

Comparaison entre expérience et modèle

Dans le Chapitre 2 de cette thèse, des mesures sur site ont permis de caractériser le mouvement d'une culture en présence de vent. Les propriétés spatiales et temporelles des structures cohérentes du mouvement ont été obtenues en fonction de la vitesse réduite du vent et pour les deux couverts étudiés, blé et luzerne. On a montré que ces résultats ne pouvaient être entièrement expliqués par l'analogie de couche de mélange, et que la rigidité des plantes jouaient un rôle dans la sélection de fréquence et de longueur d'onde du mouvement. Dans le Chapitre 3, un modèle couplant la dynamique du vent et le mouvement du couvert végétal a été développé. Une analyse de stabilité temporelle a permis de dériver les propriétés de l'instabilité couplée régissant, dans la limite linéaire, les fluctuations dominantes du vent et du mouvement des plantes. On a montré que l'instabilité de Kelvin-Helmholtz était affectée par la dynamique des plantes via un mécanisme d'accrochage. Il convient maintenant de comparer les résultats obtenus par les deux approches, les expériences et le modèle.

4.1 Comparaison des propriétés spatiales et temporelles

On confronte ici les prédictions issues du modèle de couplage vent / couvert avec les résultats expérimentaux obtenus sur les propriétés des ondes formées par le mouvement des plantes sous le vent. Pour cela, on compare les valeurs de longueur d'onde, de fréquence et de vitesse de phase caractérisant l'instabilité couplée du modèle avec les valeurs expérimentales correspondantes issues de l'analyse BOD du mouvement des cultures de blé et de luzerne. Pour le modèle, la longueur d'onde caractéristique est dérivée du nombre d'onde le plus amplifié, k^{max} , et la fréquence de la pulsation associée ω_r^{max} , tous deux calculés à l'aide de la relation de dispersion (3.14), en prenant soin de revenir à des quantités dimen-

sionnelles. La vitesse de phase correspond, elle, au rapport ω_r^{max}/k^{max} . Pour plus de clarté, on utilise dans le modèle uniquement les paramètres de la luzerne pour comparer les résultats expérimentaux des deux couverts. On fait varier dans le calcul la valeur de la vitesse réduite $U_r = U/f_0h$.

La Figure 4.1 montre la superposition des valeurs expérimentales et théoriques de la longueur d'onde λ , de la fréquence f et de la vitesse de phase c , avec normalisation par h et f_0 , en fonction de la vitesse réduite U_r . On obtient un bon accord qualitatif et quantitatif entre les données expérimentales et les prédictions du modèle. Le modèle permet de recouvrer, pour l'intervalle de vitesses réduites couvert par les expériences, les évolutions discutées en section 2.5 : la longueur d'onde caractéristique de l'instabilité couplée est proportionnelle à la hauteur du couvert (ou à l'épaisseur de vorticité du profil), et augmente linéairement avec la vitesse réduite U_r ; la fréquence est égale à la fréquence propre des plantes formant le couvert et est indépendante de U_r ; enfin, la vitesse de phase normalisée augmente linéairement avec la vitesse réduite avec une pente approximativement égale à 1.

Les points expérimentaux sont pratiquement tous situés dans un intervalle de la vitesse réduite U_r où le modèle prédit un accrochage de la fréquence de l'instabilité sur la fréquence propre des plantes, voir Figure 4.1. Le mécanisme d'accrochage, révélé par l'analyse de stabilité temporelle du modèle couplé, permet donc d'expliquer pourquoi l'ondulation cohérente des cultures se produit à la fréquence propre des plantes, indépendamment de la dynamique du vent, comme montré par les expériences.

En effet, les structures tourbillonnaires du vent et le mouvement cohérent des plantes résultent bien d'un mécanisme d'instabilité de type Kelvin-Helmholtz lié à l'inflexion du profil de vent, comme montré par Raupach *et al.* (1996) et confirmé par l'analyse du modèle couplé, section 3.3. Ce mécanisme sélectionne en principe une longueur d'onde fixée par l'épaisseur de vorticité du profil, et donc indépendante de la vitesse moyenne du vent U , et une fréquence temporelle augmentant avec U , voir les courbes correspondant au modèle découplé Figure 4.1. Dans l'intervalle des vitesses de vent mesurées lors des expériences, la fréquence naturelle de Kelvin-Helmholtz est proche de la fréquence propre f_0 des plantes : la fréquence de l'instabilité vient donc s'accrocher sur f_0 , par le mécanisme d'accrochage décrit sections 3.4 et 3.5. Par conséquence de l'accrochage, la fréquence de l'instabilité régissant la dynamique du vent et le mouvement cohérent du couvert est constante par rapport à U , et la longueur d'onde augmente avec U , tous deux étant fixés par la rigidité du couvert végétal.

Le mécanisme d'accrochage a en revanche peut d'effet sur la vitesse de phase des ondes, qui est globalement proportionnelle à la vitesse réduite que l'on se trouve ou non dans l'intervalle d'accrochage (Figure 4.1).

