

INFLUENCE DU RELIEF SUR LES ÉCOULEMENTS

Dans l'optique de caractériser les flux de surface en fonction de la topographie (Chapitre 5), le présent chapitre propose, dans un premier temps, une analyse des effets de relief sur les conditions d'écoulement, en particulier au niveau de l'inclinaison du plan d'écoulement. Pour cela, une intercomparaison est menée entre deux indicateurs de l'inclinaison. Partant de l'hypothèse que les conditions d'écoulement sont influencées au premier ordre par le relief, le premier indicateur est de nature topographique. Il correspond, à l'échelle du footprint des mesures de covariances turbulentes, à la pente moyenne obtenue à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT), selon les directions parallèle et orthogonale à celle du vent. Le second indicateur est aussi la pente, mais obtenue via la correction rotative « planar fit », et qui indique l'inclinaison de l'écoulement capturée par les mesures de covariances turbulentes.

Dans un premier temps, les dimensions spatiales des mesures (footprints) sont analysées selon les conditions micrométéorologiques, afin de définir un footprint moyen à partir duquel peut être quantifiée une inclinaison topographique. Les conditions de relief à l'intérieur des footprints sont évaluées via un Modèle Numérique de Terrain (MNT). Une analyse de sensibilité permet de s'assurer de la représentativité des estimations selon l'étendue du footprint dont la variabilité a été préalablement caractérisée. Dans un second temps, l'inclinaison de l'écoulement est caractérisée à partir de la correction rotative « planar fit », et comparée avec les estimations topographiques. Une différenciation est faite entre les conditions d'occupation du sol (couverture végétale / sol nu), et les conditions d'écoulement 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) induits par le couplage entre la direction du vent et la topographie.

Nous proposons de rappeler préalablement quelques éléments bibliographiques précédemment détaillés (Chapitre 1), et qui seront utiles pour expliquer les résultats présentés ici. Notons dans un premier temps que les conditions de relief auxquelles nous nous intéressons sont relatives à des structurations collinaires basées sur des petites collines. La principale différence avec d'autres reliefs, tels que grandes collines et montagnes, réside dans

les conditions de stabilité atmosphérique et la stratification résultante, qui ne sont pas significativement influencées (Raupach et Finnigan, 1997). Bien que de multiples travaux aient étudié les modifications engendrées par les structurations collinaires sur les flux (Belcher et Hunt, 1998 ; Finnigan, 1988 ; Finnigan et Belcher, 2004 ; Finnigan et Brunet 1995 ; Kaimal et Finnigan, 1994), il n'est actuellement pas possible de clairement identifier ces modifications (Poggi et Kaul, 2007). Pour les petites collines en conditions neutre ou instable, Raupach et Finnigan (1997) proposent de caractériser l'écoulement induit selon plusieurs régions qui diffèrent par la turbulence (Figure 4.1). La région correspondant au versant face au vent, caractérisée par un vent ascendant, est divisée en deux couches (Cellier et al., 1995), l'une inférieure (proche de la surface, les lignes de courant sont fortement perturbées) et l'autre supérieure (éloignée de la surface, les lignes de courant sont parallèles). La région correspondant au versant sous le vent, caractérisée par un vent descendant, est le siège d'un écoulement plus turbulent. Les étendues de ces régions dépendent des dimensions (largeur et hauteur) de la colline considérée.

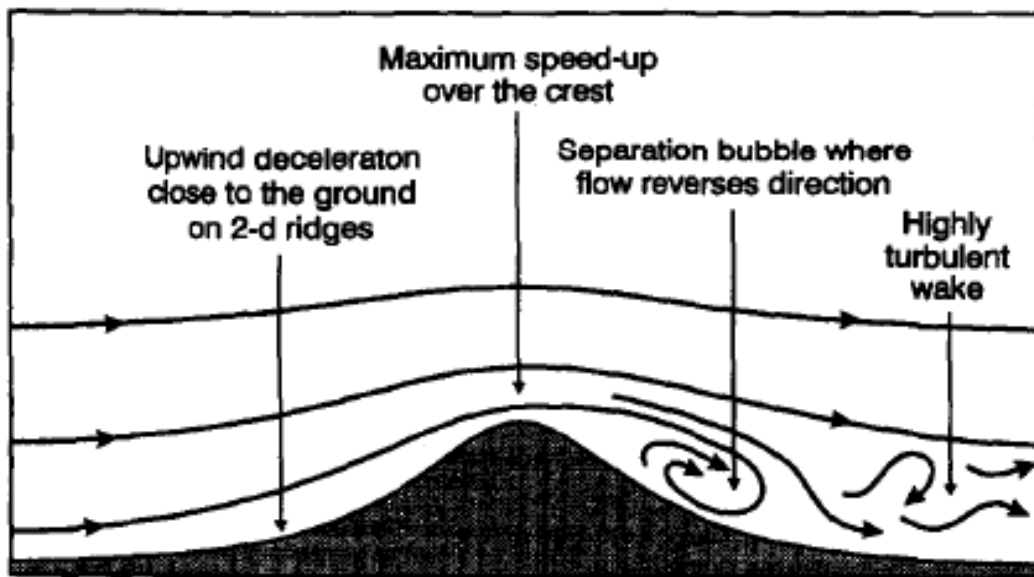


Figure 4.1. Caractérisation du champ de vitesse pour un écoulement en conditions neutres ou instables, au dessus d'une crête perpendiculaire à la direction du vent. D'après Raupach et Finnigan (1997).

Afin de corriger les mesures de covariances turbulentes (collectées par anémométrie sonique) des effets d'inclinaison, Wilczak et al. (2001) proposent d'utiliser la méthode de correction rotative « planar fit », qui permet de déterminer l'inclinaison du plan d'écoulement. A partir des mesures, un changement de système de coordonnées est effectué via une matrice de

rotation. Dans le nouveau système de coordonnées résultant, la composante verticale du vent est selon l'axe vertical, et la direction du vent dans le plan horizontal est selon un seul axe (e.g. celui des abscisses). Nous en déduisons 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). L'estimation de ces angles permet donc de caractériser l'inclinaison du plan d'écoulement.

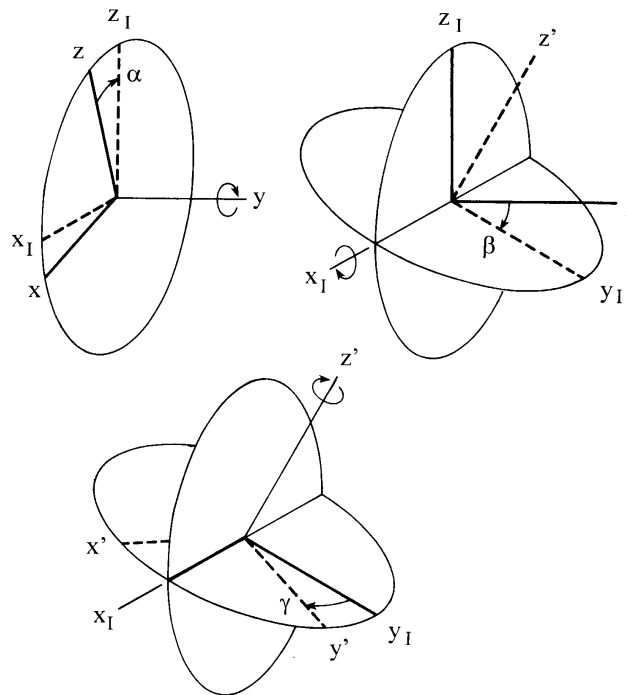


Figure 4.2. Illustrations des angles utilisés pour caractériser la correction planar fit. L'angle α est l'angle « pitch » que fait l'écoulement avec l'horizontal dans la direction du vent. L'angle β est l'angle « roll » que fait l'écoulement dans le sens transversal de la direction du vent avec l'horizontal. L'angle γ est l'angle « yaw » que fait la direction du vent avec une direction de référence donnée par l'orientation du système de mesure. D'après Wilczak et al. (2001).

Cette section se propose de présenter l'obtention et la comparaison de deux indicateurs pour l'inclinaison du plan d'écoulement, l'un obtenu à partir de la topographie via un MNT (§ 1) et l'autre à partir des mesures de covariances turbulentes via la correction rotative « planar fit » (§ 2). Les résultats sont analysés selon les conditions environnementales telles que le couplage entre topographie et régime de vent et l'occupation du sol en termes de couverture végétale et de sol nu.

1. Topographie à l'échelle des observations

1.1. Estimation du footprint pour les mesures ponctuelles

Cette partie a pour but de déterminer et caractériser le footprint des mesures, défini comme l'empreinte au sol qui inclut les contributions spatiales. Cette empreinte dépend des variables qui conditionnent l'écoulement et les flux de surface au voisinage de la station de mesure : longueur de rugosité, longueur de Monin-Obukhov, vitesse de friction et écart type du vent latéral. Ces variables sont considérées ici comme des variables micrométéorologiques, en ce sens qu'elles sont caractéristiques des échanges entre la surface et l'atmosphère. Comme mentionné dans le Chapitre 2, le modèle de footprint choisi est celui de Horst et Weil (1994), qui est adapté aux mesures de covariances turbulentes et de scintillométrie. Ce choix est motivé par la volonté d'utiliser le même modèle pour les deux types de mesures. Notons toutefois que la considération d'un modèle de footprint n'est pas une étape triviale : il existe plusieurs modèles qui donnent des résultats différents, leur formulation étant à l'heure actuelle un sujet de recherche à part entière.

