
Mouvements des plantes sous le vent

Problématiques associées aux mouvements des plantes

L'étude des mouvements induits par le vent sur les plantes, qu'il s'agisse de plantes isolées ou en situation de couvert, est motivée par des problématiques de recherche importantes en agronomie et en biologie. Le problème majeur, également le plus connu, concerne l'endommagement des cultures par le vent. Ce phénomène est appelé la verse. Une autre motivation concerne l'étude de l'influence des contraintes mécaniques subies par les plantes sur leur croissance. Ces contraintes sont en fait essentiellement liées à l'action du vent. Cet effet, appelé la thigmomorphogénèse, constitue un domaine de recherche en plein essor. Enfin, la troisième application importante des mouvements des plantes sous le vent est leur rôle présumé dans le détachement et la dispersion de particules, de pollens par exemple. Nous abordons ci-dessous ces trois problématiques biologiques et finissons par des questions d'ordre plus théoriques liées au mouvement des plantes sous le vent.

La verse des cultures

Quand les mouvements induits par le vent sur les plantes sont très forts, ils peuvent mener à la verse de la culture, c'est-à-dire une inclinaison irréversible des tiges pouvant aller jusqu'à leur abattement sur le sol, voir Figure 1.2*. Malgré la sélection au cours des dernières décennies de variétés plus courtes et plus résistantes, et malgré l'emploi intensif de régulateurs de croissance, la verse mène encore à des pertes de rendements agricoles de 10 à 30% au niveau mondial (Farquhar *et al.*, 2000). A une autre échelle, rappelons également les ravages dramatiques sur les forêts lors de la tempête de 1999 en France. La verse se produit soit par rupture ou flambage localisé de la tige, soit par déracinement de la plante, et résulte d'une interaction complexe entre la dynamique du vent, l'éventuelle présence de pluie, les propriétés mécaniques de la plante et les caractéristiques du sol (Baker, 1995; Farquhar & Meyer-Phillips, 2001; Sterling *et al.*, 2003).

Les régulateurs de croissance utilisés par les agriculteurs pour limiter les risques de verse se révèlent extrêmement polluants. Leur interdiction a déjà été votée dans certains pays ou régions, notamment l'Autriche et la Wallonie, et il existe de fortes pressions pour l'extension de cette interdiction à toute l'Europe (Ambroise *et al.*, 1998). Sans l'emploi de ces produits, un champ de blé subit en moyenne 50% de verse et un champ d'orge jusqu'à 80% (Mouliat, 2005), d'où un regain d'intérêt important pour les problématiques liées à la verse. Si les études biomécaniques de la verse se sont jusqu'ici principalement concentrées sur

*Figure 1.2 : source des photos. Verse du blé : <http://www.oznet.ksu.edu/wheatwatch/lodging.htm>. Verse d'une bature : photo E. de Langre, Petite-Riviere-St-François, Canada, août 2005.



FIG. 1.2 – Verse d'un champ de blé, à gauche, et du foin de bature, à droite.

la résistance des tiges et des systèmes racinaires à un chargement donné, et l'impact sur cette résistance des différents facteurs géométriques et physiologiques, voir par exemple Farquhar & Meyer-Phillips (2001); Farquhar *et al.* (2002), il apparaît maintenant nécessaire de mieux comprendre les mouvements des cultures dûs au vent à l'origine de la verse (Berry *et al.*, 2003). Les motifs particuliers produits par la verse sur les champs (Figure 1.2) illustrent l'action de rafales de vent localisées qui induisent un mouvement cohérent intense de zones de champs jusqu'à leur rupture. Une description plus précise de ces mouvements cohérents et une meilleure compréhension de la dynamique des couverts végétaux sous le vent sont nécessaires pour améliorer les modèles de verse et envisager de nouvelles solutions.

La thigmomorphogénèse

La thigmomorphogénèse (du grec thigmo = toucher) est l'influence des sollicitations mécaniques sur la croissance et le développement des végétaux (Boyer, 1967; Jaffe, 1973). Comme l'ensemble des êtres vivants, les plantes perçoivent les déformations de leurs cellules résultant des sollicitations mécaniques qu'elles subissent -flexions, compressions, piqures, etc.- (Coutand & Moulia, 2000) et y répondent en réduisant leur croissance en hauteur au profit de leur croissance racinaire, et chez certaines espèces en stimulant leur croissance radiale. La réponse thigmomorphogénétique inclut également une modification de la composition et des propriétés mécaniques de la tige principale (Coutand, 1999). Il est par exemple connu que de jeunes arbres soutenus par des tuteurs, comme c'est souvent le cas en agglomération, poussent plus haut et ont un diamètre plus faible que les mêmes arbres libres de mouvements (Jacobs, 1954). De plus, il a été montré que des arbres, libérés de leur tuteur après deux années, n'étaient plus aptes à supporter les sollicitations mécaniques dues au vent et flambaient sous leur propre poids



FIG. 1.3 – Illustration de la thigmomorphogénèse : au centre de l'image, les plantes de luzerne ont poussé à travers deux grilles qui réduisent l'amplitude de leurs mouvements ; celles-ci poussent beaucoup plus haut que les plantes voisines libres d'osciller sous le vent (photo : Moulia & Combes (2004))

(Coutand (2005), voir Fig. 4 dans Fournier *et al.* (2005)).

Bien qu'on ait depuis longtemps décrit qualitativement l'influence des mouvements induits par le vent sur la croissance des arbres et sur l'adaptation à leur environnement (Crook & Ennos, 1996), l'importance des réponses thigmomorphogénétiques sur le plan agronomique n'a été montrée que très récemment (Moulia & Combes, 2004) comme l'illustre la Fig. 1.3 : dans un champ de luzerne, une parcelle de plantes ayant poussé à travers deux grilles, qui réduisent l'amplitude de leur mouvement, poussent 40% plus haut que les plantes voisines libres d'osciller avec le vent. Les mouvements induits par le vent sur les plantes de culture affectent non seulement leur croissance en hauteur, mais aussi leur production en biomasse aérienne (pour la luzerne, les feuilles, qui sont utilisées comme fourrage pour les animaux) et la composition en matériau ligneux (bois, non comestible) de la tige. Enfin, dans la gamme des vents modérés (< 30 km/h) on observe des gammes de réponse allant de 0 à 40% de réduction de la croissance en hauteur, en fonction des niveaux de vent subis pendant la période de croissance. Ainsi la réponse thigmomorphogénétique au vent est un phénomène important pour comprendre les variations de croissance d'une année sur l'autre. Or, pour quantifier les réponses thigmomorphogénétiques d'une culture, il est nécessaire de connaître les sollicitations perçues par les plantes en situation naturelle et donc leurs mouvements induits par le vent.