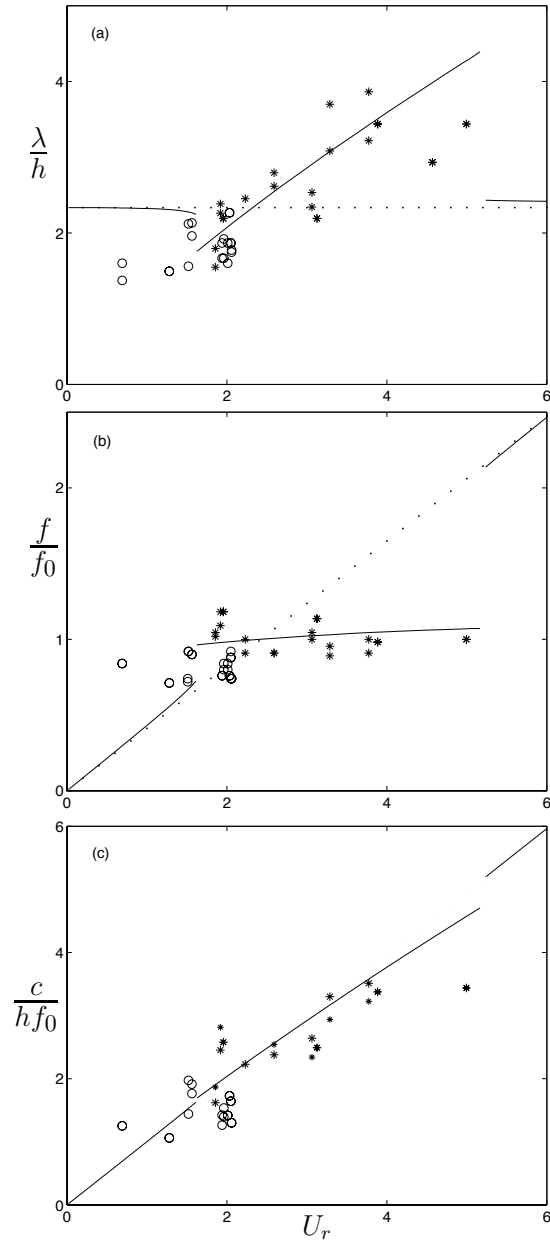


FIG. 4.1 – Comparaison des propriétés des ondes mesurées sur le mouvement des champs de luzerne (*) et de blé (o) (reproduits des Figures 2.13, 2.14 et 2.15) avec les prédictions du modèle couplé (—) : longueur d’onde (a), fréquence (b) et vitesse de phase (c) normalisées, en fonction de la vitesse réduite. La ligne pointillée (· · ·) représente les évolutions résultant du modèle de couche de mélange non couplé, suivant Raupach *et al.* (1996).

4.2 Conséquences

L'accrochage en fréquence de l'instabilité de Kelvin-Helmholtz sur la fréquence propre du couvert végétal permet de comprendre les propriétés des ondes formées par le mouvement des plantes sous le vent, montrées expérimentalement, et que l'analogie de couche de mélange de Raupach *et al.* (1996) ne suffisait pas à expliquer. L'accrochage en fréquence offre également une explication probable aux résultats expérimentaux de Finnigan (1979) montrant la fréquence dominante du vent au-dessus d'un champ de blé égale à la fréquence propre des tiges de blé.

Nous avons également montré, dans l'analyse de stabilité du modèle couplé, section 3.4, que le mécanisme d'accrochage faisait augmenter le taux de croissance de l'instabilité et renforçait sa sélectivité en terme de nombre d'onde. Quand il y a accrochage sur la fréquence propre des plantes, l'instabilité couplée est donc plus intense et plus efficace à sélectionner dans la turbulence environnante une longueur d'onde et une fréquence spécifiques. Cette intensification de l'instabilité de couche de mélange modifiée par l'accrochage en fréquence permet vraisemblablement d'expliquer comment cette instabilité est capable de se développer au sein des couverts végétaux de manière si frappante. Rappelons en effet que les instabilités de couche de mélange sont extrêmement sensibles au bruit (Huerre, 2000). Même dans les expériences contrôlées en laboratoire, l'observation des rouleaux de Kelvin-Helmholtz nécessite souvent de forcer l'écoulement à la fréquence naturelle de Kelvin-Helmholtz. Des questions étaient donc soulevées sur le moyen par lequel une instabilité de ce type pouvait se développer et persister dans le vent au-dessus des couverts végétaux (Finnigan, 2004). Le fait que l'oscillation des plantes joue sur l'intensité et la sélectivité du mécanisme de couche de mélange, par le phénomène d'accrochage, contribue certainement à expliquer le développement de cette instabilité au sein des couverts végétaux.

4.3 Amplitudes

Dans les expériences, l'amplitude du mouvement du couvert végétal a été mesurée en fonction de la vitesse du vent, cf Figure 2.12. Le modèle, en revanche, ne peut fournir l'amplitude des modes instables puisqu'il est linéaire. Cependant, on peut supposer que le taux de croissance de l'instabilité a une certaine influence sur l'amplitude résultante. Nous utilisons donc ici, pour normaliser les résultats expérimentaux de l'amplitude du mouvement, le taux de croissance ω_i^{max} calculé à l'aide du modèle couplé, pour les paramètres respectifs des deux couverts végétaux et la vitesse de vent considérée. Les données ainsi normalisées, $A/\omega_i^{max}h$ en fonction de la vitesse réduite U_r sont tracées sur la Figure 4.2.