Dans l'analyse qui suit, les footprints sont caractérisés en termes de 1/ sensibilité aux variables micrométéorologiques, 2/ probabilités de dépassement des parcelles concernées, et 3/ dimensions parallèle et perpendiculaire à la direction du vent. Les périodes de sol nu et de couvert végétal sont traitées séparément. Cette séparation est motivée par 1/ la considération des facteurs d'influence précités qui dépendent du couvert végétal, et 2/ le possible dépassement de parcelle par le footprint selon les conditions dans le voisinage – ces conditions sont similaires en l'absence de végétation puisqu'il s'agit de sol nu.

Nous rappelons que les footprints obtenus dans cette partie seront utilisés par la suite pour 1/ caractériser l'écoulement via une inter comparaison entre la topographie et les corrections appliquées sur les mesures, et 2/ disposer d'informations pour analyser les mesures en lien avec les conditions d'écoulement associées. Enfin, les variables considérées ici correspondent à un pas de temps de 30 minutes, soit directement via la fréquence de collecte des mesures de routine, soit indirectement via le traitement des mesures ponctuelles enregistrées à 10 Hz.

1.1.1. Influence des variables atmosphériques sur le footprint

Les facteurs d'influence précités (longueur de rugosité, longueur de Monin-Obukhov, vitesse de friction et écart type du vent latéral) sont caractérisés de façon quantitative à partir des données de fluctuations (ou de covariances turbulentes) corrigées de la rotation « planar fit » (Chapitre 2) afin d'approcher les conditions réelles. Le modèle de Horst et Weil (1994) fournit les contributions de chaque élément de surface, dont est déduit le footprint par seuillage sur les probabilités cumulées (seuil à 90 %), et la géométrie de la forme ellipsoïdale correspondante (surface, largeur dans la direction perpendiculaire à celle du vent, longueur dans la direction parallèle à celle du vent). La vitesse de friction est déduite de la covariance entre les composantes verticale et parallèle à la vitesse du vent. La rugosité mécanique est déduite de la formulation classique pour le profil de vent. La longueur de Monin-Obukhov est déduite de la vitesse de friction, de la température de l'air et de la chaleur sensible.

Des résultats représentatifs, obtenus sur la parcelle A en 2004 (culture de blé, conditions de couverture végétale, jeu de données A04blé) sont illustrés sur la Figure 4.3. Pour le cas considéré, les graphes illustrant les relations entre les facteurs d'influence précités (longueur de rugosité, longueur de Monin-Obukhov, vitesse de friction et écart type du vent latéral) sont des indicateurs sur les conditions rencontrées. Ainsi, ces dernières correspondent à un large panel de valeurs pour la vitesse du vent, illustré par les dynamiques observées pour la vitesse de friction et l'écart type du vent latéral, la forte corrélation entre ces deux dernières variables étant attribuée à l'influence de la vitesse du vent. Des conditions plus instables (augmentation de la longueur de Monin-Obukhov de $-\infty$ vers 0^-) sont aussi observées avec des vitesses de vent plus faibles (via la vitesse de friction et l'écart type du vent latéral), indiquant une corrélation négative entre convections libre et forcée. L'absence de relation marquée entre la rugosité mécanique et les autres variables micrométéorologiques indique que la rugosité ne dépend que des conditions de surface, ce qui est représentatif d'un couvert végétal homogène et non poreux d'un point de vue aérodynamique.

La diminution de la surface du footprint avec l'augmentation de la rugosité s'explique par la diminution de la distance entre la source et le point de mesure. L'augmentation de la longueur de Monin-Obukhov correspond à une diminution de la vitesse du vent et donc à une diminution de la surface du footprint. Enfin, une vitesse du vent plus élevée induit des valeurs

plus importantes pour la vitesse de friction, l'écart type du vent latéral et la surface du footprint, et donc de fortes corrélations entre ces variables.

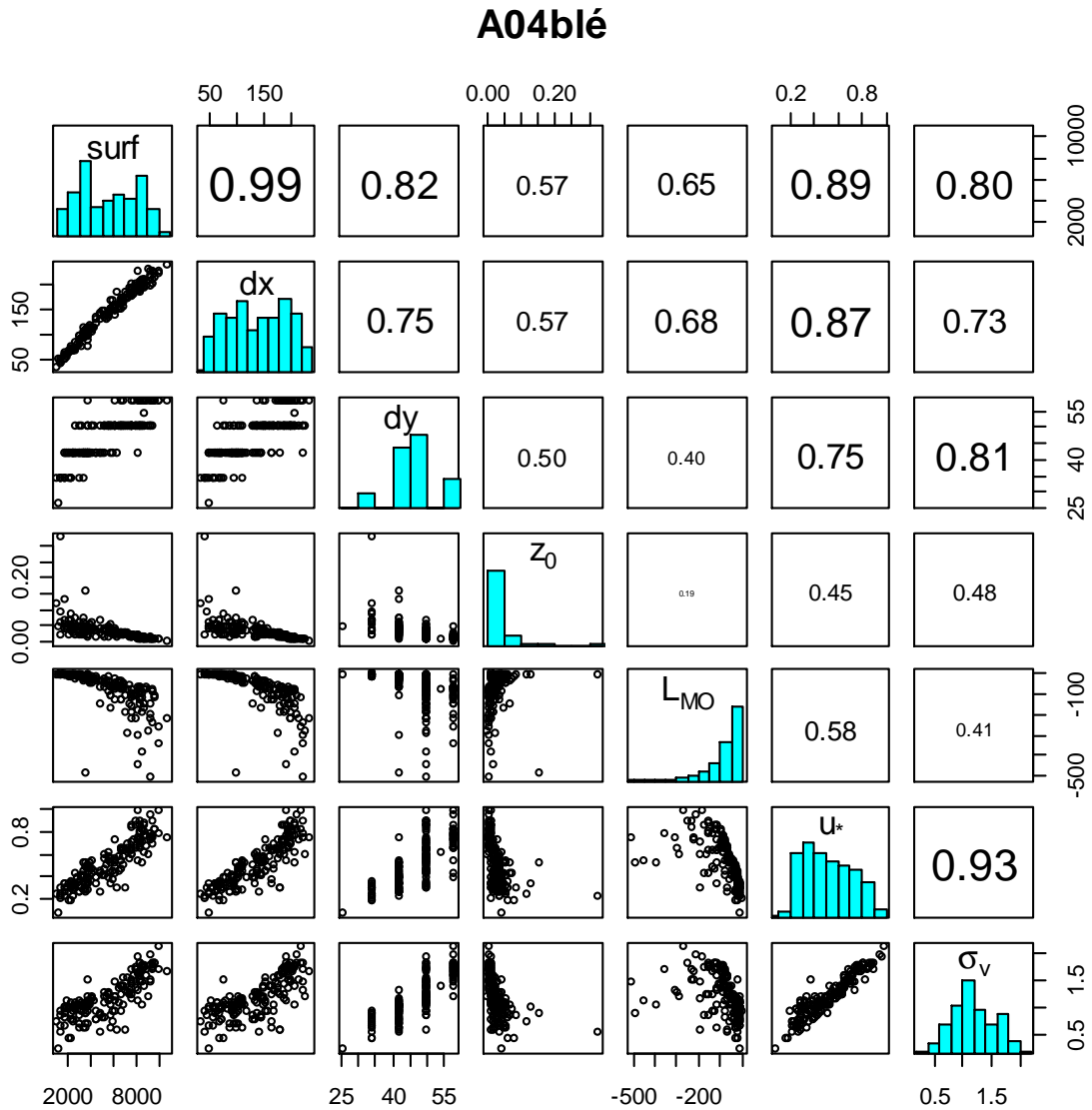


Figure 4.3. Exemples, pour la parcelle A en conditions de couverture végétale (culture de blé) durant l'année 2004 (jeu de données A04blé), des relations entre 1/ les dimensions du footprint : surface en m^2 (surf), la longueur (dx) et la largeur (dy) en m ; et 2/ les variables micrométéorologiques : la longueur de rugosité z_0 en m, la longueur de Monin-Obukhov L_{MO} en m, la vitesse de friction u_* en m/s et l'écart type du vent latéral σ_v en m/s. Les éléments au dessus de la diagonale indiquent les coefficients de corrélation (valeurs absolues) pour chaque paire considérée (e.g. 0.19 est le coefficient de corrélation entre z_0 et L_{MO}).

Les analyses obtenues en discriminant les directions de vents de nord-ouest et de sud montrent qu'il n'y a pas de différence notable. De même, les analyses obtenues en discriminant les conditions de couverture végétale ont mis en avant des tendances très similaires. Les différences observées entre conditions de sol nu et de couverture végétale sont

cohérentes, et principalement expliquées par une variation de la rugosité qui se traduit par une variation de la taille du footprint. D'une façon générale, de fortes variabilités sont observées pour les variables discutées ci-dessus, ce qui s'explique pour majeure partie par une forte variabilité des conditions météorologiques (vitesse du vent, température et humidité de l'air) comme discuté dans le Chapitre 3.

