

CHAPITRE 5 : INFLUENCE DU RELIEF SUR LES FLUX

Nous avons mis en évidence, dans le précédent chapitre, les conditions d'écoulement en rapport avec la topographie, en mettant l'accent sur l'inclinaison des écoulements selon les conditions de vent et l'occupation du sol. Nous proposons, dans le présent chapitre, d'analyser les flux d'énergie de surface en rapport avec la topographie.

Une première partie (§ 1) se concentre sur les mesures à l'échelle de la parcelle, c'est à dire les observations collectées sur les parcelles des deux rives du bassin versant, à partir des dispositifs de covariances turbulentes. Nous considérons les quatre composantes du bilan d'énergie (le terme de stockage est supposé nul) : le bilan radiatif ou rayonnement R_n , le flux de chaleur dans le sol G , et les flux convectifs de chaleur sensible et latente H et LE . Chacune de ces composantes est étudiée individuellement, et l'ensemble est ensuite analysé en termes de bilan d'énergie. Pour les flux convectifs, nous considérons additionnellement la quantité de mouvement, via la vitesse de friction. Les analyses sont menées en considérant les estimations obtenues avec et sans correction liée au relief (correction planar fit).

Le chapitre 3 a mis en évidence les régimes de vents caractéristiques de la zone d'étude, avec des directions de Nord-Ouest et de Sud récurrentes, qui influent sur la micrométéorologie en termes de température et d'humidité de l'air. Par suite, le chapitre 4 a montré l'influence de la topographie sur les écoulements, particulièrement en rapport avec le régime de vent qui induit un couplage entre direction du vent et relief. En conséquence, l'ensemble des analyses menées à l'échelle de la parcelle sont effectuées en discriminant les directions de vent Nord-Ouest (soufflant du Nord-Ouest vers le Sud-Est, ce qui correspond à des directions de vent comprises entre 225° et 70° pour une origine vers le Nord géographique) et Sud (soufflant du Sud vers le Nord, ce qui correspond à des directions de vent comprises entre 135° et 225°). Ceci amène à considérer des régimes 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). Dans ce contexte, les variations observées en lien avec les changements de direction du vent (et donc selon les conditions d'écoulement ascendant ou descendant) sont analysées en considérant l'ensemble des facteurs d'influence possibles, avec un accent sur la caractérisation des variables intermédiaires (variables d'états par exemple).

Une seconde partie (§ 2) se concentre sur les mesures à l'échelle d'un ensemble de parcelles, via les flux intégrés issus des mesures scintillométriques. Une première étape consiste à caractériser le footprint de ces dernières, et à s'assurer de l'appartenance des parcelles expérimentales à ce footprint. Une seconde étape consiste à : 1/ évaluer la sensibilité des estimations scintillométriques aux paramètres de surface nécessaires pour le calcul. 2/ comparer, pour les flux de quantité de mouvement et de chaleur sensible, les estimations intégrées issues de la scintillométrie et les estimations locales issues des dispositifs de covariances turbulentes, et 3/ évaluer la chaleur latente comme le résidu du bilan d'énergie, en intercomparant les estimations locales pour l'énergie disponible (différence entre rayonnement net et flux de chaleur dans le sol) et les estimations intégrées pour la chaleur sensible. De même que pour les analyses à l'échelle locale, ces investigations sont menées en distinguant les conditions d'occupation du sol et les régimes d'écoulement ascendant et descendant selon les vents de Nord-Ouest et de Sud.

Influence du relief sur les mesures de flux à l'échelle de la parcelle

Cette section se propose d'analyser à l'échelle locale les effets du relief sur le bilan d'énergie et ses composantes. Les grandeurs physiques impliquées (bilan radiatif, flux de chaleur dans le sol, flux de quantité de mouvement, de chaleur sensible et latente, bilan d'énergie) sont analysées selon les conditions d'écoulement (régime de vent ascendant et descendant) et selon l'occupation du sol (sol nu et couverture végétale). Pour les flux convectifs (chaleur sensible et latente) et le flux de quantité de mouvement (via la vitesse de friction), l'analyse inclut une intercomparaison entre les estimations obtenues avec et sans correction des effets de relief (correction instrumentales et planar fit versus corrections instrumentales seulement).

1.1. Effet de la topographie sur les flux convectifs

Nous abordons dans cette section les conséquences de la topographie sur les flux turbulents H (chaleur sensible), LE (chaleur latente) et τ (quantité de mouvement). Pour cette dernière, nous considérons la vitesse de friction u_* qui est représentative de la quantité de mouvement

selon la relation $\tau = \rho u_*^2$. L'influence de la topographie est caractérisée par la magnitude de la correction planar fit sur les flux, en intercomparant les flux corrigés et non corrigés. En effet, cette correction est basée sur la normalisation des données par rapport au plan d'écoulement, dont l'inclinaison est caractérisée par une matrice de rotation selon la direction du vent qui détermine les angles pitch et roll (Figure 4.2). La magnitude de cette correction est donc a priori fonction de l'inclinaison, tant que cette dernière appartient au domaine de validité de la correction. Par suite, l'analyse de l'écoulement a montré (Chapitre 4) des régimes différents selon les conditions de vent (ascendant / descendant) et selon l'occupation du sol (sol nu / couverture végétale). Les résultats reportés ci-après sont donc obtenus en discriminant les conditions de vent et d'occupation du sol. Ainsi, nous commençons par étudier les flux turbulents dans le cas de sol nu puis en présence de végétation, chacun de ces deux cas étant étudié selon les conditions de vent ascendant et descendant. Pour terminer, une synthèse des différentes situations est présentée sous forme d'une conclusion.

Rappelons que les données utilisées ici sont préalablement sélectionnées. En effet, les flux considérés sont 1/ corrigés des effets instrumentaux et 2/ filtrés par des contrôles de qualité (test de stationnarité et de turbulence intégrale), selon les procédures détaillées dans le Chapitre 2. Nous avons considéré le filtrage le plus sélectif (données de très bonne qualité pour des analyses sur des chroniques ponctuelles, classe 1 sur 3 incluant environ 45% des données), ainsi que le filtrage intermédiaire (données de bonne qualité pour des analyses de longues séries, classe 2 sur 3 incluant environ 45% des données), sachant que les données de mauvaise qualité qui furent rejetées (classe 3 sur 3) ne représentaient que 10% des observations. Certaines analyses plus fines demandaient de considérer le filtrage le plus sélectif exclusivement. Notons enfin (résultats non présentés ici) que l'analyse comparée des corrections instrumentales et des corrections de rotation (planar fit) a généralement montré des magnitudes de correction plus importantes pour la rotation (sauf la chaleur latente pour laquelle ce n'était pas systématique), quelles que soient les conditions d'occupation du sol.

1.1.1. Conditions de sol nu

La comparaison des flux estimés avant et après rotation, pour des conditions de vent ascendant et descendant, montre que les flux en conditions de vent ascendant sont nettement moins élevés que ceux en conditions de vent descendant. La différence est observée pour les

trois flux considérés (chaleur sensible, chaleur latente, vitesse de friction) ainsi que pour les différentes situations de mesures (parcelles, années). Elle est atténuée par la correction planar fit. La Figure 5.1 illustre les résultats obtenus avec le jeu de données A04sol collectée en 2004 sur la parcelle A en conditions de sol nu. Ces résultats sont représentatifs des autres situations en termes de parcelle et d'année. La différence entre les flux selon les conditions d'écoulement ascendant et descendant peut être considérable et dépasser les 50 % en relatif (e.g. de 300 à 500 W/m² pour H avec le jeu de données A04sol, voir Figure 5.1), bien que des différences moindres soient parfois observées (e.g. jeu de données C06sol).

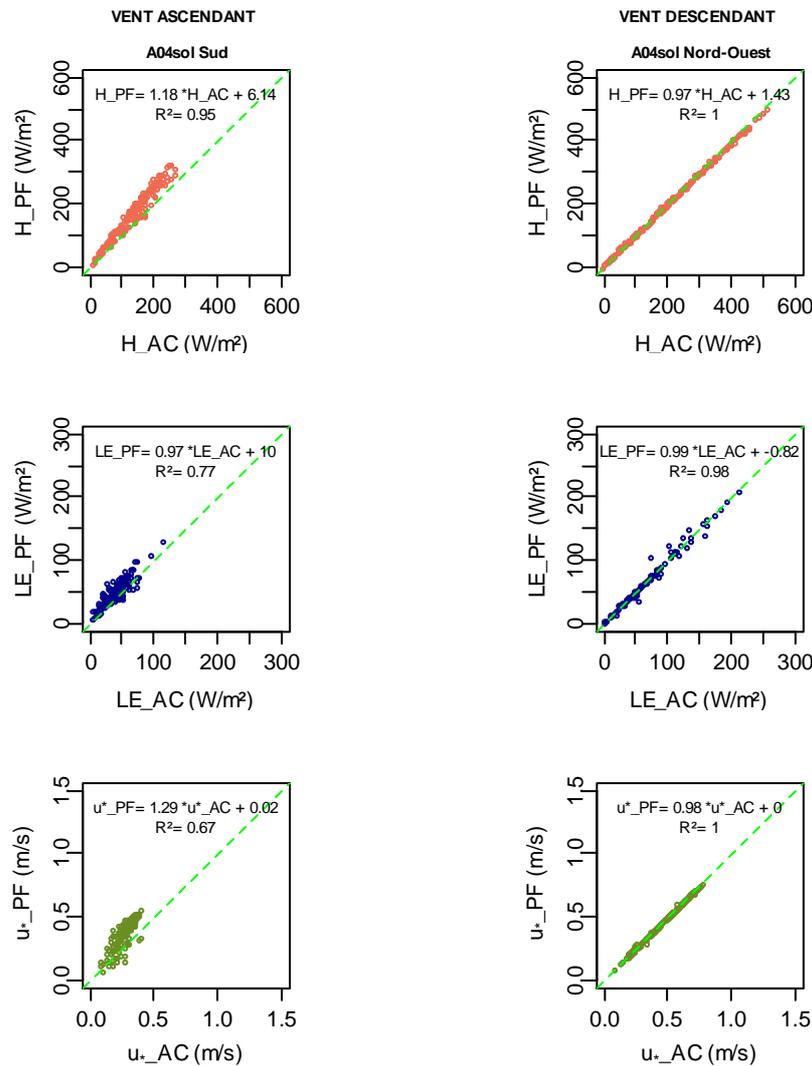


Figure 5.1. Comparaison des flux avant (_AC) et après (_PF) correction de rotation planar fit, pour le jeu de données A04sol correspondant aux observations collectées en 2004 sur la parcelle A en conditions de sol nu. Les flux _AC sont corrigés instrumentalement, et les flux _PF ont subi les corrections instrumentales et de rotation. Sont considérés les flux de chaleur sensible H (1^{ère} ligne), de chaleur latente LE (2^{ème} ligne) et de quantité de mouvement au travers de la vitesse de friction u* (3^{ème} ligne). Les conditions de vent ascendant (colonne de gauche) et descendant (colonne de droite) sont différenciées. Sont aussi indiqués la droite 1:1 en pointillée, les statistiques des régressions linéaires avec abscisse et ordonnées, et le coefficient de corrélation R².

La rotation planar fit peut avoir un impact plus ou moins important sur les différences entre les flux en conditions d'écoulement ascendant et descendant. Afin d'illustrer cet impact pour chacune des situations rencontrées (année, parcelle), nous avons effectué des régressions linéaires entre flux corrigés et non corrigés de cette rotation. Les résultats obtenus sont donnés dans le Tableau 5.1. Une première analyse montre des similitudes entre les relations obtenues pour les différentes parcelles. Cependant, des différences apparaissent pour les trois flux (chaleur sensible et latente, vitesse de friction) entre les cas de vent ascendant et descendant. Nous proposons donc de séparer chacune des situations d'écoulement ascendant / descendant.

Tableau 5.1. Statistiques des régressions linéaires entre les estimations avant (_AC) et après correction de rotation (_PF) pour les flux de chaleur sensible (H) et latente (LE) et pour la vitesse de friction u_* . Ces statistiques sont caractérisées par les pentes et ordonnées à l'origine et le coefficient de corrélation (R^2). Sont considérés les différentes périodes de mesures en conditions de sol nu. Les conditions de vent ascendant (colonne 2 et 3 en partant de la gauche) et descendant (colonne 4 et 5) sont différenciées.

Sol nu H_PF en fonction de H_AC				
	Ascendant		Descendant	
	H_PF=	R²	H_PF=	R²
A04sol	1.18*H_AC+6.14	0.95	0.97*H_AC+1.43	1
B05sol	1.15*H_AC+12.92	0.97	0.92*H_AC+3.6	1
A06sol	1.14*H_AC+15.74	0.88	0.91*H_AC+3.63	0.99
C06sol	1.17*H_AC+21.8	0.88	0.66*H_AC+9.8	0.97
Sol nu LE_PF en fonction de LE_AC				
	Ascendant		Descendant	
	LE_PF=	R²	LE_PF=	R²
A04sol	0.97*LE_AC+10	0.77	0.99*LE_AC-0.82	0.96
C06sol	0.55*LE_AC+28.23	0.35	0.54*LE_AC+10.16	0.64
Sol nu u_*_PF en fonction de u_*_AC				
	Ascendant		Descendant	
	u_*_PF=	R²	u_*_PF=	R²
A04sol	1.29* u_* _AC+0.02	0.67	0.96* u_* _AC+0	1
B05sol	1.10* u_* _AC+0.07	0.87	0.94* u_* _AC-0.01	0.99
A06sol	1.29* u_* _AC+0.03	0.79	0.93* u_* _AC-0.01	0.96
C06sol	0.72* u_* _AC+0.18	0.31	0.86* u_* _AC-0.04	0.96

1.1.1.1. Vent ascendant en conditions de sol nu

En conditions d'écoulement ascendant et de sol nu, l'application de la correction de rotation sur le flux de chaleur sensible H induit une augmentation de l'ordre de 15 à 20 % en relatif, avec un coefficient de détermination de 88 %. La relation est très similaire pour les différents cas de mesures (parcelle et année). Pour le flux de chaleur latente LE , en revanche, la linéarité de la correction est nettement moins prononcée, avec des points aberrants qui sont souvent éliminés via le filtre le plus sélectif ne gardant que les données de très bonne qualité. La correction planar fit induit une diminution du flux LE , parfois proche de 50% en relatif (e.g. cas du jeu de données C06sol). La vitesse de friction subit après la correction planar fit une augmentation variant entre 10 et 30% pour les parcelles A et B, et une diminution de l'ordre de 30% sur la parcelle C pour l'année 2006. Les corrections induites sont fortement linéaires, avec cependant une forte dispersion pour la parcelle C. Globalement, la correction planar fit induit en conditions d'écoulement ascendant une légère diminution du flux de chaleur latente, et une augmentation du flux de chaleur sensible. Pour la vitesse de friction, nous observons une augmentation, à l'exception des données collectées sur la parcelle C.

1.1.1.2. Vent descendant en conditions de sol nu

En conditions d'écoulement descendant et de sol nu pour les parcelles A et B, l'application de la correction de rotation planar fit induit sur l'ensemble des flux une diminution relativement faible, de l'ordre de 10% en relatif, avec des linéarités prononcées comme l'indiquent les coefficients de détermination proches de l'unité. Pour la parcelle C, la correction de rotation induit une diminution beaucoup plus importante, de l'ordre de 30% sur la chaleur sensible et 15% sur la vitesse de friction, avec des linéarités moins prononcées (figure non incluse). Globalement, la correction planar fit induit en conditions d'écoulement descendant une diminution de l'ensemble des flux (chaleur latente et sensible, quantité de mouvement). Par comparaison aux conditions d'écoulement ascendant, les coefficients de détermination sont nettement plus élevés en conditions d'écoulement descendant, avec en particulier des valeurs deux fois plus importantes pour les flux de chaleur latente (LE) et de quantité de mouvement (via la vitesse de friction u_*) sur la parcelle C.

1.1.1.3. Conclusion pour les conditions de sol nu

Les résultats obtenus ici montrent que les flux turbulents sont de magnitudes moindres en conditions d'écoulement ascendant, avec des différences pouvant atteindre 50 % en relatif par rapport au flux observés en conditions d'écoulement descendant.

Pour le versant nord, à savoir les parcelles A et B durant les années d'expérimentation 2004, 2005 et 2006, nous observons des tendances identiques. La correction de rotation planar fit tend à augmenter sensiblement les flux mesurés en condition d'écoulement ascendant (entre 10 et 30 % en relatif), à l'exception de la chaleur latente LE ; et elle induit une diminution en conditions d'écoulement descendant (de l'ordre de 5 %), pour les trois flux considérés LE, u_* et H.

Pour le versant sud, à savoir la parcelle C en 2006, les résultats sont nettement différents. En termes de correction planar fit, nous observons des diminutions importantes pour la chaleur latente, pouvant atteindre 50 % en relatif, et correspondant à des coefficients de détermination nettement plus faibles (35 et 65 %). Les variations (augmentation ou diminution) sont aussi plus importantes pour la chaleur sensible et la quantité de mouvement en conditions d'écoulement descendant, avec parfois de faibles valeurs pour le coefficient de détermination (e.g. 30 % pour u_* avec le jeu de données C06sol). Les différences observées pour la parcelle C en comparaison aux deux autres sont probablement liées aux conditions d'écoulement spécifiques, qui furent mises en exergue précédemment (Chapitre 4). Elles sont liées à la topographie autour de la parcelle C, avec 1/ une inclinaison importante pouvant atteindre 8°, 2/ une colline induisant un relief courbe et un effet de crête en amont (milieu de versant), et 3/ deux oueds induisant un relief accidenté en aval. La parcelle C est en effet localisée en bas de versant, par comparaison aux parcelles A et B qui sont localisées en haut de versants plans.

1.1.2. Conditions de couverture végétale

La Figure 5.2 illustre des résultats représentatifs obtenus en conditions de couverture végétale, qui correspondent au jeu de données A04blé collecté en 2004 sur la parcelle A. Comme pour la Figure 5.1, sont indiqués les résultats pour les flux de quantité de mouvement, de chaleur

latente et sensible. Dans ce cas présent, nous observons aussi 1/ des différences importantes entre les magnitudes des flux selon les conditions d'écoulement ascendant ou descendant, et 2/ de fortes linéarités entre les estimations de flux avant correction de rotation planar fit (corrigées des effets instrumentaux seulement) et après correction de rotation.

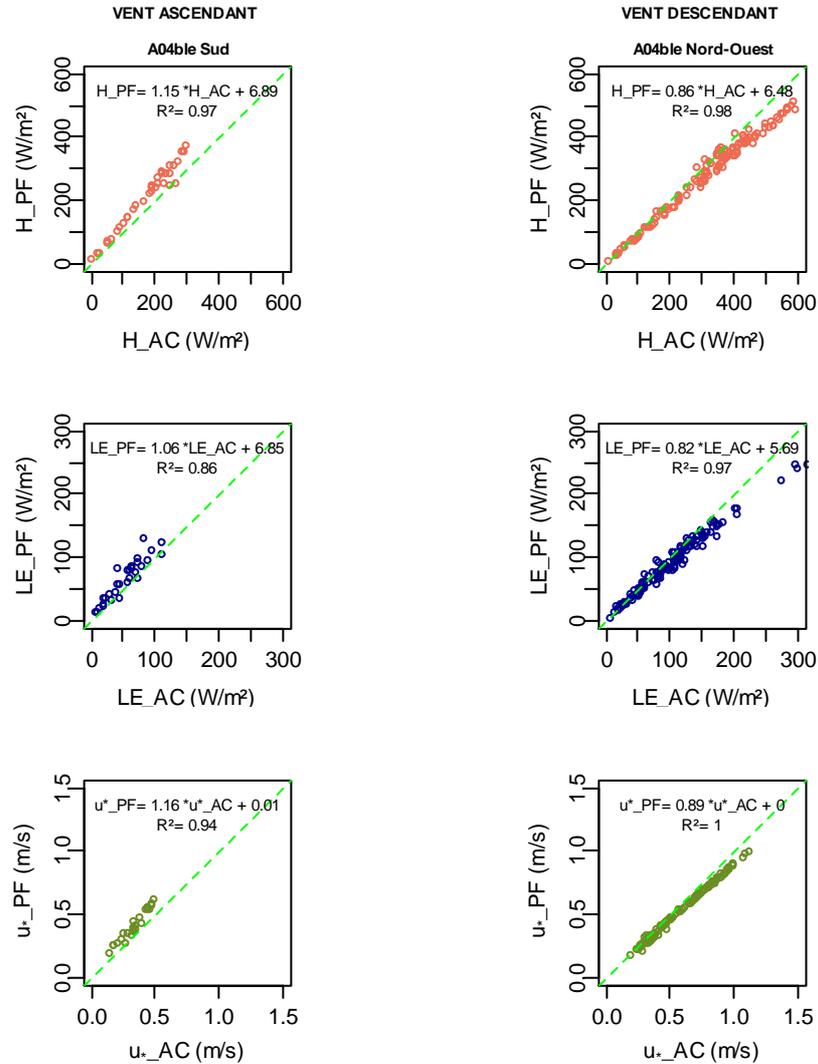


Figure 5.2. Comparaison des flux avant (_AC) et après (_PF) correction de rotation planar fit, pour le jeu de données A04blé correspondant aux observations collectées en 2004 sur la parcelle A en conditions de couverture végétale. Les flux _AC sont corrigés instrumentalement, et les flux _PF ont subi les corrections instrumentales et de rotation. Sont considérés les flux de chaleur sensible H (1^{ère} ligne), de chaleur latente LE (2^{ème} ligne) et de quantité de mouvement au travers de la vitesse de friction u^* (3^{ème} ligne). Les conditions de vent ascendant (colonne de gauche) et descendant (colonne de droite) sont différenciées. Sont aussi indiqués la droite 1:1 en pointillée, les statistiques des régressions linéaires avec abscisse et ordonnées, et le coefficient de corrélation R^2 .

Lors de l'analyse des écoulements selon les conditions de relief et d'occupation du sol (Chapitre 4), nous avons observé une variation des inclinaisons : en comparaison aux conditions de sol nu, l'écoulement en conditions de couverture végétale se rapprochait de la

pende pour un vent descendant, et de l'horizontale pour un vent ascendant. Il est donc attendu dans l'analyse des flux correspondants des corrections plus fortes en conditions d'écoulement descendant, et moindres en conditions d'écoulement ascendant. Les résultats obtenus sont donnés dans le Tableau 5.2.

