

Ecoulement du vent et structure du paysage

Y. Brunet, S. Dupont

INRA, UR 1263 Ephyse, 81 av. E. Bourleaux, F-33883 Villenave d'Ornon

Correspondance : brunet@bordeaux.inra.fr

Résumé

Si l'écoulement du vent dans les paysages forestiers a été longtemps étudié à l'échelle stationnelle homogène, les tendances actuelles visent à prendre en compte des niveaux d'hétérogénéité de plus en plus élevés et des échelles spatiales de plus en plus larges, permettant d'aborder des gammes étendues de situations réelles, caractérisées par la présence de lisières, de trouées, de clairières, de relief, etc. Les développements récents de la modélisation atmosphérique et des approches biomécaniques ouvrent de nouvelles perspectives dans ce contexte. Après une présentation succincte d'outils de modélisation récemment développés sont décrits quelques résultats sur l'écoulement dans les régions de lisière, l'influence de la fragmentation du paysage et l'impact du relief sur les interactions canopée-atmosphère. Quelques lignes de recherche future sont soulignées.

Mots-clés : arbre, biomécanique, forêt, fragmentation, lisière, mécanique des fluides, modélisation, tempête, turbulence, vent

Abstract

Wind flows over forested landscapes have long been studied at the homogeneous plot scale. The current trend consists in considering higher levels of heterogeneity and larger spatial scales, allowing an extended range of real situations to be accounted for. Such situations are characterised by the presence of forest edges, gaps, clearings, topography, etc. Recent developments in atmospheric and biomechanical modelling open new perspectives in this context. After a short presentation of newly developed modelling tools we describe recent results on wind flow in edge regions, the influence of landscape fragmentation and the impact of topography on canopy-atmosphere interactions. Several future lines of research are suggested.

Keywords: biomechanics, fluid mechanics, forest, forest edge, fragmentation, modelling, tree, turbulence, wind, windstorm

Introduction

Le microclimat des couverts forestiers a fait l'objet de nombreuses études depuis plusieurs dizaines d'années. L'analyse des variations spatiales et temporelles de la vitesse du vent a été largement abordée, dans la mesure où le vent est un des moteurs des échanges de vapeur d'eau et de gaz carbonique, mais aussi bien sûr parce qu'il joue un rôle déterminant dans les problèmes de stabilité des arbres. Les récentes tempêtes, ainsi que les annonces faites d'une probable augmentation de ce type d'évènement extrême avec les changements climatiques en cours, ont donné depuis quelques années un fort regain d'intérêt à l'étude des interactions entre vent, arbres et peuplements forestiers.

Cette étude a été menée pendant longtemps à l'échelle de peuplements homogènes, où l'on examinait l'influence de la hauteur des arbres, de leur densité, de la répartition verticale des surfaces foliaires,

autant de variables sur lesquelles peuvent jouer les techniques sylvicoles. Ces dernières années, de nouveaux efforts ont été consacrés aux situations hétérogènes, qui constituent plus la règle que l'exception, en particulier dans des massifs morcelés comme le massif landais : on s'intéresse ainsi aux régions de lisière, aux peuplements irréguliers, à l'influence de trouées ou de pare-feux sur l'écoulement atmosphérique, comme à celle de la fragmentation du paysage. Un enjeu majeur des recherches en cours est en effet de mieux comprendre pourquoi, dans un paysage donné, les arbres vont tomber ici plutôt que là. La Figure 1 souligne bien la complexité du problème en montrant la très forte hétérogénéité des dommages qu'on peut trouver dans un paysage forestier ; déterminer dans quelle mesure ces dommages sont liés aux caractéristiques aérodynamiques du paysage est fondamental. Dans une étude récente, Dupont et Brunet (2006) ont par exemple pu montrer que, à l'échelle d'un parc urbain fortement touché par la tempête de 1999, des considérations liées à l'aérodynamique du parc pouvaient rendre compte de la localisation des dégâts, là où aucun autre facteur (caractéristiques des sols, état sanitaire, espèces, etc.) n'avait de valeur explicative.

Il est devenu clair par ailleurs que c'est la turbulence, plus que le vent moyen, qui joue un rôle déterminant dans les phénomènes de casse ou d'arrachement. Si son étude expérimentale ne pose plus guère de problème compte tenu de l'avancée des techniques de mesure permettant des acquisitions à haute fréquence, aussi bien en milieu fluide que sur des structures végétales, sa modélisation pose encore de formidables défis. Les progrès récents de certaines techniques de simulation des écoulements s'avèrent toutefois d'un fort potentiel dans ce domaine de recherche, et ont d'ores et déjà généré de nouveaux résultats.

C'est ainsi un triple renouvellement des approches (élargissement des recherches vers des échelles spatiales plus grandes, prise en compte des caractéristiques intermittentes de l'écoulement, utilisation massive de la modélisation) qui a marqué, ces dernières années, l'étude des interactions vent – peuplements forestiers (voir Brunet et al., 2009). Nous proposons dans ce qui suit de dresser un panorama des avancées récentes dans ce contexte.