1.1.2. Footprint calculé à partir des variables atmosphériques médianes

Au vu du grand nombre de situations à considérer (à titre d'exemple, la Figure 4.3 ne représente qu'une parcelle de blé en conditions de couverture végétale durant l'année 2004), il a été décidé de considérer des footprints supposés représentatifs, et obtenus à partir de valeurs moyennes sur les variables micrométéorologiques présentées dans la partie précédente (§ 1.1.1). Ces valeurs moyennes sont calculées en séparant les trois parcelles concernées (A, B, C), avec des différenciations selon l'occupation du sol (couverture végétale ou sol nu), et selon les conditions de régime de vent (directions nord-ouest ou sud).

Les footprints correspondant aux deux principales directions de vent (nord-ouest et sud) sont montrés respectivement sur la Figure 4.4 et la Figure 4.5 pour les parcelles A, B et C. Ces footprints ont été interpolés depuis la position de la station de mesure de flux sur le parcellaire avoisinant, selon le modèle de Horst et Weil (1994). Cette représentation illustre la forme ellipsoïdale du footprint, ainsi que la décroissance des contributions avec la distance à la station de mesure : l'extension du footprint peut être significativement grande, mais les contributions correspondantes sont très faibles, voire négligeables. De ces figures, il ressort aussi les conditions de couverture végétales correspondent à des footprints dont les extensions spatiales sont plus réduites, ce qui s'explique par une diminution de la distance entre les sources (éléments de surface inclus dans le footprint) et le système de mesure (système de fluctuations). La forme plus arrondie pour parcelle C, en comparaison aux parcelles A et B, est expliquée par une valeur plus importante pour l'écart type du vent latéral. Finalement, la Figure 4.4 et la Figure 4.5 illustrent la variabilité des footprints observés, en termes de géométrie, de taille et de distance à la bordure de parcelle.

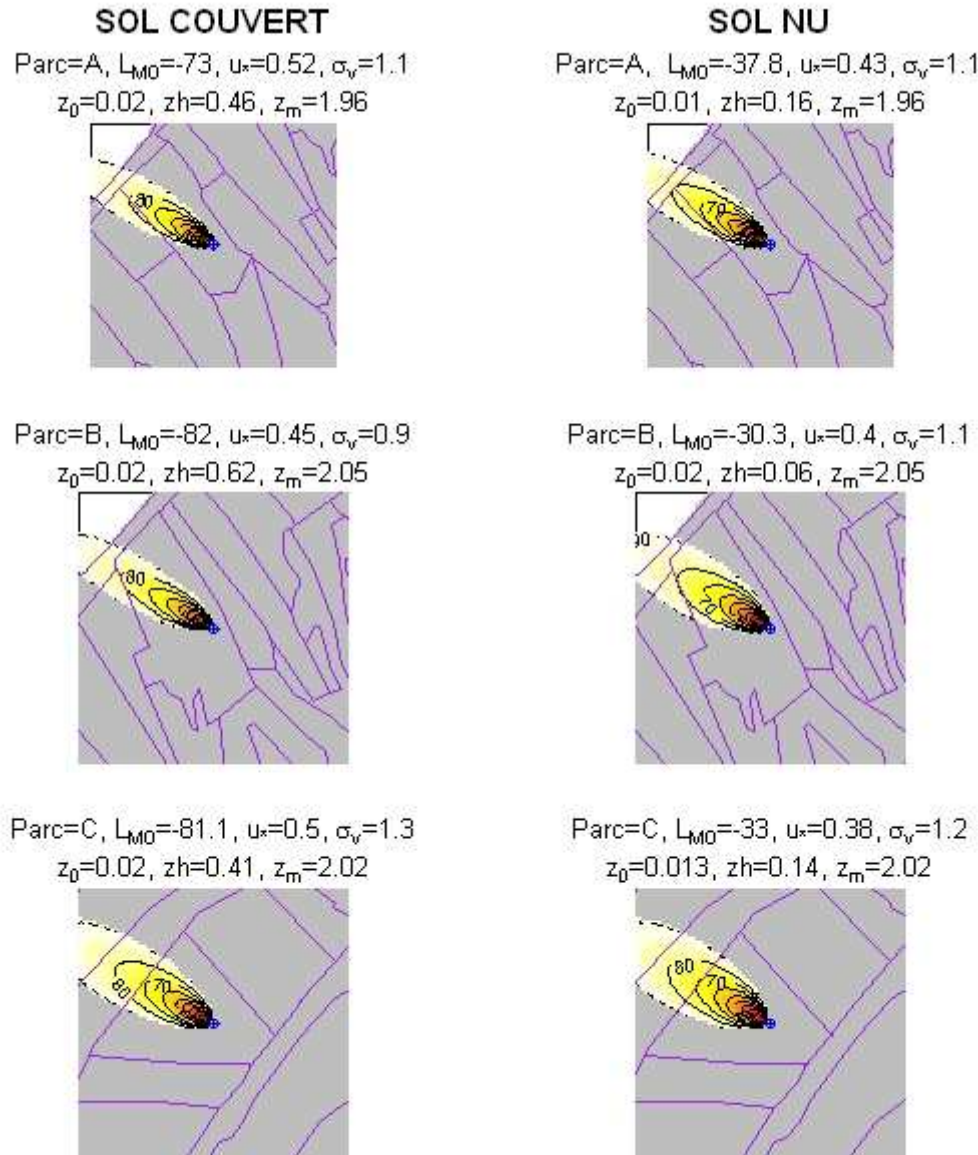


Figure 4.4. Illustration des footprints obtenus en moyennant les variables micrométéorologiques (vitesse de friction, longueur de Monin-Obukhov, rugosité mécanique, écart type de la composante transversale du vent). En ligne : les parcelles A, B et C. En colonne ; les situations de couverture végétale et de sol nu. Sont indiqués la parcelle (A, B, C), les valeurs moyennes des variables micrométéorologiques (Longueur de Monin-Obukhov L_{MO} en m, vitesse de friction u_* en m/s, écart-type du vent latéral σ_v en m/s, rugosité mécanique z_0 en m), ainsi que les hauteurs du couvert végétal (zh en m) et de la mesure (z_m en m). Le régime de vent est selon la direction nord-ouest.

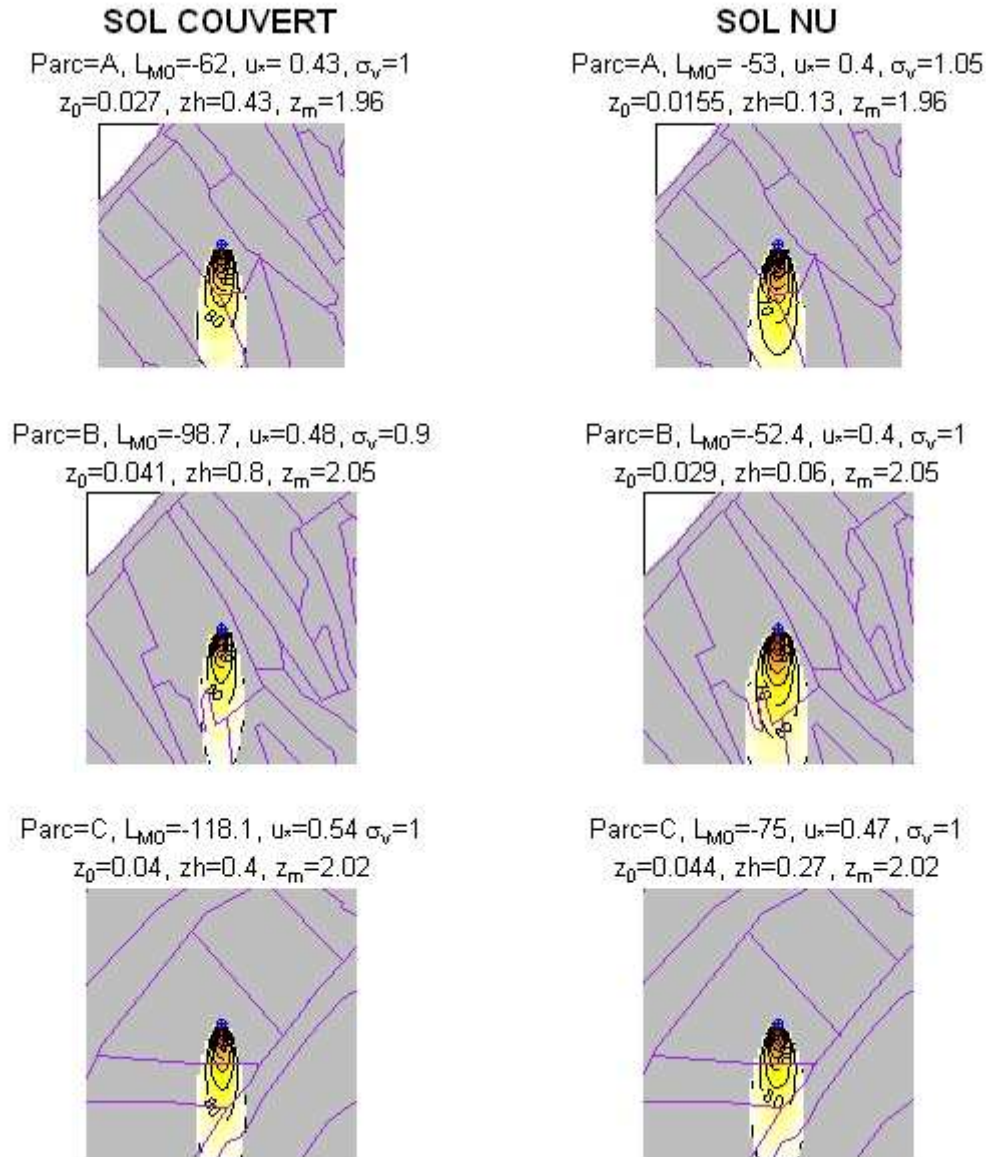


Figure 4.5. Illustration des footprints obtenus en moyennant les variables micrométéorologiques (vitesse de friction, longueur de Monin-Obukhov, rugosité mécanique, écart type de la composante transversale du vent). En ligne : les parcelles A, B et C. En colonne ; les situations de couverture végétale et de sol nu. Sont indiqués la parcelle (A, B, C), les valeurs moyennes des variables micrométéorologiques (Longueur de Monin-Obukhov L_{MO} en m, vitesse de friction u_* en m/s, écart-type du vent latéral σ_v en m/s, rugosité mécanique z_0 en m), ainsi que les hauteurs du couvert végétal (zh en m) et de la mesure (z_m en m). Le régime de vent est selon la direction sud.

