position of isotherm 700K. Flame height was calculated as the highest point of isotherm 700K. Power was calculated by the model using gas combustion process. In the case of mature stand, crown damage was also analysed by monitoring the consumption of crown fuel.

3. Results

3.1 Aleppo pine architectural simulations

AMAPsim software can generate different steps of crown construction (Figure 9). For each step, many stochastic realizations are computed (Figure 10). In these virtual plant, the polycyclism, the length of GUs, the number of branches per tier vary according to age of axes and location within tree. Combined with the self pruning of branches, tree crown architecture was varying in structure and size. The sexuality had not been taken into account yet.



Figure 9. *Pinus halepensis* crown architecture development. From left to right, the same individual at respectively 10, 20, 30 and 40 years old.

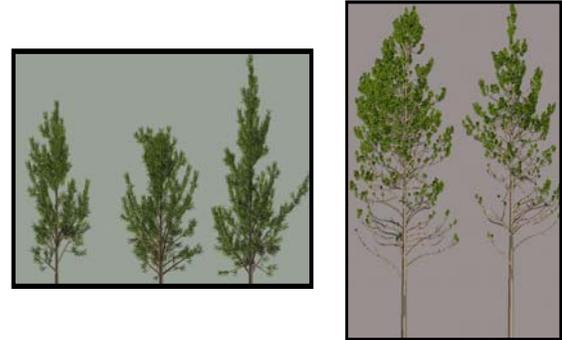


Figure 10. *Pinus halepensis* crown architecture variability at 10 (left) and 30 (right) years old

3.2. Calibration and validation of *Pinus halepensis* model

a) Calibration results : Temporal Unit Length

Comparison of internode length calculated with our sample to values extracted with AMAPsim software on previous Aleppo pine architectural model, showed an overestimation of internode length with AMAPsim. Consequently the parameters controlling internode were changed. Figure 11 shows that, after this calibration, a small overestimation can still be observed for long growth unit, but results are much better.

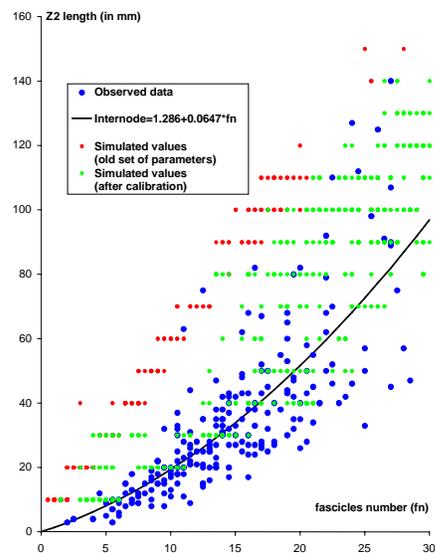


Figure 11. Calibration of internode length after comparison between observed and simulated data

b) Validation

Concerning **length of annual shoot**, histograms showed same kind of distribution for observed and simulated data. Nevertheless, Z2 length between 10 and 20 mm was overpredicted by the model (Figure 12). Annual shoot length was sensitive to branching order and branch type (Figure 13a and 13b). Data simulated by AMAPsim were quite close to experimental data.

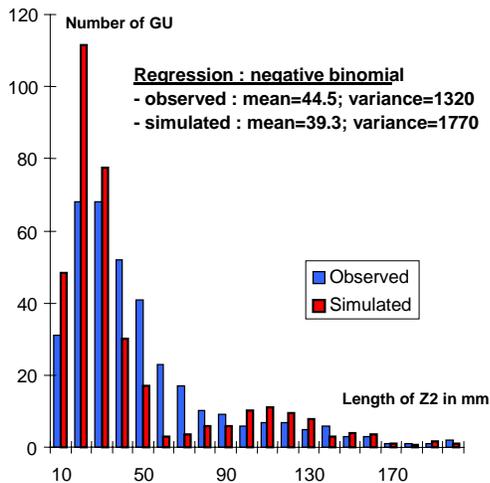
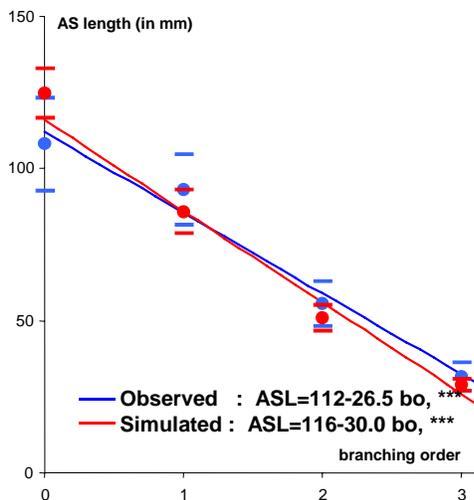


