

## **Analyse des plans d'écoulement**

Après avoir caractérisé les conditions topographiques et les inclinaisons résultantes à l'échelle du footprint des mesures de flux (§ 1), nous nous intéressons ici à l'inclinaison de l'écoulement, capturée par les mesures et caractérisée à partir de la correction rotative « planar fit ». Les résultats obtenus sont ensuite analysés sur des périodes spécifiques, pour hiérarchiser les facteurs d'influence possibles tels que topographie, régime d'écoulement ascendant ou descendant, et couverture végétale. Pour cela, les résultats sont analysés en discriminant 1/ les conditions de vent ascendant (vent de sud et nord-ouest sur les versants nord et sud, respectivement) et descendant (vent de sud et nord-ouest sur les versants sud et nord, respectivement), et 2/ les conditions d'occupation du sol (sol nu et de couverture végétale) selon les périodes de transition (croissance végétale, récolte ou sénescence). Les analyses sont effectuées pour les conditions diurnes uniquement, afin d'éviter les problèmes de stabilité en conditions nocturnes. En vue d'obtenir un écoulement moyen, les angles d'inclinaison sont calculés sur des intervalles de temps relativement long (le jour) à l'échelle des mesures qui sont collectées avec une fréquence de 10 Hz.

L'inclinaison de l'écoulement est caractérisée via les mêmes paramètres géométriques que ceux utilisés pour caractériser l'inclinaison topographique. A partir des mesures de covariances turbulentes collectées par anémométrie sonique, un changement de système de coordonnées est proposé via une matrice de rotation. Dans le nouveau système de coordonnées résultant, la composante verticale du vent est orientée selon l'axe vertical, et la

direction du vent dans le plan horizontal est orientée selon un seul axe (e.g. celui des abscisses). Nous en déduisons l'angle « yaw » que fait la direction du vent avec une direction de référence donnée par l'orientation du système de mesure, l'angle « pitch » que fait l'écoulement avec l'horizontal dans la direction du vent, et l'angle « roll » que fait l'écoulement dans le sens transversal de la direction du vent avec l'horizontal (Figure 4.2).

Nous présentons dans un premier temps les résultats en période de transition (croissance végétative et période récolte – post récolte), afin de mettre en exergue l'influence de la végétation sur l'écoulement. Dans un second temps, nous étudions l'influence du relief sur les écoulements en comparant les inclinaisons issues de « planar fit » avec celle issues de la topographie, et ce en distinguant les conditions de sol nu et de couverture végétale.