Dispersion des pollens

L'oscillation des plantes sous le vent favorise l'émission du pollen hors des anthères (petits sacs contenant le pollen) et donc sa dispersion par le vent (Niklas, 1992). De même, le mouvement des plantes peut aider à l'entraînement de particules fongiques ou pathogènes présentes sur les feuilles et donc contribuer à la contamination du couvert végétal. A un niveau plus local, le mouvement d'une feuille sous l'impact d'une goutte de pluie est susceptible de modifier le rebondissement de celle-ci, et donc d'affecter l'entraînement de spores et bactéries transportées dans les gouttes réémises (Madden, 1992; Saint-Jean *et al.*, 2004).

Avec l'essor des OGM et des craintes liées à la contamination de plantes sauvages par des cultures voisines génétiquement modifiées, le problème de la dispersion des pollens par l'action combinée du vent et de l'oscillation des plantes suscite un intérêt de plus en plus vif (Jarosz *et al.*, 2003; Aylor, 2005).

Autres phénomènes

L'ondulation des cultures sous le vent implique des phénomènes de vibrations sous écoulement et inspirent à ce titre des recherches fondamentales intéressantes en interactions fluide-structure. Une étude célèbre de Moon & Kuroda (2001) a porté sur le comportement vibratoire d'un réseau de tiges élastiques soumis à un écoulement transverse : une dynamique fortement non-linéaire et des mouvements chaotiques des tiges ont été observés. Également dans l'optique générale des couvert végétaux, Brücker & Smith (2005) s'intéressent aux interactions entre le mouvement de cylindres flexibles immergés dans un écoulement et la dynamique des sillages générés derrière ces cylindres.

1.1.2 Etudes existantes sur le comportement mécanique des plantes

On donne ici quelques éléments bibliographiques, non exhaustifs, sur le comportement mécanique des plantes et les mouvements liés au vent. Notons que la plupart des études biomécaniques existantes sur le mouvement des plantes s'intéressent au problème de la verse et donc à la prévision des contraintes subies par la tige et le système racinaire.

Une plante est généralement modélisée comme un oscillateur harmonique amorti et les mesures de mouvements de plantes confirment la pertinence de ce type d'approche, voir Figure 1.4(a), et entre autres Flesch & Grant (1992a); Baker (1995); Farquhar *et al.* (2000); Doaré *et al.* (2004). Dans ce type de modèles, la déformée de la tige est soit calculée à l'aide d'une approche de type poutre élastique (Baker, 1995), soit imposée en considérant un mode de vibration particulier, la plupart du temps le mode fondamental (Flesch & Grant, 1991). La rigidité en flexion de la plante prend en compte la raideur structurale de la tige

et un effet correcteur lié à la gravité (Farquhar & Meyer-Phillips, 2001). Les modèles les plus courants considèrent une masse ponctuelle équivalente située à la hauteur barycentrique. L'effet du vent sur la plante est représenté par la traînée aérodynamique appliquée comme un forçage sur l'équation dynamique de l'oscillateur. Cette force de traînée est imposée comme une force temporelle arbitraire à une fréquence et une amplitude données (Farquhar *et al.*, 2000; Doaré *et al.*, 2004), ou bien déduite de mesures de vitesse de vent sur site (Baker, 1995; Sterling *et al.*, 2003). Il n'existe pas à ce jour de modèle couplant à la fois le calcul de l'écoulement du vent et celui du mouvement de la plante.

Pour les problèmes de verse, on déduit souvent de ces modèles l'expression de la fonction de transfert reliant le moment de flexion au pied de la plante et la force du vent en fonction de la fréquence. La valeur du pic de cette fonction de transfert, obtenu à la fréquence propre de la tige, est ensuite comparée aux moments de rupture de la tige et de l'ancrage racinaire. Diverses études paramétriques (numériques ou expérimentales) ont été menées pour estimer l'influence des différents facteurs géométriques et éco-physiologiques (nature du sol, fertilisation, variété considérée, emploi de raccourcisseurs, etc...) sur la résistance à la verse, voir par exemple Farquhar & Meyer-Phillips (2001); Farquhar *et al.* (2002); Berry *et al.* (2003).

Au niveau expérimental, des mesures sur site du mouvement de plantes individuelles dû au vent sont réalisées à l'aide de capteurs de déplacement ou de jauges de déformation, voir Figure 1.4(b) et (Finnigan, 1979; Flesch & Grant, 1991; Sterling *et al.*, 2003), avec mesure simultanée de la vitesse locale du vent. En laboratoire, des mesures optiques de l'oscillation libre d'une plante permettent d'obtenir directement et de manière non-intrusive ses propriétés vibratoires, voir Doaré *et al.* (2004) et section 2.3. D'autres études vibratoires par Farquhar *et al.* (2000) ont porté sur la réponse dynamique d'une tige de blé à un jet d'air comprimé simulant l'effet d'une rafale de vent. La détection des trajectoires obtenues révèle des mouvements elliptiques, dont l'amplitude varie avec la direction de la rafale par rapport à la plante, et qui peuvent s'expliquer par l'anisotropie structurelle de la tige, liée à sa section non-circulaire.

Les études théoriques et expérimentales citées ci-dessus ne concernent que le comportement de plantes individuelles. A l'échelle du couvert végétal, très peu d'informations sont disponibles. Une étude expérimentale de la verse d'un champ de blé a été menée par Sterling *et al.* (2003) à l'aide d'une soufflerie mobile placée dans un champ, voir Figure 1.5, mais l'étude n'inclut ni description ni mesure de la dynamique des plantes avant rupture. Des observations de l'ondulation d'un champ de blé due au vent sont fournies par Finnigan (1979) : il décrit cette ondulation caractéristique, appelée *honami* (Inoue, 1955), comme la trace du passage d'une rafale de vent ; celle-ci plie sous son passage une succession de tiges qui se redressent élastiquement et se mettent ensuite à osciller à leur fréquence propre avec un léger déphasage entre les tiges dans la direction du vent, donnant ainsi l'impression d'une vague qui se propage. Hormis cette description, il n'existe