Cette normalisation permet globalement de regrouper les données des deux couverts végétaux selon une même évolution, voir la Figure 4.2 en comparaison avec les résultats dimensionnels sur la Figure 2.12. La valeur du taux de croissance

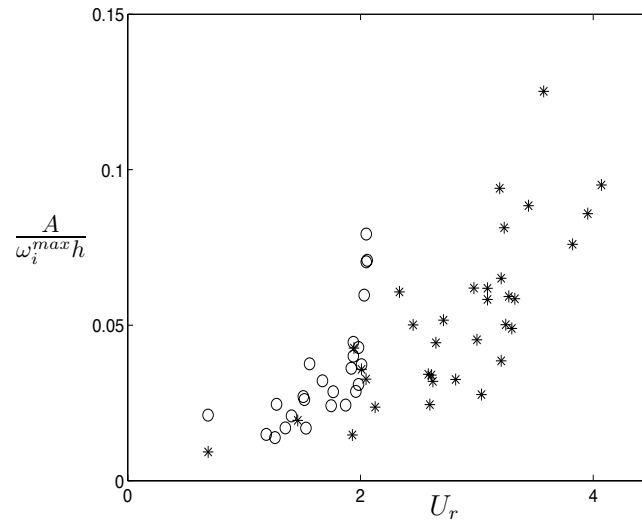


FIG. 4.2 – Amplitude du mouvement du couvert végétal normalisée par le taux de croissance de l’instabilité couplée en fonction de la vitesse réduite. (*) luzerne, (o) blé.

(pour U_r donné) étant assez proche pour les deux couverts végétaux, la fréquence propre f_0 est le seul paramètre intervenant dans la normalisation dont la valeur diffère significativement entre le blé et la luzerne (Tableau 2.1). Par conséquent, le regroupement des deux ensembles de points sur la Fig. 4.2 montre le rôle joué par la rigidité des plantes sur la différence d’intensité de mouvement en réponse au vent : le blé est plus rigide que la luzerne, il bouge donc moins pour un même niveau de vent.

Le décalage apparent de quelques points expérimentaux du blé, Figure 4.2, peut résulter de la sous-estimation de f_0 sur l’échantillon de plantes de blé testées, liée à la dispersion naturelle des propriétés des plantes dans une même culture, comme cela a déjà été discuté en section 2.4.2. Ce décalage peut bien sûr également être lié à l’emploi d’un modèle linéaire pour normaliser l’intensité du mouvement, via le taux de croissance.

Chapitre 5

Conclusions et Perspectives

Cette thèse a porté sur l'analyse de l'interaction entre les fluctuations dominantes du vent et la dynamique des couverts végétaux induite par vent. On sait, depuis les travaux de Raupach *et al.* (1996), que les structures cohérentes du vent au-dessus des couverts végétaux résultent principalement d'un mécanisme d'instabilité de type couche de mélange, lié à l'inflexion du profil de vitesse moyen au sommet des plantes. Ces structures propagatives sont supposées être à l'origine de l'ondulation si frappante des cultures sous le vent. Cependant, les mouvements d'ensemble des couverts végétaux dûs au vent n'avaient jamais été précisément étudiés, malgré des applications importantes en agronomie.

Dans le Chapitre 2 de cette thèse, une technique expérimentale novatrice a été développée pour permettre la mesure, en condition naturelle, des mouvements globaux des cultures sous le vent. Cette technique de mesure, non intrusive, se base sur le principe de corrélations entre images et implique des algorithmes de PIV (Particle Image Velocimetry). Pour chaque séquence de mouvement filmée sur site, on dérive le champ de vitesse spatio-temporel de la surface du couvert végétal. Puis, une décomposition bi-orthogonale (BOD) du champ de vitesse permet d'identifier les structures cohérentes du mouvement du couvert. Une soixantaine de champs de vitesse spatio-temporels ont été obtenus par cette technique, pour des mouvements filmés sur des champs de blé et de luzerne sous diverses conditions de vent, et une trentaine d'entre eux ont ensuite été analysés par BOD. Les propriétés spatiales et temporelles des ondes formées par le mouvement du couvert sont obtenues pour divers niveaux de vent. Les résultats expérimentaux révèlent que les caractéristiques de ces ondes ne peuvent être entièrement expliquées par l'analogie de couche de mélange, généralement utilisée pour décrire la dynamique du vent au-dessus des couverts végétaux. On montre en particulier que la rigidité des plantes, également mesurée, joue un rôle important dans la sélection de la fréquence et de la longueur d'onde des mouvements cohérents du couvert.

Pour mieux comprendre l'influence de la dynamique des plantes sur le mécanisme d'instabilité à l'origine des fluctuations dominantes du vent et de l'ondulation des cultures, suggérée par les résultats expérimentaux, un modèle couplé est présenté et analysé dans le Chapitre 3. Le couvert végétal, traité comme un milieu continu équivalent, et régi par une équation d'onde, est couplé à l'écoulement du vent par une force de traînée. Une étude de stabilité linéaire autour d'un état de base, constitué d'un profil en ligne brisée pour le vent et du déplacement associé du couvert, permet d'obtenir les propriétés de l'instabilité couplée. On montre que le système couplé reste régi par une instabilité de type Kelvin-Helmholtz, liée à l'inflexion du profil de vent, mais que la prise en compte du mouvement du couvert par le couplage en modifie les propriétés. Quand la fréquence naturelle de Kelvin-Helmholtz est proche de la fréquence propre de vibration des plantes, la fréquence de l'instabilité dévie et vient s'accrocher sur la fréquence d'oscillation des plantes. Ce mécanisme d'accrochage mène à une instabilité couplée plus intense et plus sélective en terme de nombre d'ondes.

