

Mesure des mouvements induits par le vent sur les cultures

On s'intéresse dans ce Chapitre à la caractérisation du mouvement des cultures sous le vent. Comme nous l'avons vu en Introduction, peu d'études ont été menées sur le sujet, et la plupart d'entre elles concernent la caractérisation du mouvement de plantes individuelles (Finnigan, 1979; Flesch & Grant, 1991; Sterling *et al.*, 2003). Outre quelques rapports d'observations (Finnigan, 1979), on ne dispose pas de données expérimentales sur les mouvements globaux des couverts végétaux dus au vent, et en particulier sur le phénomène d'ondulation des cultures. Ceci vient de l'absence de technique expérimentale permettant de mesurer sur site de tels mouvements. Une nouvelle approche expérimentale, présentée ci-après, a été mise au point pour mesurer les mouvements globaux des cultures en condition naturelle.

2.1 Problématique

L'emploi de capteurs ou de jauges de déformation est limité à la mesure du mouvement de plantes individuelles (Finnigan, 1979; Flesch & Grant, 1991; Sterling *et al.*, 2003). De plus, la légèreté et la flexibilité des plantes de culture, comme le blé et la luzerne à leur stade végétatif, rend l'emploi de tels systèmes délicat puisqu'ils peuvent perturber le mouvement et donc la mesure. Une technique de mesure non-intrusive est donc nécessaire. De plus, pour caractériser des mouvements d'ondulation, c'est à dire s'intéresser à la dynamique spatio-temporelle, il faut pouvoir mesurer simultanément le mouvement d'un grand ensemble de plantes avec de bonnes résolutions spatiale et temporelle.

Pour toutes ces raisons, une technique de mesure optique est appropriée. Elle consistera ici à filmer les mouvements des cultures en présence de vent, puis à en déduire le mouvement par une analyse de corrélation entre images basée sur des algorithmes de PIV (Particle Image Velocimetry). Une décomposition

bi-orthogonale permettra ensuite d'extraire de ce mouvement les principales caractéristiques spatio-temporelles.

La section 2.2 de ce chapitre présente l'approche expérimentale utilisée pour mesurer en condition naturelle les mouvements des cultures dus au vent. Cette technique expérimentale a été publiée dans *Agricultural and Forest Meteorology* (Py *et al.*, 2005), voir article joint en Annexe B. Dans la section 2.3, on décrit la mesure des propriétés mécaniques des plantes formant le couvert. Les résultats expérimentaux sur les mouvements des cultures sont présentés en section 2.4 et discutés en section 2.5.

2.2 Technique expérimentale

2.2.1 Acquisition des données

Les mesures sur site du mouvement des cultures dû au vent ont été menées au centre INRA de Lusignan en mai 2003 et mai 2004 : la première campagne expérimentale a permis de tester la technique, tandis que les résultats présentés section 2.4 sont issus de la deuxième série de mesures. Nous nous sommes intéressés à deux végétaux bien différents, le blé (*Triticum aestivum* L. cv *Apache*) et une plante fourragère, la luzerne (*Medicago sativa* L. cv *Mercedes*), de manière à obtenir, comme nous le verrons plus loin, des comportements mécaniques différents. Les champs de blé et de luzerne ont été cultivés par l'INRA avec des techniques agricoles standards.

Les mouvements des couverts végétaux sont filmés depuis le bord du champ à l'aide d'une caméra placée à environ 3 mètres de hauteur sur un trépied, voir Figure 2.1. Des séquences de mouvement de 10 à 40 secondes sont enregistrées. Pendant chaque séquence, on mesure simultanément la vitesse du vent juste au dessus de la surface du couvert. Ceci permettra dans la suite de relier les propriétés du mouvement à l'intensité du vent. Pour les deux couverts végétaux, des films sont réalisés pour différentes positions de la caméra par rapport à la direction du vent.

La résolution temporelle de la caméra est de 25 images par secondes, et la taille des images de 720*576 pixels (format DV). Les films sont par la suite numérisés et transformés en séquences d'images à l'aide du logiciel Adobe Premiere (Adobe Systems Incorporated). Seul le niveau de gris des images est considéré et celles-ci sont traitées dans la suite comme des matrices mathématiques. Avant d'être utilisées pour en déduire le mouvement du couvert, les images sont d'abord corrigées de l'effet de perspective, comme détaillé ci-après.

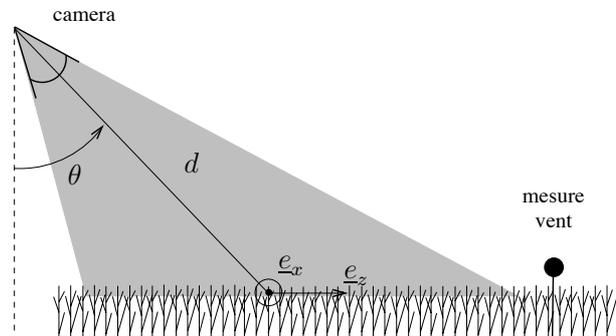


FIG. 2.1 – Schéma du dispositif expérimental pour la mesure des mouvements des cultures sous le vent : θ et d définissent la position de la caméra par rapport au couvert et $(\underline{e}_x, \underline{e}_z)$ le repère dans lequel est décrit le mouvement.

2.2.2 Redressement des images

Comme les mouvements sont filmés depuis le bord du champ, les images sont déformées par la perspective : autrement dit, les échelles de longueur sont plus petites en haut de l'image qu'elles ne le sont en bas. Cette déformation géométrique doit être corrigée avant d'exploiter les images pour mesurer le mouvement. Ce type de correction est classique en mesure optique, voir par exemple Muste *et al.* (1999).

Pour mesurer la distorsion due à la perspective, nous avons planté au préalable dans les champs de blé et de luzerne (c'est-à-dire avant que les plantes n'aient poussé) deux réseaux de mires régulièrement espacées, comme on peut le voir sur la Figure 2.2. Vues de haut, ces mires forment un maillage de référence régulier. Vues de biais, depuis la caméra, les mires semblent plus proches les unes des autres en haut de l'image qu'en bas : le maillage est déformé par la perspective. La transformation géométrique due à la perspective, dont l'expression est donnée en Annexe A, ne dépend que des paramètres d'observation, c'est à dire l'angle de visée θ et la distance virtuelle d de la caméra au centre de l'objet, Fig. 2.1. Sur l'image vue de biais, on mesure la distance entre mires voisines dans les deux directions du maillage du bas jusqu'au haut de l'image. L'évolution de ces longueurs de références de bas en haut sur l'image par rapport à la distance réelle entre mires permet d'obtenir une estimation des paramètres θ et d régissant la transformation géométrique*, voir Annexe A.

Une fois ces paramètres calculés pour une image d'une séquence, la correction, c'est à dire la transformation géométrique inverse, est appliquée à chaque pixel de l'image initiale (Annexe A) puis on fait de même pour chacune des images

*Par sécurité, une mesure additionnelle de l'angle θ était réalisée à l'aide d'un inclinomètre fixé à la caméra. Les valeurs de θ obtenues par les deux méthodes coïncidaient à 1 ou 2 degrés près.

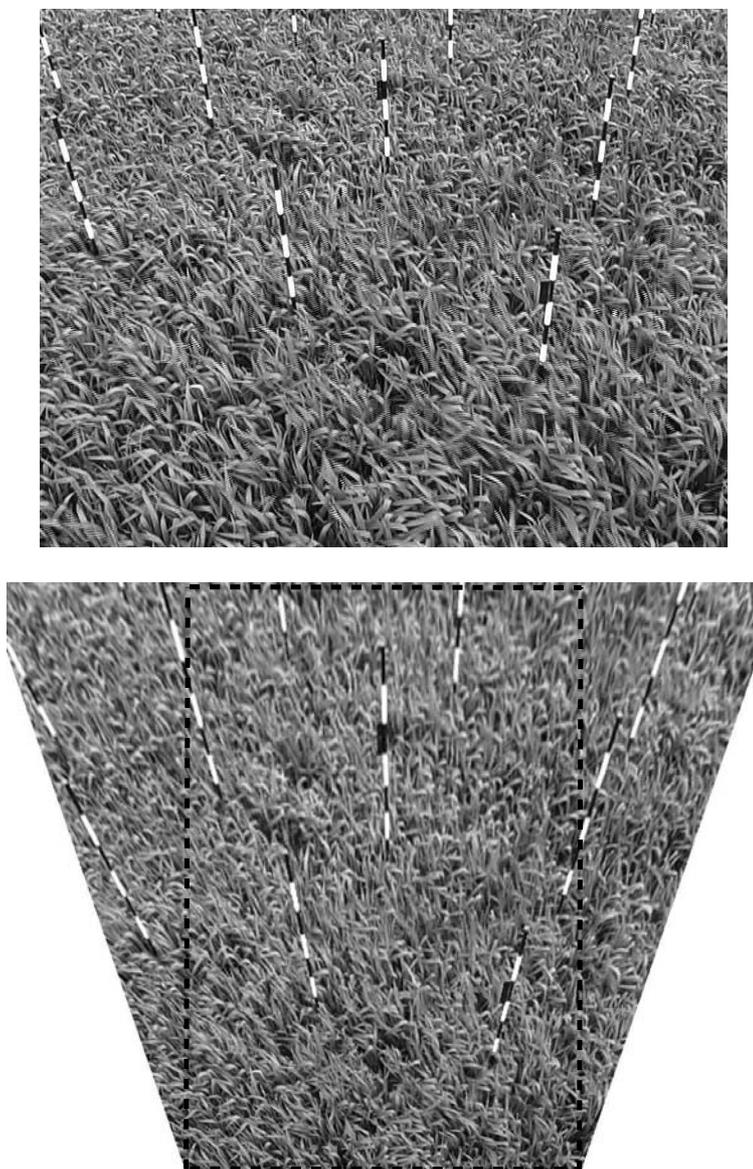


FIG. 2.2 – Image du champ de blé filmé en présence de vent. Les mires régulièrement espacées sont utilisées pour redresser l'image. En haut : image initiale (dimension : 572x716 pixels). A bas : image redressée (dimension du rectangle central : 731x530 pixels).

de la séquence. Dans cette opération de redressement, le maillage en pixel de l'image originale est déformé (étiré en haut, compressé en bas), et c'est sur ce nouveau maillage que le signal niveau de gris est interpolé, voir Fig. 2.2. Seule la zone rectangulaire centrale de l'image redressée est conservée pour la suite des traitements. Sur l'image redressée, les mires sont régulièrement espacées : l'échelle de longueur est homogène. Ce sont sur ces images redressées que le mouvement du couvert végétal est ensuite mesuré.