Tableau 5.2. Statistiques des régressions linéaires entre les estimations avant (_AC) et après correction de rotation (_PF) pour les flux de chaleur sensible (H) et latente (LE) et pour la vitesse de friction u_* . Ces statistiques sont caractérisées par les pentes et ordonnées à l'origine et le coefficient de corrélation (R^2). Sont considérés les différentes périodes de mesures en conditions de couverture végétale. Les conditions de vent ascendant (colonne 2 et 3 en partant de la gauche) et descendant (colonne 4 et 5) sont différenciées.

Sol couvert H_PF en fonction de H_AC				
	Ascendant		Descendant	
	H_PF=	R²	H_PF=	R²
A04ble	1.15*H_AC+6.89	0.97	0.86*H_AC+6.48	0.98
B05avo	1.27*H_AC+0.81	0.98	0.85*H_AC-3.51	0.97
A06fev	1.27*H_AC-0.39	0.95	0.89*H_AC+3.07	1
A06par	1.42*H_AC+2.63	0.91	0.90*H_AC+2.45	0.97
C06par	0.98*H_AC+45.3	0.6	0.67*H_AC+4.53	0.99
Sol couvert LE_PF en fonction de LE_AC				
	Ascendant		Descendant	
	LE_PF=	R²	LE_PF=	R²
A04ble	1.06*LE_PF+6.85	0.86	0.82*LE_PF+5.69	0.97
C06par	0.81*LE_PF+44.7	0.56	0.67*LE_PF-1.78	0.87
Sol couvert u_*_PF en fonction de u_*_AC				
	Ascendant		Descendant	
	u_*_PF=	R²	u_*_PF=	R²
A04ble	1.16* u_* _AC+0.01	0.94	0.89* u_* _AC+0	1
B05avo	1.16* u_* _AC+0.02	0.98	0.86* u_* _AC+0.01	0.99
A06fev	1.00* u_* _AC+0.08	0.93	0.93* u_* _AC+0	0.99
A06par	1.25* u_* _AC+0.04	0.82	0.85* u_* _AC+0.04	0.97
C06par	1.25* u_* _AC+0.05	0.58	0.85* u_* _AC-0.04	0.99

1.1.2.1. Vent ascendant en conditions de couverture végétale

En conditions d'écoulement ascendant et de couverture végétale, l'application de la correction de rotation planar fit entraîne une augmentation de 15 à 40 % pour le flux de chaleur sensible, avec pour les parcelles A et B des relations linéaires entre les estimations avant et après correction. Pour le flux de chaleur latente, la correction planar fit induit une diminution, avec

une dispersion significative (coefficient de détermination de l'ordre de 60%) entre les estimations avant et après correction. La vitesse de friction augmente après correction de rotation pour l'ensemble des parcelles, avec des accroissements entre 16 et 25 %. Quel que soit le flux turbulent considéré, les dispersions entre les estimations avant et après correction sont plus importantes pour la parcelle C, en comparaison aux parcelles A et B, ces dispersions étant associées à des non linéarités plus prononcées.

1.1.2.2. Vent descendant en conditions de couverture végétale

Dans le cas d'écoulement descendant en présence de couverture végétale, le flux de chaleur sensible montre une baisse de 10 à 15 % après correction pour les parcelles A et B, et une baisse de 30% pour la parcelle C. Quelle que soit la parcelle, les estimations avant et après correction planar fit sont linéairement reliées.

Pour la parcelle A en 2006, nous avons distingué deux périodes en rapport avec le type de couverture végétale (culture de fève suivie de parcours). Cette distinction fut nécessaire, afin de tenir compte du changement de rugosité associé à un changement d'occupation du sol (apparition d'une végétation naturelle pour la pâture après une culture de fève).

Pour le flux de chaleur latente, nous observons une diminution des estimations après correction de rotation dans les deux cas de figure, avec une diminution plus importante pour la parcelle C, de l'ordre de 30%. Les estimations avant et après rotation sont aussi linéairement reliées. La vitesse de friction, enfin, a diminué de 7 à 15 % après correction de rotation, avec des relations linéaires entre estimations pré- et post- correction quel que soit le jeu de données considéré.

1.1.2.3. Conclusion pour les conditions de couverture végétale

Les résultats reportés ici sont similaires à ceux obtenus pour les conditions de sol nu, avec

1. des magnitudes de flux significativement différentes (jusque 50 %) selon les régimes d'écoulement ascendant et descendant,

2. des différences significatives entre les estimations des flux avant et après correction de la rotation planar fit, et
3. des linéarités moindres pour la correction planar fit sur la parcelle C, en rapport avec une topographie accidentée.

Nous observons aussi que la correction de rotation planar fit induit globalement 1/ une augmentation des flux en condition d'écoulement ascendant, à l'exception de la chaleur latente LE, et 2/ une diminution en conditions d'écoulement descendant (de l'ordre de 5 %), pour les trois flux de quantité de mouvement (u_*), chaleur sensible (H) et latente (LE).

En comparaison aux conditions de sol nu, il était a priori attendu, pour les conditions de couverture végétale, des corrections planar fit plus (respectivement moins) importantes avec un vent descendant (respectivement ascendant). En effet, lors de l'analyse des écoulements selon les conditions de relief et d'occupation du sol (Chapitre 4), nous avons observé une variation de l'inclinaison : en comparaison aux conditions de sol nu, l'écoulement en conditions de couverture végétale se rapproche de la pente pour un vent descendant, et de l'horizontale pour un vent ascendant. A posteriori, nous observons effectivement des magnitudes de corrections planar fit plus importantes pour un écoulement descendant en condition de couverture végétale qu'en conditions de sol nu. En revanche, cette tendance n'est pas vérifiée pour un écoulement ascendant. Il n'est donc pas possible de conclure quant à un lien systématique entre l'inclinaison de l'écoulement et la magnitude de la correction planar fit selon l'écoulement et l'occupation du sol.

Les dispersions entre estimations pré- et post- correction planar fit sont systématiquement plus importantes pour la parcelle C en condition de vent ascendant (différences de 30% en absolu sur les coefficients de détermination pour la chaleur sensible et la quantité de mouvement, voir Tableau 5.2). Afin de comprendre ces dispersions, nous avons caractérisé le rapport F_{AC}/F_{PF} entre flux corrigés ($_{PF}$) ou non ($_{AC}$) de la rotation planar fit ($F = H, LE, \text{ ou } u_*$) selon la direction et la vitesse du vent (Figure 5.3). Notons que l'écoulement ascendant sur la parcelle C correspond à un vent de Nord-Ouest (direction du vent entre 225° et 70°). Nous remarquons que le rapport F_{AC}/F_{PF} est 1/ constant pour une direction de vent donnée, 2/ supérieur ou inférieur à l'unité selon la direction de vent, 3/ très fluctuant lorsque le vent change de direction, et 4/ plus bruité pour un écoulement ascendant. Ce dernier point peut s'expliquer par un panel de directions de vent plus important pour un vent de Nord-Ouest ($[225^\circ - 70^\circ]$) que de Sud ($[135 - 225^\circ]$), ce qui induit une gamme plus large

de couplages entre direction du vent et topographie. En conclusion, réduire les intervalles de direction du vent diminuerait la dispersion entre estimations pré- et post- correction, mais cette dispersion resterait importante pour des conditions de vent tournant.

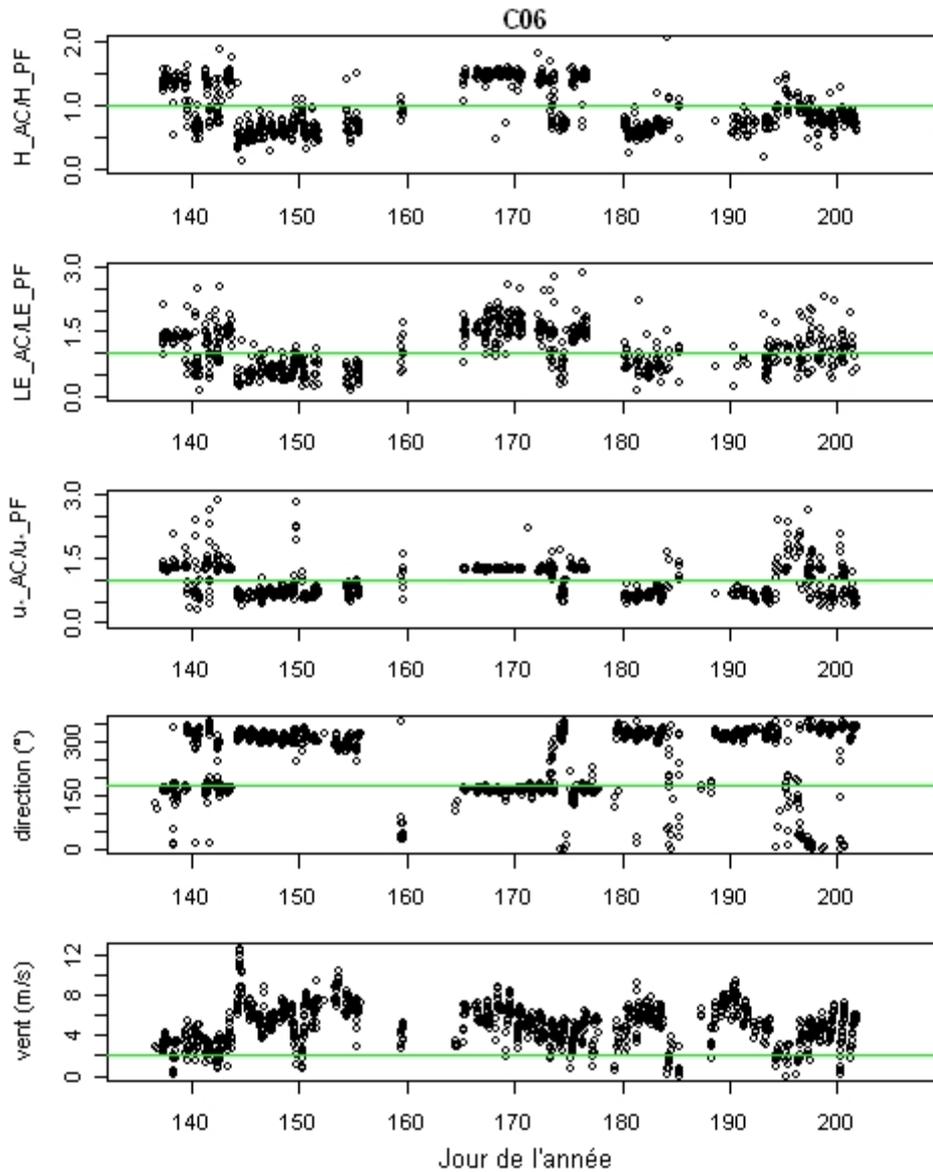


Figure 5.3. Chroniques temporelles pour les rapports des estimations pré- et post- correction planar fit pour le flux de chaleur sensible H (1^{ère} ligne), le flux de chaleur latente LE (deuxième ligne), la vitesse de friction u_* (troisième ligne), ainsi que pour la direction du vent (°) et la vitesse du vent (m/s). Le jeu de données considéré est celui collecté sur la parcelle C durant l'année 2006.

1.1.3. Conclusions quant à l'effet du relief sur les flux convectifs

L'influence du relief sur les flux (chaleur sensible H, chaleur latente LE et quantité de mouvement τ via la vitesse de friction u_*) a été caractérisée par une intercomparaison des

estimations corrigées ou non de la rotation (correction planar fit). La différence majeure observée entre les régimes de vent ascendant et descendant est relative à 1/ l'intensité des flux selon ces régimes, avec des valeurs bien plus élevées pour un écoulement descendant, et 2/ la magnitude des flux après correction, avec une augmentation pour un écoulement ascendant (sauf pour LE) et une diminution pour un écoulement descendant. Il était a priori attendu un lien entre l'inclinaison de l'écoulement et la magnitude de la correction planar fit sur les flux, via une analyse croisée des résultats en conditions de sol nu (écoulement ascendant proche de la topographie, écoulement descendant proche de l'horizontale) et en conditions de couverture végétale (écoulement descendant proche de la topographie, écoulement ascendant proche de l'horizontale). Bien que ce lien soit vérifié en conditions de vent descendant (correction planar fit plus forte en conditions de couverture végétale, en lien avec un écoulement proche de la topographie), les résultats très nuancés en conditions de vent ascendant ne permettent pas de dresser une conclusion générale. Une explication possible est la magnitude des facteurs mises en jeu, en comparaison à celles des bruits expérimentaux.

Dans la majeure partie des cas, les corrections appliquées sont linéaires, avec très peu de dispersions entre estimations pré- et post- correction planar fit. Dans un premier temps, ceci amène à être confiant sur la cohérence de la correction effectuée. Dans un second temps, ceci est de première importance pour constituer des chroniques dans un contexte de suivi temporel. En effet, les données de flux utilisées ici pour caractériser la correction planar fit furent collectées ponctuellement avec une fréquence de 10 Hz. La constitution de chroniques sur le long terme nécessite d'effectuer des collectes à des pas de temps nettement moins élevés (enregistrements de moyennes sur 30 minutes par exemple), et les mesures résultantes ne peuvent pas subir de correction planar fit faute d'information suffisante. Les fortes linéarités et faibles dispersions observées permettent alors d'envisager des corrections sur ces mesures brutes (les corrections instrumentales sont aussi linéaires et accompagnées de faibles dispersions, comme il sera montré dans le Chapitre 6).

Les non linéarités observées entre estimations pré- et post- correction planar fit correspondent principalement aux données collectées sur la parcelle C, pour lesquelles sont aussi observées de fortes dispersions. Ces non linéarités et fortes dispersions sont liées à la topographie autour de la parcelle C, avec 1/ une inclinaison importante pouvant atteindre 8° et donc supérieure à la limite de confiance pour la correction planar fit (qui est de 6°), 2/ une colline induisant un relief courbe et un effet de crête en amont (milieu de versant) avec deux oueds induisant un

relief accidenté en aval. 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 par ailleurs localisées sur des versants plans.

Que ce soit en conditions de sol nu ou de couverture végétale, nous avons observé des différences significatives pour les flux turbulents selon les régimes d'écoulement ascendant ou descendant, avec des magnitudes bien moindres (jusqu'à 50% en relatif) pour les flux en conditions d'écoulement ascendant. Un élément d'explication possible est la turbulence associée au régime d'écoulement, avec des lignes de courant structurées selon la topographie pour un vent ascendant, et des lignes de courant fortement perturbées par un régime tourbillonnaire pour un vent descendant (Figure 4.7 du Chapitre 4). Ces différences ont probablement des conséquences sur les autres composantes (bilan radiatif et flux de chaleur dans le sol) et la fermeture du bilan d'énergie. Il est aussi attendu que ce dernier soit sensible au régime d'écoulement (ascendant / descendant) et à l'occupation du sol, au regard de l'influence de ces derniers sur les magnitudes de correction planar fit. Ce sont ces points que nous allons étudier dans la suite de ce Chapitre.

1.2. Effet de la topographie sur le rayonnement net

Au regard des résultats précédents, qui mettent en exergue l'influence du relief sur les flux convectifs, nous évaluons ici de possibles effets du relief sur le bilan radiatif. Cette grandeur, appelée aussi rayonnement net, représente l'énergie électromagnétique dont dispose la surface, en équilibre avec les flux conductif (chaleur dans le sol) et convectifs (chaleur sensible et latente) lorsque le terme de stockage est négligeable. Nous commençons par étudier les mesures réalisées simultanément sur les deux rives du bassin versant, afin de comparer le bilan radiatif selon les deux régimes d'écoulement ascendant et descendant induits par les vents de Nord-Ouest et de Sud. Les observations reportées sont ensuite analysées par le biais d'une comparaison entre 1/ les mesures de rayonnement net, et 2/ les reconstitutions basées sur les mesures des variables intermédiaires, reconstitutions qui diffèrent par la prise en compte des facteurs d'influence tels que le forçage météorologique ou le régime thermique. Une discussion reprend finalement les points majeurs.

Notons préalablement que n'avons pas corrigé l'effet de la topographie sur les mesures de rayonnement global, ces effets étant de l'ordre de 1% en relatif pour des inclinaisons topographiques inférieures à 10°, et donc dans la gamme d'incertitude des mesures.

1.2.1. Analyse des mesures de rayonnement net selon l'écoulement

Afin d'analyser les mesures de rayonnement net R_n selon l'écoulement, il est préférable de sélectionner dans un premier temps des mesures qui sont collectées simultanément sur les deux rives du bassin versant, et qui correspondent aux mêmes conditions de sol et de climat pour éliminer l'influence de ces dernières. Pour le jeu de données dont nous disposons, il y a peu de mesures qui répondent à ces critères. Il a donc été décidé de procéder en deux étapes. Dans un premier temps, nous considérons les quelques cas de figures pour lesquels des mesures de R_n sont 1/ disponibles sur les deux rives du bassin versant en conditions de sol nu et 2/ collectées durant des changements de direction du vent. Dans un second temps, les observations faites à la première étape sont vérifiées sur l'ensemble du jeu de données.

1.2.1.1. Différences observées pour des jeux de données spécifiques

Pour comparer des périodes de mesures de rayonnement net en simultané sur les deux rives du bassin versant et en conditions de sol nu, nous disposons de deux paires de jeux de données. La première paire fut collectée en 2004 sur les parcelles A et E, et la seconde fut collectée en 2006 sur les parcelles A et C. Les jeux de données sont labellisés A04sol et E04sol d'une part, et A06sol et C06sol d'autre part. Au sein des jeux de données sélectionnés, nous choisissons des chroniques permettant d'illustrer des situations types en lien avec des changements de direction du vent. Notons que les parcelles A, E et C se trouvent dans des situations topographiques où l'écoulement diffère selon la direction du vent (Chapitres 2 et 4). Les parcelles A et C sont localisées sur les rives nord et sud respectivement. Elles sont donc en régime d'écoulement contraire (descendant / ascendant ou vice versa, selon que le vent soit de Nord-Ouest ou de Sud). La parcelle E est localisée sur le même versant que la parcelle A, mais dans des conditions topographiques différentes, avec une inclinaison proche de l'horizontale.

La Figure 5.4 illustre les chroniques de mesures collectées pour la direction du vent et le rayonnement net sur une période de neuf jours qui inclut un changement de direction du vent. Les jeux de données considérés sont A04sol et E04sol. De cette figure nous distinguons deux situations différentes, avec une première période où les mesures de rayonnements net sur les deux parcelles sont différentes, suivie par une période où ces mesures sont similaires. Pour la première période, les différences entre les mesures sont de l'ordre de 100 W/m^2 en milieu de la journée, le rayonnement net étant plus élevé sur la parcelle E. Il s'avère que la séparation entre les deux périodes correspond exactement à un changement de direction du vent.

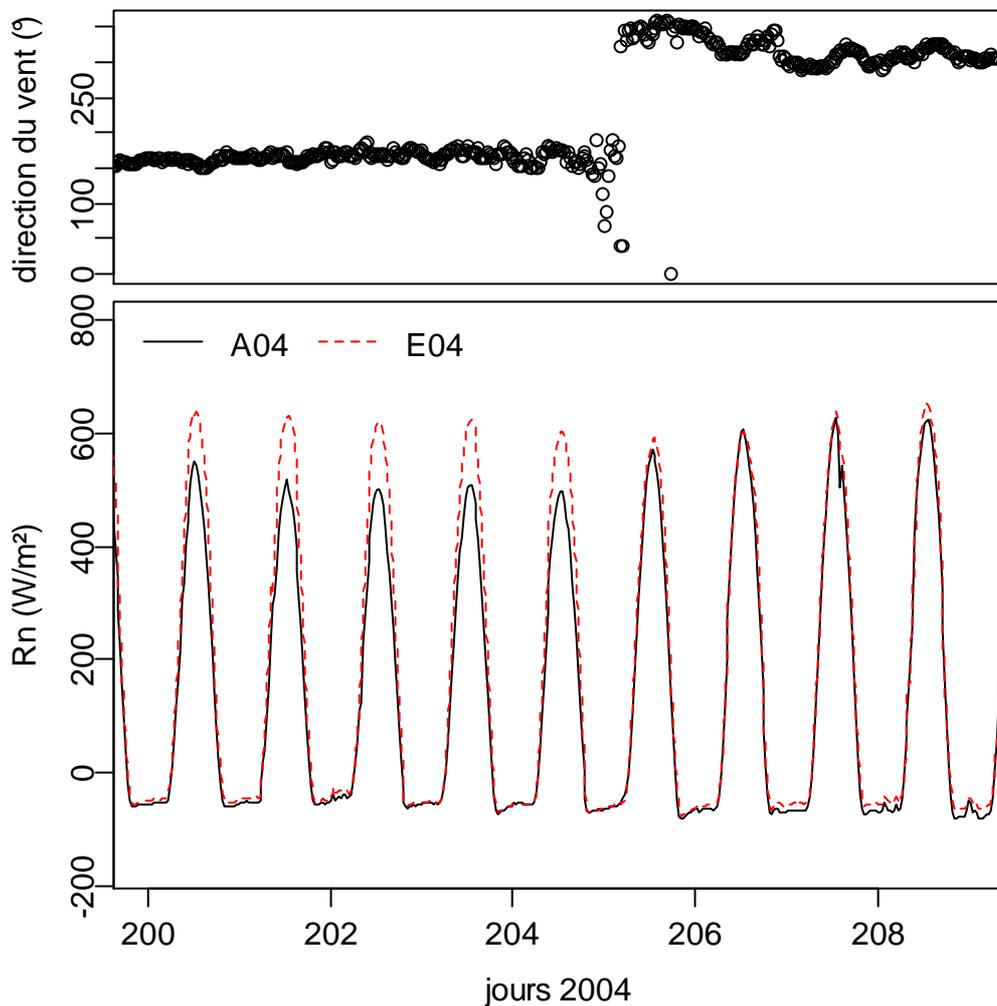


Figure 5.4. Variation de la direction du vent (en ° par rapport au Nord géographique) et du rayonnement net Rn (en W/m^2) entre les jours 200 et 209, pour les jeux de données A04sol (parcelle A en 2004, conditions de sol nu) et E04sol (parcelle E en 2004, conditions de sol nu), en considérant les mesures aux pas de temps de la demi-heure. La première période correspond à un vent de Sud (vent venant d'une direction de 150°), et la seconde période correspond à un vent de Nord-Ouest (vent venant d'une direction de 350°). Pour la parcelle A qui est localisée sur la rive nord du bassin versant, la première période correspond donc à un régime d'écoulement ascendant, et la seconde période correspond à un régime d'écoulement descendant. Pour la parcelle E qui est aussi localisée sur la rive nord du bassin versant mais dont la topographie est faible, l'écoulement est plutôt proche de l'horizontale.