Figure 12. Comparison of distribution patterns of Z2 length between observed and simulated data (a)



(b)

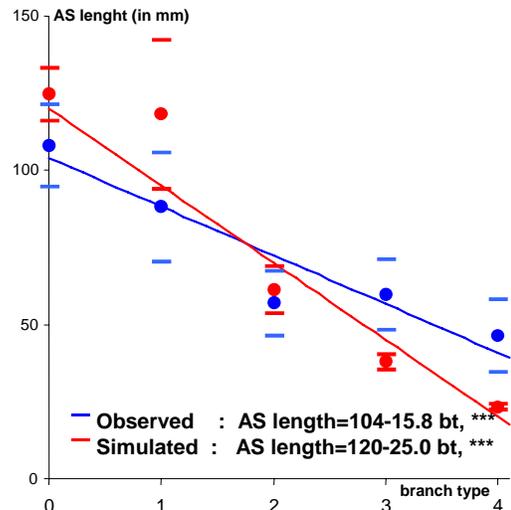


Figure 13. Comparison between observed and simulated data for annual shoot length trend as a function of branching order (a) and branch type (b).

Polycyclism decreased significantly with branching order. Simulated data showed the same trend but not the same magnitude, especially for low branching order (Figure 14). AMAPsim predicted only 20% of polycyclism against 28% in observed data (Figure 15). The logistic regression of **life period of needles** provided very satisfactory results, leading to a life estimation of 2.56 years (Figure 16). In AMAPsim model, age of needle were constant (3 years). Because we did these measurements after the 2003 drought, we decided not to modify the parameters of the model.

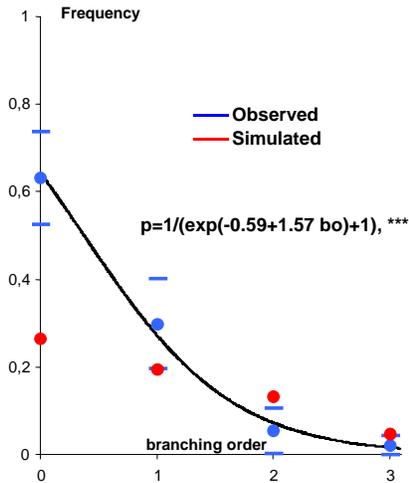


Figure 14. Comparison between observed and simulated data for frequency of polycyclism as a function of branching order.