Si l'utilisation de mires de référence est le moyen le plus classique et le plus sûr de mesurer l'effet de perspective dans un champ, l'opération n'est cependant pas anodine : le plantage et l'alignement précis des mires dans les deux champs de blé et de luzerne nécessite pratiquement 2 jours de travail à 4 personnes. Lors de la première campagne expérimentale (2003), nous ne disposions pas d'un tel système et une autre technique de mesure de la perspective avait été imaginée. Celle-ci repose sur la régularité naturelle d'une culture. En effet, dans un champ, des échelles de longueur caractéristiques peuvent être trouvées, comme la distance entre plantes ou la taille des feuilles. Si le sol, l'ensoleillement et l'arrosage sont homogènes, ces longueurs caractéristiques peuvent être supposées constantes sur tout le champ. Sur une image, toute variation globale de ces longueurs résulte donc d'un effet de perspective, et peut par conséquent être exploitée pour estimer les paramètres de distorsion. Pour ce faire, une échelle de longueur dérivée des propriétés statistiques de la variation spatiale du signal niveau de gris de l'image avait été utilisée. Plus de détails sur cette technique sont donnés en Annexe A.

2.2.3 Mesure du mouvement par corrélation entre images

La technique PIV

La technique utilisée pour mesurer le mouvement du couvert végétal est optique et s'appuie sur le principe de la corrélation entre images. Plus particulièrement, on utilise ici une technique de corrélation et des algorithmes de PIV (Particle Image Velocimetry). La PIV est une technique de mesure aujourd'hui extrêmement courante en dynamique des fluides, voir Raffel *et al.* (1998). Elle permet de capter instantanément le champ de vitesse complet d'un écoulement même complexe. Avant d'expliquer plus en détail l'application de la PIV à la mesure du mouvement du couvert, on donne ci-dessous quelques rappels brefs sur la PIV en dynamique des fluides.

La mesure d'un écoulement par PIV nécessite au préalable d'ensemencer le fluide avec des petites particules qui joueront le rôle de traceurs. On illumine ensuite l'écoulement à l'aide d'un plan laser pulsé à une fréquence élevée par rapport aux fréquences caractéristiques de l'écoulement. La lumière réfléchiée par les particules lors de chaque illumination est enregistrée et numérisée. Les images ainsi obtenues sont divisées en sous-régions, appelées fenêtres d'interrogation, sur-

lesquelles les corrélations vont être calculées. Pour chaque fenêtre d'interrogation, le vecteur local de déplacement du fluide entre deux illuminations successives est obtenu à l'aide de méthodes statistiques. Le niveau de correspondance entre deux mêmes fenêtres de deux clichés successifs, W_1 et W_2 centrées en (x, z) , est déterminé par la fonction d'inter-corrélation, définie comme :

$$R(x, z) = \sum_{i=-M/2}^{i=M/2} \sum_{j=-M/2}^{j=M/2} W_1(i, j) W_2(i + x, j + z), \quad (2.1)$$

où i et j sont des indices en pixels et M la taille en pixel de la fenêtre d'interrogation. La position du pic de la fonction d'inter-corrélation par rapport au centre de la première fenêtre donne le déplacement local du fluide entre les deux illuminations. La vitesse locale instantanée est ensuite définie par le déplacement divisé par l'intervalle de temps. On suppose dans cette technique que toutes les particules contenues dans une fenêtre ont bougé de manière homogène. Le calcul de corrélation est ensuite répété pour toutes les fenêtres d'interrogation d'une image PIV, menant ainsi au champ de vitesse spatial instantané, puis l'opération est répétée pour chaque intervalle de temps. Il est commun de considérer des fenêtres d'interrogation chevauchantes de manière à augmenter la résolution spatiale de la mesure.

Le principe de corrélation entre images de la PIV est maintenant appliqué à la mesure du mouvement d'un couvert végétal. Contrairement à la PIV standard, nous n'utilisons pas de traceurs artificiels pour cette mesure. Le couvert végétal joue lui-même le rôle de traceur naturel : les petites hétérogénéités locales de l'image du couvert (feuilles, portion de tiges, etc.) permettent en effet de détecter les déplacements locaux de la surface du couvert. De plus, aucun éclairage artificiel de type plan laser n'est nécessaire dans notre cas, puisque a) le soleil fournit une intensité lumineuse et un contraste suffisants pour que les hétérogénéités puissent être détectées pour les calculs de corrélation, b) le plan de mesure est défini naturellement par le sommet du couvert végétal pourvu que ce dernier soit suffisamment dense.

La résolution temporelle de la mesure est ici fixée par la résolution de la caméra, soit 25 Hz. Pour les calculs de corrélation, les images du mouvement du couvert, une fois redressées, sont divisées en fenêtres d'interrogation avec un chevauchement entre fenêtres de 50%. Pour notre application, la taille optimale d'une fenêtre correspond approximativement à la taille des patterns reconnaissables de l'image du couvert, c'est à dire typiquement un groupe de quelques feuilles. Le calcul de corrélation, à l'aide d'un algorithme classique de PIV (MatPIV sous Matlab, développé par Svein (2000)), incluant les routines de correction standards (signal to noise ratio, local/global filters, double pass calculation) est mené sur chaque fenêtre entre deux images successives et répété entre chaque image d'un film complet. Par cette technique, on aboutit, pour chaque séquence de mou-

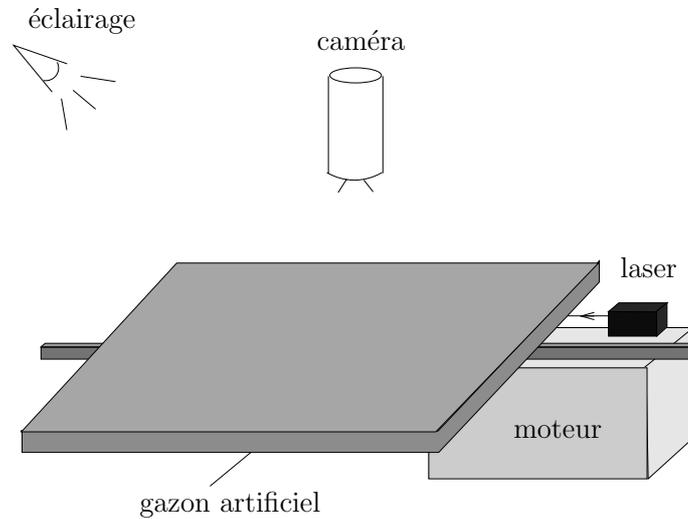


FIG. 2.3 – Schéma du montage visant à tester en laboratoire la technique de mesure du mouvement du couvert par PIV.

vement filmé sur site, au champ de vitesse bi-dimensionnel spatio-temporel de la surface du couvert végétal. On note ce champ de vitesse $\dot{\mathbf{X}}(x, z, t)$.

Validation de la technique de mesure

Pour tester l'efficacité de la technique type PIV sur la détection du mouvement du couvert végétal sans traceurs, un cas test a été mené en laboratoire. Un carré de 50 cm de côté de gazon artificiel est fixé sur une plaque mobile, voir Fig. 2.3. Celle-ci est actionnée par un moteur dans un mouvement oscillant rectiligne. Les brins d'herbe artificielle étant rigides, ils ont tous le même mouvement et suivent le mouvement de la plaque imposé par le moteur. Son déplacement en fonction du temps est mesuré à l'aide d'un faisceau laser impactant le côté de la plaque, et relié à un système d'acquisition. Simultanément, on filme le mouvement de la plaque de gazon avec une caméra positionnée au-dessus de celle-ci. La technique de PIV décrite précédemment est ensuite appliquée aux images du film, et on en déduit le champ de vitesse spatio-temporel de la surface de gazon.

Des petites hétérogénéités visuelles ont été créés sur la surface du gazon en pliant aléatoirement quelques fibres. Cela a permis d'avoir une image du gazon plus contrastée, ressemblant davantage à la texture d'une image de vrai champ, et d'obtenir de meilleurs calculs de corrélations dans la PIV. L'amplitude du mouvement de la plaque était de 1 cm, et on a fait varier sa fréquence d'oscillation entre 0.5 et 2 Hz. Sur le film, cela a mené à des déplacements du gazon de l'ordre de 1 à 4 pixels entre deux images successives. Le champ de vitesse obtenu par le calcul de PIV était uniforme et dans tous les cas, la fréquence temporelle

du mouvement ainsi que son amplitude vérifiaient les données mesurées par le laser avec une erreur inférieure à 5%. On a également fait varier la position de l'éclairage par rapport à la direction du mouvement, sans influence sur la qualité des résultats. L'efficacité du redressement d'images a aussi été vérifiée sur ce système en inclinant la caméra et en superposant au gazon une grille régulière jouant le rôle du réseau de mires.

Application à la mesure du mouvement d'un couvert végétal

L'application de la technique de mesure du mouvement par corrélation entre images est illustrée sur une séquence filmée sur le champ de blé de la Figure 2.2.

La taille initiale des fenêtres d'interrogations a été fixée dans cet exemple à 56 pixels (soit 22 cm sur la surface du champ), de manière à ce que le rapport moyen entre le pic de corrélation et le bruit (signal to noise ratio) soit supérieur à 1.5, signe d'une bonne précision du calcul de corrélation. Après calcul en double passe, cela mène à une résolution spatiale d'un point tous les 11 pixels, et à un champ de vitesse comportant 1850 points en espace. La durée de la séquence considérée est de 10 s, soit 250 points en temps. Le temps de calcul nécessaire sur station de travail pour obtenir le champ de vitesse spatio-temporel complet de cette séquence est d'environ 6h.