## 2.1. Influence de la végétation sur les écoulements

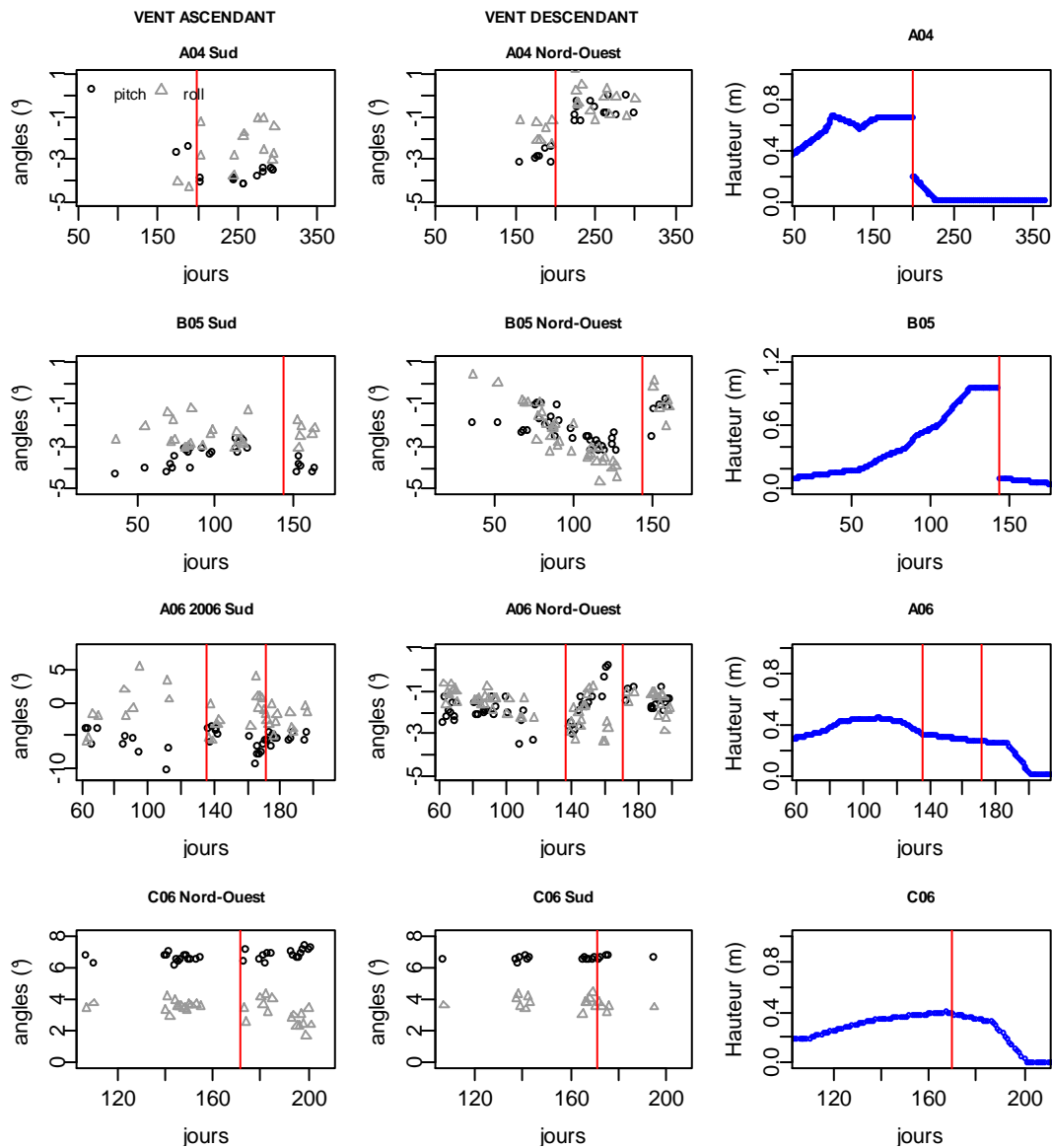
Bien que la hauteur du couvert végétal ne soit pas élevée (inférieure au mètre), il est attendu que les caractéristiques végétales influent sur les mesures de flux convectifs, celles-ci étant effectuées à une hauteur de 2 m, et donc à proximité de la surface. La Figure 4.13 illustre, pour les différentes parcelles de mesure (A, B, C), les chroniques des angles pitch et roll déterminés par « planar fit », ainsi que de la hauteur du couvert mesurée in-situ (voir Chapitres 2 et 3). Via les différents jeux de données considérés (A04, B05, A06, C06), sont différenciées les parcelles (A, B, C) et les années d'expérimentation (2004, 2005, 2006), ainsi que les conditions de vent (ascendant, descendant). Les conditions d'occupations du sol pour ces chroniques étaient les suivantes : le jeu de données A04 correspond à une culture de blé, le jeu de données B05 correspond à une culture d'avoine, le jeu de données A06 correspond à une culture de fève suivie par de la végétation naturelle avant le dessèchement, le jeu de données C06 correspond à une jachère pour pâturage. Rappelons pour finir que le couplage entre direction de vent et topographie induit des conditions de vent

- ascendant sur le versant nord (parcelles A et B) pour un vent de sud, et sur le versant sud (parcelle C) pour un vent de nord-ouest,
- descendant sur le versant nord (parcelles A et B) pour un vent de nord-ouest, et sur le versant sud (parcelle C) pour un vent de sud.

La Figure 4.13 indique des changements d'inclinaison du plan d'écoulement (via les angles pitch et roll) en réponse à des changements d'occupation du sol (récolte ou sénescence qui entraînent une variation des caractéristiques de la couverture végétale), mais pas de façon systématique. Pour le jeu de données A04, nous observons des variations de 1 à 2 ° sur les angles pitch et roll, que le vent soit ascendant ou descendant. Dans ce cas, la couverture végétale accroît (respectivement diminue) l'inclinaison du plan d'écoulement (via l'angle pitch) lorsque le vent est descendant (respectivement ascendant). Pour le jeu de données B05, l'angle pitch diminue (respectivement augmente) avec la couverture végétale en conditions de vent ascendant (respectivement descendant). Les jeux de données A06 et C06 ne présentent pas de corrélation entre les angles d'inclinaison et les conditions de couverture végétale.

Les résultats pour les jeux de données A04 et B05 montrent une influence plus importante de la couverture végétale, qui peut s'expliquer par les caractéristiques de cette dernière. Pour les jeux de données A06 et C06, la végétation est en effet caractérisée par une hauteur inférieure (40 cm en comparaison à 80 et 100 cm pour les jeux de données A04 et B05) et une couverture végétale moindre (végétation éparse et hétérogène en comparaison à une végétation couvrante et homogène pour les jeux de données A04 et B05). Aussi, les périodes de transition ne sont pas similaires, avec dans un cas un changement instantané de couverture végétale (récolte) et dans l'autre cas un changement progressif (sénescence). Enfin, les résultats pour la parcelle C sont influencés par une contribution du voisinage plus importante en comparaison aux autres parcelles, dans un contexte de relief accidenté.