La confrontation des résultats expérimentaux et théoriques, dans le Chapitre 4, révèle un bon accord entre les propriétés spatiales et temporelles des mouvements cohérents des cultures sous le vent et celles des ondes issues de l'analyse de stabilité du modèle. La modification de l'instabilité de Kelvin-Helmholtz par l'accrochage en fréquence permet donc d'expliquer les caractéristiques de l'ondulation des cultures, notamment pourquoi le mouvement cohérent se fait à la fréquence propre des plantes, indépendamment de la vitesse du vent. Le rôle, ainsi démontré, de la dynamique des plantes sur le mécanisme à l'origine des ondes du vent et du couvert permet aussi vraisemblablement d'expliquer le développement possible d'une telle instabilité dans le vent au sein des couverts végétaux malgré un niveau de bruit naturellement très élevé.

Ce couplage fort entre la dynamique du vent et le mouvement des plantes, par le mécanisme d'accrochage, mène à un changement de point de vue conséquent sur les mouvements des couverts végétaux sous le vent. Le mouvement d'une plante était habituellement vu comme le résultat d'un forçage dû au vent. Nous avons montré qu'un véritable couplage existe, et que l'ondulation des plantes induit en retour une modification de l'instabilité à l'origine des fluctuations dominantes du vent. Ce mécanisme d'accrochage, parce qu'il mène à une instabilité plus intense et donc des mouvements résultant plus forts, et parce qu'il sélectionne une fréquence d'ondulation du couvert égale à la fréquence propre des plantes, c'est à dire leur fréquence de résonance, joue vraisemblablement un rôle important dans le phénomène de verse des cultures.

Quelques perspectives de cette étude sont maintenant abordées. Tout d'abord, le modèle couplé considéré ici est linéaire, et par conséquent les amplitudes limites des modes instables ne peuvent être obtenus. Son extension à un modèle

non-linéaire, incluant les non-linéarités à la fois du fluide et du solide, constituerait une perspective intéressante de ce travail. Les expériences sur site, par ailleurs, ont permis de mesurer les amplitudes du mouvement du couvert végétal sous le vent (Figures 2.12 et 4.2). Ces résultats expérimentaux, en plus d'être utiles à la connaissance des sollicitations subies par les plantes, peuvent aussi être employés comme un moyen de validation de futurs modèles non-linéaires. Les études de Moon & Kuroda (2001) et Brücker & Smith (2005) sur les problèmes d'interactions fluide-structure dans le comportement vibratoire de réseaux de tiges élastiques en écoulement transverse peuvent également aider à comprendre certains aspects non-linéaires du couplage vent / couvert.

Une autre limite de cette étude réside dans le fait que seule l'instabilité primaire 2D a pu être étudiée, le modèle étant seulement bi-dimensionnel. La couche de mélange du vent au-dessus des couverts végétaux devient rapidement tri-dimensionnelle (Figure 1.13). Cependant, on sait que les principales caractéristiques spatio-temporelle des ondes primaires 2D sont conservées en 3D (Finnigan, 2000), d'où la pertinence d'une première étude bi-dimensionnelle. Il serait intéressant maintenant d'étendre cette étude à une modélisation tri-dimensionnelle, incluant les mouvements transversaux pour l'écoulement du vent, et un degré de liberté supplémentaire dans le mouvement du couvert végétal, éventuellement avec couplage entre les deux directions d'oscillation suivant Farquhar *et al.* (2000).

De même, au niveau des expériences, nous nous sommes surtout concentrés ici sur la détection de la principale longueur d'onde des structures spatiales du mouvement du couvert, mais les données expérimentales incluent beaucoup plus d'informations. Une large base de données expérimentales est maintenant disponible pour étudier plus en détail l'ensemble du mouvement spatio-temporal du couvert végétal. Le couplage complet entre les structures tri-dimensionnelles du vent et le mouvement horizontal bi-dimensionnel de la surface du couvert végétal reste une question ouverte.

Enfin, nous avons considéré dans l'étude théorique un modèle de couvert végétal présentant des propriétés uniformes. En réalité, les plantes présentent une variabilité très grande au niveau de leurs caractéristiques géométriques et mécaniques, même au sein d'une même culture. Il est donc assez frappant que l'on soit arrivé à un tel accord entre les résultats théoriques et expérimentaux, malgré la dispersion dans l'échantillon de plantes testées (section 2.3) et en dépit de l'homogénéité artificielle du couvert considéré dans le modèle. Pour une analyse encore plus fiable, il pourrait être intéressant d'inclure dans une version future du modèle une variabilité statistique des propriétés mécaniques du couvert végétal.