Figure 1 : Carte des classes de hauteur de couvert (à gauche) et des classes de dégâts (à droite) observés sur le dispositif de la forêt de Nezer en Gironde (Brunet et al., 2009). Remerciements à D. Guyon et S. Dayau.

Les outils d'étude

On peut trouver dans la littérature un grand nombre d'articles présentant des résultats de mesures réalisées *in situ* sur des mâts ou des tours. Ces études reposaient autrefois sur l'utilisation de capteurs dits « lents » (parce qu'ils ne permettent de mesurer que des vitesses moyennées sur des périodes d'au moins plusieurs minutes), comme les anémomètres à coupelle, ne permettant de décrire que les caractéristiques moyennes de l'écoulement et d'en donner une vision statique. Cette limitation a entraîné la généralisation progressive de l'emploi de capteurs « rapides » (capables de réaliser des mesures à une résolution temporelle inférieure à la seconde), comme les anémomètres soniques ; ces derniers donnent en effet accès aux caractéristiques turbulentes de l'écoulement, dont la connaissance permet d'analyser de façon fine les mécanismes de transport et les caractéristiques des contraintes mécaniques. Nos connaissances actuelles en la matière reposent largement sur les études réalisées avec ces capteurs depuis une vingtaine d'années (voir Raupach et al., 1996, pour une synthèse). Les campagnes de mesures *in situ* ont été complétées par des expérimentations en soufflerie, sur des maquettes de végétation, permettant, grâce à une bonne maîtrise des conditions d'environnement, des analyses fines de processus dans des configurations variées (Brunet et al., 1994 ; Gardiner et al., 2005).

En parallèle à ces activités expérimentales, la modélisation des écoulements turbulents au voisinage des canopées s'est elle-même considérablement développée. De manière complémentaire aux mesures, elle permet de tester des hypothèses, de simuler et prédire des comportements, de généraliser des résultats. Ont ainsi été développés au fil des ans des outils permettant le calcul des champs de vitesse et de turbulence à l'intérieur et au voisinage d'un couvert végétal, dans des conditions d'abord simples (peuplement forestier horizontalement homogène), puis d'hétérogénéité quelconque (régions de lisière, trouées ou clairières, présence de relief, mosaïque de parcelles, paysages fragmentés, etc.). Le principe général de ces modèles est de représenter la physique de l'écoulement par un ensemble d'équations de « conservation » (masse, énergie, quantité de mouvement,...) et d'hypothèses décrivant les mouvements du fluide et ses interactions avec les surfaces naturelles. Une grande variété de modèles a ainsi été utilisée, qui diffèrent par leurs hypothèses, leur complexité, leur mode de résolution. Pour répondre à l'ensemble des questions soulevées par les problèmes d'écoulement atmosphérique au voisinage des peuplements forestiers, deux tendances se sont dégagées, correspondant aux deux approches principalement utilisées de nos jours : (1) des codes relativement rapides, pouvant fournir dans des contextes variés une description correcte des champs de vent moyens ; (2) des codes permettant, au prix d'une plus grande complexité et d'un coût plus important en temps de calcul, une simulation du comportement turbulent de ces champs (et donc des successions de rafales) pour des applications ciblées, plus fondamentales, justifiant une telle lourdeur.

La plupart des résultats présentés dans ce qui suit ont ainsi été acquis à l'aide de deux modèles mécanistes, complémentaires, correspondant à ces deux catégories et qui ont été adaptés aux interactions végétation-atmosphère à partir de codes existants (voir Brunet et al., 2009, pour plus de détails) :

- le premier, Aquilon (maintenant Thétis, développé par le Laboratoire Trefle à Bordeaux), provient de la mécanique des fluides. Il repose sur le système de Reynolds et donne accès aux champs moyens tridimensionnels de vitesse, de flux de quantité de mouvement et d'énergie cinétique turbulente (Foudhil et al., 2005 ; Dupont et Brunet, 2006) ;
- le second, ARPS (en provenance de l'Université d'Oklahoma), est un modèle de type atmosphérique pouvant être utilisé en mode LES (ou « simulation des grandes échelles ») qui permet l'accès aux champs instantanés de vitesse, à une résolution spatiale métrique, apportant une grande richesse d'informations pour des études sur la vulnérabilité au vent des

arbres, ou de manière générale pour des études fondamentales sur les structures turbulentes de l'écoulement (Dupont et Brunet, 2008a, b & c, 2009 ; Dupont et al., 2008).

De manière complémentaire à ces codes de calcul d'écoulement, la modélisation du comportement biomécanique des arbres a fortement progressé, elle aussi. Ainsi a-t-on développé récemment un modèle numérique permettant de prédire les mouvements instantanés et les contraintes internes des ramifications d'ordre 1 (tronc) et 2 (branches principales) d'un arbre de structure quelconque, forcé par des sollicitations turbulentes (Sellier et al., 2008).