La Figure 2.4 montre un exemple de champ de vitesse instantané du mouvement de la surface du champ de blé, et la Figure 2.5 une évolution typique des deux composantes de vitesse en un point donné. Les évolutions temporelles et spatiales du mouvement du couvert végétal sont détectées avec une résolution suffisante : de larges structures sont visibles Fig. 2.4 et des oscillations bien définies Fig. 2.5.

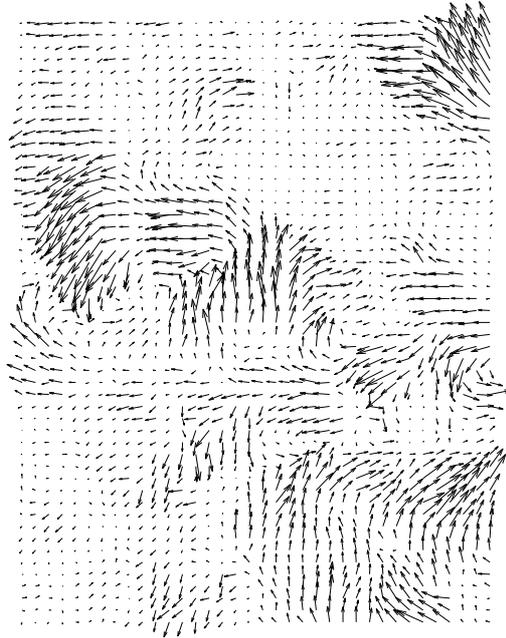


FIG. 2.4 – Champ de vitesse instantané calculé par PIV sur une séquence de mouvement du champ de blé de la Fig.2.2. Echelles : distance entre points : $\Delta_x = \Delta_y = 5$ cm, vitesse maximale := 0.26 ms^{-1}

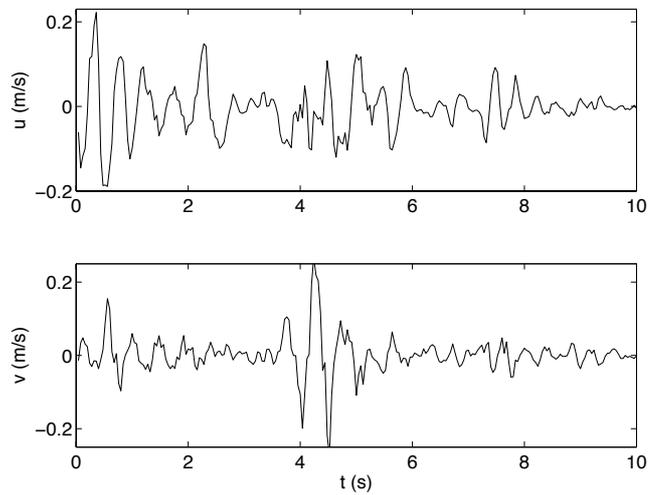


FIG. 2.5 – Evolution temporelle des composantes de vitesse u et v en un point situé au milieu du champ montré Fig. 2.4.

2.2.4 Décomposition Bi-Orthogonale du champ vitesse

Le champ de vitesse du mouvement du couvert végétal est extrêmement riche au niveau spatio-temporel. Un traitement spécifique est nécessaire pour extraire de ce signal les structures cohérentes. Nous utilisons ici une Décomposition Bi-Orthogonale du champ de vitesse.

Concepts de base sur la Décomposition Bi-Orthogonale

Le principe de la Décomposition Bi-Orthogonale (BOD en anglais), qui fut proposée initialement par Aubry *et al.* (1991), est de décomposer un signal fonction de l'espace et du temps en une somme finie de structures spatio-temporelles. Nous considérons ici le champ de vitesse du mouvement du couvert

$$\dot{X}(M, t) = \begin{bmatrix} u(M, t) \\ v(M, t) \end{bmatrix}, \quad (2.2)$$

où M est le point de coordonnées (x, z) , t est le temps et u, v sont les composantes de vitesse dans les directions x et z . La BOD d'un tel champ de vitesse s'écrit

$$\dot{X}(M, t) = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{\alpha_k} \mu_k(t) \Psi_k(M), \quad (2.3)$$

où Ψ_k sont les fonctions spatiales, appelées topos, et μ_k les fonctions temporelles, appelées chronos. Ces fonctions spatiales et temporelles forment deux ensembles de fonctions orthogonales. Le facteur de poids de chacune des structures spatio-temporelles (Ψ_k, μ_k) est le scalaire réel $\sqrt{\alpha_k}$. Aubry *et al.* (1991) ont montré que

- (i) cette décomposition est unique,
- (ii) les topos sont les fonctions propres de l'opérateur de corrélation spatiale de \dot{X} avec pour valeurs propres α_k ,
- (iii) les chronos sont les fonctions propres de l'opérateur de corrélation temporelle de \dot{X} avec les mêmes valeurs propres α_k ,
- (iv) cette série converge en norme, ce qui permet la troncature aux N premiers termes de la somme.

Une propriété remarquable de la BOD est le fait que les valeurs propres α_k sont communes aux fonctions propres spatiales (topos) et temporelles (chronos). Ceci provient des propriétés des opérateurs de corrélation spatiale et temporelle qui sont adjoints.

En pratique, le signal à analyser est donné sous forme discrète, ce qui implique que dans les définitions ci-dessus, les fonctions sont en fait des vecteurs et les opérateurs des matrices. Notons également que le signal est un signal mesurable, ce qui signifie qu'il est à carré intégrable, ou autrement dit que tous les termes des matrices de corrélation ont une valeur finie. Pour notre application, la matrice de

corrélation temporelle est définie comme

$$T_{ij} = \sum_{p=1}^{N_s} u(M_p, t_i) u(M_p, t_j) + v(M_p, t_i) v(M_p, t_j) + u(M_p, t_i) v(M_p, t_j) + u(M_p, t_j) v(M_p, t_i), \quad (2.4)$$

où N_s est le nombre de points en espace du signal. De manière similaire, la matrice de corrélation spatiale est donnée par

$$S = \begin{bmatrix} [S^{uu}] & [S^{uv}] \\ [S^{vu}] & [S^{vv}] \end{bmatrix} \quad (2.5)$$

où les S^{ab} sont des sous-matrices de corrélation définies par

$$S_{ij}^{ab} = \sum_{q=1}^{N_t} a(M_i, t_q) b(M_j, t_q) \quad (2.6)$$

avec N_t le nombre de points en temps, et (ab) prenant les valeurs (uu) , (uv) , (vu) et (vv) . Les composantes de T et S sont en pratique normalisées par l'énergie cinétique du signal et sont donc à juste titre appelées corrélations. Il faut également noter que le signal à analyser est bi-dimensionnel en espace. Le calcul de corrélation prend donc en compte les corrélations croisées entre les composantes u et v de \dot{X} .

Dans le cas du champ de vitesse du mouvement du couvert végétal, le nombre de points en temps N_t sera toujours plus petit que le nombre de points en espace N_s . Par conséquent la dimension de la matrice T , qui est N_t^2 , est plus petite que celle de S , qui est $4 N_s^2$. Comme les valeurs propres de T sont aussi les valeurs propres de S , il est plus pratique (moins coûteux en temps de calcul) de résoudre d'abord le problème aux valeurs propres temporel et de déduire ensuite les modes spatiaux. Les chronos (vecteurs propres temporels, μ) sont donc calculés en premier en résolvant le problème discret aux valeurs propres

$$T \mu = \alpha \mu, \quad (2.7)$$

où μ est de dimension N_t . Les topos (vecteurs propres spatiaux, Ψ) sont ensuite déduits par projection de la décomposition (2.3) sur l'ensemble des chronos :

$$\Psi_k(M) = \frac{1}{\sqrt{\alpha_k}} \sum_{i=1}^{N_t} \dot{X}(M, t_i) \mu_k(t_i). \quad (2.8)$$

Il est important de noter que cette projection utilisant le signal original \dot{X} , basée sur les propriétés d'orthogonalité de la BOD, n'altère pas l'information de phase du signal.

Dans la décomposition de l'équation (2.3), les structures spatio-temporelles (μ_k, Ψ_k) sont classées par ordre décroissant de leur contribution à l'énergie cinétique totale. La valeur propre α_k représente l'énergie cinétique du $k^{\text{ième}}$ mode spatio-temporel (Hémon & Santi, 2003). Le taux de convergence de la série BOD est un test de la présence de structures cohérentes dans le signal. Dans le cas d'une convergence rapide de la série, les premiers couples de chronos-topos de la décomposition contiennent les principales caractéristiques spatiales et temporelles du signal complet.

La Décomposition Bi-Orthogonale a un certain lien avec les décompositions de type Karhunen-Loève, comme par exemple (en anglais) Principal Component Analysis (PCA), Singular Value Decomposition (SVD), Empirical Orthogonal Functions (EOF), ou encore Proper Orthogonal Decomposition (POD). Cependant une différence majeure existe et qui a pour notre application des conséquences pratiques importantes : la BOD ne nécessite pas que le signal satisfasse d'hypothèses particulières (autre que celle d'être à carré intégrable, ce qui est le cas de tous les signaux mesurables). Elle peut donc être utilisée avec des signaux non-stationnaires, présentant même des événements intermittents, ce qui est le cas avec le mouvement d'une culture sous un vent naturel. De plus, l'hypothèse d'ergodicité, c'est à dire le fait que la moyenne temporelle soit identique à la moyenne spatiale, n'est pas nécessaire avec la BOD, alors qu'elle l'est avec les décompositions de type Karhunen-Loève comme la POD. De plus, pour les techniques de type POD, le signal doit avoir une distribution gaussienne, ce qui est rarement le cas. Enfin, la différence essentielle de la BOD par rapport aux décompositions de type Karhunen-Loève repose sur le fait qu'elle offre une analyse simultanée en espace et en temps puisque la phase relative n'est pas perdue. La BOD permet donc, non seulement d'extraire les structures cohérentes du signal mais aussi de décrire comment celles-ci évoluent ou sont convectées.