Bibliographie

- AMBROISE, R., BARNAUD, M., MANCHON, O. & VEDEL, G. 1998 Bilan de l'expérience des plans de développement durable du point de vue de la relation agriculture-environnement. *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA* **34**.
- AUBRY, N., GUYONNET, R. & LIMA, R. 1991 Spatiotemporal analysis of complex signals : theory and applications. *Journal of Statistical Physics* **64**, 683–739.
- AYLOR, D. E. 2005 Quantifying maize pollen movement in a maize canopy. *Agricultural and Forest Meteorology* **131**, 247–256.
- BAKER, C. J. 1995 The development of a theoretical model for the windthrow of plants. *Journal of Theoretical Biology* **175**, 355–372.
- BERRY, P. M., STERLING, M., BAKER, C. J., SPINK, J. & SPARKES, D. L. 2003 A calibrated model of wheat lodging compared with field measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* **119**, 167–180.
- BLEVINS, R. D. 1990 *Flow-Induced Vibration*, 2nd edn. van Nostrand Reinhold.
- BOYER, N. 1967 Modification de la croissance de la tige de bryone (*bryonia dioica*) à la suite d'irritations tactiles. *Compte Rendu de l'Académie des Sciences de Paris* **264**, 2114–2117.
- BROWN, G. L. & ROSHKO, A. 1974 On density effects and large structure in turbulent mixing layers. *Journal of Fluid Mechanics* **64**, 775–816.
- BRÜCKER, C. & SMITH, M. 2005 Wake interaction of arrays of flexible cylinders in boundary layer flows. In *Fourth Conference on Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibrations* (ed. T. Leweke & C. H. K. Williamson), pp. 291–294. Santorini, Greece, 21-24 June.
- 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. & IRVINE, M. R. 1999 The control of coherent eddies in vegetation canopies : streamwise structure spacing, canopy shear scale and atmospheric stability. *Boundary-Layer Meteorology* **94**, 139–163.
- COUTAND, C. 1999 Etude biomécanique de l'effet d'une flexion contrôlée sur la croissance primaire de la tige de tomate (*lycopersicon esculentum* mill.). PhD thesis, Université de Bordeaux I.
- COUTAND, C. & MOULIA, B. 2000 Biomechanical study of the effect of a controlled bending on tomato stem elongation : local strain sensing and spatial integration of the signal. *Journal of Experimental Botany* **51** (352), 1825–1842.
- CROOK, M. J. & ENNOS, A. R. 1996 Mechanical differences between free-standing and supported wheat plants, triticum aestivum l. *Annals of Botany* **77** (3), 197–202.
- DIMOTAKIS, P. E. & BROWN, G. L. 1976 The mixing layer at high Reynolds number : large-structure dynamics and entrainment. *Journal of Fluid Mechanics* **78**, 535–560.
- DOARÉ, O., MOULIA, B. & DE LANGRE, E. 2004 Effect of plant interaction on wind-induced crop motion. *Transactions of the ASME, Journal of Biomechanical Engineering* **126**, 146–151.
- DRAZIN, P. G. & REID, W. H. 1981 *Hydrodynamic stability*. Cambridge University Press.
- FACCHINETTI, M., DE LANGRE, E. & BIOLLEY, F. 2004 Coupling of structure and wake oscillators in vortex-induced vibrations. *Journal of Fluids and Structures* **19** (2), 123–140.
- FARQUHAR, T. & MEYER-PHILLIPS, H. 2001 Relative safety factors against global buckling, anchorage rotation, and tissue rupture in wheat. *Journal of Theoretical Biology* **211** (1), 55–65.
- FARQUHAR, T., WOOD, J. Z. & VAN BEEM, J. 2000 The kinematics of a wheat struck by a wind gust. *Transactions of the ASME, Journal of Applied Mechanics* **67**, 496–502.
- FARQUHAR, T., ZHOU, J. & HASLACH, H. 2003 A possible mechanism for sensing crop canopy ventilation. In *Sensors and sensing in biology and engineering* (ed. F. Barth, J. Humprey & T. Secomb). Ch. 15.
- FARQUHAR, T., ZHOU, J. & WOOD, W. H. 2002 Competing effects of buckling and anchorage strength on optimal wheat stalk geometry. *Journal of Biomechanical Engineering* **124**, 441–449.

- FINNEY, D. J. 1964 *Statistical method in biological assay*. Charles Griffin, London.
- FINNIGAN, J. J. 1979 Turbulence in waving wheat. I. Mean statistics and honami. *Boundary-Layer Meteorology* **16**, 181–211.
- FINNIGAN, J. J. 2000 Turbulence in plant canopies. *Annual Review of Fluid Mechanics* **32**, 519–571.
- FINNIGAN, J. J. 2004 Private communication .
- FLESCH, T. & GRANT, R. 1991 The translation of turbulent wind energy to individual corn plant motion during senescence. *Boundary Layer Meteorology* **55**, 161–177.
- FLESCH, T. & GRANT, R. 1992a Corn motion in the wind during senescence : I. Motion characteristics. *Agronomy Journal* **84**(4), 742–747.
- FLESCH, T. K. & GRANT, R. H. 1992b Corn motion in the wind during senescence : II. Effect of the dynamic plant characteristics. *Agronomy Journal* **84** (4), 748–751.
- FOURNIER, M., STOKES, A., COUTAND, C., FOURCAUD, T. & MOULIA, B. 2005 Tree biomechanics and growth strategies in the context of forest functional ecology. In *Ecology and biomechanics* (ed. A. Herrel & T. Speck). Springer Verlag, on Press.
- GHISALBERTI, M. & NEPF, H. M. 2002 Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows. *Journal of Geophysical Research* **107** (C2), 1–11.
- GUYON, E., HULIN, J. P. & PETIT, L. 1991 *Hydrodynamique physique*. Inter-Editions, Editions du CNRS.
- HÉMON, P. & SANTI, F. 2003 Applications of biorthogonal decompositions in fluid-structure interactions. *Journal of Fluids and Structures* **17**, 1123–1143.
- HO, C. M. & HUERRE, P. 1984 Perturbed free shear layers. *Annual Review of Fluid Mechanics* **16**, 365–424.
- HUERRE, P. 2000 Open shear flow instabilities. In *Developments in Fluid Mechanics : A Collection for the Millenium* (ed. G. K. Batchelor, H. K. Moffatt & M. G. Worster). Cambridge University Press.
- HUERRE, P. & ROSSI, M. 1998 Hydrodynamic instabilities in open flow. In *Hydrodynamics and Nonlinear Instabilities* (ed. C. Godrèche & P. Manneville), pp. 81–294. Cambridge University Press.