Vent et turbulence dans une canopée homogène

L'écoulement turbulent en couvert horizontalement homogène (c'est-à-dire en particulier loin des lisières) est maintenant bien connu (Brunet et al., 1994 ; Raupach et al., 1996 ; Foudhil et al., 2005 ; Dupont et Brunet, 2008a). Nous ne nous attarderons pas sur ce cas, sinon pour en rappeler quelques grandes caractéristiques à partir d'un exemple issu de la validation de ARPS. Il s'agit d'un cas horizontalement homogène, correspondant à une hauteur du couvert de 18 m, un indice foliaire de 2 et une faible variation verticale de la distribution du feuillage.

La Figure 2 montre les profils moyens de la vitesse longitudinale u , du flux de quantité de mouvement $\overline{u'w'}$ (w étant la vitesse verticale), des écart-types de vitesse, de l'énergie cinétique turbulente (ECT) totale, du coefficient d'asymétrie des distributions de u et w ("skewness" Sk_u et Sk_w), et du coefficient d'aplatissement de ces distributions ("kurtosis" Kt_u et Kt_w). Toutes ces variations verticales sont caractéristiques d'un comportement de couvert homogène :

- le profil moyen de u montre un point d'inflexion au sommet du couvert, où se manifeste un fort cisaillement, et une décroissance exponentielle à l'intérieur du couvert ; dans la couche de surface au-dessus, le profil de u est de type logarithmique ;
- le flux de quantité de mouvement $\overline{u'w'}$ est constant dans cette dernière région, mais décroît très rapidement à l'intérieur du couvert, de même que les variances de vitesse et l'ECT, sous l'action des forces de traînée exercées sur l'écoulement par les éléments de feuillage ;
- les coefficients d'asymétrie Sk_u et Sk_w des composantes de vitesse sont proches de zéro au-dessus du couvert ($z/h \geq 2$), indiquant une distribution symétrique des variations de ces dernières par rapport à leur valeur moyenne ; dans la partie supérieure du couvert en revanche, $Sk_u > 0$ et $Sk_w < 0$, indiquant que la turbulence à l'intérieur du couvert est dominée par d'intenses rafales descendantes, reflets du passage de structures turbulentes (ou tourbillons) ;
- le coefficient d'aplatissement Kt_u atteint un maximum de 3.5 au niveau du houppier du couvert (3 étant la valeur gaussienne) alors que Kt_w augmente dans le couvert pour atteindre un maximum de 5 au sol, indiquant la présence de tourbillons intermittents qui ont suffisamment d'énergie pour pénétrer profondément dans le couvert.

Raupach et al. (1996) ont montré la généralité de ces caractéristiques sur tous les types de couverts végétaux. Complétées par d'autres techniques d'analyse, elles témoignent d'un comportement « universel » de la turbulence de couvert. Cette dernière apparaît dans une large mesure dominée par des structures turbulentes énergiques, dont les échelles de longueur sont de l'ordre de la hauteur du couvert ; elles se manifestent de façon intermittente et assurent une part importante des échanges. Elles sont dites « cohérentes » dans la mesure où elles se distinguent bien de la turbulence de fond et ont une existence propre pendant une certaine durée. Leur présence dans l'écoulement se traduit par des signatures caractéristiques dans les fonctions turbulentes, comme des trains de rafales entrecoupés de périodes plus calmes. Raupach et al. (1996) en ont expliqué l'origine et la dynamique sur la base d'une analogie avec un écoulement de couche de mélange plane (écoulement formé par le

mélange de deux régions du fluide animées de vitesses différentes). Ils ont en particulier précisé les rôles respectifs de ces structures et des mouvements de plus grande échelle caractéristiques de la couche limite, qui jouent moins un rôle dans le transport effectif de quantité de mouvement que dans l'initiation des structures cohérentes, rendue possible par la présence du point d'inflexion dans le profil de vitesse.

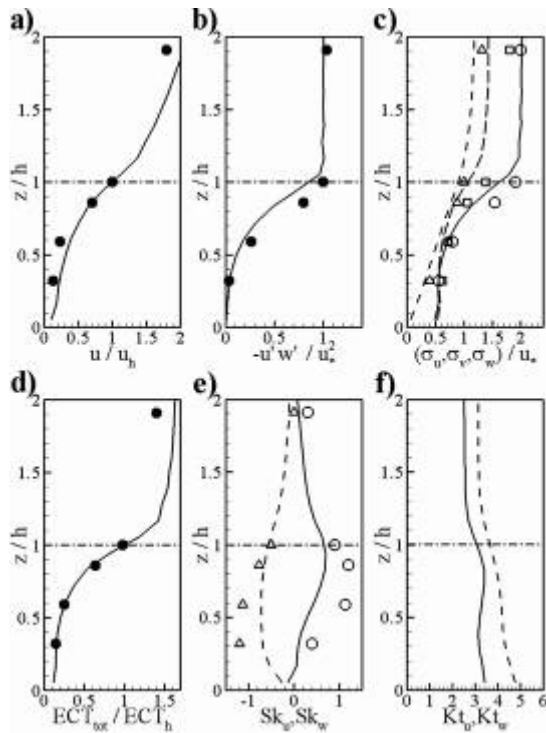


Figure 2 : Validation du modèle ARPS sur un couvert homogène d'indice foliaire 2. Comparaison des profils adimensionnés moyens simulés (lignes) et mesurés (symboles) : a) vitesse horizontale, b) flux de quantité de mouvement, c) écarts-types des trois composantes de la vitesse (σ_u : ligne continue – cercle vide ; σ_v : ligne longs tirets – carré vide ; σ_w : ligne petits tirets – triangle vide), d) ECT totale, e) coefficient d'asymétrie de u et w (Sk_u : ligne continue – cercle vide ; Sk_w : ligne tirets – triangle vide), f) coefficient d'aplatissement de u et w (Kt_u : ligne continue ; Kt_w : tirets). Les variables sont normalisées par les valeurs moyennes au sommet du couvert (notées par l'indice h) et la vitesse de frottement u_* .