De ces résultats, nous pouvons conclure que les périodes de transition considérées ici mettent en évidence l'influence de la végétation sur les conditions d'écoulement en termes d'inclinaison, mais pas systématiquement. Ainsi l'influence de la végétation est détectable dans le cas de couvert végétaux bien développés en termes de hauteur, de couverture du sol, et d'homogénéité. De même cette influence est-elle principalement observée pour des conditions de vent descendant. En définitive, il semble donc que l'inclinaison de l'écoulement (caractérisée par l'angle pitch en valeur absolue) augmente (respectivement diminue) avec la couverture végétale en conditions d'écoulement descendant (respectivement ascendant). Après avoir considéré les périodes de transition, nous nous intéressons maintenant à l'analyse des conditions de sol nu et de couverture végétale, séparément, et ce en comparant les inclinaisons issues de « planar fit » avec celle issues de la topographie.



**Figure 4.13. Chroniques des angles pitch et roll capturés par les mesures et calculés à l'aide de planar fit, en conditions de vent ascendant (colonne 1) et descendant (colonne 2), et en fonction de la hauteur du couvert végétal (colonne 3). Chaque ligne représente un jeu de données (A04, B05, A06, C06) selon les parcelles (A, B, C) et les années d'expérience (2004, 2005, 2006). Les lignes verticales représentent 1/ la date de récolte pour les cultures (A04, B05 et A06 1<sup>ère</sup> colonne), et 2/ la date de sénescence du végétal pour les parcours (A06 2<sup>ème</sup> colonne et C06). Les directions de vent (vent de nord-ouest ou de sud) sont accolées aux étiquettes des jeux de données (A04, B05, A06, C06).**

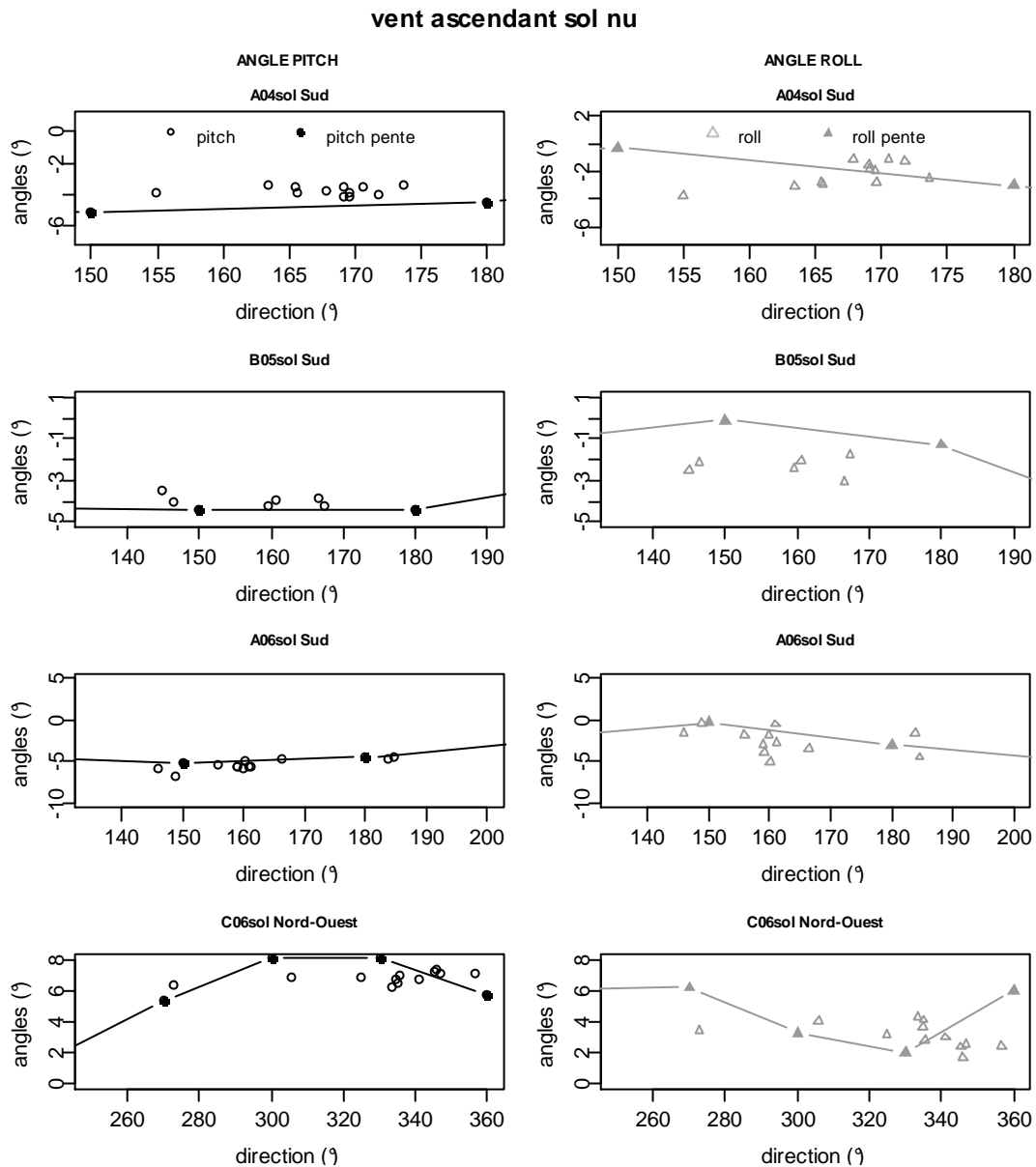
## 2.2. Influence du relief sur les écoulements : cas du sol nu