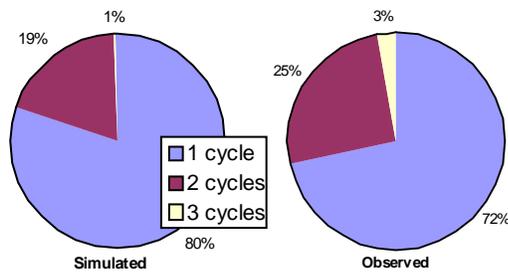


Figure 15. Compared frequencies of annual shoot cycle number

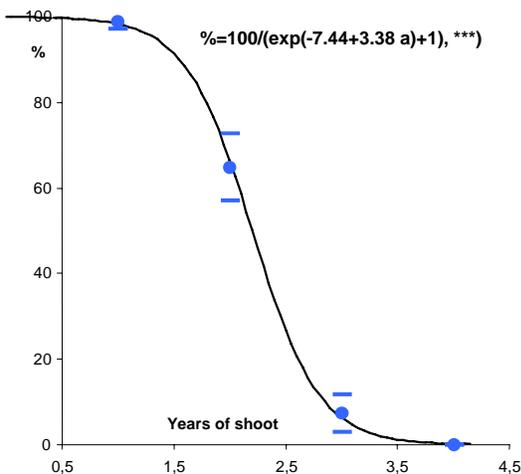


Figure 16. Proportion of needle presence as a function of needle age

3.3. Fire propagation in different types Aleppo pine stands

Analysis of simulated fire rate of spread (ROS) showed that in few cases, fire stopped after a propagation of less than 100 meters. These cases corresponded to the lowest cover fraction value. In virtual trees stand, rate of spread decreased with cover fraction. When fire propagated, ROS was twice higher for homogeneous trees and stand than for virtual trees (Figure 17). Moreover, the threshold of cover fraction for fire propagation up to the end of the domain was not the same with the three representations: between 25 and 40% for virtual trees and between 40 and 80% for homogeneous cases.

Average flame height was not affected by the cover fraction (data not shown). Nevertheless, flames were almost twice higher in homogeneous trees and in homogeneous stands (around 6 m) than in virtual trees (around 3.5 m).

Fire intensity tended to increase with cover fraction. For this variable also, values were twice higher for homogeneous cases (Figure 18).

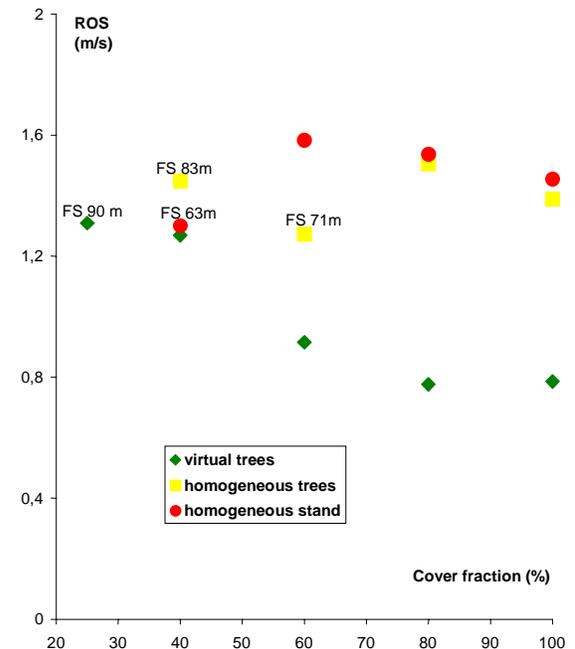


Figure 17. Rate of spread (ROS) of the 3 ways to represent vegetation, as a function of cover fraction (FS # m means that the fire stopped after # meters of propagation)

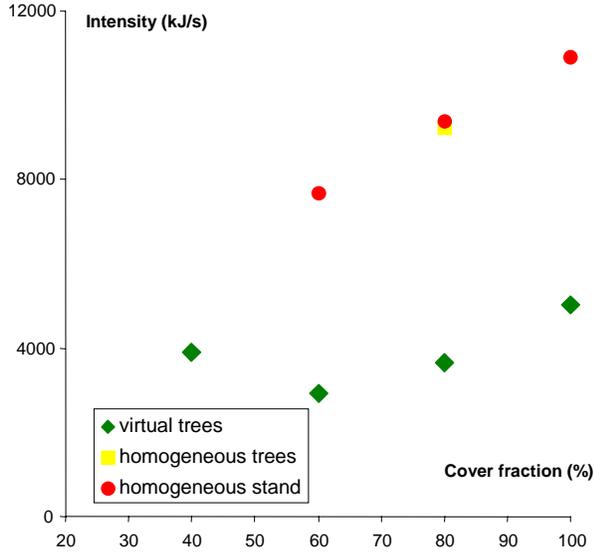


Figure 18. Fire intensity for the 3 ways to represent vegetation, as a function of cover fraction (data were not represented when fire stopped).

In the mature stands, very few differences could be seen on fire behaviour according to the three main indicators (data not shown). Indeed, the fire front in mature stand was very close from the case without canopy (plotted in black in figure 19). Nevertheless, small accelerations due to torching in the crown could be observed. First crowning started respectively 75 meters and 100 meters after stand edge for homogeneous and virtual tree stands.