De manière à affiner ces résultats, une étude de sensibilité de l'écoulement turbulent à la morphologie du couvert (densité et la distribution verticale foliaire) a été récemment réalisée pour trois types de couvert avec cinq niveaux de LAI, de 1 à 5 (Dupont et Brunet, 2008a). Sans entrer dans les détails, elle montre que les grandes caractéristiques de l'écoulement de couvert deviennent plus prononcées avec l'augmentation de la densité : (1) une plus forte densité conduit à de plus faibles vitesses ; (2) les variables turbulentes telles que l'énergie cinétique turbulente et le flux de quantité de mouvement diminuent plus rapidement à l'intérieur du couvert car les structures cohérentes ont plus de difficulté à y pénétrer ; (3) la contribution des rafales de vent au transfert d'énergie mécanique est augmentée ; (4) les structures turbulentes pénétrant dans le couvert sont moins allongées, mais plus inclinées. Pour un indice foliaire donné, la distribution verticale du feuillage joue aussi un rôle important, et la densité de la partie supérieure du couvert exerce une influence majeure sur l'écoulement turbulent.

Comment ce comportement, bien documenté dans le cas de couverts homogènes, est-il affecté par la présence d'hétérogénéités (lisières, trouées, relief, fragmentation du paysage...) ? C'est ce que nous allons maintenant aborder.

Les régions de lisière

Le type d'hétérogénéité représenté par une lisière est très courant dans un paysage forestier fragmenté tel que celui des Landes. Lorsque le vent entre dans une parcelle forestière, en provenance par exemple d'un champ agricole, les caractéristiques de l'écoulement sont progressivement modifiées

jusqu'à ce que ce dernier atteigne un équilibre correspondant au cas homogène décrit précédemment. Cette « mise à l'équilibre » se produit sur une distance horizontale x qui peut atteindre une dizaine de fois la hauteur du couvert h . Depuis une quarantaine d'années, ces régions de lisière ont bénéficié d'études expérimentales, *in situ* comme en soufflerie (voir Brunet et al., 2009), qui ont généré une grande variété de résultats, souvent disparates compte tenu des conditions spécifiques de mesure (emplacement des capteurs, architecture des arbres, structure du peuplement, type de lisière, caractéristiques géométriques de l'ensemble forêt-clairière, etc.). Ces dernières années, l'usage de la modélisation a permis de compléter les connaissances et de dégager les grandes caractéristiques de ces régions (Dupont et Brunet, 2008b & c, 2009). Nous présenterons dans un premier temps ces caractéristiques générales, puis examinerons l'influence de la structure du couvert, et enfin considérerons l'impact de la structure elle-même de la lisière.

Caractéristiques générales

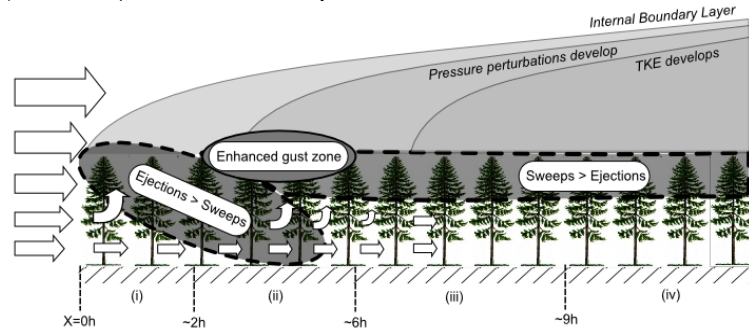
On retiendra les points suivants :