L'observation reportée ci-dessus au travers de la Figure 5.4 n'est pas anecdotique. En effet, une observation similaire est reportée pour l'année 2006 via la Figure 5.5, en considérant cette fois-ci un changement de direction du vent en milieu de journée. Nous observons alors des valeurs de rayonnement net similaires sur la première période de la journée, et des différences atteignant 100 W/m^2 sur la deuxième période de la journée, après que le vent ait changé de direction. Il s'avère alors que le rayonnement net est plus faible pour la parcelle A.

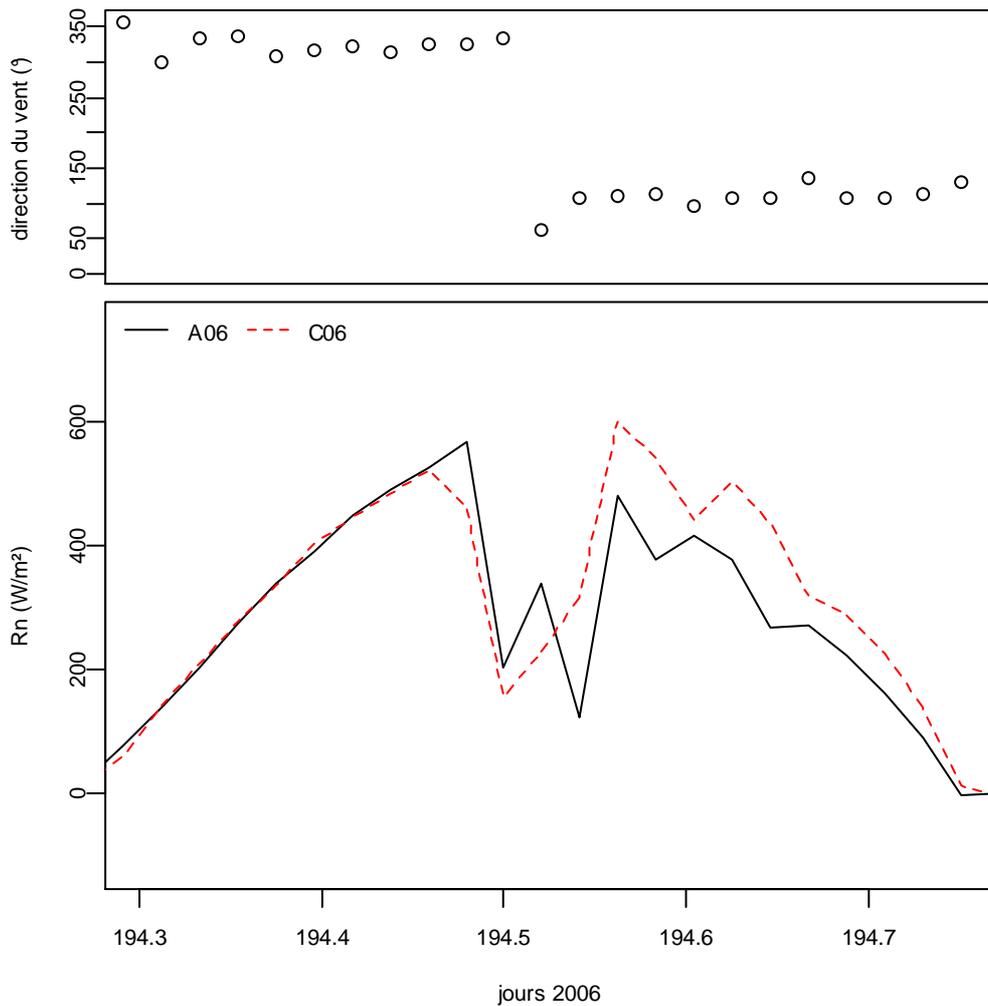


Figure 5.5. Variation de la direction du vent (en ° par rapport au Nord géographique) et du rayonnement net R_n (en W/m^2), durant le jour 194 de l'année 2006 sur les parcelles A et C en conditions de sol nu. Les jeux de données considérés sont A06sol (parcelle A en 2006, conditions de sol nu) et C06sol (parcelle C en 2006, conditions de sol nu). Les mesures sont au pas de temps de la demi heure. La première période diurne correspond à un vent de Nord-Ouest (vent venant d'une direction de 350°), et la seconde période correspond à un vent de Sud (vent venant d'une direction de 100°). Pour la parcelle A (respectivement C) qui est localisée sur la rive nord (respectivement sud) du bassin versant, la première période correspond donc à un régime d'écoulement descendant (respectivement ascendant), et la seconde période correspond donc à un régime d'écoulement ascendant (respectivement descendant).

En interprétant les différences observées pour les mesures de rayonnement net R_n selon la direction du vent, et illustrées sur la Figure 5.4 et la Figure 5.5, il ressort les points suivants.

- Lorsque le vent est de Sud (deuxième période sur la Figure 5.5), l'écoulement est ascendant sur la parcelle A et descendant sur la parcelle C. Donc le R_n est plus petit pour un écoulement ascendant (parcelle A). Lorsque le vent est sud toujours (première période sur la Figure 5.4) l'écoulement est ascendant sur la parcelle A et proche de l'horizontale sur la parcelle E (le voisinage de la mesure est plat). Donc le R_n est aussi plus petit pour un écoulement ascendant (parcelle A).
- Lorsque le vent est de Nord-Ouest (première période sur la Figure 5.5), l'écoulement est descendant sur la parcelle A et ascendant sur la parcelle C, le R_n est un peu plus important sur A. Lorsque le vent est de Nord-Ouest toujours (deuxième période sur la Figure 5.4), le R_n est presque similaire sur les parcelles A et E, où l'écoulement est descendant pour la parcelle A et proche de l'horizontale pour la parcelle E.

Pour récapituler sur les mesures de rayonnement net en conditions de sol nu, nous observons que le bilan radiatif diffère d'une parcelle à une autre selon la direction du vent, et que ces différences semblent liées à l'écoulement. Nous observons une nette diminution du rayonnement net pour des écoulements ascendants, en comparaison à des écoulements descendants ou proches de l'horizontale. En revanche, nous n'observons pas de différence sur le rayonnement net entre les écoulements descendants ou proches de l'horizontale. Dans la section qui suit, nous évaluons l'occurrence des tendances reportées ici sur le large panel des situations de mesures réalisées durant l'expérimentation.

1.2.1.2. Différences observées sur l'intégralité des mesures

Afin de vérifier si le rayonnement net R_n se comporte différemment selon l'écoulement pour l'ensemble des mesures collectées, nous avons représenté les moyennes diurnes de R_n selon les directions de vent Nord-Ouest et Sud, où les valeurs diurnes sélectionnées correspondent à un rayonnement solaire R_g supérieure à 20 W/m^2 . Les résultats sont illustrés par la Figure 5.6, et correspondent à différentes conditions d'occupation du sol. Afin de normaliser les variations de R_n par rapport à celles du rayonnement solaire R_g qui en est la composante majeure (environ 70 à 80% en magnitude), nous avons aussi considéré le rapport R_n / R_g , calculé à partir des valeurs diurnes du rayonnement net R_n et du rayonnement solaire R_g . Les

résultats sont illustrés avec la Figure 5.7. Il convient de rappeler les conditions d'écoulement pour les parcelles considérées, sachant que ces parcelles sont localisées sur la rive nord du bassin versant, à l'exception de la parcelle C localisée sur la rive sud. Ainsi un vent de Nord-Ouest (respectivement Sud) correspond à un écoulement descendant (respectivement ascendant) sauf pour la parcelle C où c'est l'inverse.

La Figure 5.6 montre que le R_n est variable selon une gamme de valeurs comprises entre 150 à 400 W/m^2 , ces valeurs extrêmes correspondant à un semis d'orge en hiver (jeu de données D06org) et à un sol nu en été (jeu de données E04sol). Par ailleurs, nous observons un rayonnement net systématiquement plus faible ($40 W.m^{-2}$ en moyenne) en conditions de vent ascendant (vent de Sud pour toutes les parcelles et vent de Nord-Ouest pour la parcelle C), à l'exception de trois jeux de données sur 12 qui sont E04pch (culture de pois chiche sur la parcelle E en 2004), B05avo (culture d'avoine sur la parcelle B en 2005), et C06sol (sol nu sur la parcelle C en 2006).

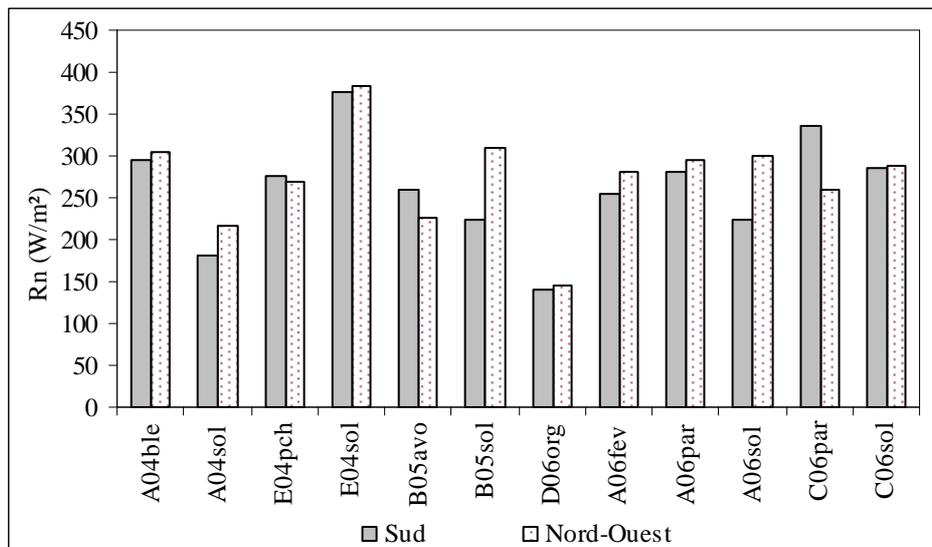


Figure 5.6. Moyenne des valeurs diurnes du rayonnement net R_n , selon que la direction du vent soit Nord-Ouest ou Sud, pour l'ensemble des jeux de données existants (incluant parcelles et années). Chaque jeu de données est labellisé selon la parcelle (A, B, C, D, E), l'année (2004, 2005, 2006) et l'occupation du sol (sol nu ou bien couverture végétale correspondant à des parcours ou à des cultures de blé, de pois chiche, d'avoine, d'orge, de fève).

La Figure 5.7 montre que le rapport R_n / R_g (ou R_n et R_g sont des moyennes des valeurs diurnes) est variable selon une gamme de valeurs comprises entre 0.4 et 0.7, ce qui correspond à 55% de variation en relatif. Plus particulièrement, nous observons que dans tous les cas de figure, y compris pour les jeux de données mentionnés ci-dessus (E04pch, B05avo,

C06sol), le rapport R_n / R_g est systématiquement plus faible en conditions d'écoulement ascendant. En effet, à l'exception de la parcelle C pour laquelle la tendance est inversée, le rapport R_n / R_g est systématiquement plus important en conditions de vent de Nord-Ouest et donc d'écoulement descendant. Sachant que le rayonnement solaire R_g est quasiment homogène à l'échelle du bassin versant (taille de 2.5 km²), nous en déduisons que le rayonnement net R_n est systématiquement plus important pour un écoulement descendant, par comparaison à un écoulement ascendant.

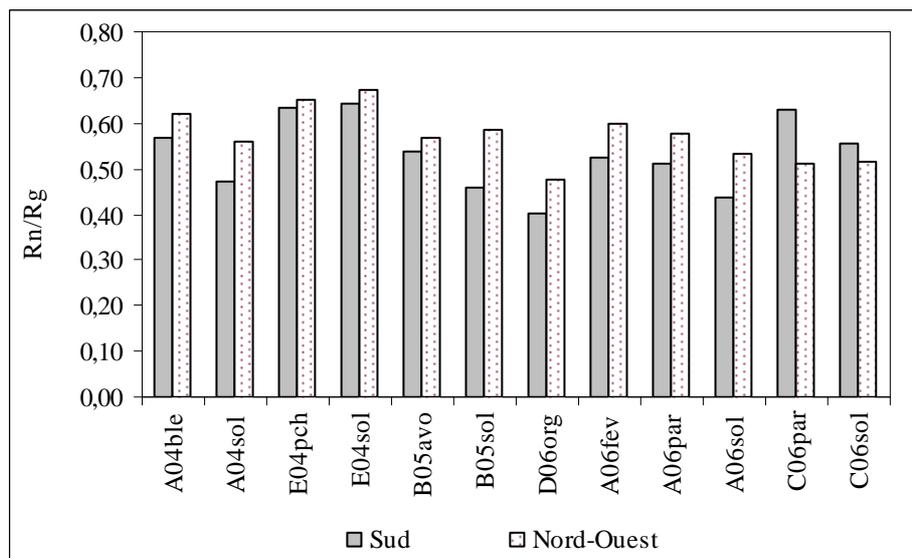


Figure 5.7. Rapport entre le rayonnement net R_n et le rayonnement global R_g , selon que la direction du vent soit Nord-Ouest ou Sud, pour l'ensemble des jeux de données existants (incluant parcelles et années). Le rapport est calculé à partir des valeurs diurnes du rayonnement net R_n et du rayonnement solaire R_g , mesurées selon un pas de temps de 30 minutes. Chaque jeu de données est labellisé selon la parcelle (A, B, C, D, E), l'année (2004, 2005, 2006) et l'occupation du sol (sol nu ou bien couverture végétale correspondant à des parcours ou à des cultures de blé, de poids chiche, d'avoine, d'orge, de fève).

Les observations reportées ne sont pas anecdotiques mais répétitives dans le temps et dans l'espace. Elles correspondent à un large panel de conditions météorologiques, d'occupation du sol et de bilan hydrique associé. Nous éliminons donc l'hypothèse qu'elles résultent d'une erreur de mesure. Le bilan radiatif est donc influencé par les conditions d'écoulement en termes de vent ascendant et descendant, avec une diminution en conditions d'écoulement ascendant. Dans une optique de clôture du bilan d'énergie, ceci est d'ailleurs cohérent avec les observations reportées précédemment (§ 1.1), à savoir les différences significatives entre les valeurs des flux convectifs selon les conditions d'écoulement ascendant et descendant, et plus particulièrement les valeurs plus faibles en conditions d'écoulement ascendant.

Ce type d'observation pour le rayonnement net n'est ni reporté ni analysé dans la littérature, d'après nos connaissances bibliographiques. Nous tentons donc dans ce qui suit d'apporter des éléments de réponse quant aux différences observées selon les écoulements ascendants ou descendants. Pour cela, nous évaluons l'influence de chacun des facteurs qui pilotent le rayonnement net, en confrontant 1/ les mesures directes présentées ci-dessus et 2/ les reconstitutions basées sur les mesures de ces facteurs (variables intermédiaires telles que l'albédo, les rayonnements solaire et atmosphérique, la température de surface).

1.2.2. Explication des variations de rayonnement net selon l'écoulement

Suite aux observations qui montrent des variations du rayonnement net selon les écoulements ascendants ou descendants, nous proposons maintenant de discuter les diverses raisons qui peuvent engendrer ces variations. Pour ceci, nous envisageons la contribution de chacun des facteurs qui pilotent le bilan radiatif de la surface : le rayonnement solaire dans les courtes longueurs d'onde, l'albédo, le rayonnement atmosphérique dans les grandes longueurs d'onde qui dépend de la température et de l'humidité de l'air, et la température de surface. Le rayonnement net est alors reconstitué selon deux approches proposées dans la littérature, et qui diffèrent par la prise en compte de ces facteurs d'influence.

La première approche considérée est celle proposée par Allen et al. (1998) dans le cadre de la méthode FAO-56. Elle fournit une estimation du rayonnement net qui est ensuite introduite dans le calcul de l'évapotranspiration de référence. De même que l'ensemble des estimations FAO-56, elle est adaptée pour une culture basse de type gazon, et bien irriguée. Elle ne fait intervenir que les variables météorologiques, et ne tient pas compte de l'état thermique de la surface en rapport avec la thermodynamique des échanges d'énergie. La considération de cette approche permet d'isoler les possibles influences des variables météorologiques. En effet, ces dernières pourraient a priori être à l'origine des variations de rayonnement net avec le changement de la direction du vent.

La seconde approche considérée, plus détaillée dans la caractérisation du rayonnement net, tient compte de l'état thermique de la surface en rapport avec la thermodynamique des échanges de chaleur. Son implémentation requiert la connaissance de la température de surface, plus exactement de la température radiative, selon la nomenclature de référence

proposée par Norman et Becker (1995). Pour cela, nous reconstituons à partir des mesures de flux de chaleur sensible H et de quantité de mouvement u_* une température de surface, et plus particulièrement une température aérodynamique qui est ensuite reliée à la température radiative via le paramètre kB^{-1} (Lhomme et al., 2000). Par inversion, il est alors possible d'identifier de possible paramètres qui interviennent dans les échanges de chaleur et qui influent sur le rayonnement net selon les écoulements ascendants ou descendants, et ce en croisant deux sources d'information indépendantes que sont 1/ la mesure du rayonnement net par pyrromètre et 2/ la mesure du flux de chaleur sensible par la méthode des covariances turbulentes.

1.2.2.1. Normalisation vis-à-vis des conditions météorologiques

Pour isoler les possibles influences des conditions météorologiques sur les variations de rayonnement net R_n selon les régimes d'écoulement ascendant et descendant, nous avons utilisé la formule proposée par FAO. Celle-ci est conçue pour un sol couvert dont la réserve en eau au niveau du système racinaire n'est pas limitant, permettant à la végétation de transpirer à son maximum. L'état thermique de la surface, caractérisé par la température de surface qui résulte des échanges de chaleur sensible et latente, n'est pas pris en compte. La composante grandes longueurs d'onde ne tient donc compte que de la radiation atmosphérique. L'approche FAO-56 est implémentée à partir des mesures météorologiques collectées sur la zone d'étude (rayonnement global, température de l'air et pression de vapeur) et de données spécifiques au site (latitude, longitude, altitude) selon la formulation :

$$R_n = R_{nc} + R_{nl}$$

$$R_n = (1 - a) R_g - \sigma T_a^4 \left(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \left(1.35 \frac{R_g}{R_{go}} - 0.335 \right) \right) \quad (\text{Équation 5.1})$$

R_{nc} et R_{nl} sont les bilan radiatifs sur les courtes (0.3 à 3 μm) et grandes (3 à 100 μm) longueurs d'onde. R_g est le rayonnement solaire, a est l'albédo (fixé à une valeur nominale de 0.23), T_{max} et T_{min} sont les températures de l'air minimale et maximale sur la période de 24 heures, σ est la constante de Stefan-Boltzmann, e_a est l'humidité de l'air, R_{go} est le rayonnement solaire en conditions de ciel clair.

Une fois déterminé, le rayonnement net FAO-56 est comparé à celui mesuré sur les parcelles, en considérant différentes conditions d'occupation du sol et en incluant les deux directions principales de vent (vent de Sud et vent de Nord-Ouest). Les résultats obtenus sont synthétisés dans le Tableau 5.3. Quelles que soient l'occupation du sol et la direction du vent, les estimations (R_n FAO) sont toujours supérieures aux mesures (R_{nmes}), et ces deux grandeurs sont linéairement reliées (coefficient de détermination supérieur à 0.94). Cependant, le coefficient de Nash s'approche systématiquement de 1 lorsque le vent est descendant.

Le Tableau 5.3 mentionne aussi les indicateurs de performances en relatif, c'est-à-dire le biais ou le RMSE divisé par la valeur moyenne de la référence (ici la mesure). De ces indicateurs donnés sous forme de pourcentage, nous constatons que les différences entre estimations et mesures varient selon les conditions d'occupation du sol (sol nu ou couverture végétale) et les régimes d'écoulement ascendant ou descendant. L'écart moyen (ou biais) relatif est au minimum deux fois plus important en conditions de sol nu, par rapport aux conditions de couverture végétale. Une explication possible est la formulation FAO-56 pour le rayonnement net, qui est dédiée à des conditions de sol couvert ne souffrant pas de déficit d'eau dans la zone racinaire, et dont l'albédo peut être très différent de celui d'un sol nu. L'écart moyen relatif est aussi largement supérieur en régime d'écoulement ascendant, en comparaison au régime d'écoulement descendant. Ceci nous amène à suspecter un facteur d'influence qui n'est pas pris en compte dans l'expression FAO-56 du rayonnement net, et qui 1/ est de nature autre que météorologique, et 2/ varie fortement en régime d'écoulement ascendant.

Avant de conclure quant à l'absence d'influence de la part des conditions météorologiques sur les variations de rayonnement net selon la direction du vent, nous voulons éliminer un hypothétique impact de la variabilité spatiale induite par l'utilisation de mesures collectées en différents points (incluant un éventuel couplage avec les régimes d'écoulement ascendant / descendant). En effet, l'exercice présenté ci-dessus repose sur l'inter comparaison entre 1/ les estimations FAO-56 de rayonnement net obtenues à partir des mesures météorologiques collectées sur les parcelles via les dispositifs de mesures de flux (température et humidité de l'air) et à l'exutoire du bassin versant (rayonnement solaire), et 2/ les mesures de rayonnement net effectuées sur les parcelles. Nous proposons d'expliquer pourquoi la variabilité spatiale qui existe pour les mesures collectées sur les différentes localisations ne peut induire les écarts entre la mesure et le calcul FAO-56. Pour cela, nous discutons chacune des variables du rayonnement net dont la variabilité spatiale peut induire des variations dans

le calcul de R_n : le rayonnement solaire qui est mesuré à l'exutoire, l'albédo qui est fixé arbitrairement à une valeur empirique, et enfin la température et l'humidité de l'air qui sont mesurées sur les différentes parcelles via les dispositifs de mesures de flux.