- INOUE, E. 1955 Studies of the phenomena of waving plants ("honami") caused by wind. Part 1 : Mechanism and characteristics of waving plants phenomena. *Journal of Agricultural Meteorology (Japan)* **11**, 71–82.
- JACOBS, M. R. 1954 The effect of wind sway on the form and development of *pinus radiata* d. don. *Australian Journal of Botany* **2**, 35–51.
- JAFFE, M. 1973 Thigmomorphogenesis : the response of plant growth and development to mechanical stimulation, with special reference to bryonia dioica. *Planta* **114**, 143–157.
- JAROSZ, N., LOUBET, B., DURAND, B., MCCARTNEY, A., FOUPELLASSAR, X. & HUBER, L. 2003 Field measurements of airborne concentration and deposition rate of maize pollen. *Agricultural and Forest Meteorology* **119**, 37–51.
- KAIMAL, J. C. & FINNIGAN, J. J. 1994 *Atmospheric Boundary Layer Flows*. Oxford University Press.
- KAIMAL, J. C., WYNGAARD, J. C., IZUMI, Y. & COTÉ, O. R. 1972 Spectral characteristics of surface layer turbulence. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* **98**, 563–589.
- DE LANGRE, E. 2005 Some basic ingredients of VIV and VIW using wake oscillator models. In *Fourth Conference on Bluff Body Wakes and Vortex-Induced Vibrations* (ed. T. Leweke & C. H. K. Williamson), pp. 225–228. Santorini, Greece, 21-24 June.
- MADDEN, L. V. 1992 Rainfall and the dispersal of fungal spores. *Advanced Plant Pathology* **8**, 40–79.
- MOON, F. C. & KURODA, M. 2001 Spatio-temporal dynamics in large arrays of fluid-elastic, Toda-type oscillators. *Physics Letters A* **287**, 379–384.
- MOULIA, B. 2005 Communication personnelle .
- MOULIA, B. & COMBES, D. 2004 Thigmomorphogenetic acclimation of plants to moderate winds greatly affects height structure in field-grown alfalfa (*medicago sativa* l.), an indeterminate herb. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A : Molecular & Integrative Physiology* **137** (3-S1), 77.
- MUSTE, M., XIONG, Z., KRUGER, A. & FUJITA, I. 1999 Error estimation in piv applied to large-scale flows. In *Proceedings of the third International Workshop on PIV* (ed. A. Adrian, Y. Hassan & C. Meinhart).
- NIKLAS, K. J. 1992 *Plant Biomechanics : an engineering approach to plant form and function*. Univ. Chicago Press.

- ORTIZ, S., CHOMAZ, J. M. & LOISELEUX, T. 2002 Spatial Holmboe instability. *Physics of Fluids* **14** (8), 2585–2597.
- PANTON, R. 1996 *Incompressible Flow*, 2nd edn. Wiley-Interscience publication, Ch. 22.
- PEAKE, N. 1997 On the behavior of a fluid-loaded cylindrical shell with mean flow. *Journal of Fluid Mechanics* **338**, 347–410.
- PIERREHUMBERT, R. T. & WIDNALL, S. E. 1982 The two- and three-dimensional instabilities of a spatially periodic shear layer. *Journal of Fluid Mechanics* **112**, 467–474.
- PY, C., DE LANGRE, E. & MOULIA, B. 2004 The mixing layer instability of wind over a flexible crop canopy. *Comptes-Rendus Mécanique* **332**, 613–618.
- PY, C., DE LANGRE, E., MOULIA, B. & HÉMON, P. 2005 Measurement of wind-induced motion of crop canopies from digital video images. *Agricultural and Forest Meteorology* **130**, 223–236.
- RAFFEL, M., WILLERT, C. & KOMPENHANS, J. 1998 *Particle Image Velocimetry : a practical guide*, 3rd edn. Springer-Verlag, Berlin.
- 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.
- RAUPACH, M. R. & THOM, A. S. 1981 Turbulence in and above plant canopies. *Annual Review of Fluid Mechanics* **129**, 13–97.
- ROGERS, M. R. & MOSER, R. D. 1994 Direct simulation of a self-similar turbulent mixing layer. *Physics of Fluids* **6**, 903–922.
- SAINT-JEAN, S., CHELLE, M. & HUBER, L. 2004 Modelling water transfer by rain-splash in a 3d canopy using monte carlo integration. *Agricultural and Forest Meteorology* **121**, 183–196.
- SALENÇON, J. 2001 *Handbook of continuum mechanics*. Springer.
- SPATZ, H. C. & SPECK, O. 2002 Oscillation frequencies of tapered plant stems. *American Journal of Botany* **89** (1), 1–11.
- STERLING, M., BAKER, C. J., BERRY, P. M. & WADE, A. 2003 An experimental investigation of the lodging of wheat. *Agricultural and Forest Meteorology* **119**, 149–165.
- SVEEN, J. K. 2000 An introduction to MatPIV 1.4.
<http://www.math.uio.no/jks/matpiv/index.html> .

- THORPE, S. A. 1969 Experiments on the instability of stratified shear flows : immiscible fluids. *Journal of Fluid Mechanics* **39**, 25–48.
- TOWNSEND, A. A. 1976 *The structure of turbulent shear flow*. Cambridge University Press.
- WILLIAMSON, C. H. K. & GOVARDHAN, R. 2004 Vortex induced vibrations. *Annual Review of Fluid Mechanics* **36**, 413–455.
- WINANT, C. D. & BROWAND, F. K. 1974 Vortex pairing : the mechanism of turbulent mixing layer growth at moderate Reynolds numbers. *Journal of Fluid Mechanics* **63**, 237–255.