- lorsque l'écoulement rencontre la résistance due à la traînée aérodynamique du couvert, il décélère près de la surface du sol et accélère juste au-dessus du sommet du couvert où la vitesse verticale moyenne est positive, générant ainsi de forts gradients de pression horizontaux. Cet ensemble décélération-accélération produit le point d'inflexion caractéristique du profil de vitesse présent dans la partie supérieure du couvert (Figure 2a) ;
- au voisinage de la lisière, l'épaisseur de la couche cisailée, et donc l'échelle des tourbillons énergétiques générés par le couvert, est petite devant la hauteur de ce dernier ; cette épaisseur augmente avec la distance à la lisière et les structures turbulentes pénètrent de plus en plus profondément dans le couvert au fur et à mesure de leur développement, transférant de la quantité de mouvement sur une épaisseur de plus en plus grande du couvert ;
- si à la lisière le maximum de cisaillement se produit au pied des arbres, là où la vitesse est la plus faible, à l'intérieur de la parcelle le maximum de cisaillement se produit vers le sommet du houppier, là où la vitesse est maximale ;
- à l'intérieur du couvert, l'équilibre de l'écoulement n'est pas atteint de façon monotone mais passe par une zone où les vitesses et la turbulence prennent des valeurs inférieures à ce qu'elles sont plus en aval. La turbulence importée de l'amont est en effet atténuée par la traînée aérodynamique avant que la « nouvelle » turbulence créée par le couvert ne se manifeste. Une zone avec des valeurs de Sk_u négatives se forme dans la partie basse du couvert (typiquement à partir de $x/h = 4$), dont l'épaisseur décroît plus en aval. Cette région indique la présence de mouvements dits de « recirculation » où la vitesse horizontale est négative de manière intermittente à cause du passage de structures tourbillonnaires principalement transversales ;
- dans les parties supérieures de la canopée, la distorsion de l'écoulement provoquée par la lisière joue un rôle fondamental dans le retard du développement de la turbulence et du flux de quantité de mouvement ; l'énergie cinétique turbulente ne se développe qu'après que le terme d'advection verticale de faibles valeurs d'ECT provenant des profondeurs du couvert est devenu petit devant le terme de production de cisaillement, typiquement à partir de $x/h \approx 8$, où la vitesse verticale moyenne devient négligeable ;
- si l'écoulement moyen dans le couvert s'équilibre avec ce dernier à une distance de la lisière d'environ $10 h$, les statistiques turbulentes (ECT et flux de quantité de mouvement) juste au-dessus du sommet continuent à évoluer dans la couche limite interne en croissance ;

- dans la partie supérieure du couvert (pour $0.7 < z/h < 1$) et dans la région $2.5 < x/h < 6$ un pic de Sk_u (+1.5) est simulé, montrant là une intensification des rafales. Sa présence peut rendre compte, au moins en partie, du fait que les dégâts dus au vent se manifestent souvent non pas à la lisière même mais à l'intérieur du couvert, à quelque distance de celle-ci ; toutefois, l'intensité de l'ECT est plus faible dans cette région. Plus en aval, les valeurs de Sk_u deviennent proches de celles observées pour un couvert homogène (+0.5).

Ces résultats donnent une idée générale des caractéristiques turbulentes des régions de lisière que nous schématisons en Figure 3.

(a) Caractéristiques de l'écoulement moyen



(b) Développement des structures turbulentes

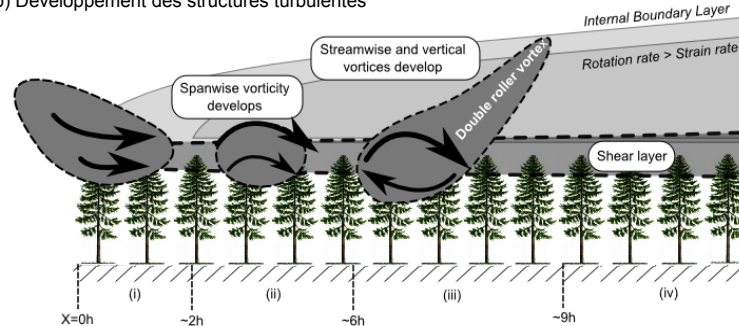


Figure 3 : Représentation idéalisée des caractéristiques moyennes de l'écoulement de lisière (a) et des différentes étapes de développement des structures cohérentes depuis la lisière entrante de la canopée (b) pour un couvert d'indice foliaire (LAI) autour de 2. Voir Dupont et Brunet (2009).

On peut en outre, à partir des champs turbulents et sur une période donnée, calculer des indicateurs de stabilité des arbres : moment de courbure moyen C_m , moment de courbure extrême C_{ex} , rapport $G = C_{ex}/C_m$ ou « facteur de rafale » (« gust factor »). L'étude de Dupont et Brunet (2008c) sur le comportement de ces grandeurs montre quelques points importants : (1) C_m et C_x ont des fortes valeurs juste après la lisière, générées par des rafales venant de la clairière amont ; (2) C_m tend ensuite de façon continue vers de faibles valeurs tandis que C_x passe par un minimum vers $x/h \approx 2$; (3) G , faible au début, ainsi que C_{ex} augmentent vers $x/h \approx 2-3$, puis prennent leur valeur d'équilibre vers $x/h \approx 5-6$. Ce comportement révèle une augmentation de la vulnérabilité des arbres, due au développement des structures turbulentes propres à la canopée, dans un environnement où le moment de courbure moyen est faible. Ils montrent également qu'il convient de distinguer lisières établies et lisières nouvellement créées : si, pour les premières, c'est le facteur G qui semble le plus déterminant, pour les secondes c'est C_{ex} qu'il est judicieux de considérer.