La première variable que nous discutons est le rayonnement global, qui correspond au rayonnement d'origine solaire direct (dans la direction du soleil) et diffus (hémisphérique). Il varie avec la position géographique, le taux d'insolation, l'exposition de la pente, et la direction du vent qui peut influencer sur la composition et donc la transmittance atmosphérique.

- Dans notre cas d'étude, nous éliminons l'hypothèse qu'il varie spatialement puisque les stations de mesures sont distantes d'un kilomètre au maximum. De plus, des variations spatiales du rayonnement global ne se traduiraient pas par des variations de rayonnement net selon le sens de l'écoulement ascendant ou descendant.
- Les variations de rayonnement solaire avec la direction du vent résultent généralement d'une variation de la transmittance atmosphérique en rapport avec la teneur atmosphérique en eau (nuage, humidité) ou en aérosols. Toutefois, une telle variation n'explique pas les différences observées entre les deux rives du versant (pour une direction du vent, nous observons un rayonnement net plus faible avec un vent ascendant sur l'un des versants).
- La présence de pente sur le site et les différentes expositions des parcelles induisent une variation inter parcellaire du rayonnement global. Or cette variation dépend de l'élévation solaire qui varie au cours de la journée (ce type de variation diurne n'est pas observé ici), et n'est pas en lien avec un changement de direction du vent.

De ces éléments nous excluons une possible influence de la direction du vent sur le rayonnement net via une influence sur le rayonnement solaire.

La seconde variable que nous discutons est l'albédo, qui varie avec les conditions de surface (sol nu / végétation) et les conditions d'éclairement via la composante diffuse en lien avec la couverture nuageuse et la turbidité de l'atmosphère (Isiomon et Mayer 2002). Il peut aussi être influencé par la vitesse du vent via la couleur et la rugosité du couvert végétal qui s'incline sous l'effet du vent. Evett (2002) a montré qu'un accroissement de la vitesse du vent induit une augmentation de la rugosité et donc une diminution de l'albédo. Ces résultats furent obtenus à partir de la formulation proposée par Dvoracek et Hannabas (1990), où β est l'angle solaire, a est l'albédo, p et c sont des coefficients de couleur et de rugosité :

$$a = p^{c \sin(\beta) + 1} \quad (\text{Équation 5.2})$$

Tableau 5.3. Analyse statistique de la relation entre 1/ le rayonnement net calculé selon la FAO (Rn FAO) et 2/ le rayonnement net mesuré (Rnmes). Sont considérés les différents jeux de données existants, selon les parcelles (A, B, C), les années (2004, 2005, 2006) et les conditions d'occupation du sol (sol nu ou bien couverture végétale correspondant à des parcours ou à des cultures d'avoine, de blé, de fève). Sont discriminées les conditions d'écoulement ascendant (Asc.) et descendant (Des.) selon les directions de vent correspondantes (Sud et N-O pour Nord-Ouest). Les mesures et les estimations FAO-56 de rayonnement net (en W/m²) correspondent à un pas de temps de 30 minutes. Les variables suivantes sont indiquées : n est le nombre de mesures ; (Rnmes)m est la moyenne des mesures de rayonnement net Rn (en W/m²) ; (Rn FAO)m est moyenne des estimations FAO-56 de rayonnements net (en W/m²) ; ME est biais moyen entre les mesures (Rnmes) et les estimations FAO-56 (Rn FAO) ; RMSE est l'erreur quadratique moyenne ; Nash est le coefficient Nash ; R² est le coefficient de corrélation. Sont aussi indiqués les indicateurs de performances en relatif, c'est-à-dire le biais ME ou l'erreur quadratique moyenne RMSE divisé par la valeur moyenne de la référence (ici la mesure Rnmes). Le premier bloc de résultats correspond aux conditions de sol nu et le second bloc aux conditions de couverture végétale.

	A04sol		B05sol		A06sol		C06sol	
Écoulement	Asc.	Des.	Asc.	Des.	Asc.	Des.	Asc.	Des.
Direction vent	Sud	N-O	Sud	N-O	Sud	N-O	N-O	Sud
N	1136	854	225	281	204	433	431	203
(Rnmes)m	214.7	285.3	265.3	351.2	277.1	351.8	344.6	354.1
(Rn FAO)m	288.3	319.8	369.7	399.7	395.3	436.2	438.9	397.2
ME	73.6	34.4	104.4	48.6	118.2	84.4	94.3	43.0
RMSE	90.5	57.6	117.4	59.1	124.7	96.8	104.1	49.1
Nash	0.61	0.90	0.51	0.92	0.39	0.73	0.68	0.94
R²	0.94	0.94	0.96	0.97	0.98	0.94	0.95	0.99
ME/Rnmes (%)	34.3	12.1	39.4	13.8	42.7	24.0	27.4	12.1
RMSE/Rnmes (%)	42.2	20.2	44.3	16.8	45.0	27.5	30.2	13.9
	A04blé		B05avo		A06fev		C06par	
Écoulement	Asc.	Des.	Asc.	Des.	Asc.	Des.	Asc.	Des.
Direction vent	Sud	N-O	Sud	N-O	Sud	N-O	N-O	Sud
n	721	861	659	389	825	530	318	589
(Rnmes)m	330.1	373.0	288.7	256.2	299.9	334.6	319.2	377.9
(Rn FAO)m	371.4	381.2	345.8	275.2	370.6	366.3	399.3	389.7
ME	41.3	8.2	57.1	19.0	70.7	31.7	80.1	11.9
RMSE	67.2	62.1	68.3	50.9	84.2	48.8	88.5	38.4
Nash	0.90	0.93	0.87	0.94	0.80	0.95	0.78	0.97
R²	0.94	0.93	0.97	0.95	0.96	0.97	0.97	0.98
ME/Rnmes (%)	12.5	2.2	19.8	7.4	23.6	9.5	25.1	3.1
RMSE/Rnmes (%)	20.4	16.6	23.7	19.9	28.1	14.6	27.7	10.2

En tenant compte de ces processus physiques il est donc possible d'observer des variations d'albédo avec la direction du vent, et ce en conditions de couverture végétale. Dans notre cas d'étude, néanmoins, les observations que nous essayons d'expliquer correspondent à des conditions de sol nu exclusivement (Figure 5.4 et Figure 5.5) ou bien incluent des conditions de sol nu (Figure 5.6, Figure 5.7). De ces éléments nous excluons une possible influence de la direction du vent sur le rayonnement net via une influence sur l'albédo.

La troisième variable que nous discutons est le rayonnement atmosphérique dans les grandes longueurs d'onde qui est piloté par la température et l'humidité de l'air. Même si ces dernières varient avec la direction du vent, nous n'observons pas de différence inter-parcellaire majeure. Les faibles variabilités spatiales de la température et de l'humidité de l'air observées (voir Chapitre 3) ne peuvent donc induire les différences significatives entre les différentes parcelles pour le calcul FAO-56 du rayonnement net. De plus, et similairement à ce qui est noté pour le rayonnement solaire, de telles variations ne pourraient expliquer les différences observées entre les deux rives du versant (pour une direction du vent, nous observons un rayonnement net plus faible avec un vent ascendant sur l'un des versants). De ces éléments nous excluons une possible influence de la direction du vent sur le rayonnement net via une influence sur la température et l'humidité de l'air.

Nous avons effectué dans cette partie un exercice d'intercomparaison entre mesures et reconstitutions de rayonnement net, ces dernières étant obtenues à partir de la relation FAO-56 qui ne tient compte que des variables climatiques. Les résultats obtenus infirment l'hypothèse que la variation du rayonnement net avec la direction du vent puisse provenir d'une variation des conditions météorologiques. Ceci accentue l'hypothèse que les variations de rayonnement net avec la direction du vent résultent de changements en termes de régime thermique, puisque le calcul FAO-56 ne tient pas compte de la température de surface qui résulte des échanges de chaleur. Il s'agit donc dans ce qui suit d'évaluer de possibles changements de température de surface en lien avec des variations du régime d'écoulement. Rappelons que le R_n est en effet plus élevé avec un écoulement descendant proche de l'horizontal qu'avec un écoulement ascendant qui suit la pente topographique.

1.2.2.2. Prise en compte des échanges de chaleurs

Le rayonnement net R_n , qui représente le bilan radiatif pour les courtes et grandes longueurs d'onde, a pour expression complète la formulation suivante :

$$R_n = (1 - a)R_g + \sigma \varepsilon_a T_a^4 - \sigma \varepsilon_s T_s^4 \quad (\text{Équation 5.3})$$

R_g est le rayonnement global ; a est l'albédo ; T_a est la température de l'air, ε_s est l'émissivité de la surface (fixée arbitrairement à une valeur empirique de 0.97 dans notre cas) ; T_s est la température de surface ; σ est la constante de Stefan–Boltzmann. Avec l'inclusion de la température de surface qui résulte des échanges de chaleur, cette formulation tient compte de l'état thermique de la surface. L'émissivité apparente de l'air ε_a est définie par :

$$\varepsilon_a = 1.24 \left(\frac{e_a}{T_a} \right)^{\left(\frac{1}{7}\right)} \quad (\text{Équation 5.4})$$

où e_a et T_a sont les humidité et température de l'air. Dans la section précédente, nous avons montré que l'albédo et les variables météorologiques (R_g, T_a, e_a) n'expliquent pas les variations du rayonnement net selon le régime d'écoulement. Les deux premiers termes de l'équation 5.3 sont donc mis hors de cause. Il s'agit donc ici de caractériser un possible lien entre le régime d'écoulement et le troisième terme de cette équation, qui inclut la température de surface sous forme radiative (Norman et Becker 1995).

Ne disposant pas de mesure de température de surface, nous reconstituons celle-ci à partir des mesures de flux collectées par les dispositifs de covariances turbulentes. Les mesures utilisées imposent de considérer une approche monocouche qui ne différencie pas les composantes sol et végétation, tant pour la température que pour le flux de chaleur sensible associé :

$$T_s = \frac{r_a H}{\rho c_p} + T_a \quad (\text{Équation 5.5})$$

$$r_a = \frac{1}{k^2 u} \left[\text{Log} \left(\frac{z_m - D}{z_{0h}} \right) - \Psi_h \left(\frac{z_m - D}{L_{MO}} \right) \right] \left[\text{Log} \left(\frac{z_m - D}{z_0} \right) - \Psi_m \left(\frac{z_m - D}{L_{MO}} \right) \right] \quad (\text{Équation 5.6})$$

On trouvera l'expression des fonctions de stabilité $\Psi_m(\zeta)$ et $\Psi_h(\zeta)$ dans de nombreux ouvrages (Brutsaert, 1982 ; Guyot, 1997). Les autres variables sont déterminées selon deux méthodes de calculs différentes, qui sont présentées ci-après.

Premier calcul de température de surface pour reconstituer le rayonnement net

Le recours aux équations 5.3 à 5.6, pour l'estimation du rayonnement net à partir de la température de surface, nous amène à considérer plusieurs paramètres et variables, parmi

lesquels certains sont mesurés et d'autres sont fixés arbitrairement à des valeurs empiriques proposées dans la littérature. Le Tableau 5.4 indique l'origine de chacun des paramètres et variables utilisés. Les grandeurs mesurées sont 1/ le flux de chaleur sensible et la vitesse de friction, collectés sur les parcelles via les dispositifs de mesures de flux par covariances turbulentes, 2/ la hauteur du couvert végétal, mesurée à l'intérieur des parcelles, et 3/ les données climatiques, mesurées via la station météorologique à l'exutoire du bassin versant. Les grandeurs fixées arbitrairement à des valeurs empiriques sont les propriétés aérodynamiques de la surface (rugosité mécanique et thermique, hauteur de déplacement) et l'albédo. La forme aérodynamique de la température de surface T_s (Équation 5.5) est convertie sous une forme radiative (Équation 5.3) via l'ajustement des rugosités mécanique et thermique, le rapport des deux étant le coefficient correctif nommé paramètre kB^{-1} . Notons enfin que les valeurs choisies pour les propriétés aérodynamiques sont proposées dans la littérature pour des conditions de surfaces planes et horizontales, avec absence d'inclinaison topographique. Les résultats obtenus ici doivent donc être considérés avec précaution.

Tableau 5.4. Origine des paramètres utilisés pour calculer le rayonnement net à partir d'une température de surface reconstituée via les mesures de flux de chaleur sensible.

Paramètres	Origine
<ul style="list-style-type: none"> • Rayonnement global, pression de vapeur et température de l'air (R_g, e_a, T_a) 	Mesures de la station météo localisée à l'exutoire du bassin versant de Kamech
<ul style="list-style-type: none"> • Flux de chaleur sensible, vitesse de friction et vitesse du vent (H, u_*, u) 	Dispositifs de mesures des flux sur les parcelles considérées
<ul style="list-style-type: none"> • Hauteur du couvert végétal (h_{veg}) 	Mesures in situ
<ul style="list-style-type: none"> • Rugosité mécanique 	Lagouarde et al. (1995) : $z_{0m} = 0.13 * h_{veg}$ pour couvert continu de h_{veg} limitée
<ul style="list-style-type: none"> • Rugosité thermique 	Lagouarde et al. (1995) : $z_{0h} = 0.1 * z_{0m}$ peut varier beaucoup selon la structure végétale, les conditions hydriques et météorologiques
<ul style="list-style-type: none"> • Hauteur de déplacement 	Lagouarde et al. (1995) : $D = 0.7 * h_{veg}$
<ul style="list-style-type: none"> • Albédo 	Allen et al. (1998) pour FAO-56 : valeur de 0.23

La vitesse du vent intervient, via la résistance aérodynamique (Equation 5.6), dans la reconstitution de la température de surface par inversion du flux de chaleur sensible (Equation 5.5), la température reconstituée étant finalement utilisée pour estimer le rayonnement net (Equation 5.3). Au regard de la variabilité spatiale du vent, nous considérons deux sources d'informations pour la vitesse du vent. La première estimation repose sur la

vitesse enregistrée à l'intérieur des parcelles via les dispositifs de mesure de flux par covariances turbulentes. La seconde estimation repose sur la vitesse mesurée au niveau de la station météorologique à l'exutoire du bassin versant. En termes de résistance aérodynamique, nous constatons des différences selon l'utilisation de l'une ou l'autre de ces deux estimations. Cependant, ces différences s'amointrissent entre les températures de surface reconstituées, et deviennent négligeables pour les estimations de rayonnement net (écarts relatifs de 2%).

Le flux H intervient directement dans la reconstitution de la température de surface (Equation 5.5). Il intervient aussi indirectement, au même titre que la vitesse de friction u_* , via la résistance aérodynamique qui dépend de la longueur de Monin-Obukhov (Equation 5.6). Bien que ces grandeurs soient théoriquement de meilleure qualité après avoir subi la correction de rotation planar fit, nous reconstituons la température de surface et le rayonnement net en utilisant les deux estimations, à savoir H et u_* corrigés (H_{PF} et u_{*PF}) et non corrigés (H_{AC} et u_{*AC}) de la rotation planar fit. Nous comparons ensuite les reconstitutions de rayonnement net avec les mesures, les différences étant quantifiées via l'écart moyen (ou biais) relatif, qui représente la différence (R_n calculé - R_n mesuré) divisée par le R_n mesuré. Les résultats sont donnés dans le Tableau 5.5.

En comparant les biais obtenus selon l'utilisation des flux corrigés et non corrigés, nous remarquons que ces écarts sont toujours plus élevés pour les estimations obtenues avec les flux non corrigés. Ceci confirme la pertinence de la correction planar fit. En termes de différence selon les conditions d'écoulement ascendant et descendant, la même dynamique est observée que les flux soient corrigés ou non. Nous considérons donc dans la suite de l'analyse les résultats obtenus avec les flux corrigés (R_{nPF}), puisqu'ils sont plus proches des mesures.

Les biais sont plus importants en conditions de vent ascendant, avec une gamme de 10 à 18 % et un pic à 31 % pour le jeu de données A06sol, en comparaison à une gamme de 0 à 4 % et un pic à 8 % pour le jeu de données A06sol, lorsque le vent est descendant. Systématiquement, le calcul (R_{n_calcul}) est supérieur à la mesure (R_{n_mesure}) en conditions de vent ascendant, et inférieur ou égal en conditions de vent descendant. Ceci se vérifie quelle que soit l'occupation du sol (couverture végétale ou sol nu), bien que les différences entre mesures et calculs aient tendance à être plus faibles en conditions de couverture végétale.

Tableau 5.5. Écart moyen relatif entre le rayonnement net calculé (Rn_calcul = Rn_AC ou Rn_PF) et mesuré (Rn_mesure), et défini comme le rapport $MER = ME (Rn_calcul, Rn_mesure) / \langle Rn_mesure \rangle$, ou ME est l'écart moyen et $\langle Rn_mesure \rangle$ est la valeur moyenne des mesures. Le rayonnement net calculé est obtenu soit à partir des flux corrigés de la rotation via la correction planar fit (Rn_calcul = Rn_PF, 3^{ème} et 5^{ème} colonne), soit à partir des flux non corrigés (Rn_calcul = Rn_AC, 2^{ème} et 4^{ème} colonne). Les 2^{ème} et 3^{ème} colonnes correspondent au régime de vent ascendant. Les 4^{ème} et 5^{ème} colonnes correspondent au régime de vent descendant. Les lignes correspondent aux jeux de données considérés selon les parcelles (A, B, C), les années (2004, 2005, 2006), en séparant les conditions d'occupation du sol (sol nu ou bien couverture végétale correspondant à des parcours ou à des cultures d'avoine, de blé, de fève). Notons que les flux H et u_* sont toujours corrigés des effets instrumentaux.

	Vent ascendant		Vent descendant	
	MER (Rn_AC et Rn_mesure)	MER (Rn_PF et Rn_mesure)	MER (Rn_AC et Rn_mesure)	MER (Rn_PF et Rn_mesure)
Sol couvert				
A04blé	0.14	0.10	-0.07	-0.06
B05avo	0.14	0.13	-0.03	-0.02
A06fev	0.18	0.17	-0.02	-0.02
C06par	0.21	0.18	-0.04	-0.02
moyenne	0.17	0.14	-0.04	-0.03
Sol nu				
A04sol	0.16	0.11	<u>-0.20</u>	<u>-0.20</u>
B05sol	0.20	0.14	-0.07	-0.05
A06sol	0.33	<u>0.31</u>	<u>0.08</u>	<u>0.08</u>
C06sol	0.19	0.17	-0.04	0.00
moyenne	0.22	0.18	-0.06	-0.04

En récapitulant les observations issues du Tableau 5.5 et reportées ci-dessus, quatre points majeurs émergent, listés ci-dessous.

- Les flux corrigés permettent un calcul de Rn plus proche de la mesure par rapport aux flux non corrigés. La correction de rotation planar fit semble donc améliorer la qualité des flux convectifs, et particulièrement pour les conditions de vent ascendant qui induisent une inclinaison de l'écoulement proche de la pente topographique.
- Les différences entre calculs et mesures sont nettement plus importantes avec un vent ascendant, à l'exception du jeu de données A04sol où les différences sont plus importantes avec un vent descendant. La même tendance a été notée lors de la comparaison entre reconstitutions FAO-56 et mesures de rayonnement net.
- A l'exception du jeu de données A06sol, les conditions de vent ascendant induisent systématiquement des estimations par le calcul supérieures aux mesures, alors que le contraire est systématiquement observé pour les conditions de vent descendant.

- En conditions de couverture végétale, l'estimation par le calcul est généralement plus proche de la mesure, en comparaison aux conditions de sol nu.

Afin de conclure cette analyse, nous comparons les résultats obtenus pour les estimations du rayonnement net selon que soit prise en compte ou non la température de surface. Cela revient à comparer les biais (écarts entre rayonnement net calculé et mesuré) obtenus avec la méthode FA0-56 (Tableau 5.3) à ceux obtenus via les jeux d'équations 5.3 à 5.6 (Tableau 5.5). La prise en compte de la température de surface dans le bilan radiatif améliore nettement le calcul du rayonnement net. En conditions de vent descendant, les différences entre mesures et calculs diminuent significativement pour devenir quasiment nulles (biais proches de zéro). En conditions de vent ascendant, les différences entre mesures et calcul diminuent significativement, mais ne deviennent pas nulles (biais relatif entre 10 et 20%). Ceci nous amène à conclure que la prise en compte de la température dans le bilan radiatif améliore nettement le calcul de ce dernier, mais que la détermination de cette température à partir des données de flux est probablement erronée en conditions d'écoulement ascendant. De possibles sources d'erreur sont 1/ les mesures de flux H et u_* , ou 2/ la caractérisation de la résistance aérodynamique dans ces conditions d'écoulement (Équation 5.7). Dans ce dernier cas, nous pensons en particulier à un paramétrage irréaliste de la rugosité mécanique, via l'utilisation de valeurs inadaptées pour des écoulements inclinés. Nous proposons donc dans ce qui suit une optimisation qui permette de minimiser ces possibles sources d'erreur.

Deuxième calcul de température de surface pour reconstituer le rayonnement net

Afin d'évaluer de possibles sources d'erreur parmi 1/ les mesures de flux (chaleur sensible H ou quantité de mouvement via la vitesse de friction u_*) ou 2/ le calcul de la résistance aérodynamique (en particulier au travers de la rugosité mécanique), nous considérons une approche d'optimisation. Celle-ci consiste à ajuster les grandeurs précitées (flux et rugosité mécanique) afin de minimiser les différences entre les reconstitutions et les mesures de rayonnement net. Nous considérons dans un premier temps les flux H et u_* comme variables d'ajustement, et dans un second temps la rugosité mécanique.

L'optimisation du rayonnement net en ajustant les mesures de flux H et u_* montre que des variations relatives de 10% pour les flux H et u_* induisent des variations relatives de 1% sur le rayonnement net. Similairement, obtenir des variations de rayonnement net qui permettent de

minimiser les différences entre mesures et calculs, soit des variations de 10 à 20%, requiert des variations d'au moins 50% sur les flux H et u_* , et donc la considération de valeurs irréalistes pour les flux de chaleur sensible et de quantité de mouvement. Ceci nous amène à exclure les flux mesurés en tant que possibles sources d'erreur, et nous amène à suspecter plus encore les estimations de la résistance aérodynamique via la rugosité mécanique.