Nous présentons ici les variations, sur l'intervalle des valeurs prises par la direction du vent, de l'inclinaison du plan d'écoulement dans les directions parallèle (angle pitch) et orthogonale (angle roll) à celle du vent, en discriminant les conditions d'écoulement ascendant et descendant. Pour cela nous comparons, pour chacun des jeux de données considérés, les estimations issues de la topographie (MNT) avec celles issues de la correction « planar fit ».

### 2.2.1. Vent ascendant

La Figure 4.14 illustre les variations des angles pitch et roll sur l'intervalle des valeurs prises par la direction du vent (conditions de vent ascendant), pour chacun des jeux de données (A04, B05, A06, C06) parmi les parcelles (A, B, C) et les années d'expérimentation (2004, 2005, 2006), en ne sélectionnant que les conditions de sol nu. Sont indiquées les valeurs des angles calculées à l'aide 1/ des mesures par covariances turbulentes via la correction planar fit, et 2/ de la topographie via le MNT.

Il n'apparaît pas de différence notable d'un jeu de données à un autre. Que ce soit pour les angles pitch ou roll, les estimations « planar fit » ne montrent pas de variation sur l'intervalle des valeurs prises par la direction du vent, et les différences avec les estimations issues de la topographie sont faibles (entre 1 et 2 °). Les valeurs peuvent être considérées comme constantes, tant pour les estimations « planar fit » que topographiques. En définitive, il semble que l'écoulement suit la pente du terrain lorsque le sol est nu et le vent ascendant.