Influence de la structure de la végétation

Dupont et Brunet (2008b) ont étudié l'impact de la structure du couvert sur l'écoulement de lisière en comparant plusieurs cas, différant par l'indice foliaire (de 2 à 5) et les parts relatives de végétation dans le houppier et le sous-bois. La comparaison des résultats obtenus dans les différents cas appelle les commentaires suivants :

- pour une même forme de variation verticale, un indice foliaire élevé conduit à un « renforcement » des caractéristiques décrites précédemment ; l'écoulement est alors freiné et distordu plus fortement dans la région de lisière, la zone d'intensification des rafales est plus intense et plus proche de la lisière, et l'écoulement atteint son état d'équilibre plus rapidement ;
- lorsque la densité foliaire est plus faible en bas qu'en haut un vent-jet (courant de vent) peut se former dans la partie basse du couvert, et ce d'autant plus que la différence de densité est forte ; ce jet s'atténue avec la distance à la lisière ;
- avec un houppier haut placé et un sous-bois peu dense (cas typique du pin maritime), l'écoulement à la lisière contourne le houppier par le haut et le bas, induisant dans le sous-bois un fort vent-jet dont la vitesse diminue très lentement ; ceci induit un mouvement moyen ascendant au-dessus du couvert jusqu'à une grande distance de la lisière et augmente donc la distance d'ajustement de l'écoulement avec le couvert. La zone d'intensification des rafales est beaucoup plus étirée et l'on trouve près du sol moins de mouvements s'accompagnant de vitesse horizontale négative (zones de « recirculation »).

Influence de la structure de la lisière

Dupont et Brunet (2008c) ont étudié l'impact de la structure de la lisière sur l'écoulement, en comparant sept traitements différents (Figure 4), selon que la lisière est plus ou moins étagée (cas 2 et 3), ou plus ou moins dense (cas 4 et 6), ou plus ou moins haute (cas 5 et 7) par rapport à un cas homogène de référence (cas 1).

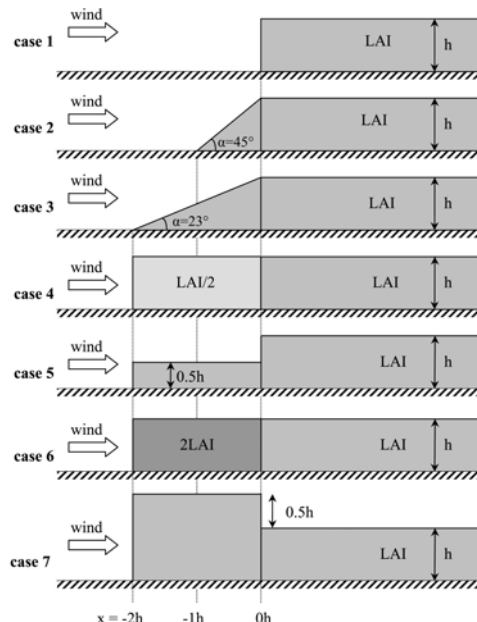


Figure 4 : Représentation des sept traitements de lisière considérés dans l'étude de Dupont et Brunet (2008c).

Ils montrent que :

- pour des lisières établies, un traitement de lisière n'apporte pas de bénéfice clair ; dans certains cas, le facteur de rafale peut même être accru dans la région de lisière (cas des traitements denses) ;
- pour des lisières nouvellement créées, la vulnérabilité de l'arbre peut être réduite par un traitement, qui a tendance à diminuer les moments de courbure moyen et extrême ; cette observation est particulièrement vérifiée pour les traitements de lisière hauts et denses, qui génèrent toutefois une plus forte turbulence plus loin en aval.

Fragmentation du paysage

Écoulements de lisière sortante

Si dans ce qui précède nous n'avons considéré que les écoulements entrants, il est également important de considérer les sorties de peuplement. L'écoulement juste en aval d'une parcelle forestière étant en effet celui qui va aborder la suivante, dans la direction du vent, sa nature et ses caractéristiques doivent être prises en compte dès lors qu'on s'intéresse à un ensemble de parcelles. De manière schématique, les caractéristiques générales de l'écoulement sortant peuvent être décrites ainsi :

- en aval du couvert, l'écoulement accélère en raison de la moindre traînée exercée sur lui et la vitesse verticale devient négative sur une région dont l'extension horizontale est de l'ordre de quelques fois h ;
- le très fort cisaillement présent au niveau du sommet de la végétation n'étant plus alimenté par les forces de traînée, la production de turbulence y diminue et l'énergie cinétique turbulente générée par le couvert est redistribuée sur la verticale ; elle diminue dans la région où $z/h \approx 1$ et augmente ailleurs ;
- la combinaison de ces phénomènes peut entraîner l'apparition d'une région où les valeurs de turbulence et de flux de quantité de mouvement passent par un maximum avant de diminuer à plus grande distance ;
- en amont de cette zone, et donc à l'aval immédiat de la parcelle, on distingue habituellement une zone « abritée » où vitesse moyenne et turbulence sont encore faibles et où l'on peut même observer des mouvements de « recirculation », déjà mentionnés précédemment ;
- l'écoulement sortant s'équilibre avec la nouvelle surface sur une distance beaucoup plus grande que l'écoulement entrant (typiquement de l'ordre de $50 h$ au lieu de $10 h$) ; il s'équilibre d'autant plus lentement que la clairière est peu rugueuse.