1.1.3. Contribution des parcelles et voisinages sur les observations

Comme le montrent les Figure 4.4 et Figure 4.5, les footprints des mesures peuvent dépasser les parcelles correspondantes. Nous nous intéressons donc ici à la quantification des contributions de la parcelle et de son voisinage pour chaque mesure de flux. Pour cela, les

probabilités obtenues par le modèle de Horst et Weil (1994) sont croisées avec le parcellaire, en vue de quantifier les contributions parcelle / voisinage pour chaque mesure.

La Figure 4.6 représente, pour chaque situation parcelle – année – couverture, les distributions des contributions parcellaires (i.e. les flux provenant de la parcelle ou est localisée la station de mesure). Dans la majeure partie des cas, les mesures proviennent des parcelles elles-mêmes (contributions des voisinages faibles), et ce malgré la petite taille des parcelles (moyenne de 0.67 ha à l'échelle du bassin versant). Les distributions sont uni-modales, avec des médianes variant entre 60 et 80 %. Nous observons aussi que les contributions parcellaires sont plus importantes en situation de couverture végétale, ce qui s'explique par la diminution des footprints, comme discuté en § 1.1.1 et 1.2.1. La parcelle B correspond à la plus importante contribution parcellaire (plus faible contribution du voisinage), ce qui s'explique 1/ par une plus grande taille de parcelle, et 2/ par un couvert végétal plus élevé.

Les analyses obtenues en discriminant les directions de vent nord-ouest et sud montrent que les différences ne sont pas significatives (Tableau 4.1) : à l'exception d'une variation absolue de 7 % pour la parcelle agronomique A en 2006 (culture de fève), les variations observées varient entre 1 et 4 %. Notons de surcroît que les contributions des voisinages ne sont pas problématiques dans la majeure partie des cas. En effet, les voisinages des parcelles de mesures sont généralement dans les mêmes conditions hydriques et d'occupation du sol (soit une couverture végétale similaire, soit du sol nu), sauf pour la parcelle A en 2006 (culture de fève suivie d'un parcours, avec des cultures de céréales dans les voisinages sud et ouest).

Tableau 4.1. Valeurs médianes, pour les mesures de flux, des contributions des parcelles correspondantes, selon les jeux de données (parcelle / année / culture), en séparant les régimes de vents selon les directions Nord-Ouest (N) et Sud (S).

Jeu de données / direction vent	Contribution parcelle concernée	Jeu de données / direction vent	Contribution parcelle concernée
A04ble / N	0.67	A06fev / N	0.69
A04ble / S	0.68	A06fev / S	0.62
A04sol / N	0.55	A06sol / N	0.6
A04sol / S	0.56	A06sol / S	0.6
B05avo / N	0.78	C06par / N	0.83
B05avo / S	0.78	C06par / S	0.79
B05sol / N	0.78	C06sol / N	0.81
B05sol / S	0.78	C06sol / S	0.8

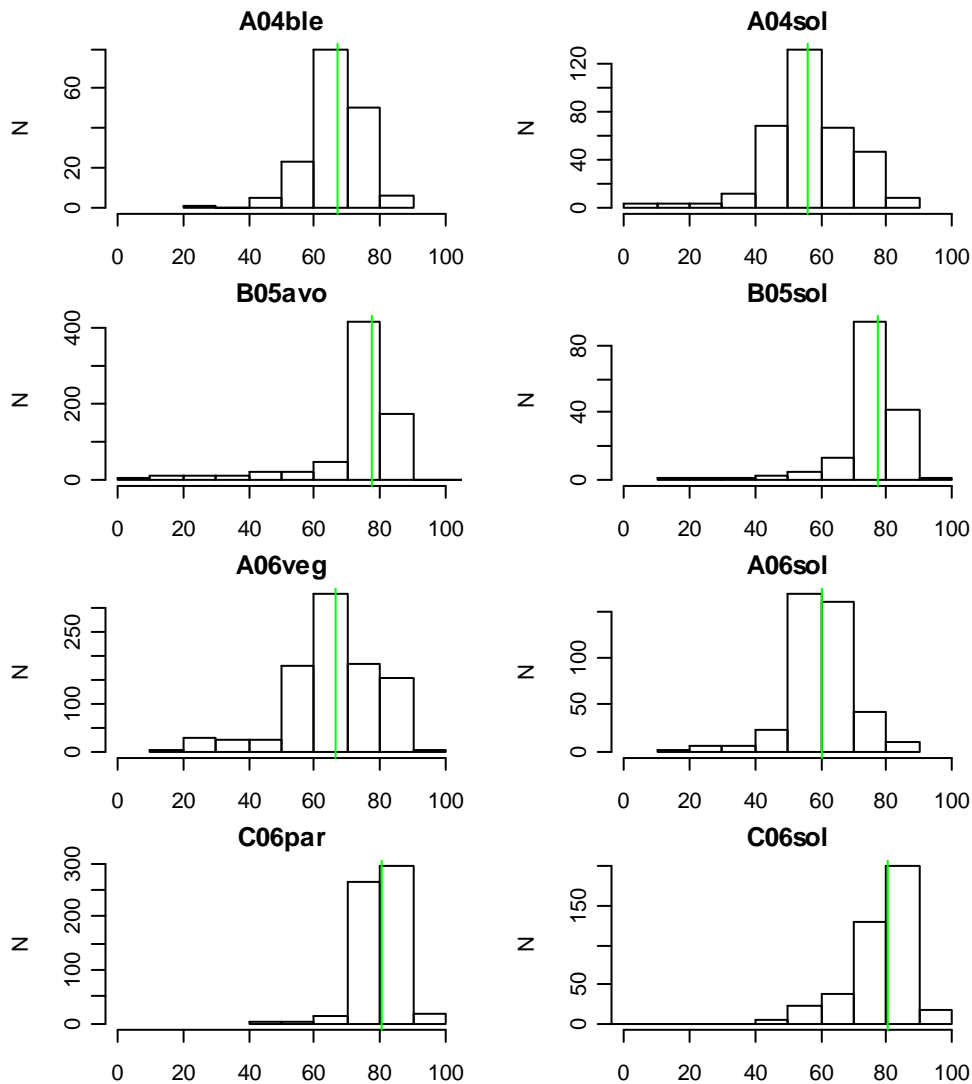


Figure 4.6. Pourcentage des flux provenant de la parcelle sur laquelle est installé le dispositif de mesures par covariances turbulentes. Les graphes sont structurés en discriminant les conditions de couverture végétale (colonne de gauche) et de sol nu (colonne de droite), pour chacun des jeux de données (lignes 1 à 4) selon la parcelle (A, B, C) et l'année d'expérience (2004, 2005, 2006). Ainsi le jeu de données collecté sur la parcelle A en 2004 (culture de blé) durant les conditions de couverture végétale (respectivement sol nu) s'appelle A04ble (respectivement A04sol). Les valeurs médianes sont indiquées par des verticales.

1.1.4. Dimensions du footprint

Le dernier point abordé dans cette première partie concerne les dimensions maximales (longueur dans la direction du vent et largeur dans la direction perpendiculaire) que peut avoir la forme ellipsoïdale du footprint. Cette information sera ensuite utilisée pour caractériser le relief sur lequel s'étend le footprint, en vue d'analyser l'impact sur l'écoulement dans la zone de mesure du système de fluctuation. La présente partie a pour but de déterminer la largeur et la longueur d'un plan donné, les dimensions de ce dernier correspondant à celles de la forme ellipsoïdale du footprint.

Les Figure 4.7 et Figure 4.8 illustrent, pour chaque situation parcelle – année – couverture, les distributions des longueurs et largeurs des footprints. De fortes variabilités sont observées pour les longueurs, qui varient d'un ordre 10 (entre 25 et 300 m), les médianes se situant entre 140 et 200 m selon la parcelle considérée. Ces valeurs sont adéquates avec celles reportées dans la littérature pour le dimensionnement d'un « fetch » adéquat (les flux proviennent d'une zone dont les dimensions sont environ 100 fois la hauteur de mesure). Les largeurs varient beaucoup moins que les longueurs, avec des facteurs de 1 à 5, des valeurs qui dépassent rarement les 80 m, et des médianes comprises entre 50 et 70 m.