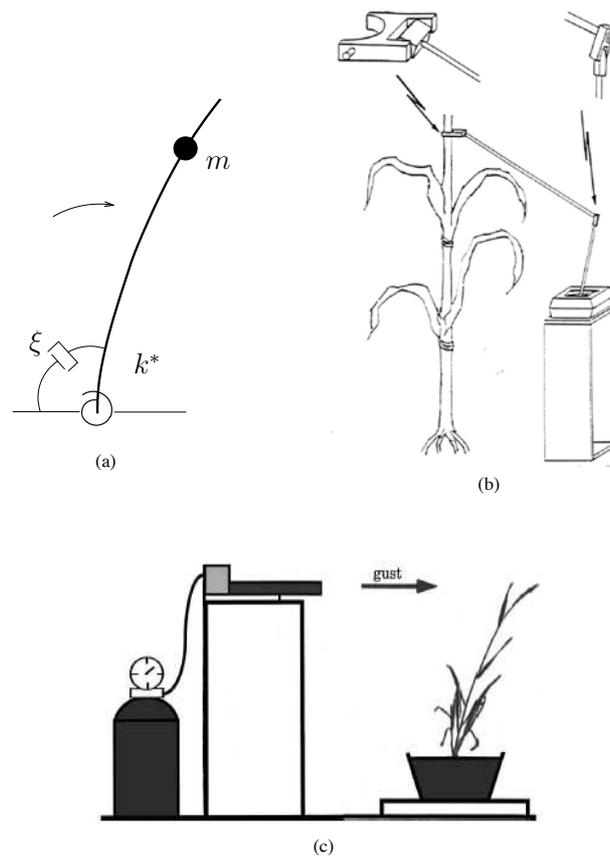


FIG. 1.4 – (a) Modèle mécanique élémentaire d'une plante. (b) Exemple de dispositif expérimental utilisé pour mesurer en champ le mouvement d'un pied de maïs (Flesch & Grant, 1992a). (c) Etude de la réponse d'une tige de blé à une impulsion de vent (Farquhar *et al.*, 2000)



FIG. 1.5 – Etude expérimentale de la verse sous une soufflerie : couvert végétal réel mais vent artificiel (Sterling *et al.*, 2003).

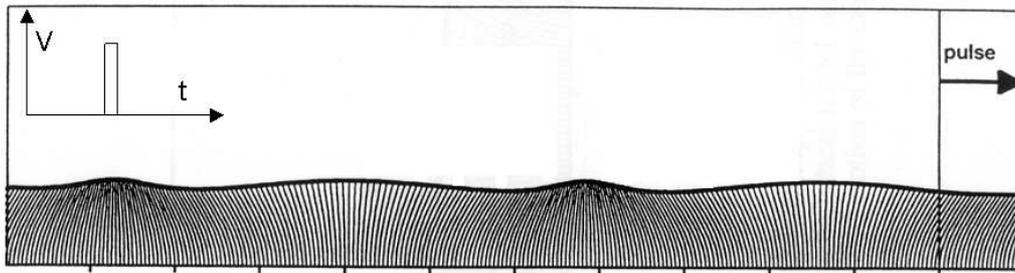


FIG. 1.6 – Oscillation d'un couvert végétal après le passage d'une rafale de vent à la vitesse V : les plantes oscillent à leur fréquence propre f_0 avec une longueur d'onde spatiale $\lambda = V/f_0$, modèle de Farquhar *et al.* (2003).

pas de mesures quantitatives du mouvement global du couvert végétal. Au niveau modélisation, à notre connaissance seuls Farquhar *et al.* (2003) et Doaré *et al.* (2004) ont proposé des modèles de couverts végétaux : le couvert est représenté par une rangée d'oscillateurs mécaniques, voir Figure 1.6, et Doaré *et al.* (2004) ont introduit des interactions élastiques entre oscillateurs pour tenir compte des contacts entre plantes voisines.

En résumé, les mouvements induits par le vent sur des plantes individuelles sont assez bien appréhendés à l'aide de modèles de type oscillateurs et de mesures simples. En revanche, le comportement vibratoire d'un couvert végétal en présence de vent est mal connu, et on manque d'informations quantitatives sur les mouvements d'ensemble des plantes en condition naturelle.

1.2 Le vent au dessus des couverts végétaux

Pour étudier le mouvement des couverts végétaux, il est nécessaire de connaître la dynamique du vent à l'origine de ces mouvements. Paradoxalement si le mouvement des plantes a été assez peu étudié, du moins à l'échelle du couvert, la littérature est en revanche beaucoup plus riche en ce qui concerne la dynamique du vent au-dessus des couverts végétaux, comme l'indique les deux articles de synthèse par Raupach & Thom (1981) et Finnigan (2000). Ces études sur le vent ont été motivées par des problématiques diverses : les échanges gazeux (CO_2 , vapeur d'eau) et transferts de chaleur entre la végétation et l'atmosphère, et leurs rôles dans l'éco-physiologie des couverts et les micro-climats végétaux, la dispersion par le vent des pollens, les problèmes de verse, etc. On se concentre ici sur le principal modèle existant sur la dynamique du vent au-dessus des couvert végétaux, à savoir l'analogie de couche de mélange proposée par Raupach, Finnigan & Brunet (1996), et qui est le cadre dans lequel on se place dans la suite de la thèse. Pour cela, on dresse d'abord un bilan des spécificités de la turbulence du vent au dessus et au sein des couverts. Puis on rappelle ce qu'est une instabilité et un écoulement dits de couche de mélange, ce qui permet ensuite d'étayer l'analogie, très généralement utilisée, entre ce modèle de couche de mélange et les fluctuations dominantes du vent au dessus des couverts végétaux.

1.2.1 Principales caractéristiques

Contrairement à ce qui a été pensé pendant longtemps, la turbulence du vent au-dessus des couverts végétaux n'est pas juste une version perturbée de la turbulence du vent aux altitudes plus élevées, où les modèles de couche limite atmosphérique s'appliquent, mais a des propriétés spécifiques, bien établies, et communes à des couverts de types et de tailles très divers. La description du vent, donnée ci-après, s'applique à des couvert végétaux uniformes, et suffisamment denses, c'est à dire pour lesquels l'espacement entre plantes ou arbres est bien inférieur à la hauteur du couvert, et concerne les conditions diurnes. En nocturne, la stabilité thermique modifie quelque peu les propriétés.