Les lisières multiples

Ces résultats laissent penser que la taille de la clairière peut avoir une influence sur le régime turbulent auquel est soumise la parcelle suivante. Un travail préliminaire a été réalisé à l'aide du code LES, visant à analyser l'influence sur l'écoulement de petites parcelles forestières (de longueur $L = 3 h$) séparées d'une distance D variable, valant $20 h$, $8.5 h$, $5 h$, $2.5 h$ et 0 (cas du couvert continu). Les résultats montrent que l'énergie cinétique turbulente et la contrainte mécanique varient effectivement d'une manière notable, en passant par un maximum pour $D/h = 5$ (valeur de l'espacement valant à peu près le double de celle de la longueur de la parcelle). Pour les grands espacements en effet, l'influence d'une parcelle ne se fait guère sentir sur la suivante, et lorsque ces espacements sont faibles l'écoulement ne

ressent guère les clairières et se comporte presque comme sur un couvert continu. Pour les espacements intermédiaires, en revanche, l'écoulement sortant interagit fortement avec la nouvelle parcelle, menant à un maximum de production de turbulence. Ainsi, certains niveaux de fragmentation d'un paysage forestiers pourraient conduire à une augmentation de la turbulence, et donc à un accroissement des risques en cas de vent violent. Ce domaine de recherche doit faire l'objet d'études approfondies.

Influence du relief

Peu de travaux ont été réalisés sur l'effet de la topographie sur la dynamique moyenne de l'écoulement et sur les structures turbulentes, à l'échelle d'une colline boisée. Des premiers éléments avaient été apportés par une expérimentation en soufflerie menée par Finnigan et Brunet (1995), sur une maquette de colline bidimensionnelle surmontée d'une maquette de forêt. Les caractéristiques de cette expérience ont été récemment reprises par Dupont et al. (2008) dans un travail de simulation 3D effectué à l'aide du modèle ARPS. Les principales caractéristiques de l'écoulement qui en résultent peuvent être résumées par quelques points clés :

- sur la partie amont de la colline, une accélération de la vitesse du vent à l'intérieur et au-dessus du couvert est observée, avec une quasi disparition du point d'inflexion du profil de vitesse longitudinal au sommet du couvert, et une augmentation de l'énergie cinétique turbulente et du flux de quantité de mouvement dans le couvert, indiquant que les structures turbulentes pénètrent plus profondément dans ce dernier ;
- au sommet, un fort cisaillement du vent au niveau du tiers supérieur du couvert, avec un maximum de l'énergie cinétique turbulente et du flux de quantité de mouvement et un fort point d'inflexion, sont observés, alors que dans les deux tiers inférieurs du couvert le flux de quantité de mouvement est proche de zéro, indiquant une faible interaction turbulente entre la partie inférieure du couvert et l'atmosphère au-dessus ;
- au pied aval de la colline se trouve une zone de recirculation, dans laquelle les processus turbulents sont très intermittents ;
- une zone de sillage est présente derrière la colline où la vitesse du vent est réduite, chapeautée par une couche de cisaillement caractérisée par un maximum de l'énergie cinétique turbulente et un point d'inflexion du profil de vitesse longitudinale ;
- en aval de la colline, dans la zone de sillage, aucun point d'inflexion n'est observé au sommet du couvert, ni aucun maximum du cisaillement ;
- un maximum du coefficient d'asymétrie de la vitesse longitudinale est observé tout le long de la colline au sommet du couvert.

De ces caractéristiques, peut être déduite une représentation schématique des interactions dynamiques entre l'écoulement et la canopée, présentée en Figure 5. L'utilisation du modèle biomécanique évoqué plus haut (Sellier et al., 2008), couplé au modèle d'écoulement ARPS, permet de compléter ce panorama par une analyse du comportement des arbres tout au long de la colline. Les résultats préliminaires de cet exercice montrent que les diverses contraintes affectant les arbres (flexion, torsion, contraintes internes, etc.) diminuent au fur et à mesure que l'on s'approche du sommet sur la face au vent, puis augmentent brusquement sur la face sous le vent, pour présenter un maximum en aval de la mi-hauteur de la colline. Ces faits sont à mettre en relation avec des observations de dégâts relevées à proximité de crêtes (Colin et al., 2009) ou en région dunaire.