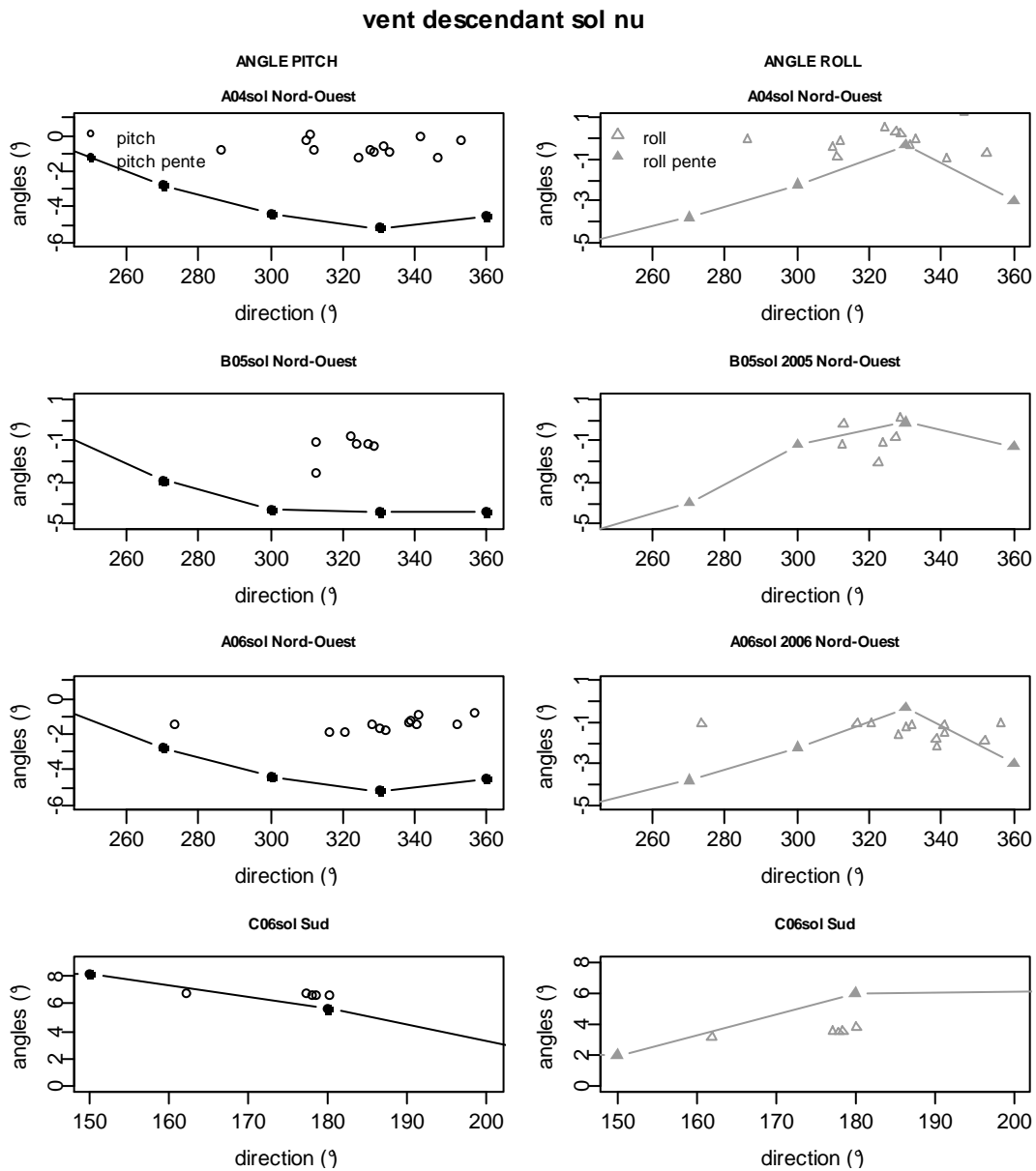


**Figure 4.14.** Valeurs, en fonction de la direction du vent, des angles pitch (colonne 1) et roll (colonne 2), calculées à l'aide 1/ des mesures par covariances turbulentes via la correction planar fit (labels « pitch » et « roll ») et 2/ de la topographie via le MNT (labels « pitch pente » et « roll pente »). Chaque ligne représente un jeu de données (A04, B05, A06, C06) parmi les parcelles (A, B, C) et les années d'expérience (2004, 2005, 2006). Ne sont considérés que les conditions de sol nu et les régimes de vent ascendant.

### 2.2.2. Vent descendant

La Figure 4.15 illustre les variations des angles pitch et roll sur l'intervalle des valeurs prises par la direction du vent (conditions de vent descendant), pour chacun des jeux de données (A04, B05, A06, C06) parmi les parcelles (A, B, C) et les années d'expérimentation (2004, 2005, 2006), en ne sélectionnant que les conditions de sol nu. Sont indiquées les valeurs des angles calculées à l'aide 1/ des mesures par covariances turbulentes via la correction planar fit, et 2/ de la topographie via le MNT.

Similairement aux résultats reportés pour les conditions de vent ascendant, les angles pitch et roll varient peu sur l'intervalle des valeurs prises par la direction du vent en conditions de vent descendant. Il n'apparaît pas non plus de différence notable d'un jeu de données à un autre, sauf pour la parcelle C. En revanche, nous observons des différences plus importantes entre les estimations topographiques et les estimations « planar fit », différences comprises entre 1 et 5 °. En outre, les estimations « planar fit » pour les angles pitch et roll sont inférieures, en valeur absolue, aux estimations topographiques. Ceci indique des inclinaisons moindres pour les plans d'écoulement en comparaison au relief, et donc un décrochage entre les deux, avec des écoulements qui se rapprochent de l'horizontale. Une explication possible est la dilatation des distances horizontales entre les plans d'écoulement, comme illustré sur la Figure 4.1. Ce phénomène est plus ou moins prononcé d'un jeu de données à un autre, selon la distance entre la crête du versant et la station de mesure, et selon la topographie dans le voisinage de la station.



**Figure 4.15.** Valeurs, en fonction de la direction du vent, des angles pitch (colonne 1) et roll (colonne 2), calculées à l'aide 1/ des mesures par covariances turbulentes via la correction planar fit (labels « pitch » et « roll ») et 2/ de la topographie via le MNT (labels « pitch pente » et « roll pente »). Chaque ligne représente un jeu de données (A04, B05, A06, C06) parmi les parcelles (A, B, C) et les années d'expérimentation (2004, 2005, 2006). Ne sont considérés que les conditions de sol nu et les régimes de vent descendant.



### 2.2.3. Conclusion sur les écoulements en condition de sol nu

Les angles pitch et roll déterminés par planar fit sont quasi constants pour les vents ascendants et descendants. Nous proposons donc de synthétiser les résultats via les moyennes sur les intervalles des valeurs prises par la direction du vent (Tableau 4.4). Comme observé via la Figure 4.14 et la Figure 4.15, il ressort du Tableau 4.4 que les différences entre estimations « planar fit » et estimations topographiques sont plus importantes en conditions de vent descendant. Nous observons dans ce cas une tendance à l'horizontalité pour les estimations « planar fit », qui s'explique par l'éloignement entre les plans d'écoulement. En revanche, ces derniers suivent la topographie en conditions de vent ascendant, ce qui s'explique par une contraction des distances horizontales entre les lignes de courant comme illustré sur la Figure 4.1.