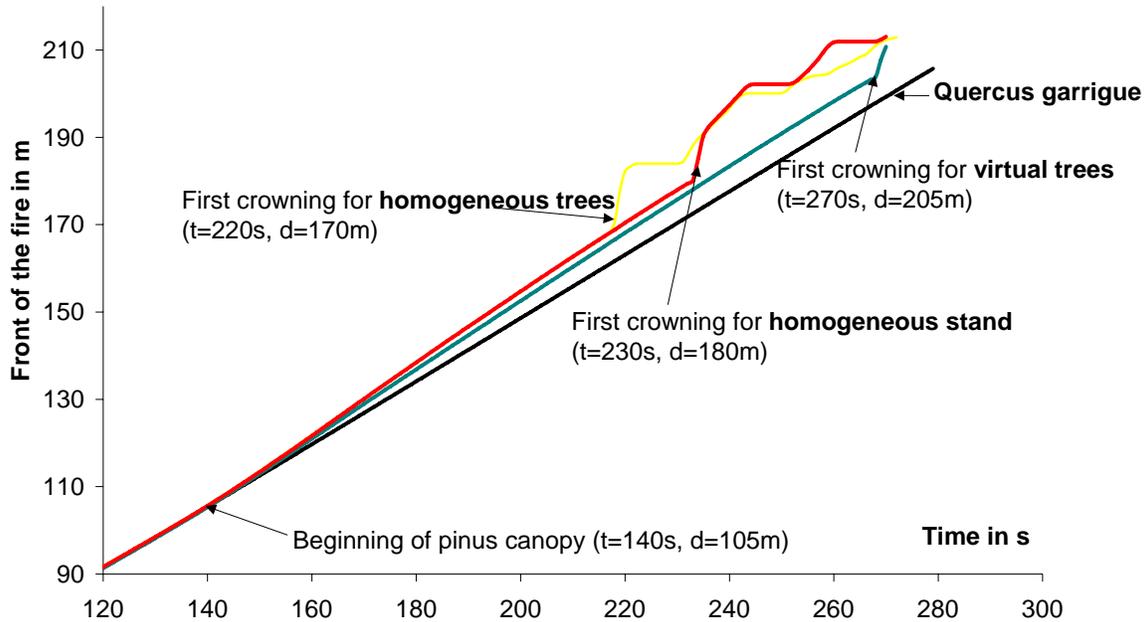


Figure 19. Distance travelled by the fire, as a function of time for the 3 ways to represent vegetation (cover fraction 80 %).

Further analysis showed that vegetation consumption (data not shown) was different when trees were virtual or represented in an homogeneous way. Fuel consumption was higher in the homogeneous canopy than in the virtual trees stand.

4. Discussion

4.1. Aleppo pine architecture

This study contributed to better calibrate the Aleppo pine architectural model namely for the estimation of needles number and crown size.

Internode calibration on a given study site is an important step to improve local quality of model prediction. Our study showed that internode length could vary from site to site and that its calibration could be improved by light field measurements. The response of other components of tree architecture was satisfactory with regard to field observations, even without changing the parameters of initial model of

Aleppo pine. For instance, the effect of branching order and branch type on annual shoot length was satisfactory both in trend and magnitude without specific calibration. The tree organisation was stable enough from one site to another. Our recommendation would be to use the current set of parameters without further improvement.

Nevertheless some parameters like polycyclism seemed to vary from site to site and then would need further calibration with a wider range of local conditions or annual meteorological sequences [27]. However volume fraction prediction by the mean needle number is probably less sensitive to polycyclism frequency than other allometric parameters. Total shoot length and number of needle per length unit are the most important factors to explain total number of needles.

Needle life period needs to be better appraised by further studies, taking into account normal meteorological sequences.

Both range of values and spatial distribution variability seemed reasonable. Moreover, even though very few references could be found in literature, average volume fraction was in the same order of magnitude than field data derived from [28] (LAI and direct measurements).

After calibration, one can be rather confident in using extracted volume fractions for fire simulations.