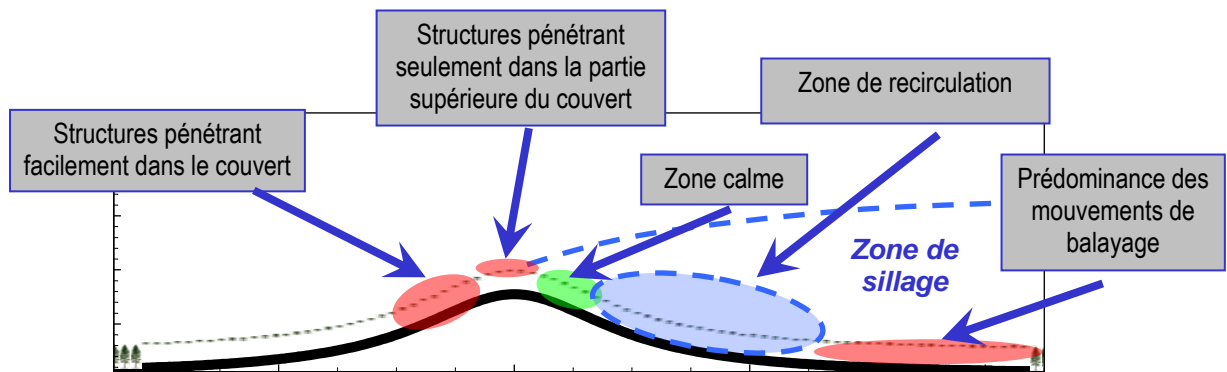


Figure 5 : Identification des zones spécifiques pour les échanges canopée-atmosphère le long d'une colline boisée (voir Dupont et al., 2008).

Conclusions et perspectives

L'ensemble des résultats de recherche présentés ici, pour la plupart très récents, donnent un aperçu très général des connaissances actuelles en matière d'interaction entre écoulement atmosphérique et structure des paysages forestiers. Ils témoignent (1) de l'orientation actuelle des recherches vers les contextes hétérogènes, rendue nécessaire par leur omni-présence et possible par le fort développement des outils de simulation atmosphérique et mécanique ; (2) du déplacement de ces recherches vers des échelles plus étendues que l'échelle stationnelle (paysage, petite région), permettant de prendre en compte des phénomènes que l'on ne peut qu'ignorer à l'échelle locale (l'effet, par exemple, de la multiplicité des lisières sur la turbulence atmosphérique et son impact, en retour, sur les sollicitations locales) ; (3) d'une ouverture, dans le domaine des interactions vent-arbre, du contexte purement sylvicole vers un contexte plus large lié à l'aménagement du paysage.

Le développement de la modélisation fournit des outils de simulation devant permettre la réalisation d'études d'impact orientées vers le test de scénarios sylvicoles ou de pratiques d'aménagement de l'espace forestier. En particulier, les modèles évoqués ici, qui restent des modèles de recherche, peuvent être utilisés avec grand profit pour améliorer les bases physiques de ceux qui sont plus tournés vers la gestion et l'aide à la décision. Un meilleur dialogue entre ces deux communautés de modèles, et de modélisateurs, devrait ainsi pouvoir aboutir à la mise au point de toute une chaîne d'outils prédictifs, des plus fondamentaux aux plus finalisés.

Références bibliographiques

- Brunet Y., Finnigan J.J., Raupach M.R., 1994. A wind tunnel study of air flow in waving wheat: single-point velocity statistics. *Boundary-Layer Meteorology* 70, 95-132.
- Brunet Y., Dupont S., Sellier D., Fourcaud T., 2009. Les interactions vent-arbre, de l'échelle locale à celle du paysage : vers des approches déterministes. In : Birot Y., Landmann G., Bonhême I. (Eds.), *La forêt face aux tempêtes*. Quae Editions, Versailles, pp 229-259.
- Colin F., Vinkler I., Riou-Nivert P., Renaud J.P., Hervé J.C., Bock J., Piton B., 2009. Facteurs de risques de chablis dans les peuplements forestiers : les leçons tirées des tempêtes de 1999. In : Birot Y., Landmann G., Bonhême I. (Eds.), *La forêt face aux tempêtes*. Quae Editions, Versailles, pp 177-228.

- 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 Forest Meteorology* 148, 976-990.
- Dupont S., Brunet Y., 2008b. Edge flow and canopy structure: a large-eddy simulation study. *Boundary-Layer Meteorology* 126, 51-71.
- Dupont S., Brunet Y., 2008c. Impact of forest edge shape on tree stability: a large-eddy simulation study. *Forestry. Special issue "Wind and trees"* 81, 299-315.
- Dupont S., Brunet Y., Finnigan J.J., 2008. Large-eddy simulation of turbulent flow over a forested hill: validation and coherent structure identification. *Quart. J. Roy. Meteorol.* 134, 1911-1929.
- Dupont S., Brunet Y., 2009. Coherent structures in canopy edge flow: a large-eddy simulation study. *J. Fluid Mech.* 630, 93-128.
- Finnigan J.J., Brunet Y., 1995. Turbulent airflow in forests on flat and hilly terrain. In: Coutts M.P., Grace J. (Eds.), *Wind and Trees*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 3-40.
- Foudhil H., Brunet Y., Caltagirone J.P., 2005. A fine-scale k- ϵ model for atmospheric flow over heterogeneous landscapes. *Environmental Fluid Mechanics* 5, 245-267.
- Gardiner B., Marshall B., Achim A., Belcher R., Wood C., 2005. The stability of different silvicultural systems: a wind-tunnel investigation. *Forestry* 78, 471-484.
- Raupach M.R., Finnigan J.J., Brunet Y., 1996. Coherent eddies and turbulence in vegetation canopies: the mixing layer analogy. *Boundary-Layer Meteorology* 78, 351-382.
- Sellier D., Brunet Y., Fourcaud T., 2008. The aerodynamic response of a forest tree to a turbulent airflow: a numerical study. *Forestry* 81, 279-297.