

Influence du relief sur les mesures de flux à l'échelle d'un ensemble de parcelles

Les mesures scintillométriques discutées lors de la présentation du dispositif expérimental durant l'année 2006 (Chapitre 2) sont analysées ici en tant que mesures intégrées à l'échelle d'un transect. Ce dernier inclut plusieurs parcelles (Chapitre 2), parmi lesquelles 1/ les parcelles D à L, pour lesquelles furent suivies l'humidité du sol et la couverture végétale (indice foliaire et hauteur du couvert), et 2/ les parcelles A et C, sur lesquelles furent collectées les mesures de flux par la méthode des covariances turbulentes, en sus des mesures d'humidité et de couverture végétale. Dans ce qui suit, nous présentons tout d'abord l'estimation des footprints pour les mesures scintillométriques, afin d'évaluer les contributions des parcelles précitées. Nous analysons ensuite les mesures scintillométriques selon l'occupation du sol (sol nu ou couverture végétale). Le fait de considérer plusieurs parcelles induit une variabilité spatiale plus importante en termes d'occupation du sol, incluant sol nu, végétation naturelle et cultivée, végétation active et sénescence, et résidus après récolte. Dans un souci de simplification, les conditions de sol nu correspondent à l'absence de végétation active (sol nu, végétation sénescence, résidus), et les conditions de couverture végétale correspondent à la présence de végétation active uniquement. L'analyse des mesures scintillométriques est effectuée sur plusieurs aspects : la sensibilité des estimations (vitesse de friction, chaleur sensible) aux variables de paramétrage pour le calcul (hauteur de végétation, rugosité mécanique, hauteur de déplacement) ; la comparaison, lorsque possible, entre les estimations de chaleur sensible issues de la scintillométrie et celles issues des mesures par covariances turbulentes ; et la comparaison entre l'énergie disponible et la chaleur sensible, la différence entre les deux correspondant à l'évapotranspiration.

2.1. Footprint des mesures scintillométriques

L'estimation du footprint pour une mesure scintillométrique se fait en intégrant sur le trajet optique le footprint de chaque point de mesure, la pondération de chaque footprint étant donnée par la réponse instrumentale. Pour chaque point de mesure appartenant au trajet optique, le footprint correspondant est déterminé via la méthode utilisée pour les mesures par covariances turbulentes, et basée sur le modèle de Horst et Weil (1994).

Chaque footprint le long du trajet optique est fonction de la hauteur de mesure, et donc de l'altitude relative entre le point du trajet optique correspondant et les sources de surface qui contribuent à la mesure. Au regard de la topographie prononcée, cette altitude relative varie de façon significative à l'intérieur de chaque footprint. Il est alors difficile de prendre en compte ces variations de hauteur de mesure, et ce d'autant plus que la direction du vent influe sur la localisation des sources (la répartition de chaque footprint est en effet variable sur chaque versant, et variable d'un versant à l'autre, avec des vents de Nord-Ouest et de Sud qui induisent des footprints sur les versants nord et sud, respectivement). Une simplification forte consiste à considérer une hauteur de mesure unique à l'intérieur de chaque footprint, égale à celle estimée par MNT sous le point du trajet optique correspondant. Ceci a pour conséquence de surestimer la distance entre le footprint et le point de mesure sur le trajet optique, mais surtout de surestimer la hauteur de mesure pour les sources localisées sur les versants et donc de sous-estimer les contributions des éléments de surface localisés dans le footprint. Au regard de ces éléments, les calculs de footprint proposés ici doivent être considérés comme des indicateurs, et non comme des estimations quantitatives.

Tableau 5.9. Exemple de valeurs retenues pour les paramètres intervenant dans le calcul de footprint des mesures scintillométriques, et obtenues à partir de valeurs représentatives pour les flux turbulents sur les parcelles A et C durant l'année 2006. La rugosité mécanique est notée z_0 , la vitesse de friction u_* , la longueur de Monin-Obukhov L_{MO} , et l'écart type du vent latéral σ_v . Les valeurs pour la longueur de Monin-Obukhov et la vitesse de friction sont des moyennes issues du calcul itératif utilisé pour estimer la chaleur sensible à partir du paramètre de structure Cn^2 . Ce dernier est déterminé à partir des mesures scintillométriques pour des longueurs de rugosité (z_0) et des hauteurs de végétation (h_{veg}) fixées.