Tableau 5.6. Valeurs obtenues par optimisation pour le rapport z_{0m}/h_{veg} . Ces valeurs sont obtenues par ajustement, de telle sorte que soient minimisés les écarts entre calculs et mesures de rayonnement net R_n . Est aussi indiquée l'erreur résiduelle sur R_n via l'écart moyen ME (ou biais) et l'erreur quadratique moyenne RMSE. Nous distinguons les résultats selon les conditions d'occupation du sol (sol nu ou bien couverture végétale correspondant à des parcours ou à des cultures d'avoine, de blé, de fève), qui correspondent à des valeurs différentes pour la hauteur de déplacement et le paramètre kB^{-1} . Pour chacune de ces conditions d'occupation du sol, nous distinguons ensuite les résultats selon les régimes d'écoulement descendant et ascendant, puis selon les jeux de données collectés sur différentes parcelles (A, B, C) en différentes années (2004, 2005, 2006).

	z_{0m}/h_{veg}	ME	RMSE
Sol couvert : $z_{0h}/z_{0m} = 0.01$, $D/h_{veg}=0.7$, albédo=0.23			
Descendant			
A04ble	1.94	6	44
B05avo	0.47	7	47
A06fev	0.63	3	40
C06par	1.48	6	29
Ascendant			
A04ble	0.0684	11	48
B05avo	0.0108	13	47
A06fev	0.0121	15	50
C06par*	0.0104	12	42
Sol nu : $z_{0h}/z_{0m} = 0.1$, $D/h_{veg}=0$, albédo=0.23			
Descendant			
A04sol	4.45	4	35
B05sol	0.53	10	31
A06sol	0.079	10	66
C06sol	0.208	5	24
Ascendant			
A04sol	0.0527	19	59
B05sol	0.0202	5	45
A06sol	0.0011	18	50
C06sol	0.023	20	60

* z_m/h_{veg} de départ=0.1 et non pas 0.13 comme pour les autres cas.

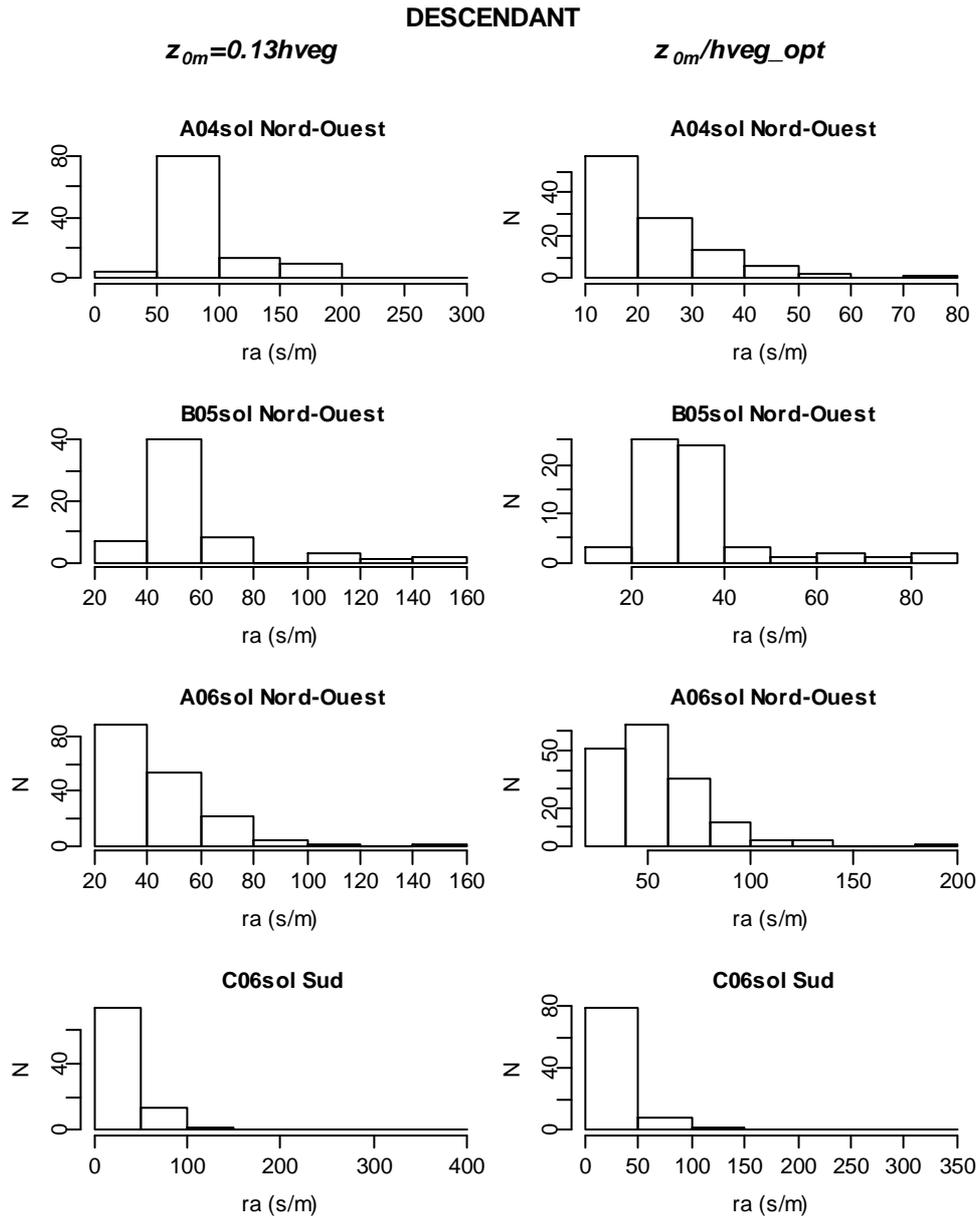


Figure 5.8. Histogrammes des valeurs de résistance aérodynamique obtenues 1/ en considérant une estimation égale à $1/8^{ème}$ de la hauteur de la végétation (colonne de gauche) et 2/ utilisant l'optimisation qui minimise les différences entre rayonnement net mesuré et calculé (colonne de droite). Résultats correspondant à des conditions de sol nu et d'écoulement descendant. Les lignes correspondent aux jeux de données considérés selon les parcelles (A, B, C) et les années (2004, 2005, 2006).

L'optimisation du rayonnement net en ajustant la résistance aérodynamique via la rugosité mécanique z_{0m} se fait par le biais du rapport z_{0m}/h_{veg} , où h_{veg} est la hauteur de la végétation mesurée in situ. L'optimisation est effectuée en discriminant les parcelles, les occupations du sol, et les types d'écoulement (ascendant ou descendant). Une différenciation selon l'occupation du sol est faite pour le paramètre kB^{-1} (i.e. le rapport des rugosités thermique et mécanique z_{0h}/z_{0m}) et la hauteur de déplacement D. Ainsi, z_{0h}/z_{0m} est fixé à 0.01 ($kB^{-1} = 4.6$)

en conditions de couverture végétale et à $0.1 \text{ (kB}^{-1} = 2.3)$ en conditions de sol nu. De même, D est fixée à $0.7 * h_{veg}$ en conditions de couverture végétale, et à 0 en conditions de sol nu.

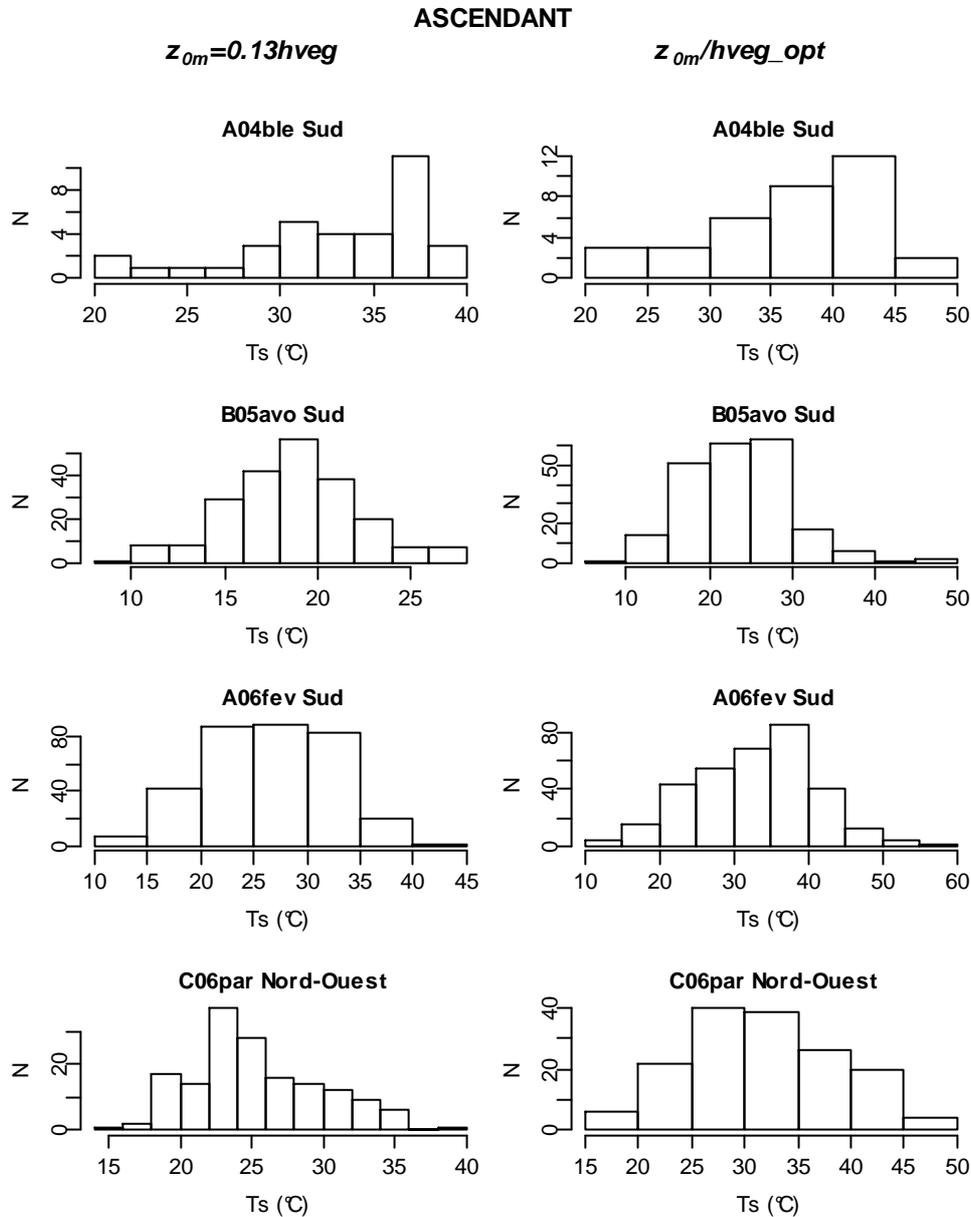


Figure 5.9. Histogrammes des valeurs de température de surface obtenues 1/ en considérant une estimation égale à $1/8^{\text{ème}}$ de la hauteur de la végétation (colonne de gauche) et 2/ utilisant l'optimisation qui minimise les différences entre rayonnement net mesuré et calculé (colonne de droite). Résultats correspondant à des conditions de couverture végétale et d'écoulement ascendant. Les lignes correspondent aux jeux de données considérés selon les parcelles (A, B, C) et les années (2004, 2005, 2006).

Les résultats de cette optimisation sont illustrés dans le Tableau 5.6. Notons que dans le cas particulier du jeu de données C06par, la valeur initiale du rapport z_{om}/h_{veg} fut changée pour obtenir de meilleurs résultats. Une explication possible est la considération de mesures acquises en conditions d'hétérogénéités spatiales (parcelle de parcours en pâture). En termes

de résultats, nous observons que les valeurs obtenues pour le rapport z_{0m}/h_{veg} diffèrent significativement selon les conditions d'écoulement ascendant ou descendant. Les différences sont d'un ordre 10 au minimum, et des valeurs plus importantes sont systématiquement obtenues en conditions d'écoulement descendant. Sachant qu'une valeur de 0.13 est couramment proposée dans la littérature pour le rapport z_{0m}/h_{veg} , il est intéressant de constater que les valeurs obtenues par optimisation sont inférieures à 0.13 en conditions de vent ascendant et supérieures en conditions de vent descendant (à l'exception du jeu de données A06sol). De même, il est intéressant de constater qu'en conditions d'écoulement descendant, la rugosité mécanique z_{0m} peut être supérieure à la hauteur de la végétation, alors qu'elle est théoriquement inférieure pour un couvert végétal aérodynamiquement poreux (culture de blé). Une explication possible est la dilatation des lignes de courant en conditions de vent ascendant (Figure 4.1 du Chapitre 4). L'obtention de telles valeurs et des variabilités associées pose cependant la question de la pertinence des formulations utilisées, sachant que ces formulations furent proposées pour des surfaces planes (absence de relief). Notons toutefois que les valeurs obtenues pour la température de surface et la résistance aérodynamique sont cohérentes, comme le montre les histogrammes de la Figure 5.8 qui illustrent les valeurs obtenues pour la résistance aérodynamique en conditions de vent descendant et de sol nu, et ceux de la Figure 5.9 qui illustrent les valeurs obtenues pour la température de surface en conditions de vent ascendant et de couverture végétale.

La Figure 5.9 illustre les résultats obtenus pour la reconstitution de la température par inversion des mesures de flux de chaleur sensible, après optimisation sur la rugosité mécanique pour minimiser les différences entre les reconstitutions et les mesures de rayonnement net (colonne de droite). Sont aussi indiquées sur cette figure les résultats obtenus pour la reconstitution de la température par inversion des mesures de flux de chaleur sensible, en considérant une valeur nominale pour la rugosité mécanique (colonne de gauche). Il est intéressant de constater que la comparaison entre les deux cas d'inversion met en exergue les différences obtenues sur les températures, différences comprises entre 5 et 10° selon les valeurs médianes. Ceci est cohérent avec les conditions considérées, à savoir des conditions de couverture végétale et d'écoulement ascendant. L'obtention de ces températures, par optimisation sur deux types de mesures indépendants (pyrradiomètre d'une part et covariances turbulentes d'autres part), amène à suggérer que les variations de rayonnement net selon l'écoulement sont induites par des variations de température, en réponse à des

changements de magnitude pour les transferts convectifs (ici chaleur sensible). Ces explications demandent bien sûr confirmation à partir de mesures radio thermométriques.

Les résultats d'optimisation reportés ci-dessus sont bien évidemment à considérer avec précaution, au regard des outils (formulations et valeurs des paramètres) utilisés pour les obtenir. Ces outils sont en effet conçus et calibrés pour des écoulements horizontaux, alors que nous les appliquons en conditions de relief pour lesquelles la turbulence est différente. Une amélioration future consistera à utiliser la formulation proposée pour la résistance aérodynamique par Rana et al. (2007), qui pondère la fonction de stabilité selon l'inclinaison topographique. Cependant, l'ensemble des observations et résultats converge vers une même indication : les régimes d'écoulement ascendant et descendant semblent induire des états thermiques et donc des bilans radiatifs (via la température de surface) différents.

1.2.3. Conclusion quant à l'effet de la topographie sur le rayonnement net

Au regard des résultats précédents qui mettent en exergue l'influence des régimes d'écoulement ascendant ou descendant sur les flux convectifs, la présente section se propose d'évaluer de possibles effets du relief sur le bilan radiatif. Dans un premier temps, l'analyse des mesures en conditions de sol nu montre une variation prononcée du rayonnement net selon les conditions d'écoulement ascendant ou descendant, que ce soit à l'échelle décadaire quand la direction du vent change d'un jour à un autre, ou à l'échelle horaire quand la direction du vent change aux alentours du midi solaire. Par suite, cette tendance est confirmée à partir de moyennes sur les valeurs diurnes, quelles que soient les conditions d'occupation du sol, les parcelles ou les années de mesures.

Pour expliquer ces variations, nous analysons d'abord les variables météorologiques qui pilotent trois des quatre composantes du rayonnement net, à savoir le rayonnement solaire incident / réfléchi et le rayonnement thermique incident (atmosphérique). Les analyses, basées sur des intercomparaisons entre reconstitutions FAO-56 et mesures, montrent que les variations du bilan radiatif selon les conditions d'écoulement ascendant et descendant ne peuvent s'expliquer à partir des variables météorologiques. En effet, les valeurs de rayonnement net reconstituées à partir de ces variables uniquement sont très différentes de celles mesurées sur le terrain, en particulier en conditions de vent ascendant.

Nous investiguons dans un second temps une possible variation de la température de surface avec le régime d'écoulement, sachant que la température pilote la quatrième composante du bilan radiatif. Ne disposant pas de mesure de température, cette dernière est reconstituée à partir des mesures de flux de chaleur sensible collectées via la méthode des covariances turbulentes, ce qui nécessite de renseigner la rugosité mécanique. Une première tentative, basée sur l'utilisation de valeurs nominales proposées dans la littérature pour des écoulements horizontaux, ne permet pas de reconstituer correctement les valeurs mesurées. Une seconde tentative, basée sur l'ajustement de la rugosité par optimisation, permet de reconstituer des valeurs de rayonnement net proches de celles mesurées, que ce soit en conditions d'écoulement ascendant ou descendant. Nous notons alors des différences importantes (d'un ordre 10) entre les rugosités mécaniques ajustées, selon que l'écoulement soit ascendant ou descendant. Conséquemment, les températures reconstituées via l'optimisation sont nettement supérieures à celle obtenues en considérant les valeurs nominales proposées pour la rugosité.

Ceci indique que les variations du bilan radiatif selon les régimes d'écoulement peuvent résulter de variations de la température de surface. Les résultats présentés ici sont en effet obtenus à partir de mesures indépendantes que sont le rayonnement net par pyrromètre et la chaleur sensible par covariances turbulentes. Cependant, ces résultats doivent être considérés avec précaution. D'une part, le formalisme utilisé pour reconstituer la température de surface est conçu pour des écoulements horizontaux en l'absence de relief. D'autre part, le ratio entre rugosité mécanique et thermique est posé à une valeur de 10%, ce qui correspond à des conditions spécifiques en termes de statut hydrique, d'écoulement, de structuration végétale ... De futures investigations sont nécessaires, basées sur des mesures de température.

1.3. Effet de la topographie sur le flux de chaleur dans le sol

Après s'être intéressés aux flux convectifs (§ 1.1) et au bilan radiatif (§ 1.2), nous investiguons ici la dernière composante du bilan d'énergie (sous l'hypothèse que le terme de stockage est négligeable), à savoir le flux de chaleur dans le sol. Selon la convention que nous avons retenue pour le bilan d'énergie, le flux de chaleur dans le sol est positif lorsqu'il est orienté de la surface vers les couches plus profondes du sol, et négatif dans le cas contraire.

Ce terme du bilan d'énergie peut être négligé sous certaines conditions, telles que lors d'analyses intégrées à l'échelle journalière ou bien dans le cas d'une couverture végétale très dense. Il peut néanmoins être important à l'échelle horaire et sous conditions de sol nu.

Les mesures du flux de chaleur dans le sol se font avec des plaquettes installées à une profondeur de quelques centimètres. Cependant, la grandeur qui intervient dans le bilan d'énergie est le flux de chaleur à quelques millimètres sous la surface. Les données sont donc corrigées pour tenir compte de l'énergie stockée entre la surface et la profondeur de mesure, et ce à partir de mesures d'humidité en surface et de température de sol à des profondeurs intermédiaires. La prise en compte de cette correction est cependant très lourde à mettre en œuvre d'un point de vue expérimental, alors que le gain de précision n'est pas toujours significatif. En conséquence, les mesures de flux de chaleur dans le sol collectées à une profondeur de quelques centimètres ne sont pas corrigées de ce terme de stockage. L'erreur résultante est supposée être importante en conditions de sol très secs, pour une précision de 40 W.m^{-2} sur les estimations si cette correction est incluse (Stannard et al., 1994).

L'objectif de cette partie est d'analyser les mesures de flux de chaleur dans le sol collectées durant l'expérimentation, et ce en considérant des échelles de temps variables. Sachant que le rayonnement net R_n dépend du régime d'écoulement (vent ascendant ou descendant), et que le flux de chaleur dans le sol G représente une proportion du rayonnement net, cette partie vise aussi à évaluer une influence possible de l'écoulement sur le flux de chaleur dans le sol. Les travaux sont scindés en trois sous parties : 1/ une analyse de G et du rapport G / R_n qui permet de discuter la consistance des mesures acquises, 2/ une comparaison de G et G / R_n selon le régime d'écoulement ascendant ou descendant, et 3/ une évaluation de l'erreur sur la mesure de G à l'échelle de la demi-heure et à l'échelle journalière.

1.3.1. Critique des mesures du flux de chaleur dans le sol

Dans un premier temps, nous analysons l'évolution temporelle de G et les répétitions spatiales de la mesure au sein d'une même parcelle. Nous étudions dans un second temps le rapport G / R_n pour les différents jeux de données collectés sur les parcelles entre 2004 et 2006, qui correspondent à différentes conditions d'occupation du sol.

1.3.1.1. Flux de chaleur dans le sol mesuré durant l'expérimentation

Pour chaque dispositif de mesures de flux radiatif et convectif, trois plaquettes de mesure de flux de chaleur dans le sol furent installées. La moyenne de ces trois répétitions est supposée fournir une valeur représentative de G pour la fermeture du bilan d'énergie, les différences entre les répétitions résultant de la variabilité spatiale. Nous proposons ici d'étudier, pour chacune d'entre elles, les variations à l'échelle de la demi-heure puis à l'échelle journalière.