La Figure 1.8, issue de Raupach *et al.* (1996), présente une compilation de profils des propriétés statistiques du vent pour des couverts végétaux allant de diverses forêts à des modèles de couverts à échelle réduite en soufflerie en passant par des champs de maïs. Voir la Figure 1.7 pour la définition des axes et composantes de vitesses. Les données représentées Fig. 1.8 sont le profil de vitesse moyen $U(z)$, la contrainte de cisaillement du tenseur de Reynolds \overline{uw} , les écart-types de vitesse $\sigma_u(z) = (\overline{u^2})^{1/2}$ et $\sigma_w(z) = (\overline{w^2})^{1/2}$, le coefficient de corrélation $r_{uw} = \overline{uw}/(\sigma_u\sigma_w)$, les coefficients de déviation Sk_u et Sk_w , et les échelles de longueur caractéristiques des fluctuations de vitesse L_u et L_w . Les grandeurs sont normalisées par la hauteur h du couvert végétal, la vitesse moyenne au sommet du couvert U_h , et la vitesse de frottement u_* . On soulignera surtout les similitudes

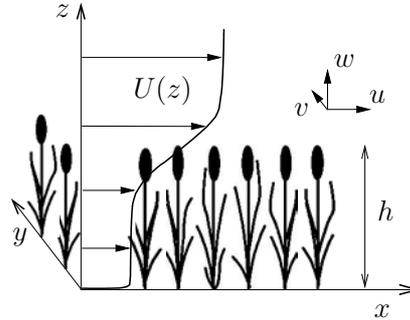


FIG. 1.7 – Le vent au dessus des couverts végétaux : définition des axes et composantes de vitesse utilisés dans cette section, suivant les notations de Raupach *et al.* (1996) : $U(z)$ est le profil moyen, et u , v , w les composantes fluctuantes du vent dans les directions x , y et z , où x est aligné avec la direction horizontale moyenne du vent, ou direction longitudinale, y est la direction transversale, et z la verticale.

entre les profils mesurés sur les différents couverts, les différences étant principalement liées à la disparité dans la répartition de surface foliaire $\alpha(z)$ selon la hauteur du couvert, Fig. 1.8(j).

Les propriétés statistiques du vent au sein et juste au dessus des couverts végétaux, dans ce qu'on appelle la couche rugueuse ($0 < z < 2h$), diffèrent significativement des propriétés dans la couche inertielle de l'atmosphère ($z \gg 2h$). Tout d'abord, le profil de vitesse moyen, Figure 1.8(a), présente dans tous les cas une forte inflexion au niveau du sommet du couvert végétal, tandis qu'il recouvre l'allure logarithmique classique en $z - d$, où d est l'épaisseur de déplacement, aux altitudes plus élevées. Cette inflexion du profil de vitesse au sommet du couvert résulte du ralentissement de l'écoulement par la traînée aérodynamique sur les feuilles à l'intérieur du couvert. Pour quantifier le cisaillement ainsi induit, on définit une échelle de longueur caractéristique, appelée la longueur de cisaillement,

$$L_s = \frac{U(h)}{(\partial U / \partial z)_{z=h}}, \quad (1.1)$$

qui diminue quand le cisaillement du vent augmente. Cette longueur de cisaillement est reliée à la hauteur du couvert, typiquement $L_s = 0.5h$ (Raupach *et al.*, 1996), mais varie avec la densité de surface foliaire du couvert : plus le couvert est dense, plus la longueur de cisaillement L_s est faible.

Dans la couche rugueuse ($0 < z < 2h$), les écarts-type sont significativement plus faibles que dans la couche inertielle au-dessus, et les coefficients de corrélation sont plus élevés, indiquant une plus forte corrélation de l'écoulement, Figure 1.8(c), (d) et (e). Les coefficients de déviation, Figure 1.8(f) et (g), qui sont nettement plus grands au voisinage du couvert qu'aux altitudes plus élevées, avec une déviation positive en u et négative en w , suggèrent le rôle dominant de

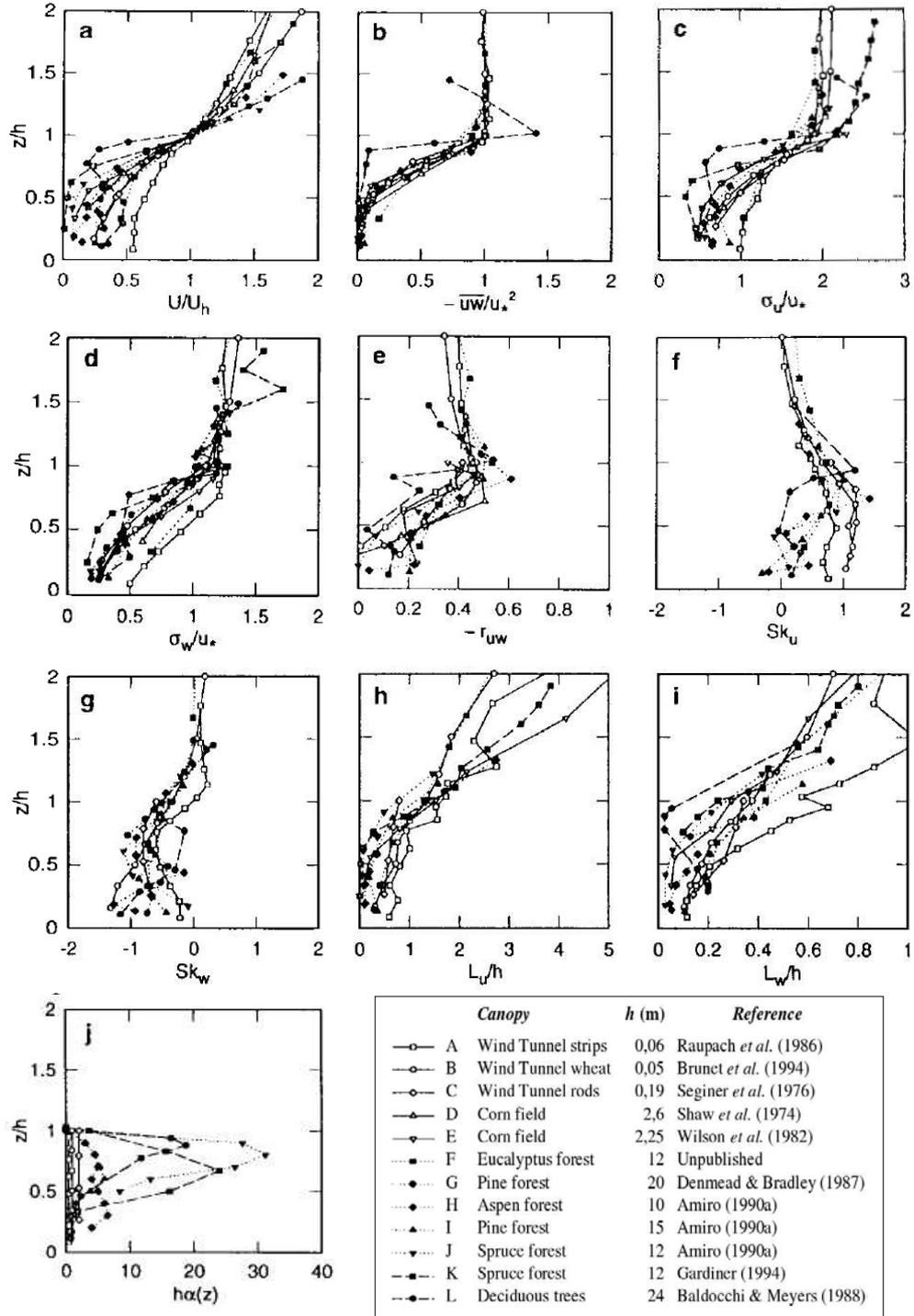


FIG. 1.8 – Famille de profils des caractéristiques du vent au dessus de divers couverts végétaux, ou modèles de couvert en soufflerie. Voir définition des grandeurs dans le texte. Figures issues de Raupach *et al.* (1996).

rafales de vent descendantes, brèves mais intenses, pénétrant le couvert végétal, comme le confirme des analyses conditionnelles par quadrant (Raupach *et al.*, 1996).