Les analyses obtenues en discriminant les directions de vent nord-ouest et sud (**Tableau 4.2**) montrent des variations inférieures à 25 m sur dx (15 % en relatif au maximum) et 15 m sur dy (25 % en relatif au maximum). Compte tenu que les contributions sont moindres aux extrémités des footprints, il est attendu que ces variations n'aient pas de conséquences majeures sur les contributions parcelle / voisinage, ce qui est vérifié via les résultats présentés dans la section précédente (§ 1.1.3).

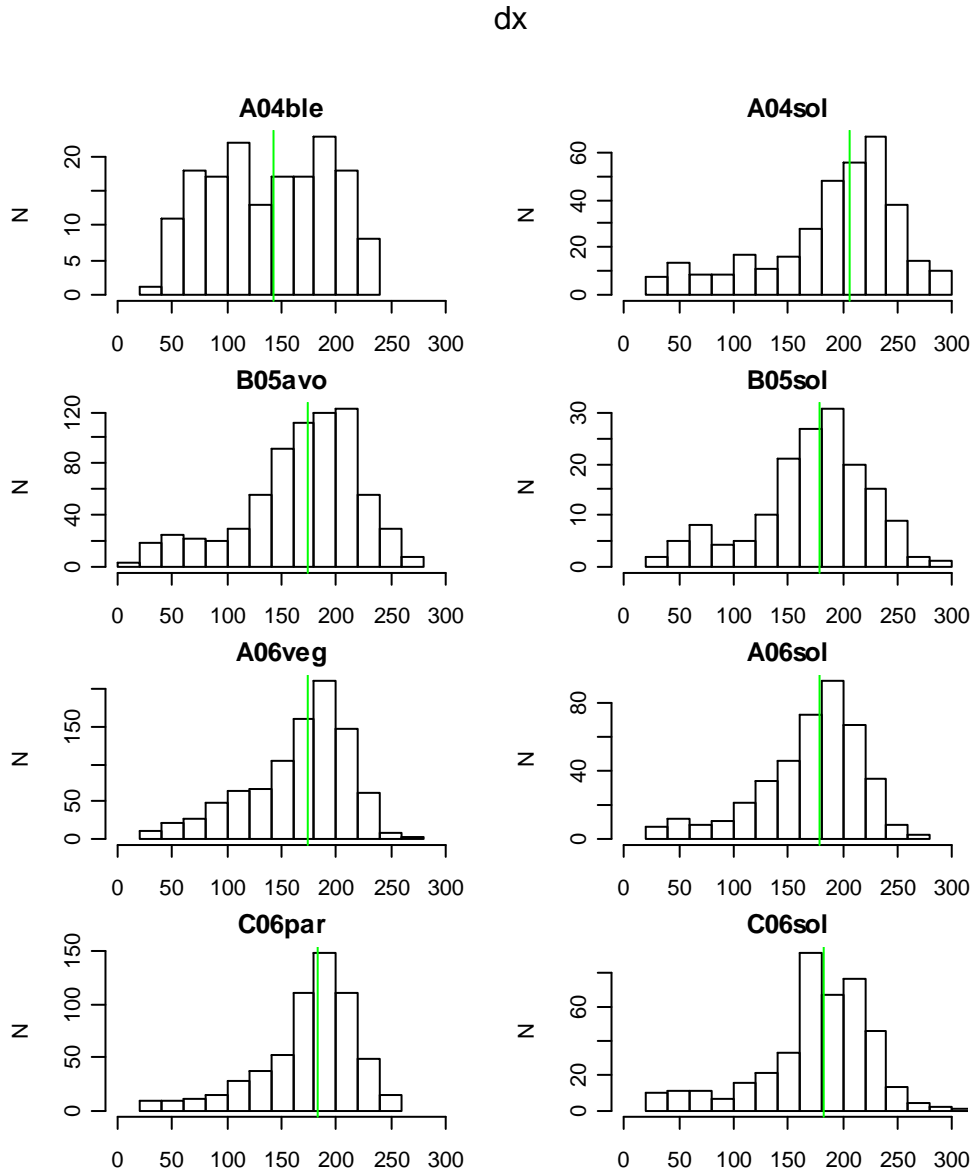


Figure 4.7. Distribution des longueurs de footprint (dx). Les graphes sont structurés en discriminant les conditions de couverture végétale (colonne de gauche) et de sol nu (colonne de droite), pour chacun des jeux de données (lignes 1 à 4) selon la parcelle (A, B, C) et l'année d'expérimentation (2004, 2005, 2006). Ainsi le jeu de données collecté sur la parcelle A en 2004 (culture de blé) durant les conditions de couverture végétale (respectivement sol nu) s'appelle A04ble (respectivement A04sol). Les valeurs médianes sont indiquées par des verticales.

dy

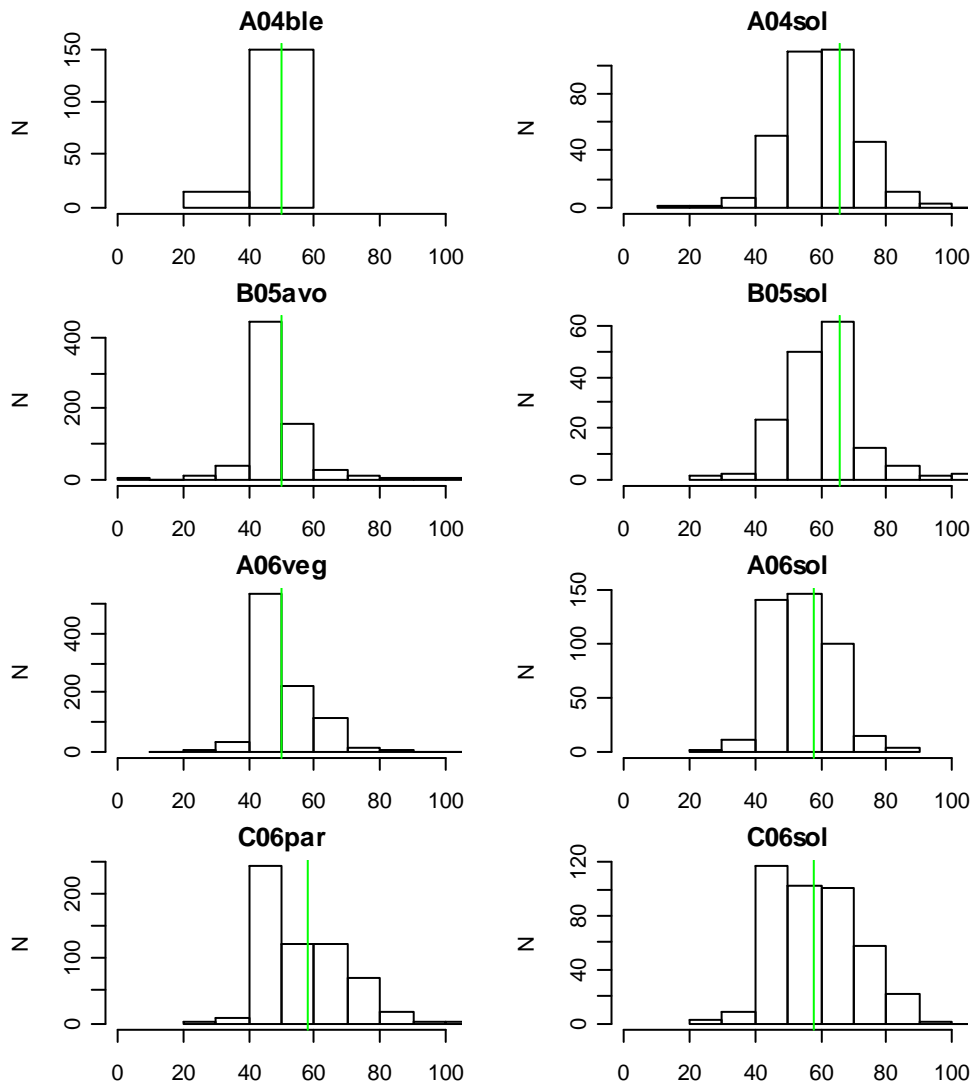


Figure 4.8. Distribution des largeurs de footprint (dy). Les graphes sont structurés en discriminant les conditions de couverture végétale (colonne de gauche) et de sol nu (colonne de droite), pour chacun des jeux de données (lignes 1 à 4) selon la parcelle (A, B, C) et l'année d'expérimentation (2004, 2005, 2006). Ainsi le jeu de données collecté sur la parcelle A en 2004 (culture de blé) durant les conditions de couverture végétale (respectivement sol nu) s'appelle A04veg (respectivement A04sol). Les valeurs médianes sont indiquées par des verticales.

Tableau 4.2. Valeurs médianes, pour les mesures de flux, des longueurs (dx) et largeurs (dy) des footprints correspondants, selon les jeux de données (parcelle / année / culture) en séparant les régimes de vents selon les directions Nord-Ouest (N) et Sud (S).