Annexe A

Redressement des images

A.1 Transformation géométrique due à la perspective

On rappelle ici quelques calculs élémentaires de projection de perspective. Le but est d'aboutir à l'expression analytique de la transformation de perspective, et d'utiliser celle-ci pour mesurer la distorsion d'une image.

Vu de la caméra, point O , Figure A.1, un point $M(X, 0, Z)$ situé sur le plan réel, dans notre cas la surface du couvert, est projeté sur le plan image en $M'(X', Y', Z')$. Le plan image est défini par O, M et M' étant alignés, et AM' orthogonal à OA , A étant le centre de l'image. Ceci permet d'exprimer les coordonnées images X', Y', Z' en fonction des coordonnées réelles X, Z dans le repère $(A, \mathbf{E}_X, \mathbf{E}_Y, \mathbf{E}_Z)$:

$$X' = \frac{Xd}{Y \sin \theta + d}, \quad Y' = \frac{-Zd \sin \theta \cos \theta}{Z \sin \theta + d}, \quad Z' = \frac{Zd \cos^2 \theta}{Z \sin \theta + d}. \quad (\text{A.1})$$

Dans le repère du plan image $(A, \mathbf{e}_x, \mathbf{e}_z)$, les coordonnées de M' sont alors

$$x = \frac{Xd}{Z \sin \theta + d}, \quad z = \frac{Zd \cos \theta}{Z \sin \theta + d}, \quad (\text{A.2})$$

expressions qui peuvent s'écrire sous la forme

$$\begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} = \Phi \left(\begin{bmatrix} X \\ Z \end{bmatrix} \right) = \begin{bmatrix} f(X, Y) \\ g(Z) \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

où Φ est la transformée géométrique de la perspective. Suivant les concepts utilisés en cinématique, voir par exemple Salençon (2001), on définit le gradient de la transformation, $\mathbb{F} = \nabla \Phi$, et le tenseur de dilatation, $\mathbb{C} = \mathbb{F}^T \mathbb{F}$, ce qui permet d'exprimer la transformation d'un produit scalaire :

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = \mathbf{A} \cdot \mathbb{C} \cdot \mathbf{B}, \quad (\text{A.4})$$

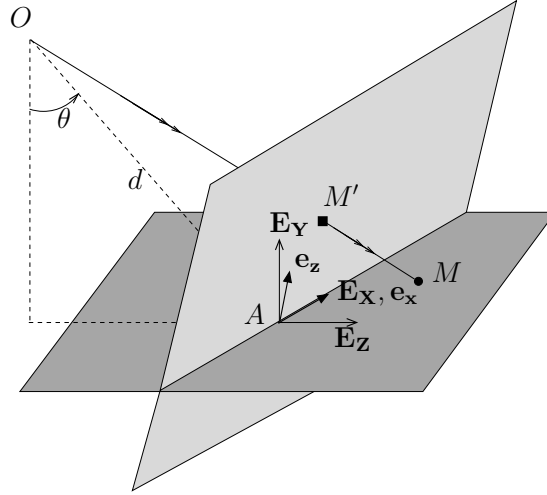


FIG. A.1 – *Projection de perspective : plan réel (le couvert) en gris foncé, plan image en gris clair, et position de la caméra en O.*

où \mathbf{A} et \mathbf{B} sont deux vecteurs appartenant au plan réel, et \mathbf{a} , \mathbf{b} leurs images respectives par la transformation Φ . En choisissant deux vecteurs identiques, l'équation (A.4) donne l'expression de la transformation d'une longueur. Une longueur horizontale L_X (respectivement verticale L_Z) sur le plan réel est transformée en l_x (resp. l_z) comme suit (Fig. A.2(b)) :

$$l_x^2 = L_X^2 \left(\frac{\partial f}{\partial X} \right)^2, \quad l_z^2 = L_Z^2 \left(\left(\frac{\partial f}{\partial Z} \right)^2 + \left(\frac{\partial g}{\partial Z} \right)^2 \right), \quad (\text{A.5})$$

ce qui mène ici à

$$l_x = L_X \left(1 - \frac{\tan \theta}{d} z \right), \quad (\text{A.6})$$

et suivant la ligne $x = 0$

$$l_z = L_Z \cos \theta \left(1 - \frac{\tan \theta}{d} z \right)^2. \quad (\text{A.7})$$

Mesurer sur une image prise de biais, les évolutions selon la direction z de deux longueurs de référence l_x et l_z , qui sont les transformées respectivement des longueurs réelles L_X et L_Z , permet donc par identification avec (A.6) et (A.7) de trouver les paramètres de perspective θ et d .

Pour les images des couverts végétaux, les longueurs de références sont les distances entre mires voisines (avec $L_X = L_Z$). On repère sur l'image l'intersection de chaque mire avec la surface du couvert, Fig. A.2(a), obtenant ainsi un maillage déformé. Puis on mesure les distances entre mires dans les directions