4.2. Fire behaviour

In young pine stand, fire propagation stopped when the cover fraction was too low. It seemed very reasonable that when the distance between trees increased, it raised a limit after which propagation was not possible any more [29]. ROS decrease with cover fraction was in agreement with [30]. Indeed, these authors showed that ROS was decreasing with volume fraction (called packing ratio in their publication). But the more interesting point was that ROS were very different between virtual trees compared with homogeneous cases (trees and stands). This result encourages us in the direction that local heterogeneity can influence the propagation. With virtual plant stands, fire propagation remained very smooth and with a lowest value than homogeneous cases. In fact, it seemed to behave like in an homogeneous canopy of higher density than its average density. We can notice that flame height and fire intensity were significantly different too.

In the mature stand, very few differences could be seen on fire main indicators. Indeed, model predicted a propagation driven by the surface fire, with only sparse torching. In this case, the way to describe the vegetation affected only the way the canopy was damaged by the surface fire. Torching appeared later and was less intense in virtual trees stand than in homogeneous situations. A deeper analysis showed that it was due to vertical distribution of volume fraction in the canopy. Indeed, the canopy base was very light in virtual trees compared to homogeneous cases (trees were more leafy at the top and middle than at the bottom). This provided less drag between the understorey and the canopy in virtual trees stand. Thus, flow was faster. For this reason, flame was more bent and cooled, which provided less torching possibilities. Moreover, foliage at the bottom of the crown was not dense enough to entail the inflammation of the whole canopy as it could appear in homogeneous cases.

Our approach was here considerably limited by the two dimensions of the fire model. Indeed, fuel description in two dimensions increases artificially fuel heterogeneity along the direction perpendicular to fire propagation.

5. Conclusion

Architectural approach entails to build virtual trees of different ages and a virtual sampling under minimal measurements for site calibration. It allows to extract quickly spatial patterns of fuel loads within a tree. It is a promising method for fuel modelling in case of trees, where destructive methodology seems less appropriate [9]. This modelling approach is even possible on shrubs. Nevertheless, in this case, destructive measurements are rapidly applicable and in fact more appropriate to describe the horizontal pattern of shoots in the stand [31].

In this study, the variations of plant architecture of *Pinus halepensis* due to ecological conditions were taken in account through site calibration. Internode values were changed in the model according to field measurements. A higher polycylism rate than in previous sampling was also observed. Two modelling strategies can probably permit to minimize some of calibration aspects. The first consists in general study and analysis of architecture responses to external factors (like drought, wind, soil conditions) using more physiological hypothesis (see Greenlab approach [32, 33]). The second consists in using plant structure functions that permit to take into account the influence of stand density, species arrangement at the community level, taking into account phototropism and competition [34]. Both strategies can help to quantify better architectural parameters *a priori*.

Fire simulation results are too sparse to conclude on the wide and complex topic of heterogeneity. It was not the aim of this paper, which was a preliminary study to appraise the benefit of the architectural approach for fuel modelling. Moreover, our approach was limited here by the two dimensions of vegetation description and fire modelling. Nevertheless, this approach suggested that small scale heterogeneities could modify significantly main fire properties specially when driven by a dense heterogeneous vegetation. Otherwise, small scale heterogeneities only affected fire effects on pine crowns.

In conclusion, the architectural approach is a promising method for fuel modelling, very complementary to the FIRESTAR classical method [9]. Other shrubs and trees species are being described taking into account variations of plant architecture due to ecological conditions in order to simulated complete Mediterranean communities with physically based fire propagation models.

Acknowledgments

We are grateful to Philippe Petit for field and laboratory assistance during this work.