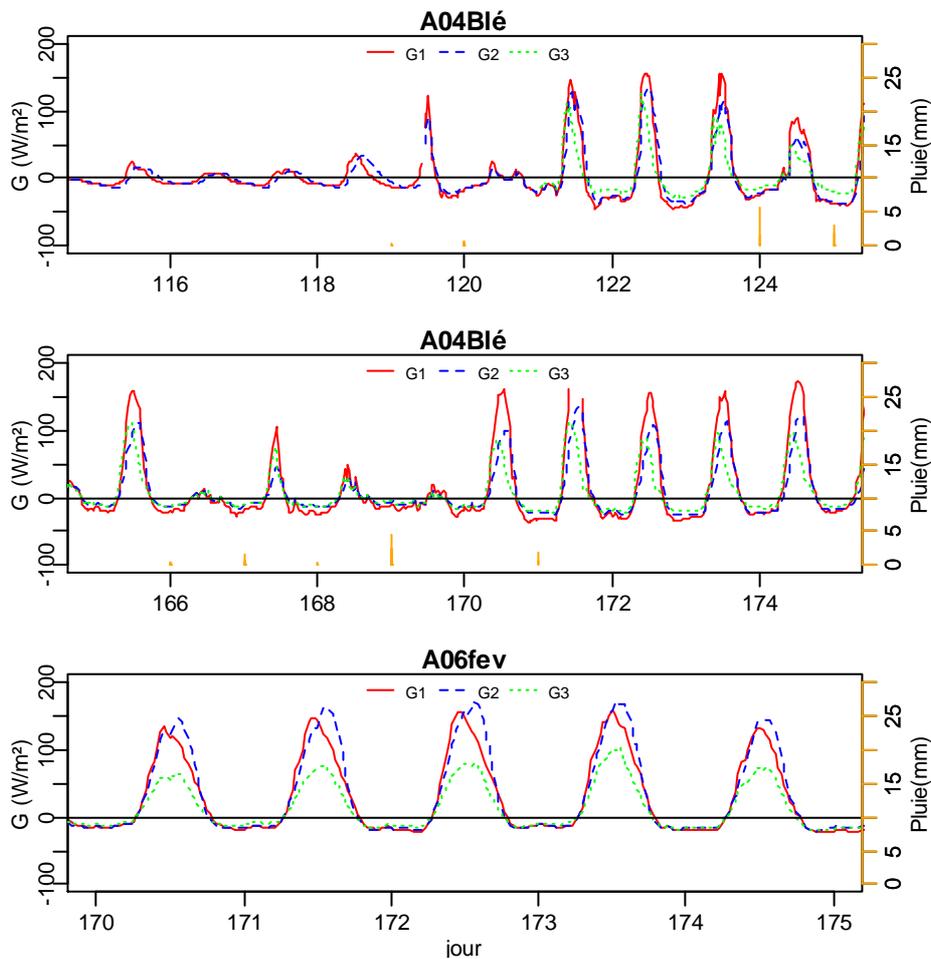


Figure 5.10. Evolution temporelle du flux de chaleur dans le sol G pour les trois plaquettes (G1, G2, G3) localisées sur la parcelle A en 2004 durant le cycle culturel du blé (1^{er} et 2^{ème} graphe) et sur la parcelle A en 2006 durant le cycle culturel de la fève (3^{ème} graphe). Les barres verticales indiquent les précipitations. Le graphe du haut illustre l'influence de la profondeur de mesure, avec des données collectées à deux profondeurs différentes avant et après le jour 119. Le graphe du bas illustre l'influence de la couverture végétale, avec des données collectées sous le rang (G1), sous l'inter rang (G2) et sous le plant (G3).

Les mesures collectées avec un pas de temps de 30 minutes présentent une forme sinusoïdale à l'échelle de la journée, tout comme celles des autres termes du bilan d'énergie (flux radiatif Rn, flux convectifs de chaleur latente H et sensible LE). La forme sinusoïdale montre un

maximum en milieu de journée (réchauffement du sol), et des valeurs négatives au cours de la nuit. Plus les plaquettes de mesure sont positionnées en profondeur, plus l'amplitude de la forme sinusoïdale diminue, et plus le déphasage est important. Ceci est illustré par la Figure 5.10, dont le graphe du haut montre les conséquences d'un changement de profondeur de mesure. Avant (respectivement après) le jour 119, les mesures étaient collectées à une profondeur de 10 cm (respectivement 5 cm). La diminution de la profondeur de mesure se traduit alors par une augmentation importante du flux de chaleur dans le sol (l'absence d'augmentation pour le jour 120 résulte des conditions nuageuses, avec un rayonnement net maximum de 67 W/m^2 en comparaison aux jours 118 et 121 où il atteint 790 et 710 W/m^2 , respectivement). Signalons dans ce contexte que les plaquettes de mesures ont été retrouvées en fin d'expérimentation à des profondeurs différentes de celles auxquelles elles furent initialement installées (entre trois et cinq cm). Cette variation de profondeur est due à plusieurs raisons telles que l'érosion suite aux pluies, les fentes de retraits dans les conditions sèches avec sol nu, ou le développement racinaire.

Sur les différentes expérimentations, les mesures de flux de chaleur dans le sol G collectées selon un pas de temps de 30 minutes montrent des valeurs maximales de 150 W/m^2 pour les jours ensoleillés (valeurs élevées de rayonnement net), et des valeurs minimales nulles ou négatives pour les jours nuageux ou les jours de pluie (jours 168 et 169 pour le jeu de données A04blé sur la Figure 5.10). Pour le jeu de données A06fév, la variation entre les répétitions autour du dispositif de mesure est imputée à l'hétérogénéité spatiale de la couverture végétale. En effet, la culture de fève sur la parcelle A en 2006 était une plantation en rang, et les trois plaquettes de flux furent installées sous le rang, sous l'inter rang et sous le plant. Le capteur G3 installé sous la végétation a enregistré les valeurs les plus faibles (Figure 5.10), et ce même après la récolte à cause d'un effet d'écran induit par les résidus végétaux.

La Figure 5.11 indique, pour les différentes parcelles et années, la moyenne journalière de chacune des trois plaquettes, incluant les conditions de sol nu et de couverture végétale. Ces chroniques temporelles montrent qu'il existe de faibles variations entre les plaquettes, à l'exception de la parcelle A en 2006. Pour cette dernière, nous observons des différences significatives dues à l'occupation du sol (culture en rang), entre G2 sous sol nu et G3 sous sol couvert. Ceci est cohérent avec les résultats obtenus à l'échelle semi horaire et discutés précédemment. Dans le cas des valeurs journalières, les différences dues à l'occupation du sol (de l'ordre de 10 à 15 W/m^2) sont plus importantes que celles engendrées par des variations

de profondeurs (inférieures à 5 W/m^2 entre une profondeur de 5 cm pour G2 et G3 et une profondeur de 3 cm pour G1, en fin d'expérimentation sur la parcelle C en 2006). Pour finir, notons que la valeur journalière de G varie entre -20 et 40 W/m^2 . Ces magnitudes sont faibles en comparaison à celles observées pour les valeurs semi horaires (maximum à 150 W/m^2), ce qui est cohérent avec l'hypothèse d'une valeur journalière négligeable dans le bilan d'énergie (Cellier et al., 1996). Les valeurs plus faibles observées pour la parcelle B en 2005 sont expliquées par les conditions expérimentales : la première partie des mesures fut collectée en hiver, et la seconde partie fut collectée en conditions de couverture végétale dense.

1.3.1.2. Rapport G / R_n

Le rapport G / R_n est souvent utilisé dans la littérature, car il a la propriété de rester constant avec les propriétés thermo-hydriques du sol, toutes conditions de couverture végétale égales par ailleurs. Il est donc utilisé pour quantifier grossièrement le flux G en l'absence de mesures, ou pour remplacer des mesures manquantes. Suite aux analyses de G présentées ci-dessus, nous étudions ici le rapport G / R_n en considérant des valeurs semi horaires et journalières pour G et R_n .

La Figure 5.12 illustre des chroniques de cinq jours pour les valeurs semi-horaires, représentatives des conditions expérimentales selon les parcelles, les années et les conditions d'occupation du sol (sol nu et couverture végétale). Les données de jour et de nuit sont différenciées. Cette figure montre que le rapport G / R_n diffère légèrement d'une parcelle à une autre. A l'exception du jeu de données A04sol pour lequel la couverture de chaume induit un effet d'écran, G / R_n diffère aussi entre le jour et la nuit. Il est généralement plus élevé la nuit, pouvant atteindre la valeur de 40 %, en lien avec la faible magnitude des flux de chaleur latente et sensible. Il est généralement égal (la nuit) ou supérieur (le jour) à 10 %, cette valeur nominale étant souvent utilisée dans la littérature (Allen et al., 1998 ; Cellier et al., 1996), bien que des valeurs entre 10 et 50 % soient proposées (Fuchs et Hadas, 1972 ; Idso et al 1975 ; Kustas et al., 1994). Le cycle diurne de G / R_n est caractérisé par une augmentation le matin et une diminution l'après-midi, à l'exception du jeu de données C06 pour lequel les mesures plus profondes peuvent induire un comportement différent. Nous observons cependant une relative stabilité de G / R_n en milieu de journée, en particulier entre 10 et 15 h.

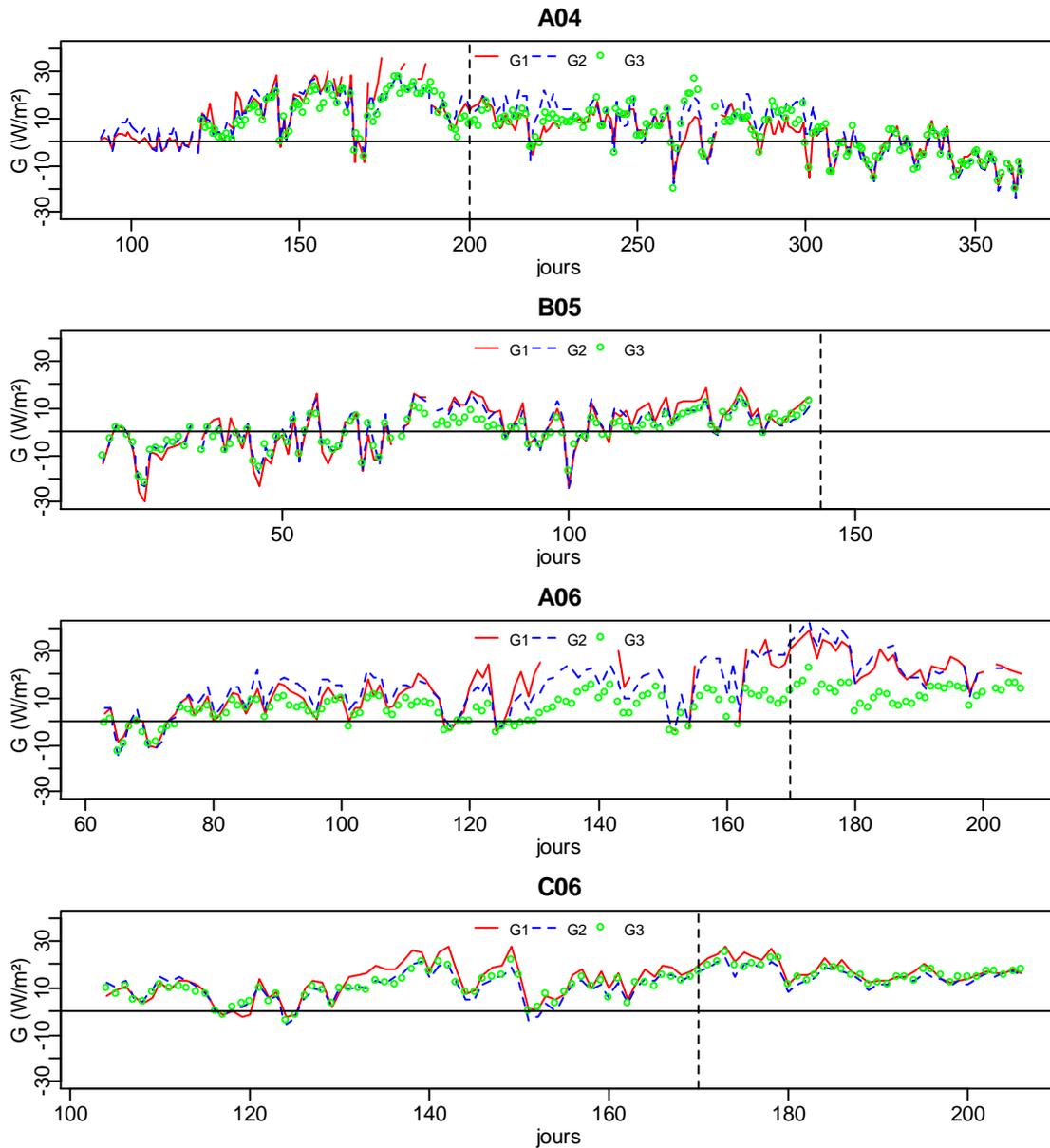


Figure 5.11. Évolution temporelle de la valeur journalière du flux de chaleur G , pour les différentes parcelles (A, B, C) et les différentes années (2004, 2005, 2006). Sont discriminées pour chaque parcelle et chaque année les trois plaquettes de flux (G1, G2, G3). La ligne verticale en discontinu indique la date de récolte ou de sol nu.

La relative stabilité du rapport G/Rn nous amène à considérer, pour l'analyse des valeurs journalières, deux valeurs moyennes de G et Rn qui incluent 1/ soit l'ensemble des valeurs diurnes et nocturnes (noté $G/Rn-JN$), 2/ soit les valeurs diurnes entre 10 et 15 h uniquement (noté $G/Rn-1015$). La comparaison des résultats pour les deux types de valeurs journalières est illustrée par la Figure 5.13. Le rapport $G/Rn-JN$ est plus variable que $G/Rn-1015$, particulièrement pour les périodes pluvieuses pour lesquelles les magnitudes de G et Rn sont plus faibles. Toutefois, ces deux rapports ne diffèrent pas significativement. Que ce soit sous sa forme $G/Rn-JN$ ou $G/Rn-1015$, la valeur journalière de G/Rn augmente en conditions

de sol nu, ce qui résulte d'un effet d'écran par la végétation. L'absence d'augmentation juste après la récolte de blé (jeu de données A04) résulte d'un effet d'écran par le chaume, et cette augmentation intervient plus tardivement après dégradation du chaume, avec des valeurs de G/Rn journalier autour de 30 %. La constance du rapport G/Rn pour le jeu de données A06 s'explique par les conditions d'occupation du sol, avec une végétation peu couvrante durant le cycle cultural suivie de résidus après récolte.

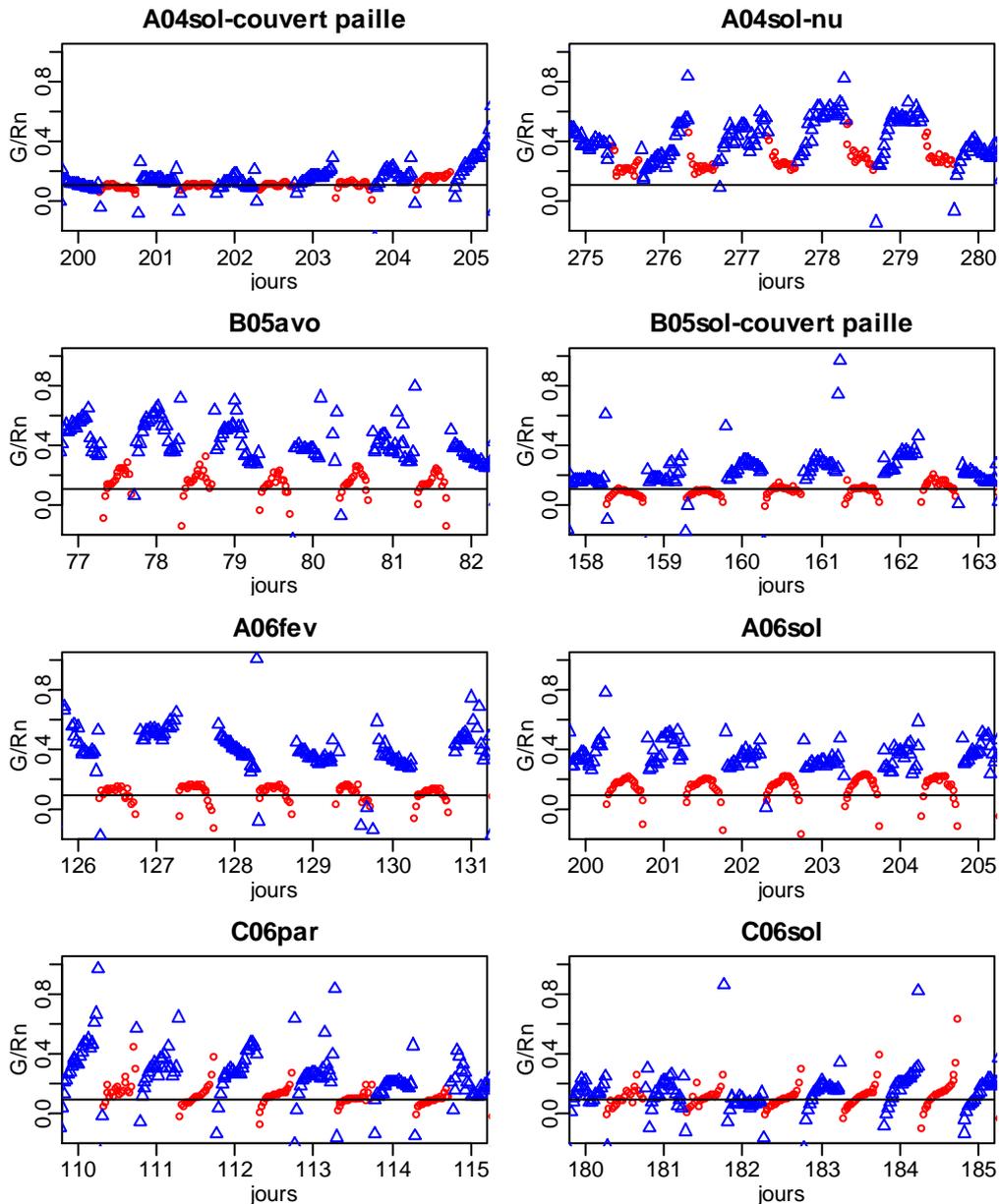


Figure 5.12. Chroniques temporelles pour le rapport G/Rn en considérant les mesures semi horaires, pour cinq jours représentatifs de chacune des parcelles et des occupations du sol correspondantes (sol nu ou bien couverture végétale correspondant à des parcours ou à des cultures de blé, d'avoine, de fève). Les cercles et les triangles représentent les données diurnes et nocturnes, respectivement. La ligne horizontale indique le rapport $G/Rn = 0.1$.

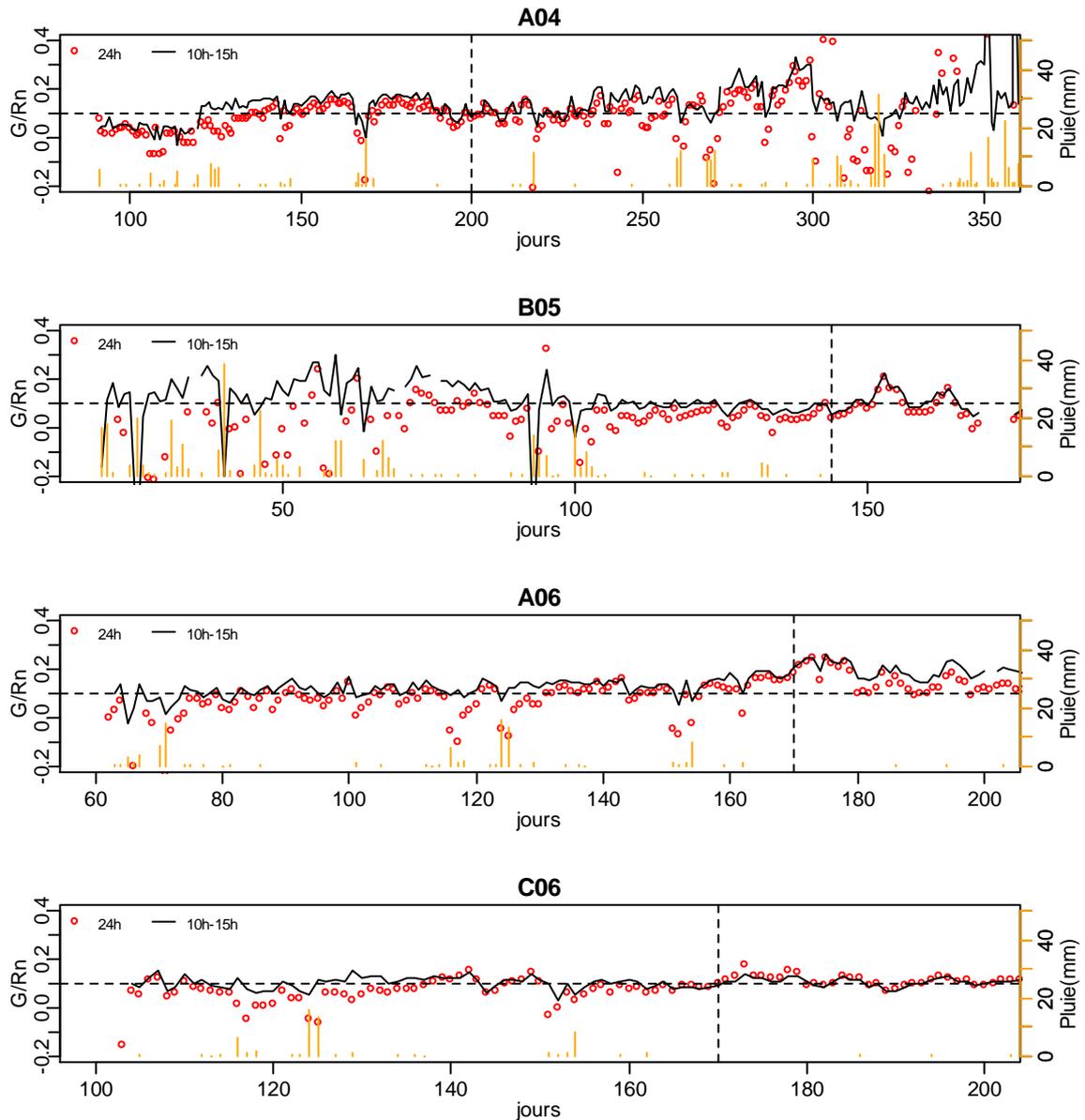


Figure 5.13. Chroniques temporelles pour le rapport G/R_n en considérant les moyennes journalières calculées à partir de 1/ l'ensemble des valeurs diurnes et nocturnes et 2/ les valeurs diurnes entre 10 et 15 h uniquement. Chaque graphe correspond à un jeu de données selon la parcelle (A, B, C) et l'année de mesure (2004, 2005, 2006), en incluant les différentes conditions d'occupation du sol (sol nu ou bien couverture végétale correspondant à des parcours ou à des cultures de blé, d'avoine, de fève). La ligne discontinue verticale correspond à la récolte qui est suivie de chaume (A04 et B05) ou de sol nu (A06, C06). La pluie journalière est représentée par des lignes verticales continues.