Application de la BOD à l'analyse du mouvement du couvert

La Décomposition Bi-Orthogonale (2.3) est appliquée au champ de vitesse spatio-temporel \dot{X} du mouvement du couvert végétal. Le calcul de BOD est réalisé à l'aide d'un code existant (Hémon & Santi, 2003). On illustre ici l'analyse BOD sur l'exemple du mouvement du champ de blé dérivé en section 2.2.3. La Figure 2.6 montre la fraction de l'énergie cinétique recouvrée dans la décomposition BOD du signal, $E_k = \sum_{k=1}^N \alpha_k / E$, E étant l'énergie cinétique totale, en fonction du nombre N de modes spatio-temporels considérés. Ce tracé permet d'illustrer la convergence de la BOD. En considérant les 15 premiers modes de la décomposition, presque 75% de l'énergie totale du signal est retrouvée. Ces 15 modes correspondent ici à $15(2N_s + N_t) \approx 6 \cdot 10^4$ degrés de liberté, au lieu de $2N_s N_t \approx 10^6$ degrés de liberté pour le signal total (avec pour cet exemple $N_s = 1850$, $N_t = 250$). Cela représente une réduction significative et montre une bonne convergence de la BOD, et donc une certaine cohérence du signal.

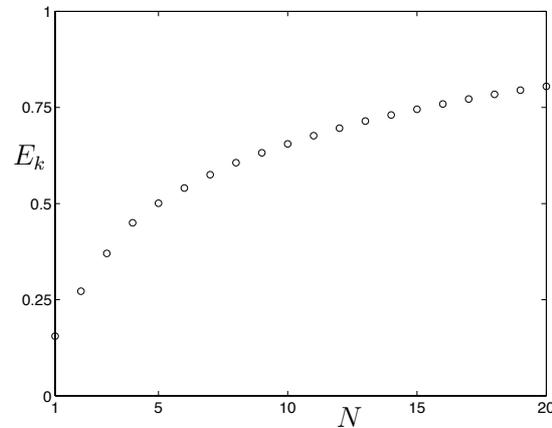


FIG. 2.6 – Fraction de l'énergie cinétique totale recouvrée en fonction du nombre de modes spatio-temporels considérés dans la BOD

On peut également calculer l'entropie du signal, voir Hémon & Santi (2003). Rappelons qu'un signal parfaitement déterminé, par exemple un mouvement de corps rigide, a une entropie pratiquement nulle. Toute son énergie est alors concentrée sur les premiers termes de la BOD. Au contraire, un signal très désordonné a une entropie proche de 1, et un grand nombre de modes BOD sont nécessaires pour reconstruire le signal. Il est connu par exemple que la BOD d'un bruit homogène est réduite à une décomposition de Fourier avec une convergence infiniment lente.

Dans l'exemple présenté ici, l'entropie du champ de vitesse est de 0.7, ce qui est assez haut. Le niveau d'entropie du signal associé à la relative bonne convergence de la décomposition illustre l'intérêt de la BOD : le champ de vitesse du couvert végétal est très désordonné mais contient une partie cohérente. La décomposition bi-orthogonale permet d'extraire les mouvements cohérents du bruit.

On se concentre maintenant sur les deux premiers modes spatio-temporels de la décomposition, qui représentent respectivement 16 et 12% de l'énergie totale. La Figure 2.7(a) et (b) représente les structures spatiales (topos) des modes numéro 1 et 2, et la Figure 2.7(c) les structures temporelles associées (chronos). Notons que les topos et chronos sont des vecteurs propres et sont donc montrés ici avec des amplitudes arbitraires. Les champs de vitesse des topos sont composés de mouvements cohérents de grande échelle. La superposition des iso-contours de module de vitesse permet de bien visualiser ces structures cohérentes. Pour les deux topos, celles-ci apparaissent sous forme de bandes parallèles de mouvement alterné. La longueur d'onde caractéristique associée à ces structures cohérentes est estimée à partir de la transformée de Fourier 2D du topos (Ψ_k , $k = 1, 2$). Celle-ci mène à deux nombres d'ondes k_x et k_z dans les directions x et z . On en

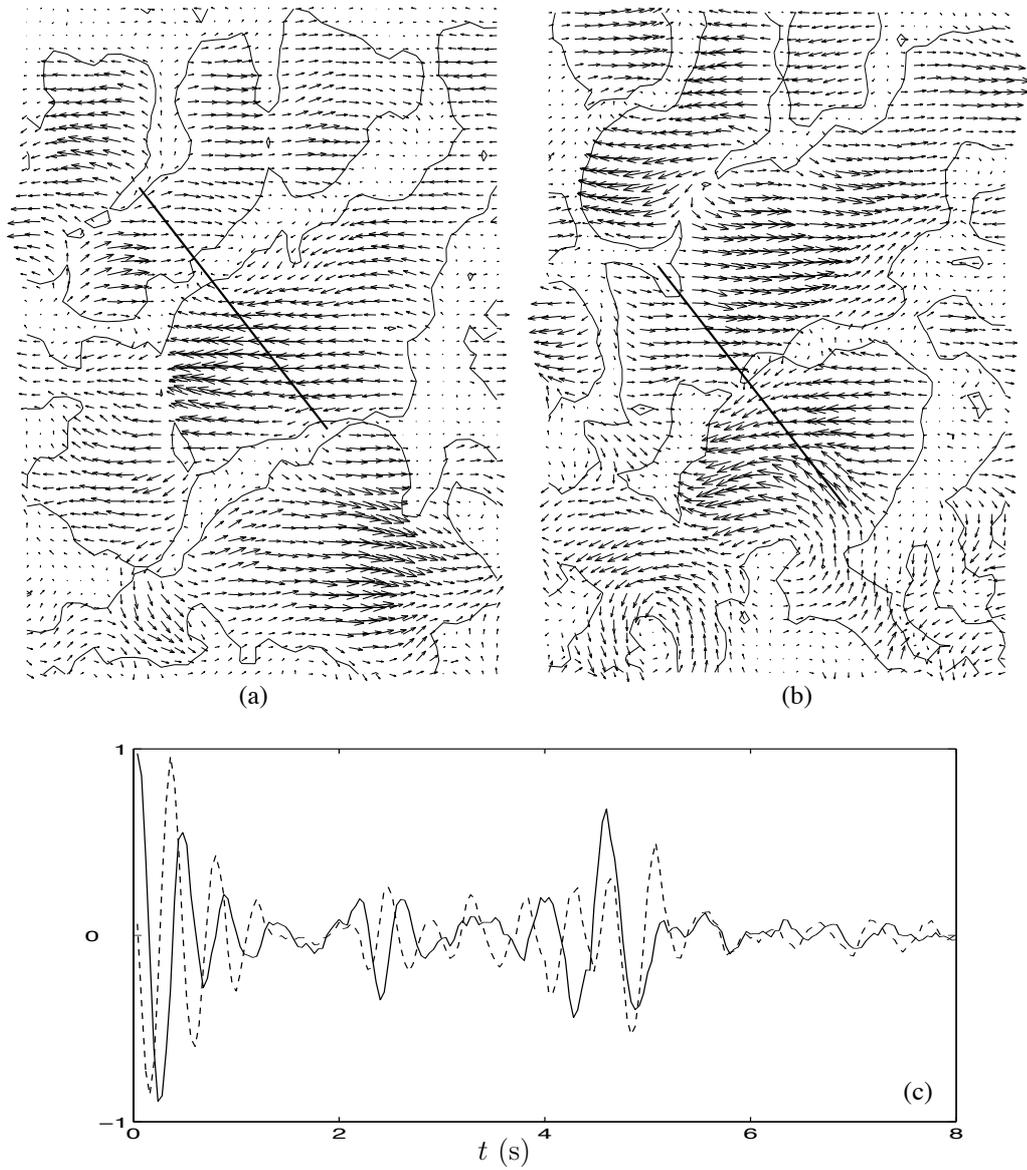


FIG. 2.7 – Les deux premiers modes spatio-temporels issus de la BOD d'une séquence de mouvement du champ de blé : topos (a, b) et chronos associés (c) : (—) chronos 1, (- -) chronos 2.

déduit la longueur d'onde λ et la direction ϕ associée :

$$\lambda = 2\pi/\sqrt{k_x^2 + k_z^2}, \text{ et } \phi = \text{atan}(k_z/k_x). \quad (2.9)$$

Les longueurs d'onde calculées sur les topos 1 et 2, et représentée par les deux segments sur les Fig. 2.7(a) et (b), sont approximativement égales et valent environ 1.40 m. Une analyse plus fine des deux topos montre de plus qu'il y a un déphasage en espace entre les champs de vitesse des topos 1 et 2.

Les deux structures temporelles associées (chronos 1 et 2), Fig. 2.7(c), ont un comportement oscillant assez régulier. Une analyse par transformée de Fourier révèle qu'ils ont tous deux une fréquence d'oscillation bien définie, f , égale à 2.2 Hz dans les deux cas. On peut également remarquer que ces deux chronos sont déphasés en temps. Par conséquent, la recombinaison des deux premiers modes spatio-temporels de la BOD, déphasés en temps et en espace, mène à un signal propagatif. La vitesse de phase correspondante peut être définie comme $c = \lambda f$, et est ici de 3.1 m s^{-1} .

Les modes suivants (3, 4, ...) dans la décomposition bi-orthogonale du champ de vitesse présentent globalement les mêmes propriétés que celles des modes 1 et 2 : des structures spatiales cohérentes similaires, cependant moins nettes que celles des deux premiers topos, et des oscillations temporelles à peu près à la même fréquence que celle des chronos 1 et 2. Ce sont les modes les moins énergétiques de la BOD qui présentent des mouvements non cohérents et à des échelles beaucoup plus petites. Un exemple est montré Figure 2.8 avec le 15^{ème} mode de la décomposition.