**Tableau 4.4. Valeurs moyennes, sur les intervalles des valeurs prises par la direction du vent, des angles pitch et roll déterminés via « planar fit » et via le MNT. Sont considérés les régimes de vent ascendant (colonne 2 à 5) et descendant (colonne 6 à 9), ainsi que chaque jeu de données selon les lignes 3 à 6 (A04, B05, A06, C06) parmi les parcelles (A, B, C) et les années d'expérimentation (2004, 2005, 2006), en ne sélectionnant que les conditions de sol nu.**

	Vent ascendant				Vent descendant			
	Pitch (°)	Roll (°)	Pitch pente (°)	Roll pente (°)	Pitch (°)	Roll (°)	Pitch pente (°)	Roll pente (°)
A04sol	-3.8	-2.2	-4.9	-1.7	-0.6	-0.2	-4.2	-2.3
B05sol	-4.0	-2.3	-4.4	-0.7	-1.3	-0.9	-4.0	-1.7
A06sol	-5.4	-2.5	-4.9	-1.7	-1.5	-1.6	-4.2	-2.3
C06sol	6.8	3.0	6.8	4.4	6.7	3.5	6.9	4.0

### 2.3. Influence du relief sur les écoulements : cas du couvert végétal

Nous avons constaté, au travers d'une analyse des périodes de transitions, que la végétation a une influence sur l'écoulement (§ 2.1). En outre, les résultats obtenus durant les périodes de sol nu ont montré que l'écoulement peut-être plus ou moins conditionné par la topographie selon les conditions de vent ascendant ou descendant (§ 2.2). La présente partie se propose donc d'analyser les mesures en conditions de couverture végétale uniquement, comme il a été fait pour les conditions de sol nu dans la section précédente. La méthode retenue est la même, à savoir l'analyse des angles pitch et roll sur l'intervalle des valeurs prises par la direction du

vent, selon les conditions de vent ascendant ou descendant, et en comparant les estimations topographiques avec les estimations « planar fit ».

### 2.3.1. Vent ascendant

La Figure 4.16 illustre les variations des angles pitch et roll sur l'intervalle des valeurs prises par la direction du vent (conditions de vent ascendant), pour chacun des jeux de données (A04, B05, A06, C06) parmi les parcelles (A, B, C) et les années d'expérimentation (2004, 2005, 2006), en ne sélectionnant que les conditions de couverture végétale. Sont indiquées les valeurs des angles calculées à l'aide 1/ des mesures par covariances turbulentes via la correction planar fit, et 2/ de la topographie via le MNT.

Il n'apparaît pas de différence notable d'un jeu de données à un autre, à l'exception d'une dispersion observée pour les parcelles A et B mais pas pour la parcelle C. Contrairement à la Figure 4.14 (vent ascendant en conditions de sol nu), des différences apparaissent entre les estimations topographiques et « planar fit », avec des nuages de points plus épars pour les estimations « planar fit ». Les dispersions observées pour les estimations « planar fit », aux voisinages des estimations topographiques, sont expliquées par la dynamique de la végétation. D'une part, les caractéristiques de la couverture végétale varient en termes de hauteur, de couverture du sol et d'homogénéité. D'autre part, nous avons noté précédemment de fortes corrélations entre les variations de ces caractéristiques et les variations des angles pitch et roll qui représentent l'inclinaison du plan d'écoulement (Figure 4.13).