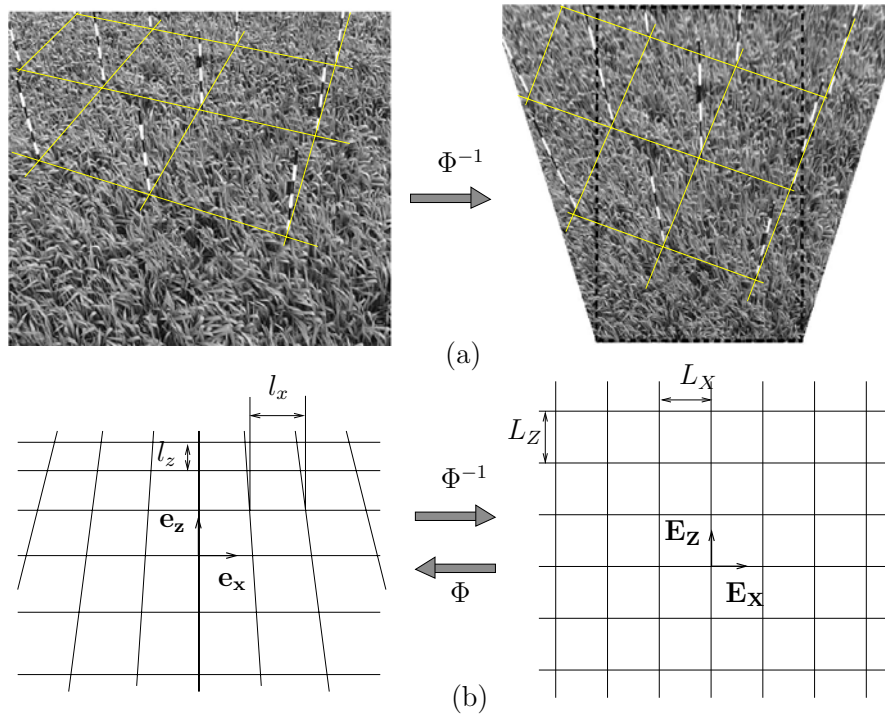


FIG. A.2 – (a) Mesure de la distorsion à l'aide des mires qui forment une grille de référence. (b) à gauche : grille régulière vue de biais, déformée par la perspective, à droite : grille redressée.

horizontales et verticales du maillage (ou leur projections suivant x et z dans le cas où le réseau de mires n'est pas exactement aligné avec les axes de l'image). Après redressement, on peut vérifier que les distances entre mires sont constantes sur toute l'image, voir Fig. A.2(a).

Notons enfin que ce type de redressement, basé sur seulement 3 paramètres (θ, d, L), ne permet pas de corriger la distorsion due à l'aberration des lentilles, qui est ici un effet secondaire.

A.2 Mesure des paramètres de perspective sans utilisation de mires

Quand on ne dispose pas de points de références comme les mires, on peut mesurer la distorsion de l'image du couvert végétal en se basant sur sa régularité naturelle. L'idée est simple : si notre oeil est capable de percevoir la perspective sur une image quelconque prise de biais, c'est que le signal lumineux de cette image contient l'information de distorsion. Sur une photo prise de biais,

les plantes apparaissent plus petites en haut de l'image qu'elles ne le sont en bas. Les échelles de longueur caractéristiques d'une culture, comme la taille des plantes ou la largeur de leurs feuilles, apparaissent comme des longueurs d'onde dans les fluctuations spatiales du signal lumineux de l'image. On définit une telle longueur d'onde sur le signal niveau de gris g de l'image par une simple formule de fréquence centrale (fréquence de Rice), comme suit

$$l = 2\pi \frac{\langle g \rangle_i}{\langle \frac{\partial g}{\partial s} \rangle_i}, \quad (\text{A.8})$$

où s et $\langle \rangle$ sont respectivement la coordonnée spatiale et l'écart-type selon la ligne i . En considérant sur l'image des lignes parallèles à l'axe x (respectivement à l'axe z) les longueurs caractéristiques l_x (resp. l_z) peuvent être estimées ainsi que leurs évolutions par rapport à z en faisant varier la position en z de la ligne i considérée. On suppose ensuite que ces évolutions de $l_x(z)$ et $l_z(z)$ suivent celles prédites par les équations (A.6) et (A.7), ces longueurs étant les transformées géométriques d'une longueur unique $L = L_X = L_Z$ puisque le champ est supposé être isotrope. Les paramètres L , θ et d sont ensuite estimés par des fits linéaires de l_x et $\sqrt{l_z}$ en fonction de z .

Cette technique de mesure de la distorsion de perspective basée sur une échelle de longueur caractéristique de l'image du champ offre l'avantage d'être portable. Elle ne nécessite pas de planter au préalable des mires de référence dans le champ, si bien que n'importe quelle partie du champ peut-être filmée sans préparation spécifique. De plus, l'absence de mires fait qu'aucune zone du champ n'est masquée sur l'image. En revanche, cette technique présente des limites importantes. Il faut que le champ soit visuellement bien homogène. Si ce n'est pas le cas, les variations du signal niveau de gris de l'image sont perturbées par d'autres échelles de longueur, comme par exemple l'effet de reflets de lumière localisés; la longueur l calculée avec (A.8) ne correspond alors plus aux tailles des plantes mais contient aussi des traces de longueurs d'ondes plus grandes présentes dans le signal, d'où des erreurs dans l'estimation de la distorsion. Dans tous les cas, cette technique mène à une correction des images moins précise que celle obtenue quand la perspective est mesurée à l'aide de repères.

Annexe B

Articles

The mixing layer instability of wind over a flexible crop canopy

C. Py, E. de Langre and B. Moulia

Comptes-Rendus Mécanique, 2004, **332**, 613-618.

Measurement of wind-induced motion of crop canopies from digital video images

C. Py, E. de Langre, B. Moulia, and P. Hémon

Agricultural and Forest Meteorology, 2005, **130**, 223-236.

A frequency lock-in mechanism in the interaction between wind and crop canopies

C. Py, E. de Langre and B. Moulia

soumis à *Journal of Fluid Mechanics*, 2005.