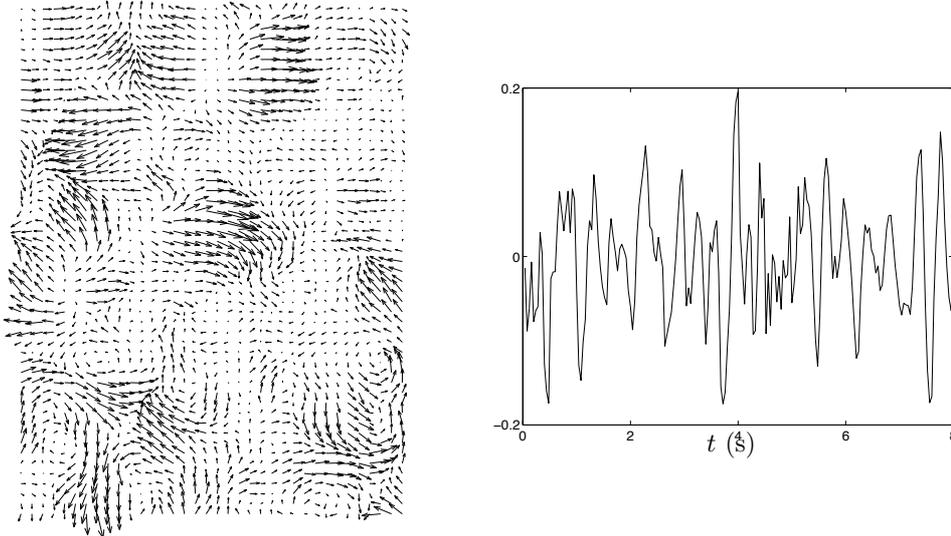


FIG. 2.8 – Mode spatio-temporel numéro 15 : topos et chronos associé.

Autres exemples d'application

Pour illustration, deux autres exemples d'application de la BOD à l'analyse du mouvement du couvert sont montrés Figures 2.9 et 2.10. Le même type de propriétés spatiales et temporelles sont extraites des deux modes les plus énergétiques. Les deux premiers topos révèlent comme précédemment des mouvements cohérents à grande échelle. Une longueur d'onde caractéristique peut être trouvée et on remarque un déphasage en espace entre les topos 1 et 2 dans la direction de la longueur d'onde principale. Ces structures spatiales cohérentes correspondent globalement à des bandes successives, le mouvement à l'intérieur de chacune se faisant, selon les cas, soit en biais ou presque aligné avec la direction des bandes, soit de manière perpendiculaire à celle-ci, ce qui fait penser respectivement à des mouvements en cisaillement ou en compression. Au niveau des structures temporelles, les deux premiers chronos issus de ces exemples présentent comme précédemment une fréquence d'oscillation commune. Ils sont très réguliers et bien déphasés en temps sur une longue durée (≈ 10 s) pour l'exemple de la Figure 2.10, et montrent au contraire un événement extrêmement court (2s, soit deux périodes) pour l'exemple de la Figure 2.9. Dans les deux cas, Figures 2.9 et 2.10, la combinaison des deux premiers modes spatio-temporels déphasé en espace et en temps mène à un mouvement cohérent propagatif.

Ces deux exemples supplémentaires d'analyse BOD confirment la reproductibilité des résultats montrés Fig. 2.7 sur l'extraction de structures spatio-temporelles propagatives et illustrent également la diversité des formes obtenues inhérente à la caractérisation de mouvements dus à un vent naturel.

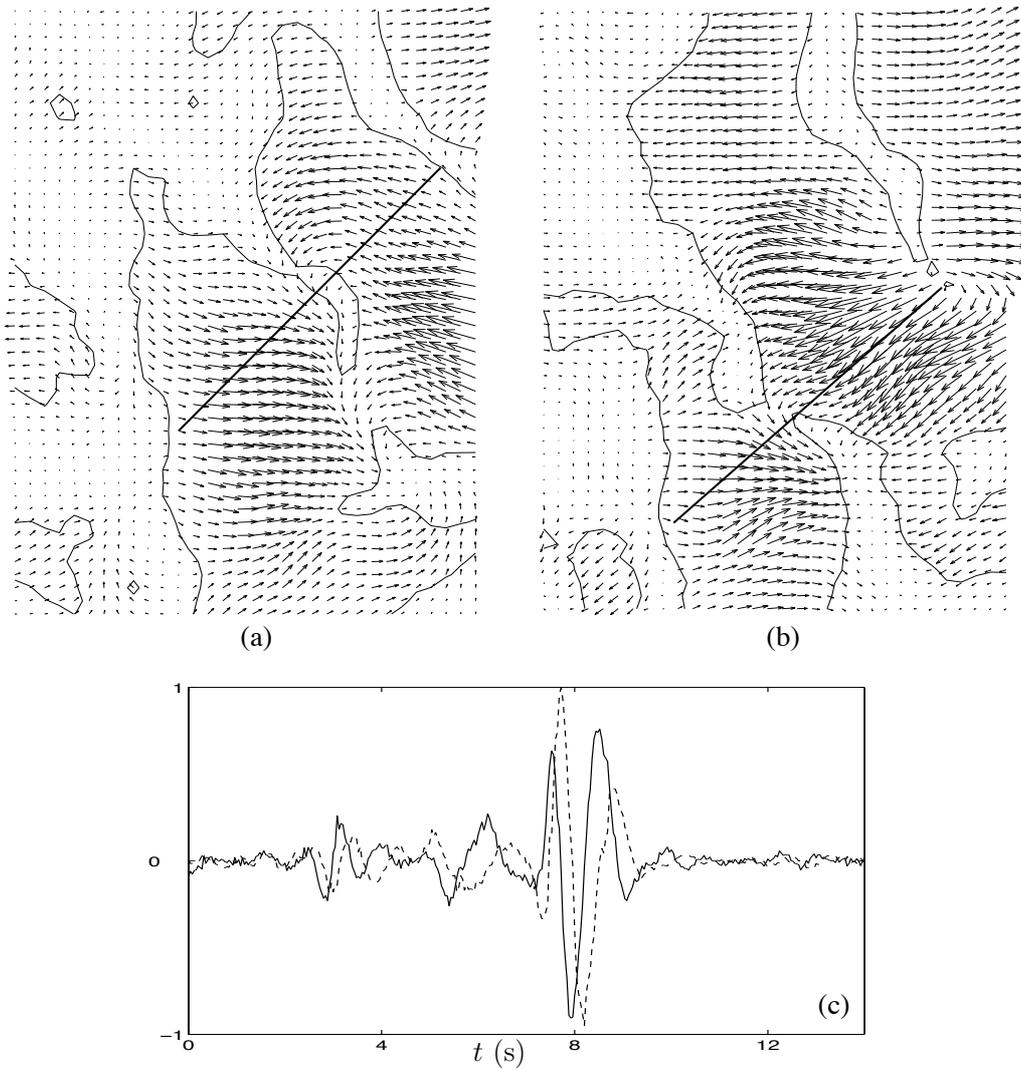


FIG. 2.9 – Illustration de la BOD sur une séquence de mouvement du champ de luzerne : topos 1 et 2 (a, b) avec iso-contours du module de vitesse, et chronos associés (c) : (—) chronos 1, (- -) chronos 2. Longueur d'onde des topos $\lambda=2$ m, fréquence des chronos $f=1$ Hz. Ces deux premiers modes représentent respectivement 27% et 15% de l'énergie totale.

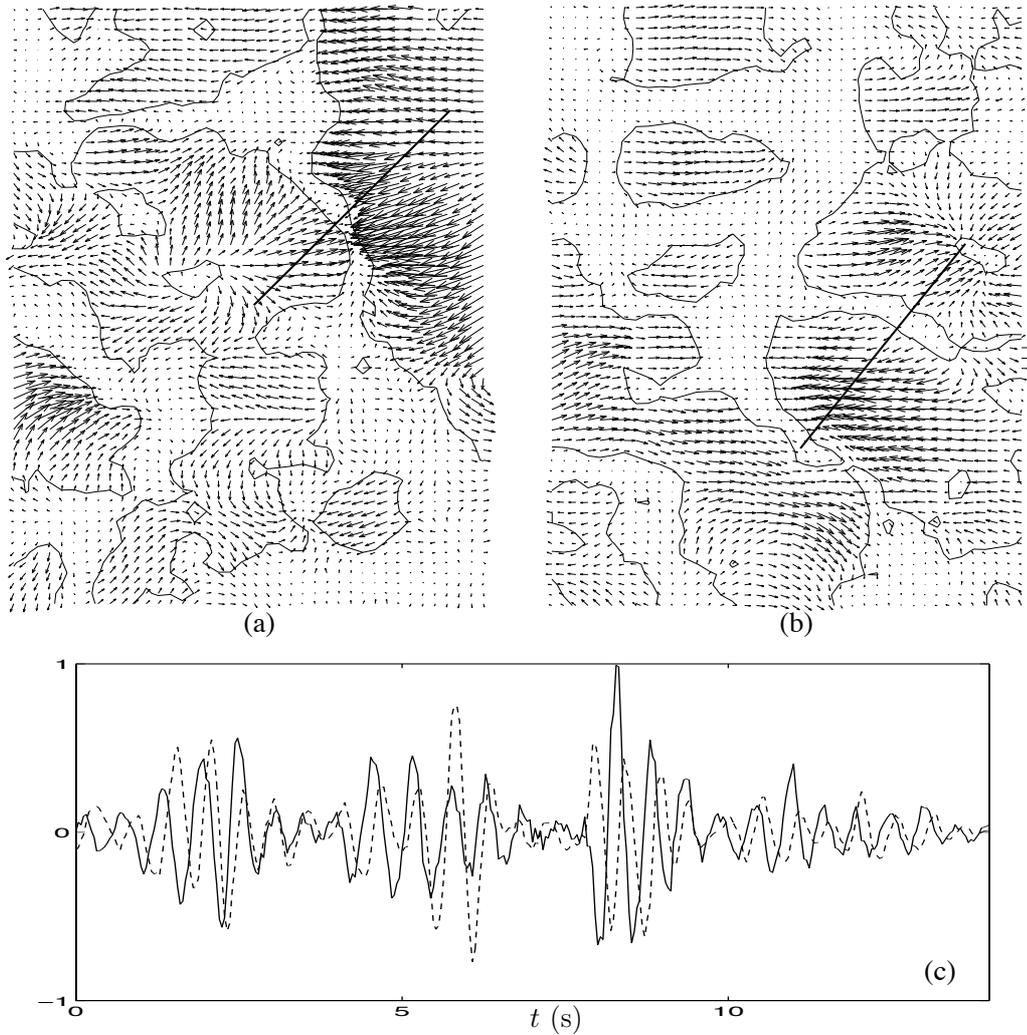


FIG. 2.10 – Illustration de la BOD sur une autre séquence de mouvement du champ de blé : topos 1 et 2 (a, b) avec superposition des iso-contours du module de vitesse, et chronos associés (c) : (—) chronos 1, (- -) chronos 2. La longueur d'onde λ (représentée par le trait) est ici environ 1.30 m pour les deux topos, et la fréquence f des chronos 1.85 Hz. Ces deux premiers modes représentent respectivement 13% et 8% de l'énergie totale.