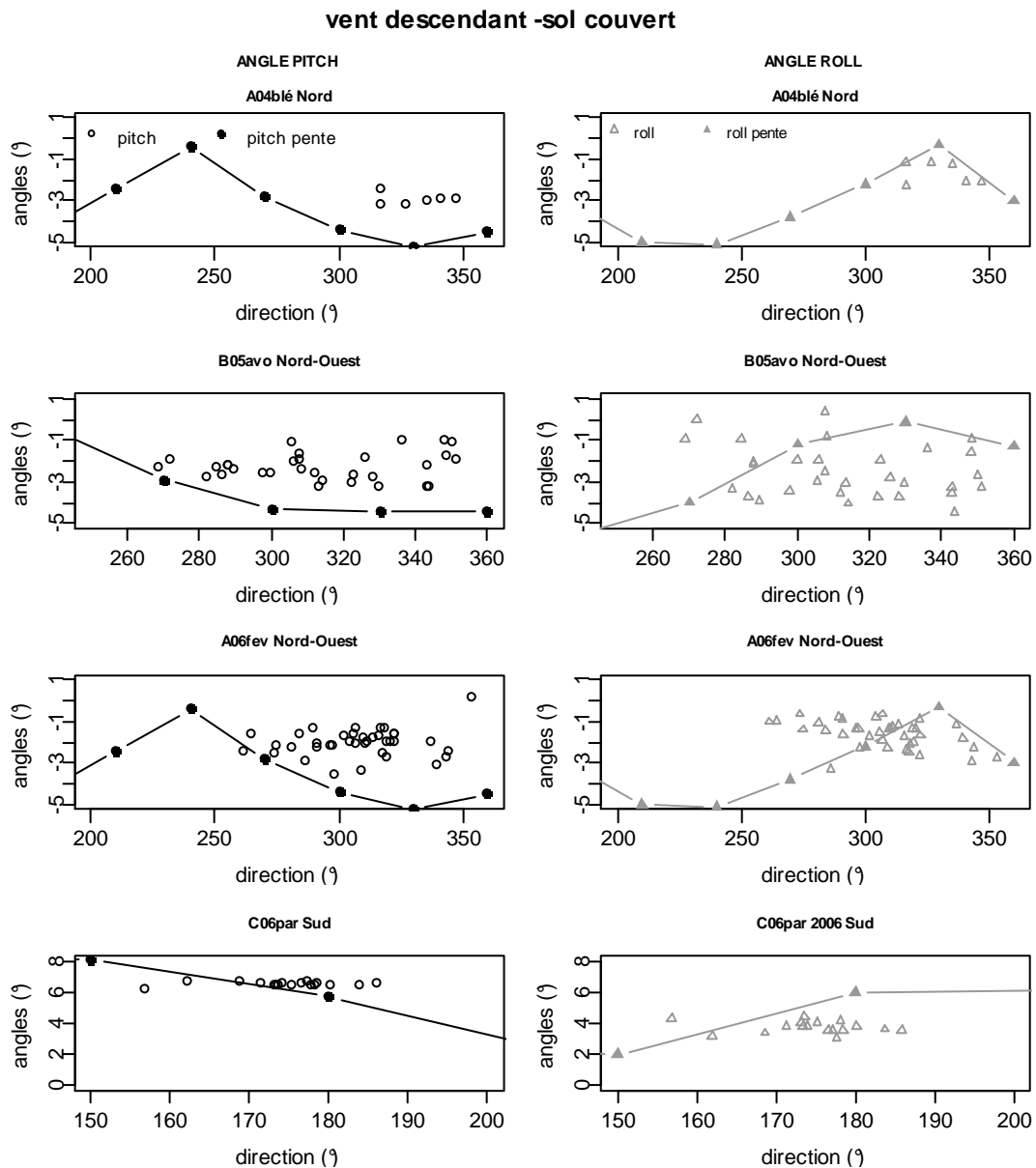
Bien qu'il soit difficile de conclure quant à un lien entre l'inclinaison de l'écoulement et la topographie en conditions de vent ascendant, deux remarques sont possibles. Primo, la Figure 4.16 montre que les estimations « planar fit » sont localisées dans le voisinage des estimations topographiques. Secundo, la Figure 4.13 indique un net lien entre la couverture végétale et l'inclinaison de l'écoulement. Il semble donc que l'écoulement suive la topographie, la dispersion observée sur la Figure 4.16 étant due à des changements de couverture végétale. Ainsi l'écoulement semble tendre à l'horizontalité en présence d'une végétation homogène dont la hauteur est de l'ordre du mètre. Il suit la pente pour une végétation de petite taille, se comportant comme dans le cas de sol nu (Figure 4.14). Lorsque la végétation est hétérogène, l'écoulement ne montre pas les mêmes tendances et l'interprétation à ce stade reste difficile.



### 2.3.2. Vent descendant

La Figure 4.17 illustre les variations des angles pitch et roll sur l'intervalle des valeurs prises par la direction du vent (conditions de vent descendant), pour chacun des jeux de données (A04, B05, A06, C06) parmi les parcelles (A, B, C) et les années d'expérimentation (2004, 2005, 2006), en ne sélectionnant que les conditions de couverture végétale. Sont aussi indiquées les estimations issues des données topographiques et de la correction « planar fit ».

Similairement aux observations reportées lors de la comparaison entre sol nu et couverture végétale pour un vent ascendant, nous observons ici des tendances comparables entre sol nu et de couverture végétale pour un vent descendant. La dispersion observée pour les conditions de couverture végétale s'explique par un panel de plus large pour les conditions de surface en rapport avec le couvert végétal : hauteur de la végétation, pourcentage de couverture du sol, hétérogénéité selon que la végétation soit éparsée ou non. La tendance est plutôt à l'horizontalité, avec des estimations « planar fit » pour les angles pitch plus proche de zéro que les estimations topographiques. Pour les angles roll, les estimations topographiques sont surtout marquées par des dispersions, sans réel comportement de sous- ou sur- estimation par les estimations « planar fit ». Les dispersions observés s'expliquent par l'influence du couvert végétal, en particulier pour des hauteurs de végétation proche du mètre, où l'on remarque un écoulement descendant qui suit plus ou moins la pente topographique selon que la végétation soit plus ou moins développée, respectivement (Figure 4.13). Notons enfin le cas particulier de la parcelle C, avec des angles qui varient très peu.



**Figure 4.17.** Valeurs, en fonction de la direction du vent, des angles pitch (colonne 1) et roll (colonne 2), calculées à l'aide 1/ des mesures par covariances turbulentes via la correction planar fit (labels « pitch » et « roll ») et 2/ de la topographie via le MNT (labels « pitch pente » et « roll pente »). Chaque ligne représente un jeu de données (A04, B05, A06, C06) parmi les parcelles (A, B, C) et les années d'expérimentation (2004, 2005, 2006). Ne sont considérés que les conditions de couverture végétale et les régimes de vent descendant.