Au niveau des bilans d'énergie cinétique turbulente (Brunet *et al.*, 1994; Raupach *et al.*, 1996), l'équilibre local entre les termes de production et de dissipation, caractéristique de la couche inertielle, est rompu dans la couche rugueuse et à l'intérieur du couvert, où les termes de transport turbulent deviennent très grands. Autrement dit, la majeure partie de la turbulence du vent au niveau du couvert végétal n'est pas générée localement.

Une des avancées majeures dans la compréhension de la turbulence du vent au dessus des couverts végétaux fut la mise en évidence de structures cohérentes de grande échelle dominant la dynamique du vent. L'ondulation cohérente des cultures sous le vent, ces mouvements de vagues qui se propagent à la surface des champs, le phénomène de *honami* (Inoue, 1955), offre depuis toujours une visualisation du passage des structures cohérentes de vent au dessus des couverts végétaux. Au niveau quantitatif, l'identification de ces structures tourbillonnaires résulte uniquement de mesures indirectes. Les échelles de longueur dominantes des fluctuations de vitesse, mesurées près du sommet du couvert végétal, sont de l'ordre de grandeur de la hauteur du couvert h ($L_u \approx h$, $L_w \approx h/3$, voir Figures 1.8(h) et (i)), autrement dit les structures tourbillonnaires dominantes sont bien corrélées sur des longueurs de l'ordre de h . Les fréquences dominantes sont, elles aussi, régies par une échelle de temps unique, basée sur h et U_h (Kaimal & Finnigan, 1994), en contraste avec leur comportement dans la couche inertielle au-dessus où les fréquences sont proportionnelles à $(z - d)/U$ (Kaimal *et al.*, 1972).

Pour résumer, les propriétés de la dynamique du vent au sein et au-dessus des couverts végétaux diffèrent significativement des caractéristiques d'un écoulement de couche limite sur une surface rugueuse (configuration qui vient naturellement à l'esprit), et présentent une constance frappante entre des couverts de taille, de densité et de type extrêmement divers, quand les différentes grandeurs sont ramenées à la hauteur du couvert h et à la vitesse moyenne du vent à son sommet U_h . Partant de ce constat, Raupach *et al.* (1996) ont proposé d'expliquer les spécificités de la turbulence du vent comme le résultat d'une instabilité de type couche de mélange liée à l'inflexion du profil de vent moyen au niveau du sommet du couvert végétal.

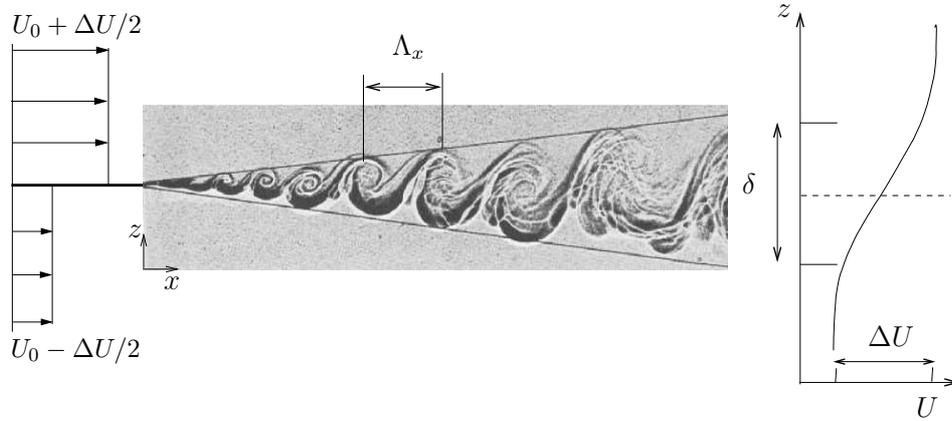


FIG. 1.9 – Écoulement de couche de mélange obtenu à l’aval d’une plaque séparant deux fluides de vitesses différentes (photo de Brown & Roshko (1974)), où la périodicité longitudinale des structures est Λ_x , et profil de vitesse associé, d’épaisseur de vorticité δ .

1.2.2 Analogie avec le modèle de couche de mélange

Avant de développer les arguments de Raupach *et al.* (1996), sur lesquels s’appuie l’analogie entre la dynamique du vent au niveau des couverts végétaux et le modèle de couche de mélange, on fait ici quelques rappels sur les écoulements de couche de mélange et l’instabilité à leur origine.

Rappels sur la couche de mélange

Une couche de mélange est l’écoulement qui se forme à l’interface entre deux fluides de vitesses différentes, initialement séparés par une plaque, voir Fig. 1.9. L’interface entre les deux fluides étant instable, les deux fluides sont rapidement mélangés, et l’écoulement dit de couche de mélange, ou couche de cisaillement, devient turbulent et auto-entretenu en aval de la plaque séparatrice (Townsend, 1976). Ce type d’écoulement se rencontre fréquemment dans des applications industrielles, ainsi que dans des contextes géophysiques, et a été très largement étudié tant du point de vue applicatif que théorique (Ho & Huerre, 1984).

La couche de mélange se développe en espace (x) et en temps, et son épaisseur peut être quantifiée par un paramètre appelé l’épaisseur de vorticité,

$$\delta = \frac{\Delta U}{(\partial U / \partial z)_{max}}, \quad (1.2)$$

où ΔU est la différence de vitesse entre les deux écoulements initiaux (Fig. 1.9). L’épaisseur de vorticité est une mesure de la hauteur sur laquelle le profil de vitesse moyen $U(z)$ présente un gradient, voir Figure 1.9. Les visualisations d’écoulements de couche de mélange, comme celle très célèbre de Brown

& Roshko (1974), révèlent des structures cohérentes intenses qui consistent en une série de tourbillons initialement transverses. La longueur d'onde longitudinale, ou périodicité des structures tourbillonnaires, Λ_x , croît proportionnellement à l'épaisseur de vortacité δ ; les études expérimentales et numériques donnent des valeurs de Λ_x/δ allant de 3.5 à 5 (Dimotakis & Brown, 1976; Rogers & Moser, 1994). Ces structures sont advectées à la vitesse moyenne de l'écoulement.