6. References

- [1] Andrews P.L., BEHAVE: Fire behaviour prediction and fuel modelling system – BURN subsystem, part 1, *USDA Forest Service, Research paper INT-194*, 1986, 130p.
- [2] Noble I.R., G.A.V. Bary, A.M. Gill, “McArthur’s fire danger meters expressed as equations”, *Australian Journal of Ecology*, 5, 1980, pp.201-203.
- [3] Cheney, N.P., J.S. Gould, W.R. Catchpole, “Prediction of fire spread in grasslands”, *Int. J. Wildland Fire* 8(1), 1998, pp.1-13.
- [4] Forestry Canada Fire Danger Group, Development and structure of the Canadian forest fire behaviour prediction system. *Information report ST-X-3. Forestry Canada, Ottawa*, 1992, 63p.
- [5] Morvan D., J.L. Dupuy, “Modeling Firespread Through a Forest Fuel Bed Using a Multiphase Formulation”, *Combustion and Flame*, 127, 2001, pp.1981-1994.
- [6] Dupuy J.L., D. Morvan, “Numerical study of a crown fire spreading toward a fuel break using a multiphase physical model”, *Int. J. Wildland Fire*, 14 (2), 2005, pp.141-151.
- [7] Linn, R.R., J. Reisner, J.J. Colman, J. Winterkamp, “Studying wildfire behavior using FIRETEC”. *Int. J. Wildland Fire* 1, 2002, pp.233-246.
- [8] Linn, R.R., Cunningham, P., “Numerical simulations of grass fires using a coupled atmosphere-fire model : basic fire behavior and dependence on wind speed”, *Journal of Geophysical Research-Atmosphere* 110 (D13), 2005, D13107.**
- [9] Cohen M., E. Rigolot, J.C. Valette, From the vegetation to the inputs of a fire model: fuel modelling for wildland-urban interface management. *Warm International Workshop on “Forest Fires in the Wildland-Urban Interface and Rural Areas in Europe: an integral planning and management challenge”, Athens, May 2003.* 2004, pp.113-120.
- [10] Barthélémy D., Botanical background for plant architecture analysis and modeling. In Hu B., Jaeger M. (Eds), *Plant growth modelling and applications (PMA03)*, Proceedings of the 2003’ International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Their Applications, Beijing, Chine, 13-16 octobre 2003. Beijing: Tsinghua University Press, Springer; 2003, pp. 1-20.
- [11] Barthélémy D., C. Edelin, F. Hallé, Architectural concepts for tropical trees. In : *Tropical Forests: Botanical dynamics, speciation and diversity*, L.B. Holm-Nielsen and H. Baslev (Eds.), Academic Press, London, 1989, pp.89-100.
- [12] Hallé F., R.A.A. Oldeman, P.B. Tomlinson, Tropical trees and forests. *Springer Verlag*, Berlin; 1978, 441 p.
- [13] Barcezi J.F., P. de Reffye, Y. Caraglio, Essai sur l’identification et la mise en oeuvre des paramètres nécessaires à la simulation d’une architecture végétale : le logiciel AMAPsim. In: *Modélisation et Simulation de l’Architecture des Végétaux*, Bouchon J., Reffye P. de, Barthélémy D. Eds.; Paris (FRA) : Science Update, INRA Editions, 1997, pp.205-254.
- [14] Quézel P., Taxonomy and biogeography of Mediterranean pines (*Pinus halepensis* and *P. brutia*). In: Ne’eman G. and Trabaud L. (eds), Ecology, biogeography and management of *Pinus halepensis* and *P. brutia* forest ecosystems in the Mediterranean basin. Backhuys Publishers, Leiden, The Netherlands, 2000, pp.1–12.
- [15] Ne’eman G., S. Goubitz, R. Nathan, “Reproductive traits of *Pinus halepensis* in the light of fire – a critical review”, *Plant Ecology* 171, 2004, pp.69–79
- [16] Martinez P., Modélisation de la croissance et de l’architecture du pin d’Alep. Mémoire de D.E.A., Ecosystèmes continentaux, arides, méditerranéens et montagnards; Rapport d’Ingénieur Forestier, Spécialisation Recherche; ENGREF Nancy, Université des Sciences et Techniques de Saint-Jérôme Marseille, Agence MTD, 1993, 39 pp.
- [17] Godin C., Y. Caraglio, “A multiscale model of plant topological structures”, *Journal of Theoretical Biology*, 191, 1998, pp.1-46.
- [18] Godin, C., Y. Guédon, E. Costes, Y. Caraglio, Measuring and analyzing plants with the AMAPmod software. In: *Plants to ecosystems - Advances in Computational Life Sciences*, 2nd International Symposium on Computer Challenges in Life Science. M.T. Michalewicz (Ed.). CSIRO Australia, Melbourne, Australie, 1997, pp.53-84.
- [19] Reffye, P. de, E. Elguero, E. Costes, Growth units construction in trees: a stochastic approach. In: *9th Seminar of the Theoretical Biology School, Solignac (FRA) 21-23 Sept. 1989; Acta Biotheoretica*, 39(3-4), 1991, pp.325-342.
- [20] Reffye, P. de, P. Dinouard, D. Barthélémy, Modélisation et simulation de l’architecture de l’Orme du Japon *Zelkova serrata* (Thunb.) Makino (Ulmaceae): la