De cette analyse des mesures de flux de chaleur dans le sol G et du rapport G/R_n où R_n est le rayonnement net, nous pouvons conclure que ces mesures sont cohérentes, et que la considération d'une valeur moyenne sur les trois répétitions minimise le problème d'hétérogénéité induit par des déplacements de plaquettes de mesures ou bien des variations sur les états de surface. A l'échelle journalière, le rapport G/R_n obtenu en moyennant les données collectées entre 10h et 15h est très représentatif de celui obtenu en intégrant

l'ensemble des données diurnes et nocturnes, tout en ayant l'avantage de minimiser les bruits. L'ensemble de ces résultats est valide pour le panel de conditions environnementales rencontrées durant l'expérimentation. Ce panel inclut des situations où le flux de chaleur dans le sol intervient à minima (G / R_n autour de 5 %) ou plus (G / R_n entre 20 et 30 %) dans le bilan d'énergie, sachant que les mesures effectuées à 5 cm de profondeur et qui ne sont pas corrigées des termes de stockage sur les profondeurs intermédiaires ont tendance à sous estimer le flux de chaleur dans le sol.

1.3.2. Comparaison selon l'écoulement du vent

Sachant que le rayonnement net R_n dépend du régime d'écoulement (vent ascendant ou descendant), et que le flux de chaleur sensible G représente une proportion du rayonnement net, cette section vise à évaluer une influence possible de l'écoulement sur le flux de chaleur dans le sol. Pour cela, nous analysons le flux de chaleur dans le sol G ainsi que le rapport G / R_n selon les conditions d'écoulement descendant et ascendant.

1.3.2.1. Evolution de G selon différentes directions du vent

Afin de mettre en exergue de possibles variations du flux de chaleur dans le sol G avec le régime d'écoulement, nous avons calculé un profil journalier moyen pour G (pas de temps de 30 minutes) en distinguant les directions de vent Nord-Ouest et Sud (Figure 5.14). Les résultats sont présentés sans distinction pour les conditions d'occupation du sol (sol nu ou couverture végétale), car cette distinction ne change aucunement les tendances observées en termes de variations selon la direction du vent. Nous remarquons que G est systématiquement plus élevé lorsque la direction du vent est Sud, à l'exception du jeu de données A04 où la différence est très faible. Pour la parcelle C, nous observons un flux de chaleur dans le sol G plus important en conditions de vent descendant, ce qui est cohérent avec des valeurs de rayonnement net R_n plus importantes dans ces conditions (en supposant que G soit une fraction constante de R_n). Cependant, les résultats obtenus sur les parcelles A et B n'abondent pas dans ce sens, avec un G plus important en conditions d'écoulement ascendant. Par ailleurs, ces résultats obtenus indiquent des différences sur G comprises entre 5 et 15 W/m², ce qui est inférieur à l'erreur sur les mesures, de l'ordre de 40 à 50 W/m².

1.3.2.2. Evolution de G/R_n selon différentes directions du vent

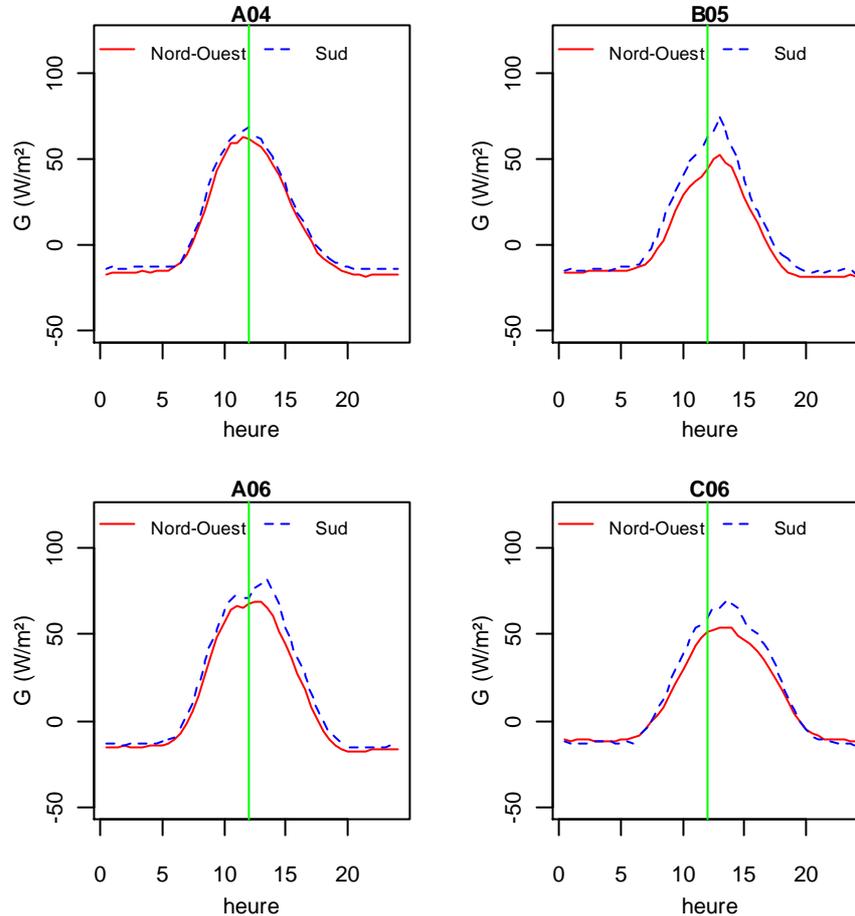


Figure 5.14. Profil journalier moyen pour le flux de chaleur dans le sol G , en distinguant les conditions d'écoulement ascendant (vent de Sud sur les parcelles A et B, vent de Nord-Ouest sur la parcelle C) et descendant (vent de Nord-Ouest sur les parcelles A et B, vent de Sud sur la parcelle C). Les quatre graphes correspondent aux jeux de données collectés sur les différentes parcelles (A, B, C) durant les différentes années de l'expérimentation (2004, 2005, 2006). La ligne verticale représente le midi solaire.

Nous étudions maintenant le rapport G/R_n , à partir d'un profil journalier moyen (pas de temps de 30 minutes) selon les parcelles et les années d'expérimentation, en distinguant les directions de vent de Nord-Ouest et de Sud (Figure 5.15). Les résultats sont présentés sans distinguer les conditions d'occupation du sol (sol nu ou couverture végétale), car cette distinction ne change pas les tendances observées en termes de variations selon la direction du vent. Le rapport G/R_n est légèrement plus important en conditions de vent de sud sur les parcelles A et B (écoulement ascendant), mais qu'il ne varie pas selon les régimes de vent de Nord-Ouest ou de Sud pour la parcelle C. Par ailleurs, les gammes de variation de ce rapport

sont de l'ordre de 5 %, ce qui est nettement inférieur à l'incertitude sur le rapport G/Rn . Cette dernière résulte en effet de la combinaison des erreurs sur les mesures de rayonnement net et de flux de chaleur dans le sol. A titre d'indication, l'erreur sur G est de 40 W/m^2 environ, pour des valeurs de 150 W/m^2 au maximum, ce qui correspond à une erreur relative de 30 % au minimum.

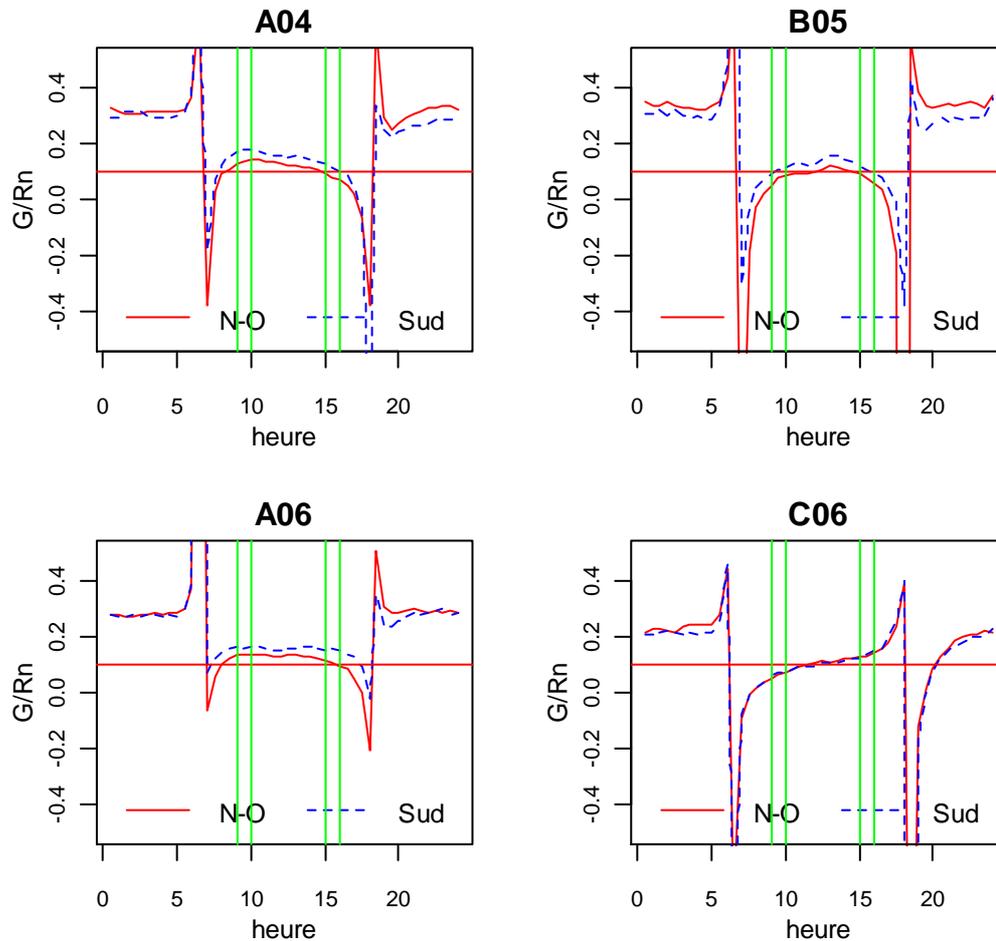


Figure 5.15. Profil journalier moyen pour le rapport G/Rn , en distinguant les conditions d'écoulement ascendant (vent de Sud sur les parcelles A et B, vent de Nord-Ouest sur la parcelle C) et descendant (vent de Nord-Ouest sur les parcelles A et B, vent de Sud sur la parcelle C). Les quatre graphes correspondent aux jeux de données collectés sur les différentes parcelles (A, B, C) durant les différentes années de l'expérimentation (2004, 2005, 2006). La ligne horizontale représente la fraction 10%.

Pour finir, nous comparons le rapport G/Rn sur la parcelle A avec le rapport G/Rn sur la parcelle C, et ce en considérant les données collectées simultanément sur les parcelles A et C en 2006. La comparaison est effectuée via le rapport entre G/Rn sur la parcelle A et G/Rn sur la parcelle C, et ce en considérant la chronique temporelle de ce rapport (Figure 5.16). Les résultats sont présentés en séparant les directions de vent de Nord-Ouest et de Sud. Par contre, ils sont présentés sans distinction pour les conditions d'occupation du sol (sol nu ou couverture végétale), car cette distinction ne change pas les tendances observées en termes de

variations selon la direction du vent. Afin de minimiser les bruits sur les mesures, les valeurs journalières sont établies en considérant les données collectées entre 10 et 15h. L'évolution du rapport considéré indique un accroissement tout au long de la période de mesure, que ce soit en conditions de vent de Nord-Ouest ou de Sud. Les raisons possibles de cette tendance sont multiples, que ce soit la profondeur des plaquettes de mesure, l'humidité du sol, ou la densité racinaire. Ainsi les fortes précipitations autour du jour 125 induisent-elles des variations d'humidité, et donc une diminution du rapport G / R_n de la parcelle A par rapport à celui de la parcelle C. Par ailleurs, il n'apparaît aucune tendance significative selon les régimes d'écoulement ascendant ou descendant, les différences observées étant inférieures aux erreurs d'estimation.

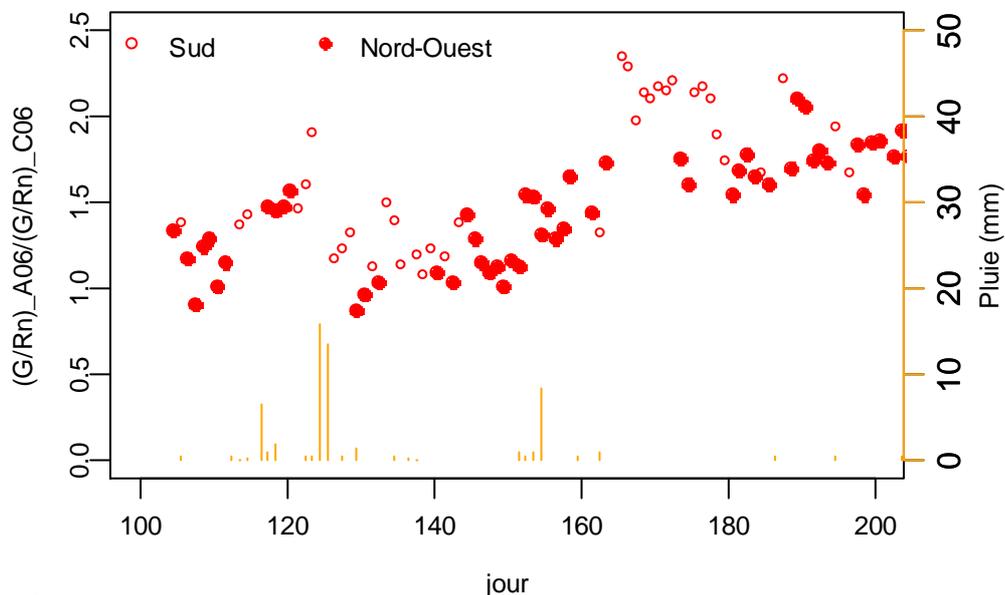


Figure 5.16. Évolution temporelle du rapport entre G / R_n sur la parcelle A et G / R_n sur la parcelle C, en considérant les données collectées simultanément sur les deux parcelles durant l'année 2006. Afin de minimiser les bruits sur les mesures, les valeurs journalières sont établies en considérant les données collectées entre 10 et 15h. Les valeurs sont indiquées en distinguant les conditions de vent de Nord-Ouest et Sud. Les précipitations journalières sont indiquées avec les lignes verticales.

1.3.3. Conclusion quant à l'effet du relief sur le flux de chaleur dans le sol

Cette partie avait pour objectif d'analyser les mesures de flux de chaleur dans le sol, et d'évaluer un effet possible des régimes d'écoulement ascendant ou descendant.

Dans un premier temps, l'analyse des mesures a montré leur sensibilité aux conditions expérimentales, que ce soit en termes de profondeur de mesure ou de localisation dans la parcelle selon la couverture végétale. Dans ce cas, nous observons une sensibilité plus forte

aux conditions de couverture végétale qu'à la profondeur de mesure. Ce résultat souligne l'importance d'une répétition des mesures pour obtenir autant que possible une valeur représentative. Les valeurs semi horaires obtenues ont une dynamique comprise entre 0 et 150 W/m², et les valeurs journalières entre -20 et 40 W/m².

Dans un second temps, nous avons analysé le rapport G / R_n . Ce dernier est compris dans des gammes de valeur de 10 à 30 %, ce qui est conforme aux valeurs proposées dans la littérature. Il est plus élevé en conditions de sol nu sec, et moindre en conditions de couverture végétale à cause de l'effet d'écran par la végétation. Il est relativement stable sur l'intervalle [10 -15] h, et fournit des valeurs journalières similaires à celles obtenues en considérant l'ensemble des données diurnes et nocturnes. Ceci nous amène à recommander l'utilisation des mesures collectées sur cet intervalle pour estimer des moyennes journalières.

Dans un troisième temps, nous avons analysé le comportement de G et de G / R_n selon les régimes d'écoulement ascendant ou descendant. Que ce soit pour le flux de chaleur dans le sol G lui-même, ou pour le rapport G / R_n qui permet de normaliser l'effet du rayonnement net R_n , nous n'avons pas observé de tendance particulière selon les conditions d'écoulement. En particulier, les variations observées selon les régimes d'écoulement sont inférieures à la précision des mesures. De même, les variations inter parcellaires semblent principalement pilotées par les conditions d'humidité. En définitive, les résultats obtenus ne permettent pas de conclure que le flux de chaleur dans le sol soit influencé par les régimes d'écoulement, contrairement aux autres termes du bilan d'énergie (rayonnement net R_n , flux de chaleur sensible H et latente LE). Cette conclusion n'est cependant pas surprenante. Le flux de chaleur dans le sol est en effet principalement fonction du gradient de température entre la surface et la subsurface, et des propriétés thermo-hydriques en subsurface.

1.4. Influence de la topographie sur la fermeture du bilan d'énergie

La fermeture du bilan d'énergie est un indicateur supplémentaire quant à la qualité des données collectées, bien que son utilisation en conditions de relief soit un sujet ouvert à discussion (Lee et al., 2004). Après avoir analysé les différents termes du bilan d'énergie (H et LE , R_n , G) dans les sections précédentes (§ 1.1, 1.2, 1.3), nous nous intéressons ici à la

fermeture (effective ou non) du bilan d'énergie. Plus particulièrement, nous étudions cette fermeture selon les conditions d'écoulement ascendant et descendant, et selon la considération ou non de la correction rotative planar fit pour les flux convectifs H et LE.

L'énergie disponible est définie comme l'énergie dédiée aux flux convectifs, et peut s'exprimer sous deux formes qui sont 1/ la différence entre le rayonnement net et le flux de chaleur dans le sol ($R_n - G$), et 2/ la somme des flux convectifs pour la chaleur sensible et latente ($H + LE$). La fermeture du bilan d'énergie est caractérisée ici par la comparaison des deux expressions de l'énergie disponible. Les jeux de données considérés sont réduits en comparaison à ceux utilisés jusqu'à présent, parce que le flux de chaleur latente LE ne fut pas systématiquement mesuré selon les parcelles et les années. En revanche, nous disposons de jeux de données sur les parcelles A et C, ce qui permet d'appréhender les conditions d'écoulement ascendant et descendant sur chacune des deux rives du bassin versant. Comme pour les flux turbulents, nous sélectionnons les données diurnes uniquement.

Cette section se divise en trois parties. La première et la seconde s'intéressent à la fermeture du bilan d'énergie en conditions d'écoulement ascendant et descendant, respectivement. Pour chacune de ces deux parties, nous effectuons les comparaisons selon les parcelles, les occupations du sol, ainsi que les différentes corrections des flux turbulents (inclusion ou non de la correction rotative planar fit). La troisième partie est une conclusion, qui discute d'une part les résultats obtenus au regard d'éléments bibliographiques, et d'autre part les différences trouvées selon les écoulements et les corrections sur les flux turbulents.

1.4.1. Cas du vent ascendant

La Figure 5.17 illustre les résultats obtenus pour les conditions de vent ascendant (vent de Sud pour la parcelle A et vent de Nord-Ouest pour la parcelle C), en considérant ou non la correction de rotation (planar fit) pour les flux convectifs. Nous observons une linéarité entre les deux expressions de l'énergie disponible ($R_n - G$ et $H + LE$), et une plus grande similitude entre ces deux expressions lorsque les flux convectifs sont corrigés de la rotation (correction planar fit). Pour la Figure 5.17, les conditions d'occupation du sol (sol nu et couverture végétale) ne sont pas séparées car les tendances associées sont similaires, comme le montre le Tableau 5.7. Ce dernier présente les statistiques obtenues lors de l'intercomparaison entre

(Rn-G) et (H+LE), en considérant ou non les corrections instrumentales et la correction de rotation (planar fit) pour les flux convectifs, et en distinguant les conditions d'occupation du sol.

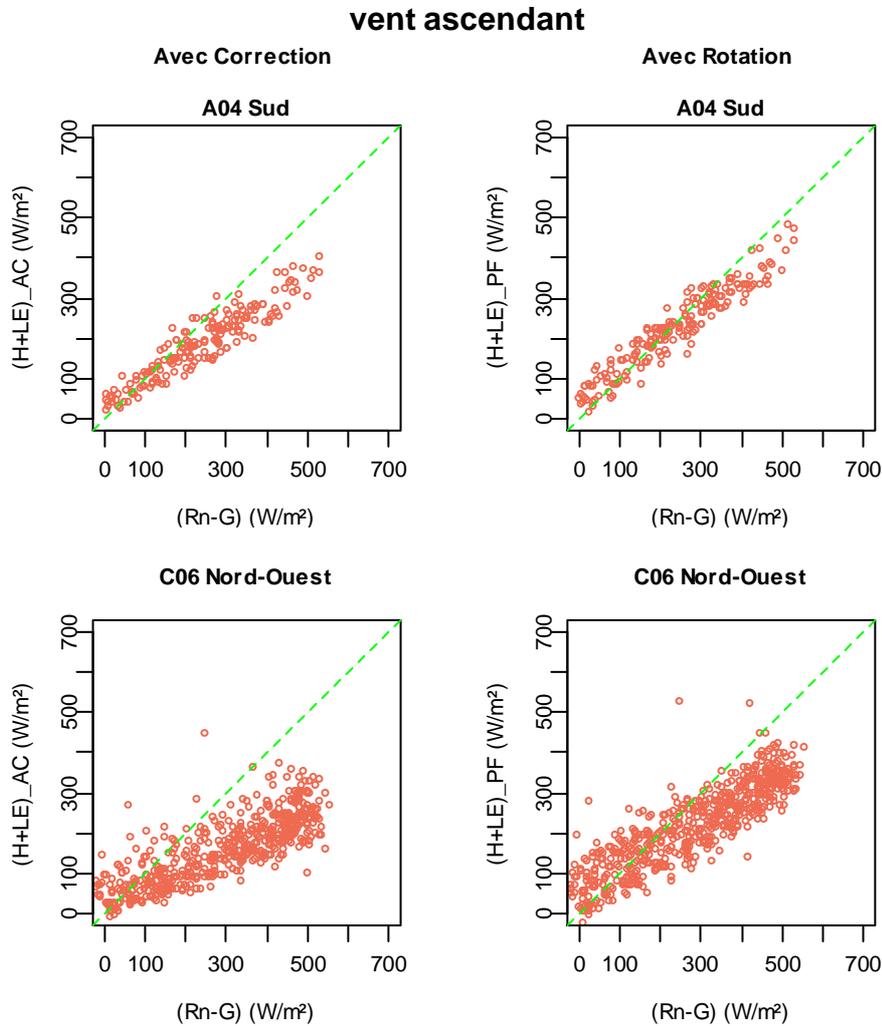


Figure 5.17. Évaluation de la fermeture du bilan d'énergie par comparaison des deux expressions de l'énergie disponible, (Rn-G) et (H+LE). Les mesures sont celles acquises sur la parcelle A en 2004 (1^{ère} ligne) et la parcelle C en 2006 (2^{ème} ligne), en conditions d'écoulement ascendant (vent de Sud pour la parcelle A et vent de Nord-Ouest pour la parcelle C). Sont aussi considérés les flux convectifs sans correction de rotation planar fit (corrections instrumentales uniquement, 1^{ère} colonne), et avec correction planar fit (corrections instrumentales et de rotation, 2^{ème} colonne). La droite 1:1 est représentée en pointillée.