L'écoulement de couche de mélange résulte d'un mécanisme d'instabilité inviscide, l'instabilité de Kelvin-Helmholtz, lié à l'inflexion du profil de vitesse moyen obtenu en aval de la plaque (Figure 1.9). La présence d'un point d'inflexion dans un profil est une condition nécessaire d'instabilité d'après le critère de Rayleigh, voir Drazin & Reid (1981). Le mécanisme de déstabilisation de Kelvin-Helmholtz, illustré sur la Figure 1.10, est expliqué ci-après. Un écoulement théorique présentant une discontinuité de vitesse peut être décomposé en une advection moyenne plus un cisaillement pur qui correspond à une nappe de vortacité localisée dans le plan d'interface entre les deux régions fluides. L'interface est perturbée par des petites fluctuations naturellement présentes sous forme de bruit dans le système. Le bilan des vitesses induites par les tourbillons voisins sur des tourbillons déplacés de leur position initiale montre que la perturbation de l'interface, initialement infinitésimale, va croître. L'interface se raidit autour des points où la vortacité est accrue (point *C*) et étirée entre ces régions (autour de *A* et *E*), ce qui mène à un "déferlement" comme dans le cas de vagues, voir Figure 1.10 et Guyon *et al.* (1991).

Pour un écoulement réel dont le profil présente un point d'inflexion, ce même mécanisme de Kelvin-Helmholtz conduit à la déstabilisation du champ de vitesse moyen. Des ondes de Kelvin-Helmholtz se développent dans le plan d'interface (s'il s'agit de deux fluides) ou dans le plan où se situe l'inflexion. A ce premier stade, l'étude de stabilité linéaire (spatiale ou temporelle) de l'écoulement de base permet de prédire, avec un bon accord par rapport aux expériences ou simulations numériques directes, la longueur d'onde de Kelvin-Helmholtz qui est proportionnelle à l'épaisseur de vortacité δ (Drazin & Reid, 1981; Huerre & Rossi, 1998). La théorie linéaire prévoit également un taux de croissance des ondes proportionnel au cisaillement $(\partial U/\partial z)_{max}$. Le développement des ondes de Kelvin-Helmholtz aboutit, par un mécanisme non linéaire, à leur enroulement en une série de tourbillons transverses (appelés *Kelvin's cats eyes*), séparés par des zones de fort étirement, voir Fig. 1.9 et Rogers & Moser (1994). Ensuite, par une instabilité secondaire tridimensionnelle, la vortacité longitudinale se développe dans les zones de fort étirement (Pierrehumbert & Widnall, 1982). Simultanément, on assiste à un appariement des tourbillons primaires deux à deux (Winant & Browand, 1974), introduisant des irrégularités dans l'espacement entre les rouleaux. Enfin, une transition mène à un état turbulent 3D pleinement développé et auto-entretenu (Dimotakis & Brown, 1976).

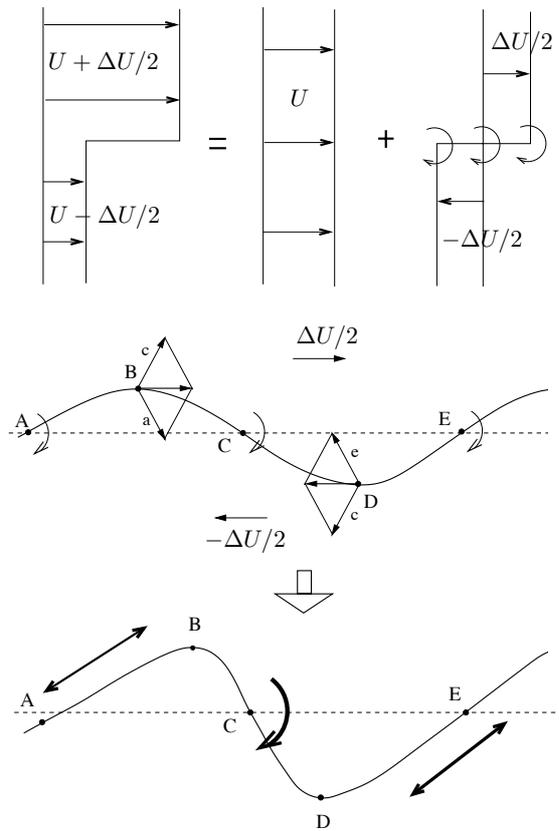


FIG. 1.10 – Principe physique de l'instabilité de Kelvin-Helmholtz : déstabilisation d'une nappe de vorticité (voir explications dans le texte). Schéma adapté de Guyon *et al.* (1991).

L'analogie avec la couche de mélange pour le vent au dessus des couverts végétaux

L'analogie entre l'écoulement turbulent d'une couche de mélange et la dynamique du vent au-dessus des couverts végétaux était suggérée à la base par l'inflexion du profil de vitesse commun aux deux écoulements.

Property	Surface layer	Mixing layer	Canopy
Inflection in $\langle \overline{u_1} \rangle(x_3)$	No	Yes	Yes
σ_u/u^*	2.5–3.0	1.8	1.8–2.0
σ_w/u^*	1.2–1.3	1.4	1.0–1.2
$r_{uw} = -\langle \overline{u'w'} \rangle / (\sigma_u \sigma_w)$	~0.3	~0.4	~0.5
$Pr_t = K_M/K_H$	~1.0	~0.5	~0.5
Integral length scale	$\propto(z-d)$	$\propto\delta$	$\propto(h-d)$
$ Sk_u , Sk_w $	small	O(1)	O(1)
TKE budget	$Ps \cong \varepsilon$	large Tt, Tp	large Tt, Tp

FIG. 1.11 – Comparaison des propriétés statistiques de l'écoulement d'une couche de surface (couche inertielle d'une couche limite turbulente), d'une couche de mélange, et du vent au dessus d'un couvert végétal. Tableau issu de Raupach *et al.* (1996).

Pour tester cette analogie, Raupach *et al.* (1996) ont comparé les propriétés statistiques du vent mesuré au sein des couverts végétaux (cf Fig. 1.8) aux caractéristiques d'un écoulement de couche de mélange d'une part, et d'un écoulement de couche limite d'autre part, voir le résumé de cette comparaison Figure 1.11. On voit notamment que le comportement de l'écart-type en u , du coefficient de corrélation, du rapport des diffusivités de chaleur et de quantité de mouvement (K_H/K_M), des coefficients de déviation et du bilan d'énergie cinétique pour le vent montre un bien meilleur accord avec les caractéristiques d'une couche de mélange qu'avec celles d'une couche limite. Le modèle de couche de mélange permet donc de rendre compte de l'essentiel des spécificités du vent au dessus des couverts végétaux que les approches de type de couche limite ne pouvaient expliquer.