notion d'axe de référence. In: *C.R. 2ème Colloq. Int. sur l'Arbre, Montpellier (FRA), 9-14 Sept. 1990.*, *Naturalia Monspeliansa, 1991, (n° hors-série)*, 1991, pp. 251-266.

[21] Barthélémy, D., Y. Caraglio, E. Costes, Architecture, gradients morphogénétiques et âge physiologique chez les végétaux. In: *Modélisation et Simulation de l'Architecture des Végétaux*. J. Bouchon, P. de Reffye and D. Barthélémy (Eds). *Science Update*. INRA Editions, Paris, France, 1997, pp.89-136.

[22] Hallé F., R. Martin, Etude de la croissance rythmique chez *Hevea brasiliensis* Müll. Arg. (Euphorbiaceae - Crotonoïdées). *Adansonia*, série 2, 8, 4, 1968, pp.475-503.

[23] Hallé F., R.A.A. Oldeman, *Essai sur l'architecture et la dynamique de croissance des arbres tropicaux*. Masson, Paris; 1970, 178 p.

[24] Caraglio, Y., D. Barthélémy, D., Revue critique des termes relatifs à la croissance et à la ramification des tiges des végétaux vasculaires. In: *Modélisation et Simulation de l'Architecture des Végétaux*. J. Bouchon, P. de Reffye and D. Barthélémy (Eds). *Science Update*. INRA Editions, Paris, France, 1997, pp.11-87.

[25] Nelson, R.M., C.W.Adkins, "A dimensionless correlation for the spread of wind-driven fires". *Can. J. For. Res.* 18, 1988, pp.391-397

[26] Albin, F.A., "A model for the wind-blown flame from a line fire". *Combustion and flames*, 43, 1981, pp.155-174

[27] Isik, F., K. Isik, T. Yildirim, B. Li, "Annual shoot growth components related to growth of *Pinus brutia*". *Tree Physiology* 22, 2002, pp.51-58

[28] Lopez-Serrano, F.R., T. Landete-Castillejos, J. Martinez-Millan, A.D. Cerro-Barja, "LAI estimation of natural pine forest using a non-standard sampling technique", *Agric. For. Meteorol.*, 101, 2000, pp.95-111

[29] Stauffer, D. An introduction to percolation theory. *Taylor and Francis ED.* 1985, 75p.

[30] Catchpole, W.R., E.A. Catchpole, B.W. Butler, R.C. Rothermel, C.A. Morris, D.J. Latham, "Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel. *Combust*", *Science and Technology*, 131, 1998, pp.1-37

[31] Pimont, F. Modifications de l'architecture du Chêne kermès (*Quercus coccifera*, L.) en fonction de l'environnement de croissance. *Rapport de DEA BEE. Université de Montpellier II*, 2004, 63pp.

[32] Hu, B.-G., P. de Reffye, X. Zhao, H.-P. Yan, M.-Z. Kang, GreenLab: a new methodology towards plant functional-structural model. In Hu B., Jaeger M. (Eds), *Plant growth modelling and applications* (PMA03),

Proceedings of the 2003' International Symposium on Plant Growth Modeling, Simulation, Visualization and Their Applications, Beijing, Chine, 13-16 octobre 2003. Beijing: Tsinghua University Press, Springer; 2003, pp.21-35.

[33] Yan H.P., P. de Reffye, C.H. Pan, B.G. Hu, "Fast construction of plant architectural models based on substructure decomposition", *Journal of Computer Science and Technology*, 18(6), 2003, pp.780-787.

[34] Godin C., H. Sinoquet, « Functional-Structural Plant modelling". *New Phytologist*, 166(3), 2005, pp.705-708.