### **2.3.3. Conclusion sur les écoulements en présence de végétation**

L'influence de la végétation est fonction des caractéristiques de celle-ci, en termes de hauteur, de pourcentage de couverture du sol, et d'homogénéité du couvert. Pour un couvert peu développé, l'écoulement est similaire à celui observé en conditions de sol nu, avec un suivi de la topographie en conditions de vent ascendant, et une tendance à l'horizontalité en conditions de vent descendant. Pour un couvert plus développé, avec une hauteur de l'ordre du mètre, les observations sont contraires, avec une tendance à l'horizontalité en conditions de vent ascendant, et un suivi de la topographie dans en conditions de vent descendant. La structure de la végétation a aussi un impact sur l'écoulement, les tendances étant plus marquées sur couverts homogènes et continus. Enfin, le relief dans le voisinage de la station de mesures influe significativement sur les données, comme le montrent les résultats sur la parcelle C qui est caractérisée par la proximité d'une colline et de deux oued, en comparaison aux parcelles A et B qui sont caractérisées par des versants plans.

## **3. Conclusion**

La présente section vise à analyser les effets de relief sur les conditions d'écoulement, avec un accent sur l'inclinaison des plans d'écoulement en lien avec la topographie. Deux indicateurs sont ainsi considérés, l'inclinaison topographique issue d'un MNT d'une part, et l'inclinaison de l'écoulement d'autre part, capturée par les mesures de covariances turbulentes puis restituée via la correction « planar fit ». Pour ces deux indicateurs, sont considérées les inclinaisons dans les directions parallèle et orthogonale à celle du vent.

Une analyse de sensibilité permet dans un premier temps de s'assurer, pour la majeure partie des cas étudiés, de la représentativité des estimations topographiques obtenues à partir du MNT, en lien avec l'étendue spatiale des mesures (footprint) qui dépend des conditions micrométéorologiques. Cette étape met en avant l'influence de la direction du vent, qui s'explique par le couplage avec la topographie. Les inclinaisons maximales peuvent alors atteindre 10%. Ces travaux soulignent aussi les différences de topographie selon les stations de mesures localisées sur les deux versants du bassin, avec la proximité d'une colline et de deux oueds pour la station de mesures localisée sur le versant sud.

Les estimations issues de la correction « planar fit » sont ensuite analysées et comparées avec les estimations topographiques, en distinguant les différentes situations que sont les conditions de vent ascendant et descendant et les conditions de sol nu et de couverture végétale. Dans des conditions de sol nu, nous avons observé que l'écoulement suit la topographie si le vent est ascendant. Dans le cas d'un vent descendant, il y a un décrochage entre topographie et écoulement, ce dernier tendant à être horizontal. Ces observations sont conformes avec la caractérisation proposée par Raupach et Finnigan (1997) en considérant une crête perpendiculaire à la direction du vent (Figure 4.1). Ces tendances sont inversées en conditions de couverture végétale prononcée (hauteur de végétation de l'ordre du mètre, couvert dense et homogène), avec un suivi de la topographie pour un vent descendant, et une tendance à l'horizontalité pour un vent ascendant. Dans le cas d'une végétation moins développée (hauteur inférieure au demi mètre dans notre cas, couvert épars et hétérogène), les tendances sont les mêmes que celles observées en conditions de sol nu. Le cas pour lequel il n'est pas possible de conclure est en rapport avec des conditions de couverture végétale intermédiaires, qui induisent de fortes variations sur les estimations « planar fit ».

Les résultats présentés ici doivent être considérés avec précaution, pour de multiples raisons. Premièrement, les angles topographiques sont calculés selon une extension spatiale rectangulaire, dont les dimensions peuvent différer des dimensions réelles pour les footprints correspondants aux mesures. Ce point est particulièrement critique pour la station de mesure localisée sur le versant sud, et qui se trouve à proximité d'une colline en amont et de deux oueds en aval. Deuxièmement, la correction rotative « planar fit » a pour objectif de normaliser les données par rapport au plan d'écoulement capturé par les mesures, elle est donc influencée par l'inclinaison des appareils de mesure eux-mêmes. Les erreurs de verticalité pour ces derniers ont des conséquences sur les estimations obtenues, la correction « planar fit » est d'ailleurs utilisée afin de corriger ces erreurs de verticalité. Troisièmement, la correction « planar fit » est valable pour des inclinaisons inférieures à  $6^\circ$ , alors que des valeurs supérieures sont rencontrées ici. Quatrièmement, les estimations « planar fit » sont conditionnées par la hauteur des mesures, à savoir deux mètres au dessus de la surface topographique pour notre expérimentation. Il est fort probable que les écoulements soient différents à d'autres hauteurs. Enfin, les outils utilisés (calcul de footprint, correction « planar fit ») sont actuellement des sujets de recherche à part entière, et particulièrement en termes de formalisme (Lee et al., 2004).