Jeu de données / direction vent	dx	dy	Jeu de données / direction vent	dx	dy
A04ble / N	154	50	A06fev / N	174	50
A04ble / S	134	50	A06fev / S	182	58
A04sol / N	218	58	A06sol / N	178	58
A04sol / S	198	66	A06sol / S	182	58
B05avo / N	186	50	C06par / N	194	66
B05avo / S	162	50	C06par / S	174	50
B05sol / N	186	50	C06sol / N	190	66
B05sol / S	162	50	C06sol / S	166	50

1.1.5. Conclusion

Les analyses effectuées ici permettent de mettre en avant les variabilités observées en termes de footprint, selon les conditions environnementales (occupation du sol selon les cycles culturaux, forçages micrométéorologiques). Malgré ces variabilités, il s'avère que les mesures sont principalement représentatives des parcelles sur lesquelles elles sont effectuées, avec des ratios de contributions parcelle / voisinage de l'ordre de 70 % / 30 %. Ces ratios sont de 60 % / 40 % pour les sols nus, ce qui n'est pas problématique puisqu'ils correspondent à des situations pour lesquelles l'occupation du sol et les conditions hydriques des parcelles et de leurs voisinages sont similaires. En conditions de couverture végétale qui induisent des différences entre parcelle et voisinage, ces ratios atteignent 80 % / 20 %.

Le fait que 20 à 30 % des flux ne proviennent pas de la parcelle en conditions de couverture végétale implique une erreur dans l'estimation des flux provenant de la parcelle. En outre, ce type de condition induit de la variabilité spatiale entre les parcelles de mesures et leurs voisinages (différents types de couverture végétale, ou bien différence entre couverture végétale et sol nu), ce qui peut générer des effets d'advection via des régimes énergétiques et évaporatoires significativement différents. Cependant, ce type de situation fut marginal durant l'expérimentation pour les parcelles concernées (une seule situation caractéristique recensée pour la parcelle A en 2006, avec une culture de fève suivie d'un parcours, et des cultures de céréales dans les voisinages sud et ouest). Il est donc attendu que les observations et analyses correspondantes résultent principalement des effets de relief.

Pour finir, notons que les résultats obtenus ici sont utilisés par la suite pour 1/ caractériser l'écoulement via une inter comparaison entre la topographie et les corrections appliquées sur

les mesures, et 3/ disposer d'informations pour analyser les mesures en lien avec les conditions d'écoulement associées.

1.2. Relief à l'échelle du footprint

Pour chacune des parcelles considérées ici (A, B, C), le relief est caractérisé à l'échelle du footprint de forme ellipsoïdale dont les dimensions médianes (longueur l dans la direction du vent et largeur d orthogonale à la direction du vent, voir § 1.1.2) ont été déterminées préalablement (§ 1.1.4). Ici l'étendue spatiale du footprint est approximée par un rectangle centré sur la station de mesure, et dont les dimensions sont celles de la forme ellipsoïdale du footprint multipliées par un facteur 2 (

Figure 4.9). Le choix d'un rectangle repose sur l'hypothèse que cette forme géométrique approxime correctement la forme ellipsoïdale du footprint. Le choix d'un centrage sur la station de mesure est motivé par le fait que l'inclinaison de l'écoulement est influencée par la topographie amont et aval. Le choix d'un facteur 2 résulte d'un centrage du rectangle sur la station de mesure, alors que celle-ci est localisée en bordure de footprint (Figure 4.4 et Figure 4.5). A partir des points fournis par le MNT et inclus dans ce rectangle, les inclinaisons sont déterminées par régression multilinéaire pour chaque direction du vent.

En supposant que la topographie peut être approximée par un plan dans le voisinage de la station de mesure, l'altitude est une fonction bilinéaire des coordonnées horizontales x (axe ouest – est) et y (axe sud – nord) :

$$z = b_0 + b_1x + b_2y$$

Sont ensuite déduits les angles « pitch » (α) et « roll » (β) selon les relations géométriques proposées par Wilczak et al. (2001) pour des conditions d'inclinaison prononcée.

$$\sin \alpha = -b_1 / \sqrt{1 + b_1^2 + b_2^2}$$

$$\sin \beta = b_2 / \sqrt{1 + b_2^2}$$

Dans ce cas, les coordonnées du vecteur vitesse du vent pour la régression bilinéaire ($\bar{w}_m = b_0 + b_1\bar{u}_m + b_2\bar{v}_m$) utilisée par Wilczak et al. (2001) sont remplacées par les coordonnées spatiales x, y, z ($z = b_0 + b_1x + b_2y$).

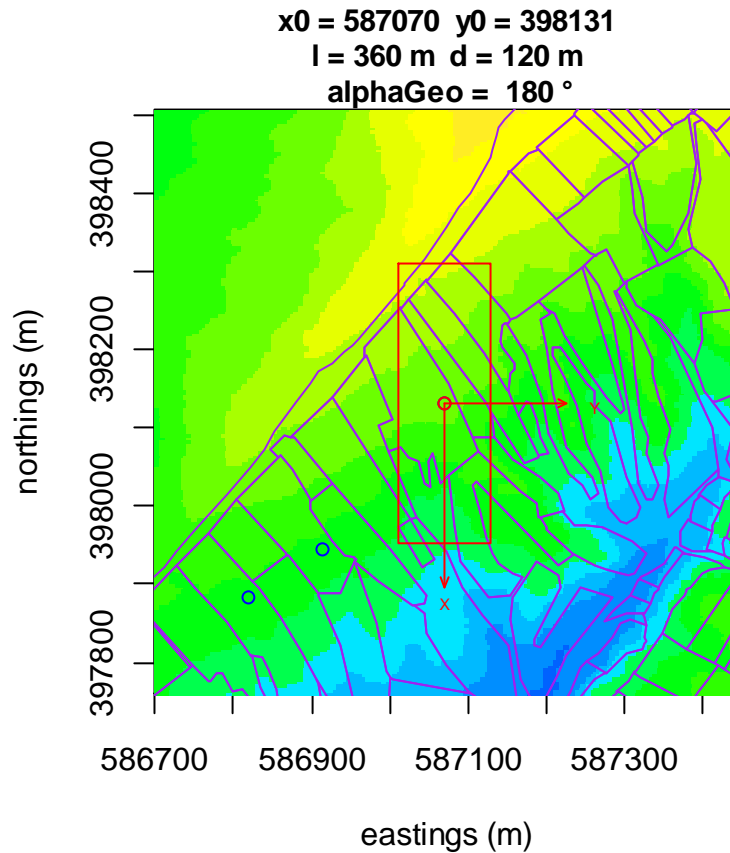


Figure 4.9. Illustration de l'étendue spatiale considérée afin de caractériser le relief à l'échelle du footprint, pour la station de mesure localisée sur la parcelle B. La direction du vent choisie est nord, ce qui correspond à un angle « alpha Geo » de 180° entre la direction du vent (vent de nord) et le nord géographique. Les labels x_0 et y_0 sont les coordonnées de la station de mesure (UTM 32), qui correspond au centre du rectangle de dimensions $l = 360$ m (longueur) et $d = 120$ m (largeur).

Les formulations utilisées indiquent que les angles « pitch » et « roll » obtenus sont fonctions de la direction du vent et des dimensions (longueur, largeur) du rectangle. Ces grandeurs étant significativement variables (§ 1.1.4), nous nous proposons d'évaluer leur influence sur les résultats. Nous étudions en premier lieu la variation des pentes avec la variation de la direction du vent. Ensuite, nous analysons les pentes parallèles (pitch) puis perpendiculaires (roll) à la direction du vent. Une conclusion sur les résultats obtenus en lien avec le relief des parcelles de mesure des flux est finalement présentée.

1.2.1. Variation des pentes selon la direction du vent

Afin d'examiner la variation de la pente selon la direction du vent pour chacune des parcelles considérées (A, B, C), les calculs sont effectués en fixant la longueur l et la largeur d du rectangle, de sorte que seule la direction du vent varie. La longueur l et la largeur d sont fixées à des valeurs approximativement doubles ($l = 360$ m et $d = 120$ m) de celles observées pour les dimensions maximales des footprints (valeurs médianes, § 1.1.4). Ce choix est motivé par la configuration géométrique retenue, à savoir un rectangle centré sur les stations de mesure, alors que ces dernières sont localisées en bordure de footprint (Figure 4.4 et Figure 4.5). Les dimensions du rectangle dépassent donc les limites des parcelles. Les calculs sont effectués pour des directions de vent variant par pas de 30° . Les directions de sens contraires, correspondant à des angles égaux à 180° près, ont les mêmes angles pitch et roll.

La Figure 4.10 indique que les variations de topographie selon la direction du vent sont significatives pour les trois parcelles, avec des gammes de valeurs et de variations plus importantes pour la parcelle C. Les inclinaisons selon les directions parallèle (pitch) et orthogonales (roll) à celle du vent sont très similaires pour les parcelles A et B (similitude en termes de taille de parcelle et de relief). Ceci confirme la pertinence du choix de B en remplacement de A pour l'année 2005, dans un contexte de caractérisation des flux en conditions de relief. Nous observons pour ces deux parcelles des variations similaires selon les angles pitch et roll, avec un déphasage de 90° . Ceci confirme que l'inclinaison est peu influencée par l'étendue spatiale, dont la dimension varie ici d'un facteur 3 entre les angles pitch (dans le sens de la longueur égale à 360 m) et roll (dans le sens de la largeur égale à 120 m). Pour la parcelle C, les tendances observées sont différentes, avec des valeurs importantes pour l'angle roll, et constantes sur l'intervalle $[180-270]^\circ$. Ceci s'explique par les conditions topographiques dans le voisinage de la station de mesure, avec en amont (milieu de versant) une colline induisant une topographie courbée et un effet de crête, et en aval deux oueds induisant un relief accidenté. La parcelle C est en effet localisée en bas de versant, par comparaison à des localisations en haut de versant pour les parcelles A et B, qui sont de surcroît caractérisées par des topographies nettement plus planes.