Que ce soit pour les mesures en conditions de couverture végétale (culture de blé) ou celles en conditions de sol nu, les résultats obtenus pour le régime d'écoulement ascendant (vent de sud) sur la parcelle A en 2004 indique que la fermeture du bilan d'énergie est mieux vérifiée en considérant les flux convectifs ayant subi la correction de rotation planar fit. En effet, les statistiques correspondantes indiquent une diminution du RMSE, une augmentation du coefficient de Nash et une valeur qui se rapproche de l'unité pour le ratio du bilan

d'énergie EBR. Des tendances similaires sont observées pour la parcelle C en 2006 en régimes d'écoulement ascendant (vent de Nord-Ouest), que ce soit en conditions de sol nu ou de couverture végétale (parcours en pâture).

Tableau 5.7. Analyse statistique de la relation $(H+LE) = a(Rn-G) + b$, en ne sélectionnant que les conditions de vent ascendant (vent de Sud pour la parcelle A et de Nord-Ouest pour la parcelle C). Sont distingués les résultats obtenus à partir des flux turbulents 1/ sans corrections instrumentales (SC), 2/ avec corrections instrumentales uniquement (AC), et 3/ avec corrections instrumentales et correction de rotation planar fit (PF). Les jeux de données se distinguent selon les années (2004 ou 2006), les parcelles (A ou C), et l'occupation du sol (sol nu ou bien couverture végétale correspondant à du parcours ou du blé). Les composantes du bilan d'énergie Rn, G, H, LE, sont caractérisées par des valeurs moyennes sur 30 minutes. Les variables suivantes sont indiquées : n est le nombre de mesures ; $(Rn-G)_m$ est la moyenne des mesures de $(Rn-G)$ en W/m^2 ; $(H+LE)_m$ est moyenne des mesures de $(H+LE)$ en W/m^2 ; ME est l'écart moyen entre les mesures de $(Rn - G)$ et celles de $(H+LE)$; RMSE est l'écart quadratique moyen entre les mesures de $(Rn-G)$ et celles de $(H+LE)$; Nash est le coefficient Nash ; a et b sont la pente et l'ordonnée à l'origine de la régression linéaire entre $(Rn-G)$ et $(H+LE)$; R^2 est le coefficient de corrélation. EBR (Energy Balance Ratio) est le ratio du bilan d'énergie qui correspond au rapport $\Sigma (H+LE) / \Sigma (Rn-G)$.

	A04blé Sud			A04sol Sud			C06par Nord-Ouest			C06sol Nord-Ouest		
	SC	AC	PF	SC	AC	PF	SC	AC	PF	SC	AC	PF
n	624	34	33	482	149	157	584	310	354	175	214	233
$(Rn - G)_m$	317	315	332	188	225	222	300	288	280	311	300	289
$(H+LE)_m$	201	229	283	138	175	210	142	145	217	159	174	218
ME	-116	-85	-48	-50	-50	-11	-158	-142	-62	-151	-125	-71
RMSE	141	106	70	74	73.9	45	192	176	101	209	168	116
Nash	0.33	0.62	0.81	0.59	0.56	0.85	-0.35	-0.28	0.58	-0.71	-0.01	0.49
a	0.50	0.57	0.62	0.54	0.53	0.62	0.41	0.38	0.54	0.32	0.38	0.51
b	19.28	23.93	44	13.01	27.54	41.25	2.61	21.63	47.67	48.41	48.01	54.84
R^2	0.89	0.95	0.94	0.84	0.82	0.89	0.61	0.63	0.80	0.23	0.63	0.73
EBR	0.63	0.73	0.85	0.74	0.78	0.95	0.47	0.51	0.78	0.51	0.58	0.75

La fermeture du bilan d'énergie est mieux vérifiée pour la parcelle A que pour la parcelle C. Partant du principe que les mesures de Rn et G collectées sur ces deux parcelles ont des qualités similaires, ce résultat s'explique par les caractéristiques de la parcelle C, avec 1/ des régimes d'écoulement plus complexes dus à des conditions topographiques accidentées dans le voisinage de la station de mesure (crêtes en amont et oueds en aval), et 2/ des conditions d'hétérogénéités spatiales résultant du pâturage. Finalement, nous observons des valeurs proches de l'unité pour l'EBR alors que les valeurs de RMSE sont élevées. Ceci s'explique par la dynamique journalière de l'EBR (Figure 5.18), avec une augmentation au long de la journée, des valeurs inférieures (respectivement supérieures) à l'unité durant la matinée (respectivement l'après midi), et donc des valeurs proches de l'unité autour du midi solaire.

Cette dynamique journalière s'explique par les évolutions croisées de R_n et H (Evet, 2002), avec un déphasage entre ces deux termes qui résulte du réchauffement de la surface.

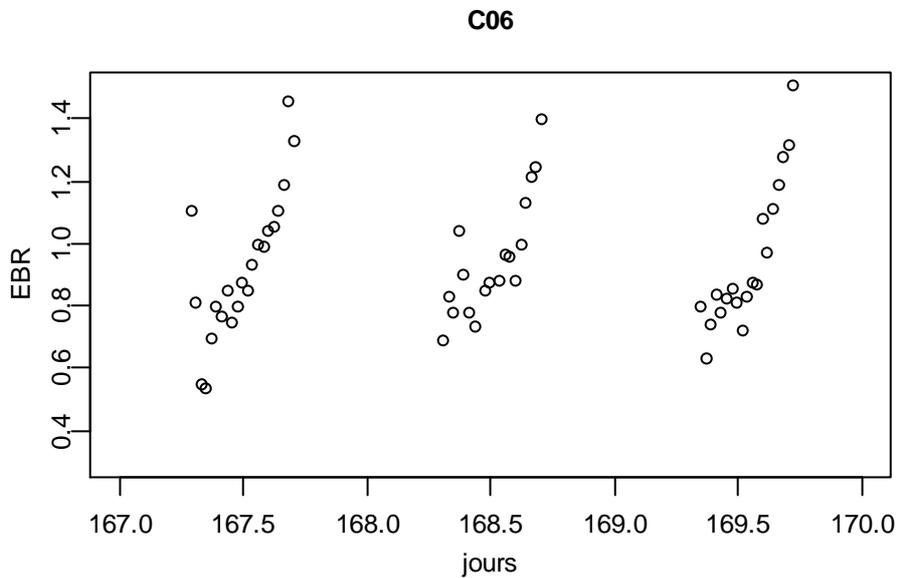


Figure 5.18. Évolution journalière pour le ratio du bilan d'énergie (EBR) avec un pas de temps de 30 minutes, en considérant trois jours de mesures sur la parcelle C en 2006.

1.4.2. Cas du vent descendant

La Figure 5.19 illustre les résultats obtenus pour les conditions de vent ascendant (vent de Nord-Ouest pour la parcelle A et vent de Sud pour la parcelle C), en considérant ou non la correction de rotation (planar fit) pour les flux convectifs. L'analyse des résultats, selon que les flux convectifs soient corrigés ou non de la rotation (correction planar fit), montre que les tendances sont différentes d'une parcelle à une autre. Pour la parcelle A en 2004, la considération des flux ayant subi la correction de rotation planar fit induit une amélioration sur la fermeture du bilan d'énergie. En revanche, la fermeture du bilan d'énergie est meilleure pour la parcelle C en 2006 si l'on considère les flux qui n'ont pas subi la correction planar fit. Quelles que soient les conditions d'occupation du sol (couverture végétale ou sol nu), la correction planar fit induit en effet pour ce jeu de données une diminution significative de la somme $(H+LE)$, et donc une différence plus grande avec le terme (R_n-G) . La Figure 5.19 indique cependant que malgré un accroissement de biais entre les deux expressions de l'énergie disponible, et donc un accroissement de l'erreur systématique, la correction planar fit diminue la dispersion, et donc l'erreur aléatoire.

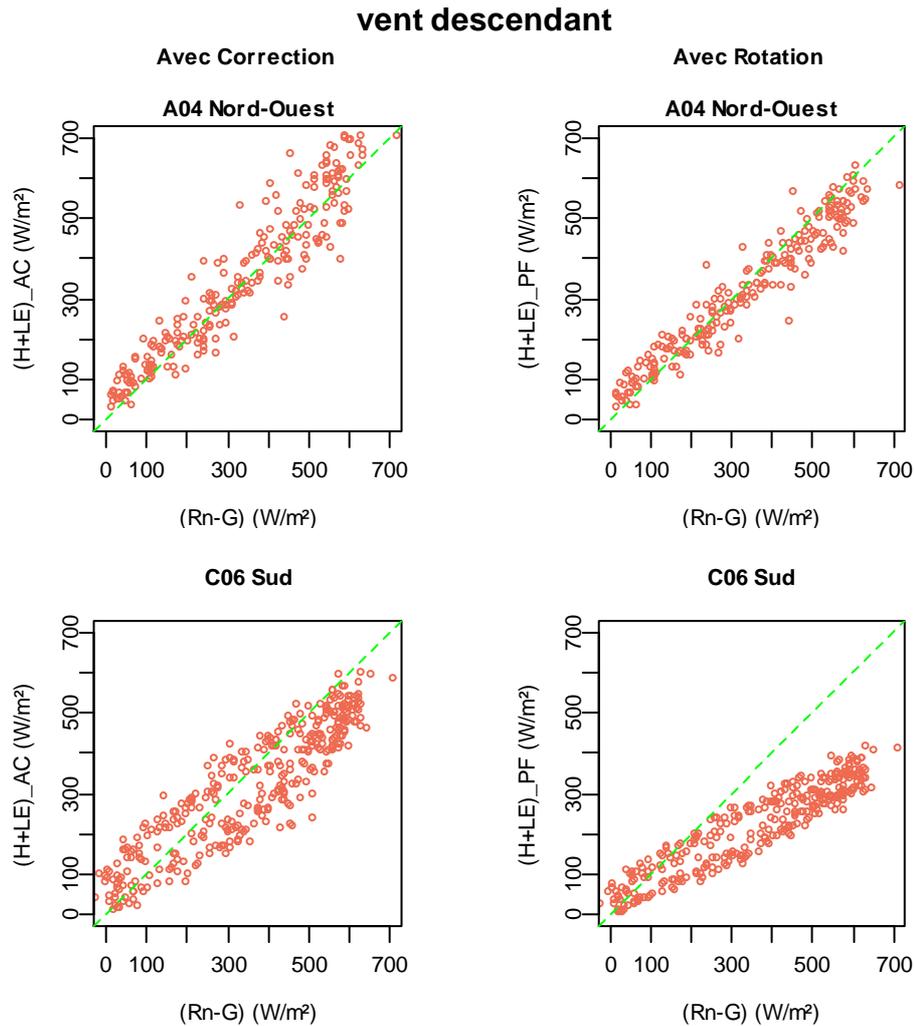


Figure 5.19. Évaluation de la fermeture du bilan d'énergie par comparaison des deux expressions de l'énergie disponible, $(Rn-G)$ et $(H+LE)$. Les mesures sont celles acquises sur la parcelle A en 2004 (1^{ère} ligne) et la parcelle C en 2006 (2^{ème} ligne), en conditions d'écoulement descendant (vent de Nord-Ouest pour la parcelle A et vent de Sud pour la parcelle C). Sont aussi considérés les flux convectifs sans correction de rotation planar fit (corrections instrumentales uniquement, 1^{ère} colonne), et avec correction planar fit (corrections instrumentales et de rotation, 2^{ème} colonne). La droite 1 : 1 est représentée en pointillée.

Ces résultats sont analysés plus en détail dans le Tableau 5.8 qui reporte les statistiques obtenues en distinguant les conditions d'occupation du sol (couverture végétale ou sol nu), mais aussi les différents degrés de correction sur les flux convectifs (label SC : aucune correction, label AC : corrections instrumentales uniquement, label PF : corrections instrumentales et correction pour l'inclinaison de l'écoulement planar fit). L'examen de ce tableau révèle que sur la parcelle A, le bilan d'énergie est bien clôturé quel que soit le degré de correction des flux turbulents utilisés, et ce tant pour le sol nu que pour la couverture végétale. Ce résultat s'explique par une inclinaison de l'écoulement moindre en conditions de vent descendant, et donc de corrections de rotation planar fit faibles. Le ratio de bilan d'énergie EBR reste stable car les corrections instrumentales induisent une augmentation de

LE, et la correction planar fit une légère diminution de H et LE. Sur la parcelle C, il est évident que la rotation planar fit intensifie la non fermeture du bilan d'énergie, comme le montrent les indicateurs statistiques. En effet, les flux turbulents sont significativement inférieurs à l'énergie disponible. Cependant, la clôture du bilan d'énergie est meilleure avec les flux convectifs corrigés instrumentalement qu'avec ceux non corrigés, ce qui laisse à penser que les corrections instrumentales améliorent les flux dans les conditions spécifiques de relief où nous travaillons. Enfin, le bilan d'énergie n'est pas clôturé sur la parcelle C, qui est caractérisée par des régimes d'écoulement plus complexes, en rapport avec des conditions topographiques accidentées dans le voisinage de la station de mesure.

Tableau 5.8. Analyse statistique de la relation $(H+LE) = a (Rn-G) + b$, en ne sélectionnant que les conditions de vent descendant (vent de Nord-Ouest pour la parcelle A et de Sud pour la parcelle C). Sont distingués les résultats obtenus à partir des flux turbulents 1/ sans corrections instrumentales (SC), 2/ avec corrections instrumentales uniquement (AC), et 3/ avec corrections instrumentales et correction de rotation planar fit (PF). Les jeux de données se distinguent selon les années (2004 ou 2006), les parcelles (A ou C), et l'occupation du sol (sol nu ou bien couverture végétale correspondant à du parcours ou du blé). Les composantes du bilan d'énergie Rn, G, H, LE, sont caractérisées par des valeurs moyennes sur 30 minutes. Les variables suivantes sont indiquées : n est le nombre de mesures ; $(Rn-G)_m$ est la moyenne des mesures de $(Rn-G)$ en W/m^2 ; $(H+LE)_m$ est moyenne des mesures de $(H+LE)$ en W/m^2 ; ME est l'écart moyen entre les mesures de $(Rn-G)$ et celles de $(H+LE)$; RMSE est l'écart quadratique moyen entre les mesures de $(Rn-G)$ et celles de $(H+LE)$; Nash est le coefficient Nash ; a et b sont la pente et l'ordonnée à l'origine de la régression linéaire entre $(Rn-G)$ et $(H+LE)$; R^2 est le coefficient de corrélation. EBR (Energy Balance Ratio) est le ratio du bilan d'énergie qui correspond au rapport $\Sigma (H+LE) / \Sigma (Rn-G)$.

	A04blé Nord-Ouest			A04sol Nord-Ouest			C06par Sud			C06sol Sud		
	SC	AC	PF	SC	AC	PF	SC	AC	PF	SC	AC	PF
n	1295	134	131	842	101	99	482	231	229	113	120	90
$(Rn-G)_m$	340	394	401	230	239	241	383	373	379	344	339	333
$(H+LE)_m$	324	425.2	380	211	233	231	307	331	228	299	294	199
ME	-16	31.1	-21.8	-20	-6.3	-10.7	-76	-41.4	-151	-45	-44.4	-133
RMSE	56	70.5	52.1	49	53.1	53.6	143	89.4	182.5	110	103.6	168.3
Nash	0.91	0.86	0.92	0.89	0.85	0.85	0.47	0.79	0.13	0.63	0.66	0.11
a	0.73	0.8	0.72	0.69	0.67	0.64	0.59	0.68	0.47	0.62	0.64	0.45
b	47.57	70.91	54.96	25.52	50.15	54.05	56.56	49	28.33	58.0	48.72	28.72
R^2	0.93	0.89	0.94	0.92	0.87	0.88	0.62	0.86	0.88	0.70	0.73	0.79
EBR	0.95	1.08	0.95	0.91	0.97	0.96	0.80	0.89	0.60	0.87	0.87	0.60

1.4.3. Conclusion quant à l'effet du relief sur la fermeture du bilan d'énergie

La présente section visait à évaluer la fermeture du bilan d'énergie selon les conditions de vent ascendant ou descendant, mais aussi selon les différentes corrections appliquées sur les

flux convectifs. Les résultats montrent que le bilan d'énergie est systématiquement clôturé en conditions de vent ascendant, avec de meilleures fermetures lorsque les flux convectifs sont corrigés pour l'inclinaison de l'écoulement (correction planar fit). En revanche, ce n'est pas le cas en conditions de vent descendant sur l'une des deux parcelles considérées. Une possible explication est l'inadéquation des corrections appliquées dans le cas de figure correspondant, sachant qu'il s'agit d'une parcelle marquée par une topographie accidentée et pour laquelle les écoulements turbulents peuvent donc être plus complexes.

Si l'on compare les résultats obtenus ici avec ceux reportés dans la littérature, il s'avère que les indicateurs statistiques sont dans la gamme de ce qui est couramment proposé. Ainsi les régressions linéaires entre les deux expressions de l'énergie disponible ($R_n - G$) et $(H + LE)$ sont-elles similaires à celles reportées par Wilson et al. (2002), avec des valeurs de pente comprises entre 0.5 et 1. Les seules exceptions à cette similitude sont les mesures de flux convectifs collectées sur la parcelle C, soit non corrigées en régime de vent ascendant, soit corrigées en régime de vent descendant, avec des valeurs de pentes inférieures à 0.5. En ce qui concerne l'ordonnée à l'origine, nous avons des valeurs supérieures à celles reportées par Wilson et al. (2002), ce qui s'explique par la considération des mesures diurnes uniquement. Les différences observées pour la fermeture du bilan d'énergie mettent en exergue une faible sensibilité aux conditions d'occupation du sol, et une forte sensibilité aux conditions d'écoulement ascendant ou descendant. Ce dernier point est en contradiction avec les conclusions de Wilson et al. (2002) et Hammerle et al. (2007) qui n'ont pas observé de différence entre zones avec ou sans relief, les zones de relief considérées étant cependant localisées en régions montagneuses pour majeure partie, ce qui correspond à des conditions très différentes de celles rencontrées dans des régions agricoles avec structurations collinaires.

La comparaison de la clôture du bilan d'énergie selon les conditions d'écoulement ascendant et descendant a montré que la quantité d'énergie disponible sous ses formes $(R_n - G)$ et $(H + LE)$ est nettement inférieure en régime de vent ascendant (de 50 à 100 W/m^2). Les conséquences des corrections appliquées sur les flux convectifs sont aussi différentes selon les conditions d'écoulement. Lorsque le vent est ascendant avec des plans d'écoulement parallèles à la topographie, l'application de la correction de rotation planar fit (conçue pour prendre en compte l'inclinaison de l'écoulement) améliore la fermeture du bilan d'énergie pour les parcelles A et C localisées sur deux des rives du bassin versant, avec une meilleure fermeture pour la parcelle A que pour la parcelle C. Lorsque le vent est descendant et que les

stations sont situées dans des zones de turbulence, les résultats diffèrent selon la parcelle. Sur la parcelle A, la considération ou non des corrections (instrumentale ou planar fit) sur les flux convectifs n'a pas de conséquence sur la fermeture du bilan d'énergie, avec des résultats toujours satisfaisants. Sur la parcelle C, en revanche, l'application de la correction planar fit sur les flux convectifs intensifie considérablement la non fermeture du bilan (de l'ordre de 40 %), en comparaison à l'utilisation des flux non corrigés (non fermeture de l'ordre de 25 %). Ceci peut s'expliquer par la collecte de mesures et l'utilisation de corrections qui ne sont pas adaptées à des situations de topographie accidentées. Tout au long de ce chapitre, la parcelle C correspond en effet à des résultats moins bons, alors qu'elle se caractérise par la présence, dans son voisinage, de crêtes en amont et d'oueds en aval. Ces résultats suggèrent d'utiliser la fermeture du bilan d'énergie non pas comme unique critère de qualité, mais comme faisant partie d'un ensemble d'indicateurs.

Dans l'optique d'appréhender les deux rives du bassin versant, les résultats présentés ici concernent, les parcelles A et C. Notons cependant que les résultats obtenus en 2005 sur la parcelle B (localisée sur la rive nord tout comme la parcelle A, avec une pente topographique proche de l'horizontale), sont aussi intéressants en termes de régime d'écoulement ascendant ou descendant. Conformément aux autres parcelles, l'énergie disponible mesurée ($R_n - G$) est plus importante lorsque le vent est descendant, avec des différences de l'ordre de 20 W/m^2 en conditions de couverture végétale (culture d'avoine), et qui peuvent atteindre 100 W/m^2 en conditions de sol nu. Des variations similaires sont observées sur le terme ($H + LE$), induites par des variations sur H . Enfin, le complémentaire de la fraction évaporative, noté $1 - EF = 1 - LE / (R_n - G) = H / (R_n - G)$ varie significativement selon les vents ascendant ou descendant, mais diffère peu après application des corrections instrumentales et planar fit, et ce conditions de couverture végétale ou de sol nu.

L'ensemble des analyses reportées ici (§ 1.1 à 1.4) a permis de s'assurer de la cohérence des mesures à l'échelle de la parcelle, pour les différentes composantes du bilan d'énergie. Dans la suite de ce chapitre, nous proposons d'évaluer la cohérence des mesures effectuées par scintillométrie à l'échelle d'un ensemble de parcelles.