Au delà de la parenté des propriétés statistiques, le point clé de l'analogie entre vent et couche de mélange réside dans le comportement des échelles de longueur dominantes. Rappelons que pour une couche de mélange, la longueur d'onde ou périodicité longitudinale des structures tourbillonnaires est proportionnelle à l'épaisseur de vorticité δ caractérisant le cisaillement du profil moyen. Dans le cas du vent au dessus des couverts végétaux, pour des raisons pratiques, une autre échelle équivalente, la longueur de cisaillement L_s , avait été définie pour quantifier l'inflexion du profil de vitesse, voir Eq. (1.1). La Figure 1.12 montre les estimations des échelles de longueur dominantes Λ_x du vent au-dessus de divers couverts végétaux (cf tableau de la Fig. 1.8), en fonction de la longueur de

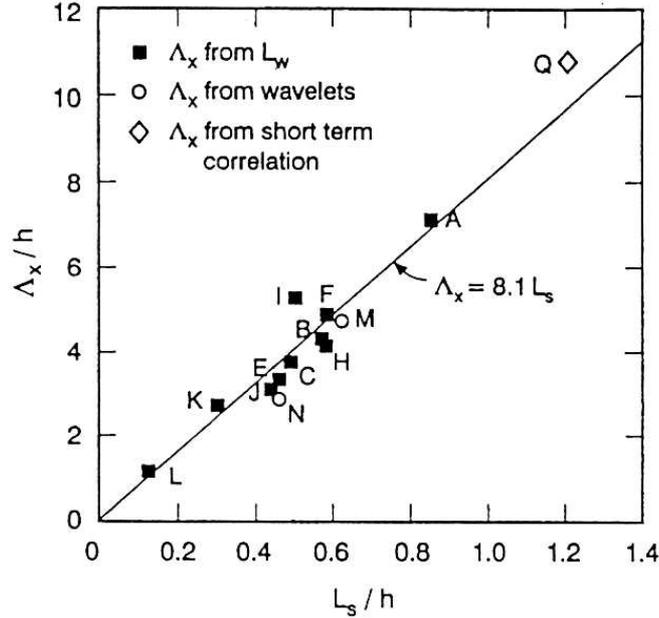


FIG. 1.12 – Echelle de longueur longitudinale Λ_x des structures tourbillonnaires du vent en fonction de la longueur de cisaillement L_s caractérisant l'inflexion du profil de vitesse moyen (figure issue de Raupach *et al.* (1996)). Les lettres correspondent aux divers couverts végétaux listés dans le tableau de la Fig. 1.8. Les valeurs de Λ_x sont calculées sur le signal de vitesse verticale w et résultent d'échelles intégrales à 1 point, d'analyses par ondelettes, et de corrélations à deux points.

cisaillement L_s , ces deux grandeurs étant normalisées par la hauteur h du couvert considéré. Toutes les données expérimentales se regroupent autour d'une même droite, autrement dit la taille des structures dominantes du vent au-dessus des couverts végétaux est proportionnelle à la longueur de cisaillement du profil, elle-même liée à la hauteur du couvert. Au niveau quantitatif maintenant, bien que la relation exacte entre longueur de cisaillement et épaisseur de vorticité dépende du profil de vitesse consid er e, on a typiquement $\delta \approx 2L_s$, d'où la comparaison suivante :

$$7 < \Lambda_x/L_s < 10 \text{ pour les couches de mélange,}$$

$$\Lambda_x/L_s \approx 8.1 \text{ pour le vent au-dessus des couverts végétaux (Fig. 1.12).}$$

Par conséquent, non seulement les échelles de longueur dominantes du vent sont proportionnelles à la longueur de cisaillement comme dans une couche de mélange, mais la valeur même du coefficient de proportionnalité montre un très bon accord entre les deux types d'écoulements. On peut donc conclure que les fluctuations dominantes du vent au dessus des couverts végétaux résultent d'une instabilité de

type Kelvin-Helmholtz liée à l'inflexion du profil de vitesse au niveau du sommet du couvert. Soulignons que ce même mécanisme s'applique sur des échelles de quelques centimètres pour les fluctuations de vent au-dessus de modèles réduits de couverts, jusqu'à des dizaines de mètres pour les écoulements au-dessus des forêts.

Une conséquence de ce mécanisme de type couche de mélange réside dans le fait qu'une échelle de longueur unique, L_s ou δ , et une échelle de vitesse unique, U_h , régissent l'instabilité primaire et les structures cohérentes résultantes du vent au niveau des couverts végétaux (Raupach *et al.*, 1996). Ces échelles uniques remplacent la dépendance en hauteur des échelles caractérisant la couche inertielle du vent aux altitudes plus élevées.

Une image de la dynamique du vent au-dessus des couverts végétaux

S'appuyant sur l'analogie de couche de mélange, Raupach *et al.* (1996) proposent la description suivante, reprise par Finnigan (2000), voir Figure 1.13, de la dynamique du vent au dessus des couverts végétaux. La première étape est l'émergence de l'instabilité primaire de Kelvin-Helmholtz. On suppose que ceci intervient quand une rafale de très grande échelle, issue de la couche inertielle bien au-dessus du couvert, fait augmenter le cisaillement en $z = h$ au-dessus d'un certain seuil pour lequel l'instabilité peut émerger de la turbulence environnante. Le taux de croissance de l'instabilité est alors proportionnel à l'intensité du cisaillement au point d'inflexion, tandis que l'échelle de cisaillement L_s est indépendante de la vitesse du vent, dépendant uniquement de la hauteur h et de la densité foliaire du couvert (Brunet & Irvine, 1999). La seconde étape est l'enroulement des ondes de Kelvin-Helmholtz en tourbillons transverses séparés par des zones de fort étirement. L'espacement entre les rouleaux correspond à la longueur d'onde de l'instabilité primaire. Enfin, des instabilités secondaires mènent à l'ondulation et à l'appariement des rouleaux primaires transverses, ainsi qu'à l'amplification de la vorticité longitudinale ambiante. Il en résulte des structures tri-dimensionnelles complexes dont les échelles de longueur longitudinales et transversales sont du même ordre de grandeur, voir Figure 1.13. Les structures cohérentes résultant de ce mécanisme d'instabilité se propagent au-dessus du couvert végétal, à la vitesse de la rafale à l'origine du processus. Le paquet d'ondes généré au déclenchement de l'instabilité s'atténue ensuite rapidement par dissipation.