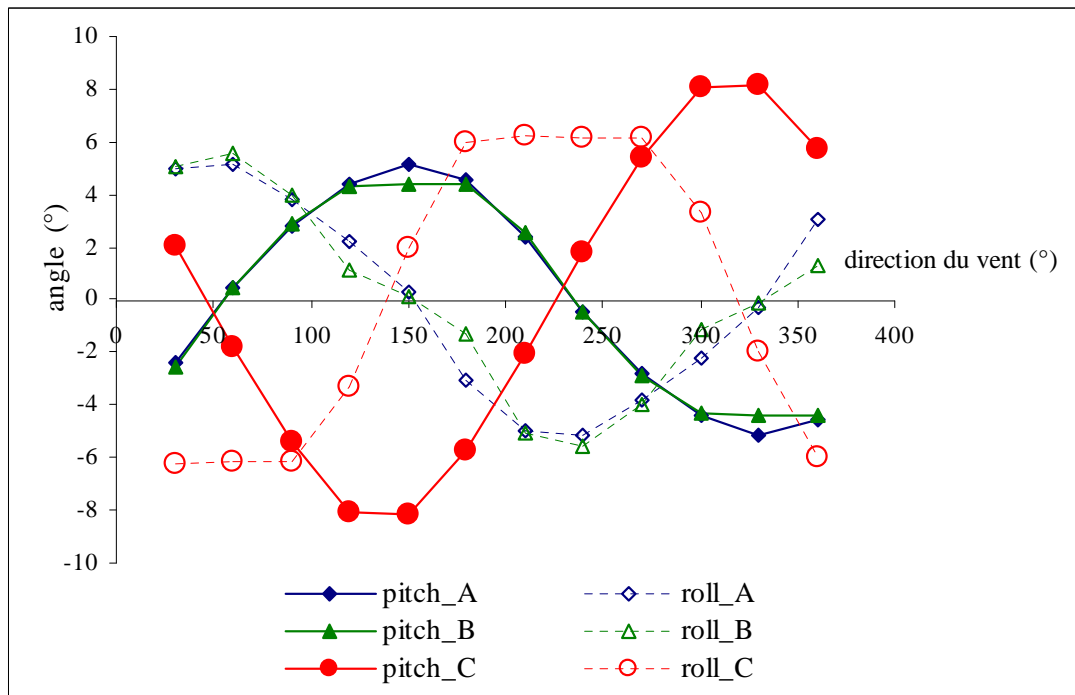


Figure 4.10. Variation, pour les parcelles A, B et C, des angles pitch et roll selon la direction du vent, avec un rectangle de longueur $l = 360$ m et largeur $d = 120$ m. Notons la symétrie par rapport à l'axe vertical en $x = 180^\circ$.

Pour la suite des investigations, deux directions du vent sont sélectionnées, selon les régimes spécifiques mis en exergue dans le Chapitre 3. Ces directions sont nord-ouest / sud-est pour un régime de vent de nord-ouest, et sud / nord pour un régime de vent de sud.

1.2.2. Pente parallèle à la direction du vent : angle pitch

Il s'agit ici de caractériser l'inclinaison topographique dans le sens de la longueur (angle pitch) en fonction de la variabilité observée sur les dimensions du footprint. Afin de déterminer l'influence de ces dernières sur les estimations de l'angle pitch, les calculs de pentes sont effectués en faisant varier les dimensions l et d du rectangle. Au regard des variabilités observées précédemment pour ces dimensions (§ 1.1.4), nous avons choisi des valeurs de 200 et 600 m pour la longueur l , et une seule valeur de 100 m pour la largeur d . Les valeurs choisies pour la longueur permettent en outre de différencier les zones de faibles et fortes contributions à la mesure de flux. La Figure 4.11 et la Figure 4.12 illustrent la détermination des angles pitch selon les deux directions de vent retenues (vent de sud et de nord-ouest), à partir des régressions linéaires sur les points fournis par le MNT, et ce en tenant

compte des variations considérées sur la longueur du rectangle approximant le footprint des mesures. Les résultats sont analysés en considérant 1/ les différences selon les parcelles, 2/ les différences selon la taille du rectangle approximant le footprint ($l = 600$ m ou $l = 200$ m), et 3/ les différences selon les directions du vent.

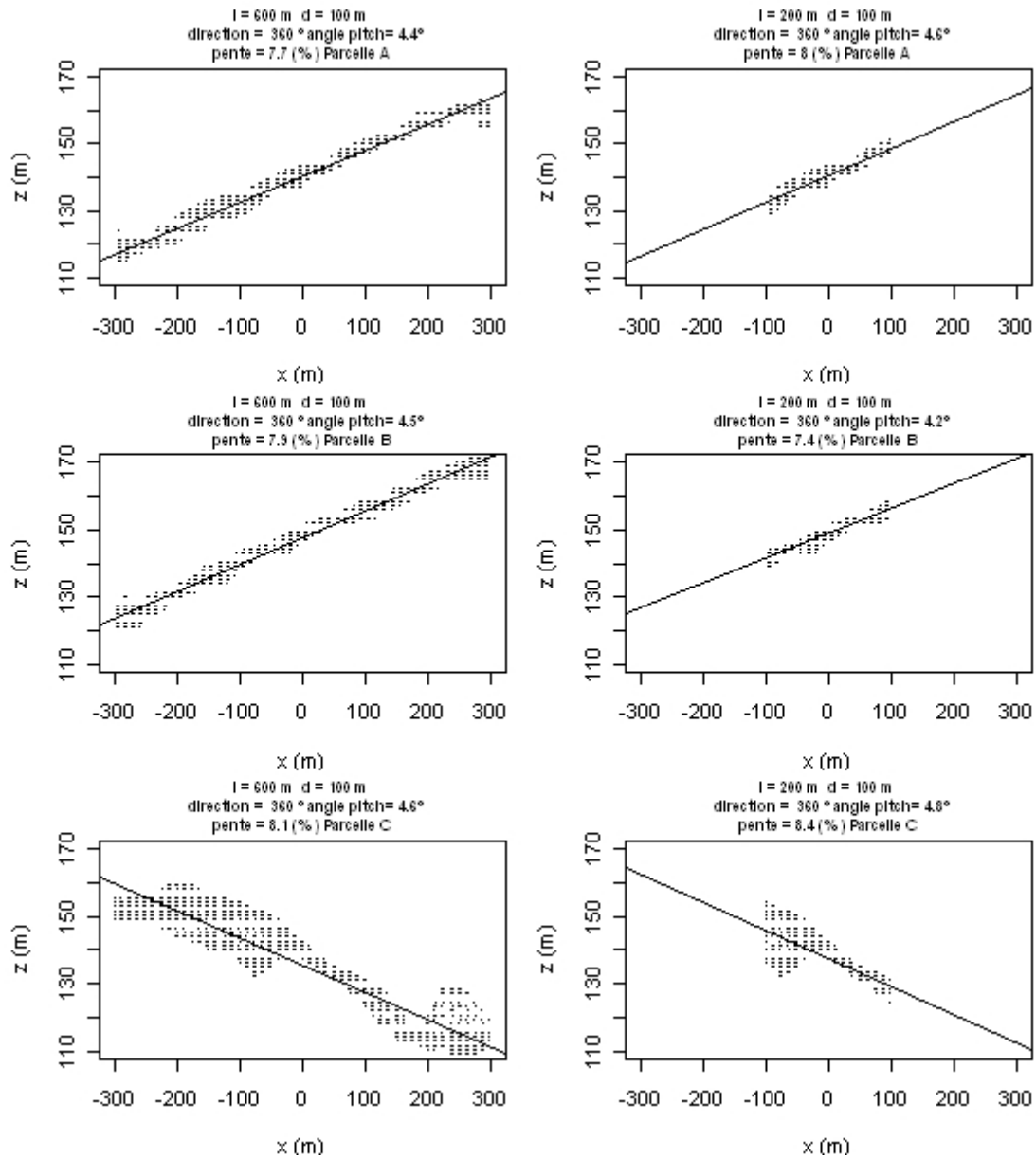


Figure 4.11. Représentation de la pente de part et d'autre de la station de mesure, qui se trouve au centre (position $x=0$) du rectangle de largeur $d = 100$ m, et de longueur $l = 600$ m (colonne de gauche) ou $l = 200$ m (colonne de droite). La pente est représentée par la droite de la régression linéaire entre l'altitude et l'abscisse des points que fournis le MNT. La direction nord/sud (ou sud/nord, c'est topographiquement identique) considérée (360°) correspond à un régime de vent de sud. Les lignes correspondent aux trois parcelles A, B, et C. L'inclinaison est donnée sous forme d'angle (pitch en degré) et de pente (en pourcentage).