2.2.5 Discussion sur la technique expérimentale

L'approche expérimentale proposée pour mesurer les mouvements des couverts végétaux dus au vent a été testée avec succès sur un grand nombre de séquences filmées sur les deux champs, de blé et de luzerne. Elle a permis dans tous les cas d'extraire des structures cohérentes propagatives, c'est à dire d'identifier quantitativement les ondes formées par le mouvement du couvert. Cette technique expérimentale est facile à mettre en oeuvre et ne nécessite que du matériel standard. En revanche, il faut noter que le temps de calcul nécessaire au traitement des données (redressement des images, calcul de PIV et de BOD) est assez long, typiquement 1 h pour 1 s de mouvement enregistré.

On discute maintenant plus en détail chaque étape de la technique expérimentale. En ce qui concerne l'acquisition des données, le redressement des images ainsi que la capture du mouvement sont tous deux meilleurs quand l'angle d'inclinaison de la caméra θ est petit. Avec un angle θ grand, l'image est en effet fortement déformée par la perspective, d'où beaucoup de bruit dans l'interpolation de l'image sur le nouveau maillage redressé. De plus, quand l'angle de visée est grand, le mouvement des plantes situées en haut de l'image initiale est à peine perceptible. En revanche, l'inconvénient d'un angle θ petit est que cela réduit la surface de champ visible avec la caméra, et rend délicate l'identification des plus grandes structures spatiales, comme par exemple celles mesurées sur la luzerne, Figure 2.9. On gagnerait bien sûr à pouvoir placer la caméra plus en hauteur, ce qui permettrait de combiner un faible angle d'inclinaison à un grand champ de visée.

L'utilisation de mires de références pour mesurer la distorsion des images a permis d'améliorer grandement la précision des mesures, par rapport à celles réalisées lors de la première campagne, et pour lesquelles un biais persistait malgré le redressement, voir Py *et al.* (2005). Ces mires sont suffisamment minces pour qu'on puisse raisonnablement supposer qu'elles ne perturbent pas l'écoulement du vent au dessus du couvert. En revanche, elles ont un impact visuel certain puisqu'elles masquent des petites parties du champ sur l'image. Malgré les interpolations de la PIV, on observe parfois des déficits localisés de vitesse dans des structures cohérentes qui correspondent à l'emplacement d'une mire. Quelques autres aspects du redressement d'images sont discutés en Annexe A.

La mesure du mouvement des plantes est basée sur une technique de corrélation entre images avancée : la PIV inclut en effet des routines de correction additionnelles qui permettent d'obtenir des données plus précises. Ceci est important puisque le champ de vitesse résultant doit être analysé en terme de structures spatio-temporelles. Le choix de la taille de fenêtre d'interrogation est un paramètre important dans la technique de PIV. Elle doit être assez petite

pour que globalement tous les pixels d'une même fenêtre aient suivi le même déplacement pendant l'intervalle de temps considéré, et suffisamment grand pour que dans une fenêtre donnée les parties de plante situées en dessous de la surface du couvert représentent une part mineure de la surface totale de cette fenêtre. En ce qui concerne le chevauchement entre fenêtres d'interrogation, un taux élevé permet d'augmenter la résolution spatiale de la mesure mais introduit une corrélation artificielle dans le champ de vitesse résultant. Un taux de chevauchement de 50% est un compromis habituel en PIV et convient pour cette application. La mesure du mouvement basée sur la technique de PIV peut facilement être appliquée à d'autres couverts végétaux d'échelles diverses, d'un gazon à une forêt. Elle ne serait pas précise sur des couverts très épars car dans ce cas on ne peut définir de plan de mesure unique : chaque région d'une image de couvert épars est en effet composée de parties de plantes situées à des hauteurs différentes, si bien que le résultat du calcul de corrélation ne peut pas être associé aux vitesses d'un même plan.

La dernière étape de l'approche expérimentale consiste en la Décomposition Bi-Orthogonale du mouvement du couvert végétal. La BOD présente un intérêt particulier ici puisque le champ de vitesse du couvert est très désordonné mais contient une partie cohérente. La BOD permet d'extraire les structures spatio-temporelles cohérentes du mouvement, et révèle également leur propagation. Cette propriété importante résulte de la décomposition simultanée en espace et en temps fournie par la BOD.

La technique expérimentale présentée dans cette section est à ce jour la seule approche simple pour mesurer sur site les mouvements globaux des cultures dus au vent. Une analyse plus systématique, en section 2.4, du mouvement des champs de blé et de luzerne pour différents niveaux de vent permettra d'obtenir

a) les amplitudes des sollicitations perçues par les plantes en situation naturelle, informations essentielles aux analyses thigmomorphogénétiques en agronomie,

b) les caractéristiques des ondes formées par le mouvement des plantes et de comparer celles-ci aux propriétés des structures propagatives du vent au-dessus des couverts végétaux déjà mesurées par d'autres moyens, voir Chapitre 1 et Finnigan (2000), ceci dans l'optique de mieux appréhender les mécanismes d'instabilité et de couplage au sein des couverts végétaux.

2.3 Caractéristiques mécaniques des plantes formant le couvert végétal

Les propriétés mécaniques des plantes individuelles formant chacun des deux champs, blé et luzerne, sont également mesurées. Ceci est fait dans l'optique de pouvoir relier les mouvements globaux des cultures à leurs propriétés mécaniques locales respectives. La caractérisation des plantes et les enregistrements vidéo du mouvement des cultures doivent être menés dans un intervalle de quelques jours seulement de manière à ce que la maturité des plantes et donc leur raideur ne varie pas.

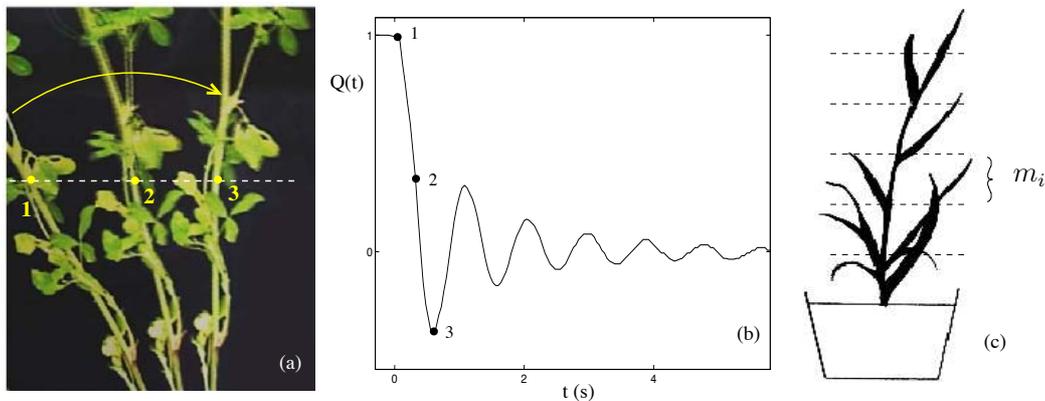


FIG. 2.11 – Mesure des propriétés mécaniques des plantes de blé et de luzerne. (a) Cliché du test d'oscillation libre montrant la position d'une tige de luzerne à trois instants successifs. (b) Oscillation de la tige en fonction du temps mesurée en repérant sa position sur une ligne horizontale. (c) Mesure de la répartition massique de la plante selon sa hauteur : m_i est la masse du $i^{\text{ème}}$ segment.

La caractérisation mécanique des plantes est basée principalement sur des essais d'oscillation libre (ou lâchers), dans la lignée de ceux proposés par Flesch & Grant (1992b) et Doaré *et al.* (2004). Une plante, déterrée du champ avec sa motte de terre, est placée dans un pot en prenant soin que son pied soit bien fixe. On maintient la motte de terre humide de manière à ce que la plante ne se désèche pas. A la main, on écarte la tige principale de sa position d'équilibre statique, puis on la relâche soudainement et on filme depuis le côté son mouvement, voir Figure 2.11(a). Sur la séquence d'images ainsi obtenues (acquises à 25 Hz), on mesure l'oscillation de la tige en repérant sur une ligne horizontale sa position en fonction du temps, voir Doaré *et al.* (2004). Le signal obtenu, tracé Figure 2.11(b), est typique du comportement d'un oscillateur amorti. Une analyse par transformée de Fourier permet de mesurer la fréquence d'oscillation, qui est la fréquence propre de la tige, notée f_0 . On estime également la dissipation grâce à

	fréquence propre f_0 (Hz)	décrément logarithmique ξ (s ⁻¹)	hauteur de tige h (m)	espacement entre tiges l (m)	masse totale m^{tot} (10 ⁻³ kg)
blé	2.5 [2.0 - 3.0]	1.35 [1.0 - 1.6]	0.68 [0.47 - 0.84]	0.05	7.4 [3.3 - 9.4]
luzerne	1.05 [0.8 - 1.7]	0.58 [0.3 - 1.0]	0.69 [0.54 - 0.76]	0.05	12.3 [3.9 - 18.9]

TAB. 2.1 – Résultats de mesure des propriétés des plantes de blé et de luzerne : valeurs moyennes et intervalles de dispersion.

la mesure du décrément logarithmique ξ . Pour une tige donnée, le test de lâcher est répété plusieurs fois de suite en faisant varier le déplacement initial imposé.