Cette description de la dynamique du vent est bien sûr assez schématique. Les structures cohérentes résultant de l'instabilité sont en fait modul es par des fluctuations à des échelles beaucoup plus grandes, li es à la couche limite planétaire, et qui constituent à l'échelle du couvert une turbulence dite inactive (Finnigan, 2000). Se superpose également une turbulence de plus petite échelle, g n r e à la fois par la cascade énergétique et dans le sillage des plantes, et que l'on suppose jouer un rôle essentiellement dissipatif (Raupach *et al.*, 1996).

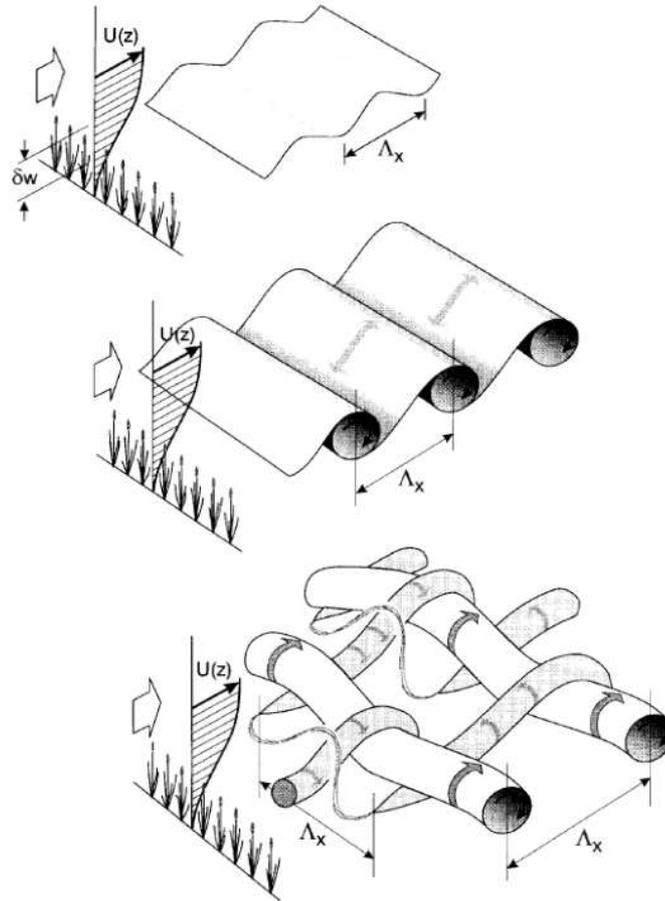


FIG. 1.13 – Représentation schématique de la couche de mélange du vent au dessus des couverts végétaux, par Finnigan (2000)

Pour finir sur cette analogie de couche de mélange, notons que suite aux travaux de Raupach *et al.* (1996), une étude récente par Ghisalberti & Nepf (2002) a montré que l'écoulement au sein et au-dessus de couverts végétaux aquatiques était aussi régi par une dynamique de type couche de mélange, ce qui renforce encore la pertinence de cette analogie.

1.3 Problématique de la thèse

Une meilleure compréhension des problèmes de verse et des réponses thigmomorphogénétiques d'une culture sous le vent passe désormais par une connaissance plus précise de la dynamique des couverts végétaux et du couplage entre ces mouvements et les fluctuations du vent. Si le comportement de plantes individuelles est relativement bien appréhendé, le mouvement global d'une culture dû au vent reste en revanche une question ouverte, tant du point de vue expérimental qu'au niveau des modèles. Rappelons de plus qu'il n'existe à ce jour aucun modèle couplant à la fois le mouvement des plantes et l'écoulement du vent.

La dynamique du vent au-dessus des couverts végétaux a été largement plus étudiée que les mouvements induits par celle-ci sur les plantes. L'analogie de couche de mélange permet de regrouper sous un mécanisme générique les fluctuations dominantes du vent au-dessus de couverts de type et de taille extrêmement divers. Les études sur le vent ont souvent été menées dans le cadre de problématiques différentes de celles qui nous intéressent ici, et par conséquent sans regard sur l'impact du vent sur les couverts végétaux, ni des éventuels couplages. Seule la présence du couvert végétal (sa hauteur et sa densité) est considérée, en tant qu'origine de l'inflexion du profil de vitesse, mais le fait que le couvert soit aussi doté d'une dynamique propre n'est pas pris en compte.

De plus, certains aspects de la dynamique du vent au-dessus des couverts végétaux restent à être clarifiés. Tout d'abord, il est assez frappant que des structures tourbillonnaires résultant d'une instabilité de Kelvin-Helmholtz puissent se former dans le vent avec un niveau de bruit naturellement très élevé, alors que les couches de mélanges sont connues pour être extrêmement sensibles au bruit (Huerre, 2000). L'instabilité au sein des couverts végétaux semble donc moins sensible au bruit que les instabilités classiques de couche de mélange. Il a été suggéré par Finnigan (2004) que l'oscillation des plantes puissent influencer la dynamique de l'écoulement et promouvoir la formation des structures cohérentes, par un mécanisme qu'il reste à identifier. De plus, certaines mesures de vent au-dessus de champs de blé montrant des ondulations caractéristiques (Finnigan, 1979) ont révélé des fréquences dominantes correspondant à la fréquence propre de vibration des plantes. Ceci est en apparence incompatible avec le modèle de couche de mélange, qui prédit une fréquence dominante régie par l'épaisseur de vorticité du profil de vitesse, et reste donc à être expliqué. Ces questions sur la moins grande sensibilité au bruit et sur la sélection de fréquence dominante dans le vent, suggèrent toutes deux que le couvert végétal ne se comporte peut-être pas comme un milieu vibratoire passif mais puisse éventuellement jouer un rôle dans le mécanisme de l'instabilité.

Pour toutes ces raisons, il apparaît nécessaire d'étudier de manière coupl e les fluctuations dominantes du vent et les mouvements induits par le vent sur les plantes. On connait très mal la dynamique des couverts végétaux sous le

vent. Par conséquent la première partie de cette thèse, Chapitre 2, est dédiée à la caractérisation du mouvement des cultures sous le vent. Pour cela, une nouvelle technique expérimentale a été mise au point. Elle permet de mesurer, sur site, le champ de vitesse de la surface d'un couvert végétal, et d'en extraire les mouvements cohérents. Au vu des résultats expérimentaux, un modèle couplant l'écoulement du vent et le mouvement du couvert végétal est ensuite développé dans le Chapitre 3. Une analyse de stabilité linéaire permet d'obtenir les caractéristiques de l'instabilité couplée à l'origine à la fois des structures cohérentes du vent et de l'ondulation du couvert, et apporte une nouvelle vision du couplage entre vent et mouvement des plantes. Enfin, le Chapitre 4 confronte les prédictions de ce modèle avec les résultats expérimentaux obtenus.