Les résultats indiquent que les inclinaisons dans la direction parallèle à celle du vent (angle pitch) sont similaires pour les trois parcelles lorsque le vent est de sud, avec des différences de l'ordre de 0.5° sur les valeurs moyennes (Figure 4.11). Les différences sont plus marquées pour un vent de nord-ouest, avec des écarts entre les valeurs moyennes pouvant atteindre 3.5° (Figure 4.12). Dans le détail, les différences sont faibles entre les parcelles A et B, et les écarts plus importants sont relatifs à la parcelle C. La dimension du footprint a une influence moins prononcée dans le cas d'un vent de sud (variation de la pente de l'ordre de 0.5°), en comparaison à un vent de nord-ouest (variation de la pente de l'ordre de 2.5°). Cette influence s'exprime toujours par une augmentation de la pente pour une longueur l plus petite (200 m versus 600 m), à l'exception de la parcelle B pour un vent de sud.

L'ensemble de ces observations s'expliquent par les nuages de points sur la Figure 4.11 et la Figure 4.12, qui illustrent la topographie pour les zones considérées. Celle-ci est en effet beaucoup plus régulière sur les parcelles A et B dans le cas d'un vent de sud, avec seulement une crête peu prononcée pour la parcelle A au nord de la station (Figure 4.11). Dans le cas d'un vent de nord-ouest, en revanche, la topographie est relativement accidentée pour ces deux parcelles, avec apparition de crêtes à des distances de 200 m au nord des stations (Figure 4.12). En ce qui concerne la parcelle C, nous observons une topographie beaucoup plus irrégulière pour les deux directions de vent considérées, avec 1/ un plateau dans le voisinage de la station de mesure, 2/ une crête à 30 m au sud (amont), et 3/ un bas-fond à 100 m au nord (aval). Ceci s'explique par la localisation de cette parcelle en bas de versant, avec une colline en amont (milieu de versant) et deux oueds en aval. Il en résulte une inclinaison peu représentative de la réalité, selon une moyenne englobant la crête et le bas fond (graphes en bas à gauche sur la Figure 4.11 et la Figure 4.12).

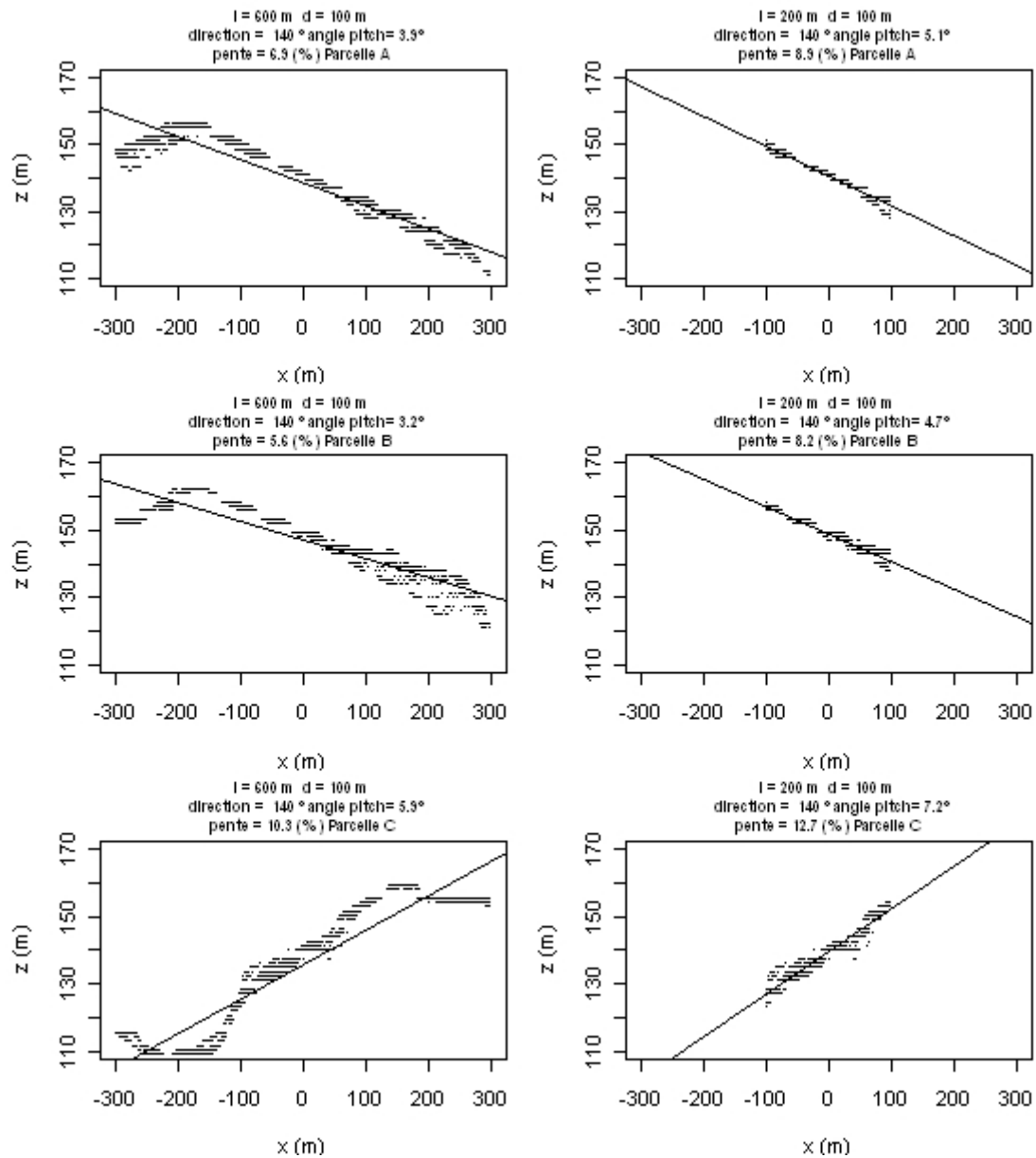


Figure 4.12. Représentation de la pente de part et d'autre de la station de mesure, qui se trouve au centre (position $x=0$) du rectangle de largeur $d=100$ m, et de longueur $l=600$ m (colonne de gauche) ou $l=200$ m (colonne de droite). La pente est représentée par la droite de la régression linéaire entre l'altitude et l'abscisse des points que fournit le MNT. La direction nord-ouest/sud-est (ou sud-est/nord-ouest, c'est topographiquement identique) considérée (140°) correspond à un régime de vent de nord-ouest. Les lignes correspondent aux trois parcelles A, B, et C. L'inclinaison est donnée sous forme d'angle (pitch en degré) et de pente (en pourcentage).

1.2.3. Pente perpendiculaire à la direction du vent : angle roll

L'angle roll représente l'inclinaison selon la direction perpendiculaire au vent. Il est étudié pour les mêmes cas de figure que l'angle pitch, en termes de parcelles, de directions de vent,

et de largeur du rectangle approximant le footprint. Pour une question de clarté (nuage de point épars en particulier), les résultats sont présentés dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3. Valeurs obtenues pour l'angle roll (direction perpendiculaire à celle du vent), sur les parcelles A, B et C, selon les directions du vent possibles (360 ° pour la direction sud / nord, 140 ° pour la direction nord-ouest / sud-est), et selon les dimensions du rectangle approximant le footprint (longueur l = 600 et l = 200 m pour une largeur d = 100 m), la station de mesure étant localisée au centre du rectangle.

	Vent de sud (360 °)		Vent de nord-ouest (140 °)	
	Roll (°)	Roll (°)	Roll (°)	Roll (°)
	l=600	l=200	l=600	l=200
A	2.8	3	1.8	1.1
B	1.5	1.5	0.5	0
C	6.4	5.5	0.5	0.8

Les tendances observées ici sont différentes de celles obtenues pour l'inclinaison dans le sens de la longueur (angle pitch), avec tout d'abord des angles plus faibles, et particulièrement pour un vent de nord-ouest (direction de 140 °). Ensuite, la dimension du rectangle approximant le footprint a une influence nettement moins prononcée que pour l'angle pitch, avec des variations comprises entre 0 et 1 ° pour des largeurs variant de 200 m à 600 m. La situation la plus remarquable est observée pour la parcelle C pour un vent de sud (direction de 360 °). Les valeurs obtenues sont alors similaires à celles observées pour l'angle pitch, ce qui résulte de la topographie prononcée dans ce cas.

1.2.4. Conclusion

Les résultats présentés dans cette section 1.2 visent à quantifier la topographie dans les zones contributives aux mesures de flux, pour les trois parcelles considérées (A, B, C). Les résultats ont mis en exergue des pentes prononcées, pouvant atteindre des valeurs de 12 %. Par suite, le régime de vent peut avoir une influence significative, via le couplage entre direction du vent et topographie. Dans les cas que nous avons considérés, les variations résultantes sur l'angle pitch vont de 10 à 30 % en relatif. Nous observons par ailleurs des topographies relativement planes pour les parcelles A et B, en comparaison à un relief beaucoup plus accidenté pour la parcelle C. Ceci s'explique par la localisation de cette dernière en bas de versant, avec une colline en amont (milieu de versant) et deux oueds en aval, par comparaison à des