Les tiges de luzerne les plus grandes, avaient tendance, une fois isolées de leurs voisines, à flamber sous leur propre poids. Dans ce cas, le test de lâcher est réalisé en suspendant la tige à l'envers. Pour obtenir la vraie fréquence propre f_0 de la plante, on corrige sur la fréquence de vibration ainsi mesurée, notée f_* , l'effet inversé de la gravité :

$$f_0 = \sqrt{f_*^2 - 2\frac{g}{(2\pi)^2 h_b}}, \quad (2.10)$$

où g est la constante de gravité et h_b la hauteur barycentrique de la plante.

Suite aux tests vibratoires, la plante est débarrassée de ses racines et la partie aérienne est pesée. On mesure la répartition de masse selon la hauteur de la plante en coupant celle-ci en segments de 10 cm et en pesant chacun des segments (tiges et feuilles), voir Fig. 2.11(c). Enfin, on mesure également l'espacement l entre les plantes au sein de la culture, ainsi que la hauteur h des plantes du couvert.

Les propriétés de 6 plantes du champ de luzerne et de 4 du champ de blé sont ainsi mesurées. Les résultats de mesure sont donnés dans le Tableau 2.1. Il est important de noter que, tandis que les hauteurs moyennes des plantes de blé et de luzerne sont sensiblement égales, autour de 70 cm, la fréquence du blé est 2.5 fois plus élevée que celle de la luzerne. On dispose ainsi de deux milieux solides de propriétés dynamiques très différentes pour une même hauteur.

2.4 Mouvements induits par le vent sur les cultures : résultats expérimentaux

Une soixantaine de séquences de mouvement, de 10 à 30 secondes, ont été filmées sur les champs de blé et de luzerne sous diverses conditions de vent. Le champ de vitesse spatio-temporel du mouvement de la surface du couvert est mesuré sur les images redressées à l'aide de la technique de corrélation entre images décrite section 2.2.3. Puis, une partie de ces séquences sont analysées par Décomposition Bi-Orthogonale, comme expliqué en section 2.2.4. On présente ici les résultats expérimentaux obtenus : tout d'abord l'amplitude des mouvements mesurés, puis les caractéristiques des structures cohérentes extraites par la BOD, en fonction de la vitesse du vent et pour les deux couverts végétaux étudiés.

2.4.1 Amplitude du mouvement

Pour chaque séquence filmée, on mesure l'amplitude moyenne du mouvement du couvert sous le vent à partir du champ de vitesse spatio-temporel brut (avant décomposition bi-orthogonale), $\dot{X}(x, z, t)$. Cette amplitude est exprimée comme une vitesse moyennée en espace, définie par

$$A = \sqrt{\frac{1}{N_s} \sum_{j=1}^{N_s} \sigma^2(M_j)}, \quad (2.11)$$

où $\sigma(M_j)$ est l'écart-type de la variation temporelle de \dot{X} pris au point M_j de coordonnées (x, z) , et N_s le nombre de points en espace du champ de vitesse. La Figure 2.12 montre l'amplitude des mouvements mesurés sur les champs de blé et de luzerne en fonction de la vitesse moyenne du vent, U , mesurée pendant chaque séquence environ 15 cm au-dessus du sommet du couvert (cf Figure 2.1). Globalement, pour les deux couverts, l'amplitude du mouvement augmente de façon non linéaire avec la vitesse de vent. La caractéristique la plus frappante réside dans la différence de comportement entre le blé et la luzerne : pour une même vitesse de vent, le couvert de luzerne a un mouvement 2 à 3 fois plus intense que le couvert de blé. Ceci résulte vraisemblablement de la différence de rigidité entre les deux végétaux, comme il sera discuté plus loin.

Ce type de résultats expérimentaux, montrant l'amplitude du mouvement d'un grand ensemble de plantes, peuvent être utiles aux études de la verse et aux analyses thigmomorphogénétiques, puisqu'ils offrent une quantification des sollicitations subies par les plantes en condition naturelle en fonction du niveau de vent au-dessus du couvert végétal. D'autres informations peuvent encore être extraites des champs de vitesse bruts, comme la variabilité statistique des mouvements, ou les taux de divergence des mouvements spatiaux qui peuvent informer sur la ventilation des couverts végétaux (Farquhar *et al.*, 2003).

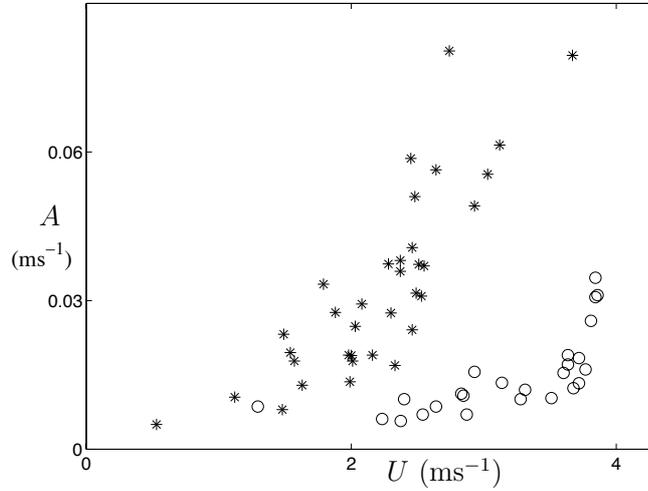


FIG. 2.12 – Amplitude du mouvement du couvert végétal en fonction de la vitesse du vent : (*) luzerne, (o) blé.

2.4.2 Propriétés des ondes formées par le mouvement du couvert

La Décomposition Bi-Orthogonale du champ de vitesse du mouvement du couvert végétal, comme décrite section 2.2.4, est menée de manière systématique sur une trentaine de séquences. Pour chaque séquence, on extrait les deux modes spatio-temporels les plus énergétiques. Ceux-ci révèlent le même type de caractéristiques spatiales et temporelles que celles illustrées sur les Figures 2.7, 2.9 et 2.10. On mesure sur les deux topos la longueur d'onde λ caractérisant les structures spatiales et sur les deux chronos la fréquence f d'oscillation. Dans le cas de modes déphasés en espace et en temps, la vitesse de phase associée, $c = \lambda f$, est ensuite déduite. Les résultats de longueur d'onde, fréquence et vitesse de phase en fonction de la vitesse moyenne du vent pour chaque séquence sont montrés sur les Figures 2.13, 2.14 et 2.15 pour le blé et la luzerne.

Longueur d'onde

La longueur d'onde λ caractérisant les mouvements cohérents du couvert végétal augmente globalement avec la vitesse du vent, voir Fig. 2.13(a), et ceci à un niveau différent pour les deux cultures. Pour une valeur de U donnée, λ est 2 à 3 fois plus grande pour la luzerne que pour le blé. La longueur d'onde est ensuite normalisée par la hauteur du couvert considéré h , et pour la vitesse du vent on introduit la vitesse réduite, U_r , un paramètre adimensionnel courant en interactions fluide-structure, voir par exemple Blevins (1990). La vitesse réduite compare une vitesse caractéristique du fluide, ici la vitesse du vent U , à une vi-

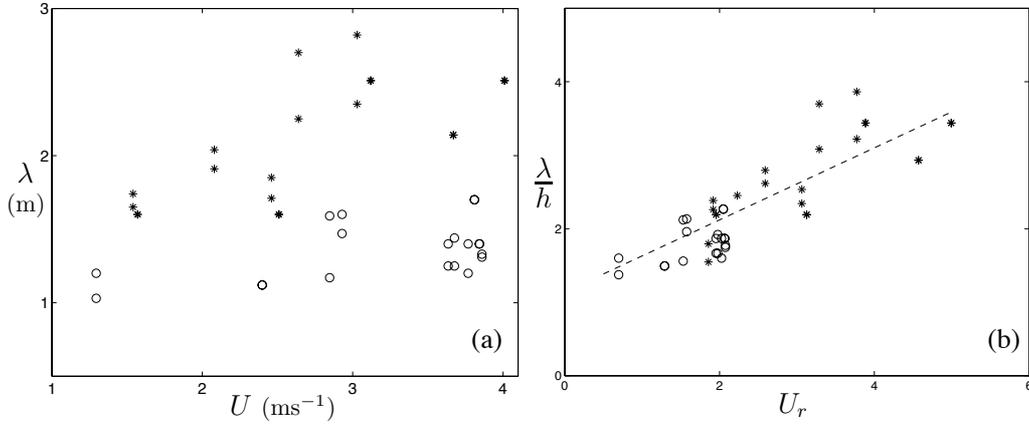


FIG. 2.13 – (a) Longueur d’onde des structures spatiales issues de l’analyse BOD du mouvement du couvert végétal, en fonction de la vitesse du vent. (b) Longueur d’onde normalisée en fonction de la vitesse réduite. (*) luzerne, (o) blé, (- -) ajustement linéaire (2.13).

tesse caractéristique du solide, basée ici sur la fréquence propre f_0 des plantes et la hauteur h du couvert :

$$U_r = \frac{U}{f_0 h}. \quad (2.12)$$

Les valeurs de f_0 et h utilisées sont celles mesurées sur les plantes individuelles de chacun des deux couverts et données dans le Tableau 2.1. Les données des deux couverts végétaux ainsi normalisées, λ/h en fonction de U_r , se regroupent sur une même courbe d’évolution en fonction de U_r , voir Fig.2.13(b). On peut ajuster une relation linéaire à ce jeu de données avec un coefficient de corrélation significativement élevé (0.85). L’adjonction de termes d’ordre supérieur dans la relation polynomiale n’est pas statistiquement significative : la probabilité pour un terme d’ordre 2 d’être liée au hasard de l’échantillonnage est en effet élevée ($P(>t)=0.39$). L’analyse statistique ne révèle pas de différences dans la pente ou l’ordonnée à l’origine entre le blé et la luzerne ($P(>t)=0.44$), si bien que les longueurs d’onde des deux couverts se situent sur la même droite

$$\lambda/h = 0.49 U_r + 1.14. \quad (2.13)$$

Comme f_0 est le seul paramètre intervenant dans la normalisation dont la valeur varie significativement entre le blé et la luzerne, un tel regroupement des données des deux couverts sur une même courbe montre que la fréquence propre des plantes entre en jeu dans la détermination de la longueur d’onde des mouvements cohérents des cultures.

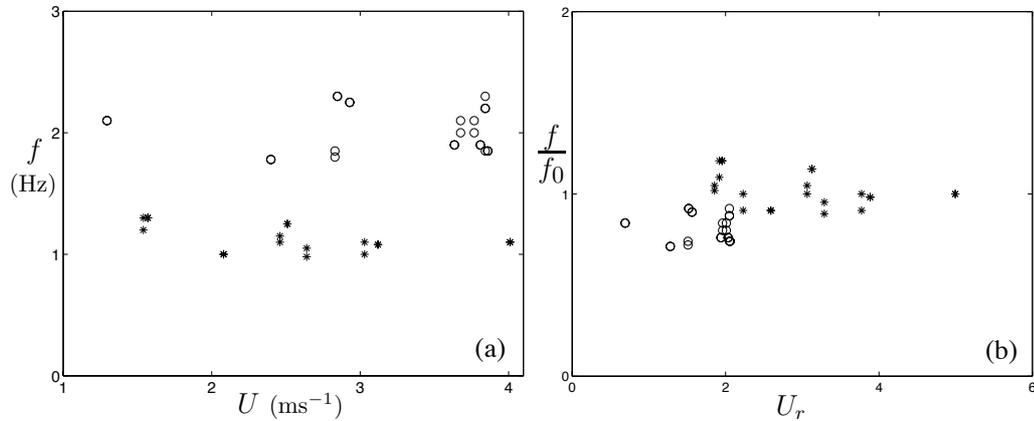


FIG. 2.14 – (a) Fréquence des structures temporelles issues de l'analyse BOD du mouvement du couvert végétal, en fonction de la vitesse du vent. (b) Fréquence normalisée en fonction de la vitesse réduite. (*) luzerne, (o) blé.

Fréquence

La fréquence temporelle f des chronos est trouvée globalement indépendante de la vitesse du vent, Figure 2.14(a), et a une valeur moyenne nettement différente pour les deux cultures. Normalisées par la fréquence propre f_0 des plantes de chaque couvert, et tracées en fonction de la vitesse réduite U_r , les données fréquentielles des deux couverts se regroupent : voir Fig. 2.14(b). L'analyse par régression des données normalisées montre que f/f_0 est indépendante de la vitesse réduite ($P(>t)=0.58$). La valeur moyenne de f/f_0 est proche de 1 pour la luzerne (1.06) mais semble inférieure pour le blé (0.81). Cependant, le tracé de la Figure 2.14(b) ne prend pas en compte l'imprécision sur f_0 (17% d'erreur relative sur f_0 pour le blé, voir Tableau 2.1). Par conséquent, il faut prendre en compte à la fois la variabilité sur f et sur f_0 pour estimer l'intervalle de confiance de la valeur moyenne de f/f_0 . Comme les variances de f et f_0 sont évaluées sur des échantillons différents et ont des valeurs différentes, l'analyse statistique de f/f_0 nécessite l'emploi du premier analogue du théorème de Fieller, avec les distributions de Berhens et le test d de Sukhatme (Finney, 1964). On trouve que les intervalles de confiance de f/f_0 , significatifs au seuil 5%, sont de 0.86-1.39 pour la luzerne, et 0.67-1.02 pour le blé. Donc, dans les deux cas, les valeurs de f/f_0 ne sont pas significativement différentes de 1. La valeur en apparence plus faible de f/f_0 pour le blé, Fig. 2.14(b), provient vraisemblablement de la sous-estimation de f_0 sur l'échantillon de plantes testées, liée à la très forte variabilité des propriétés des plantes dans un même champ.

Par conséquent, les résultats expérimentaux montrent que le mouvement cohérent du couvert végétal se produit à la fréquence propre des plantes qui le constituent, indépendamment de la vitesse du vent. Il y a donc une certaine

sélection de fréquence autour de $f = f_0$ dans le mouvement du couvert induit par le vent.

Vitesse de phase

Enfin, résultant des évolutions de la longueur d'onde et de la fréquence, la Fig. 2.15(a) illustre l'évolution de la vitesse de phase $c = \lambda f$ des ondes du mouvement du couvert en fonction de la vitesse du vent. Le graphe normalisé c/hf_0 en fonction de U_r , Fig. 2.15(b), révèle comme précédemment un regroupement des données expérimentales des deux couverts. La vitesse de phase normalisée augmente linéairement avec la vitesse réduite, avec une pente approximativement égale à 1.

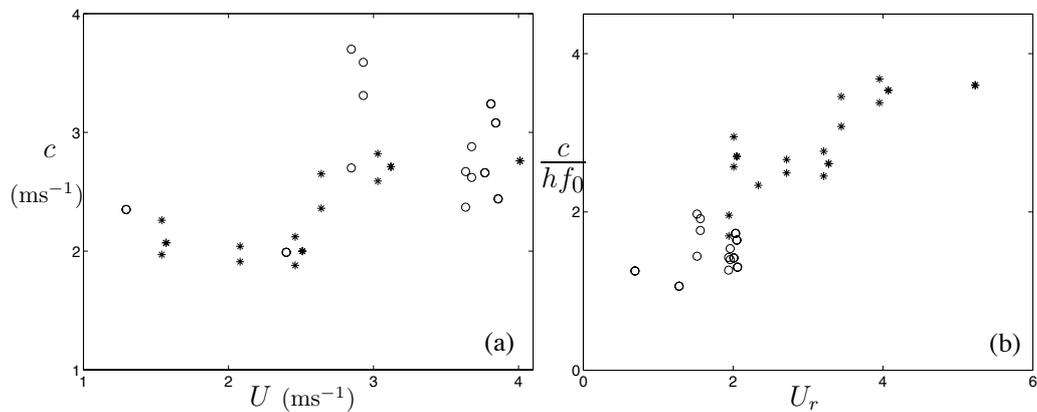


FIG. 2.15 – (a) Vitesse de phase des structures spatio-temporelles issues de l'analyse BOD du mouvement du couvert végétal, en fonction de la vitesse du vent. (b) Vitesse de phase normalisée en fonction de la vitesse réduite. (*) luzerne, (o) blé.

2.5 Discussion

Les résultats expérimentaux montrés précédemment constituent le premier ensemble de mesures quantitatives sur l'ondulation cohérente des cultures sous le vent. Les premiers modes spatiaux, ou topos, issus de l'analyse BOD du champ de vitesse du couvert révèlent de grandes structures cohérentes. Une telle longueur de corrélation n'apparaît pas naturellement dans le mouvement d'un ensemble d'oscillateurs adjacents, et sa présence suggère qu'un mécanisme d'instabilité est à l'origine de l'ondulation du couvert végétal. L'identification de structures cohérentes de grande taille dans le mouvement de la culture tend à prouver que l'instabilité de type couche de mélange, dominant la dynamique du vent au sein des couverts végétaux (Raupach *et al.*, 1996), régit également le mouvement du couvert. De plus, la longueur d'onde caractérisant les topos, proportionnelle à la hauteur des plantes ($1 < \lambda/h < 4$), est du même ordre de grandeur que la taille des structures cohérentes du vent mesurées au dessus de couverts végétaux de ce type : $3 < \lambda/h < 5$ pour le blé et le maïs, voir Fig. 1.12 et Raupach *et al.* (1996); Finnigan (2000).

Dans une instabilité de type couche de mélange, la longueur d'onde est régie par l'épaisseur de vorticité du profil moyen de l'écoulement (Huerre, 2000). Dans le cadre du vent au dessus des couverts v g aux, on sait que l'épaisseur de vorticité δ , qui est principalement liée à la densité de surface foliaire du couvert, est indépendante de la vitesse du vent U , voir Brunet & Irvine (1999). Suivant l'analogie de couche de mélange proposée par Raupach *et al.* (1996), on pourrait donc s'attendre à ce que la longueur d'onde caractérisant les structures cohérentes au sein des couverts v g aux soit (i) aproximativement égale pour le blé et la luzerne puisque ces deux v g aux ont une densité foliaire proche, et (ii) indépendante de la vitesse du vent U . Or, on a montré expérimentalement qu'il y a un rapport 2 à 3 entre les valeurs de longueur d'onde pour la luzerne et pour le blé, et que la longueur d'onde caractérisant l'ondulation du couvert augmente avec U . De manière similaire, la fréquence issue d'une instabilité de couche de mélange, régie par U/δ , augmente linéairement avec la vitesse moyenne de l'écoulement. Or ici, la fréquence caractérisant le mouvement du couvert a été trouvée indépendante de la vitesse du vent U . Par conséquent, le modèle de couche de mélange de Raupach *et al.* (1996) ne permet pas d'expliquer les évolutions expérimentales de la longueur d'onde et de la fréquence du mouvement du couvert avec la vitesse du vent.

De plus, le regroupement des données expérimentales des deux couverts, après normalisation, a montré que la rigidité des plantes, à travers leur fréquence propre f_0 , jouait un rôle prépondérant dans la détermination des valeurs de longueur d'onde et de fréquence caractérisant les ondes de chacun des deux couverts. En particulier, il est très frappant que l'ondulation cohérente se fasse à la fréquence

propre f_0 des plantes indépendamment de la vitesse du vent. Cette sélection de fréquence dans le mouvement cohérent de la culture suggère que la dynamique propre des plantes joue un rôle actif dans le mécanisme d'instabilité à l'origine de leur ondulation. Finnigan (1979) a aussi trouvé des pics dans les spectres du vent au-dessus d'un champ de blé qui correspondaient à la fréquence propre des tiges de blé : cette caractéristique suggérait également que l'oscillation cohérente des plantes puisse perturber l'écoulement du vent au-dessus et à l'intérieur du couvert.

Le modèle de couche de mélange proposé par Raupach *et al.* (1996) ne permet pas d'expliquer le rôle joué par la dynamique du couvert suggéré à la fois par nos résultats et par ceux de Finnigan (1979). Pour essayer de comprendre ce phénomène, il semble donc nécessaire d'étudier de manière couplée la dynamique du vent et le mouvement du couvert. Pour ce faire, un modèle d'interaction fluide-structure est proposé et analysé dans le Chapitre suivant.