	z_0 (m)	u_* (m/s)	L_{MO} (m)	σ_v (m/s)
Sol nu				
Nord-Ouest	0.007	0.4	-24	1.1
Sud	0.007	0.3	-12	1.1
Sol couvert				
Nord-Ouest	0.05	0.6	-136	1.1
Sud	0.05	0.5	-49	1.1

Des estimations représentatives, obtenues à partir de paramètres moyens (Tableau 5.9), sont illustrées via les Figures 5.20, 5.21, 5.22 et 5.23. Les paramètres moyens sont choisis selon l'ordre de grandeur des mesures de flux turbulents sur les parcelles A et C en 2006 (§ 1 du présent chapitre). Tout d'abord, nous confirmons par ces calculs que les parcelles choisies pour le suivi de l'humidité du sol et de la couverture végétale (parcelles A, C, D à L) sont incluses dans les footprints du scintillomètre. Il est intéressant de noter que les parcelles A et C sont localisées à l'intérieur des footprints scintillométriques pour des vents de Nord-Ouest et de Sud respectivement, et sont localisées à proximité des zones de contributions maximales. Il est donc cohérent de comparer les mesures scintillométriques avec les mesures par

covariances turbulentes collectées sur la parcelle A (respectivement C) lorsque le vent est de direction Nord-Ouest (respectivement Sud). Par ailleurs, les illustrations de footprint indiquent que les sources de surface qui contribuent aux mesures scintillométriques correspondent systématiquement à des régimes d'écoulement descendants.

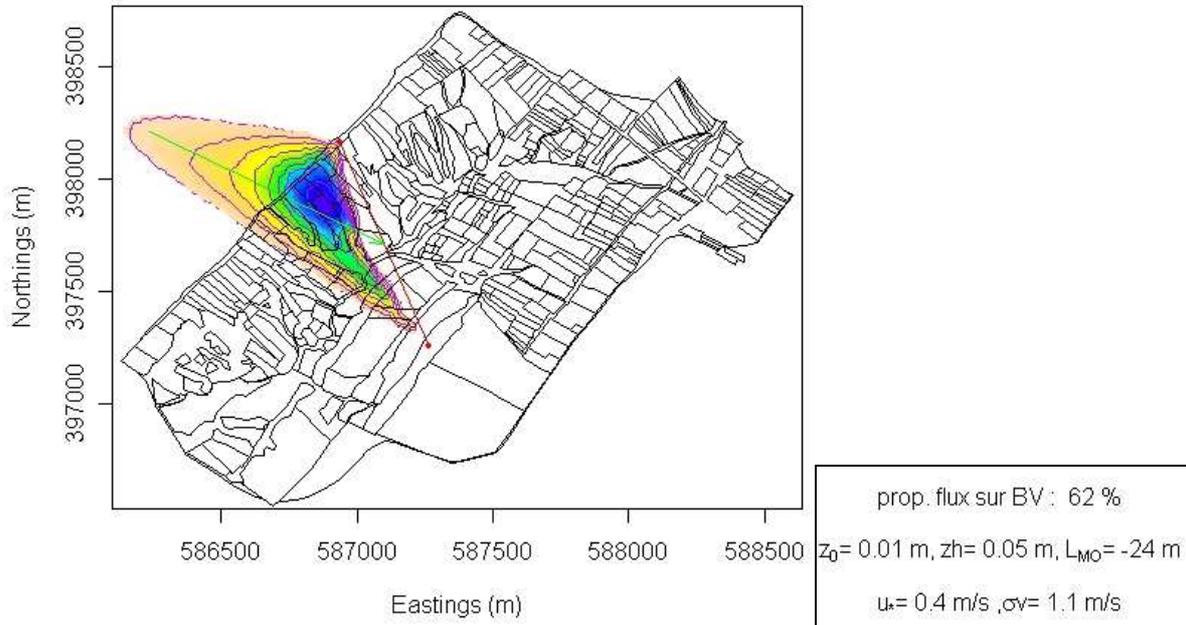


Figure 5.20. Illustration des footprints calculés pour les mesures scintillométriques, en considérant un régime de vent de Nord-Ouest et des conditions de sol nu, à partir des paramètres donnés dans le Tableau 5.9. Les deux tiers (62%) des sources de surface qui contribuent à la mesure sont localisés dans le bassin versant. La hauteur de végétation h_{veg} est fixée à 5 cm ($zh = 0.05m$).

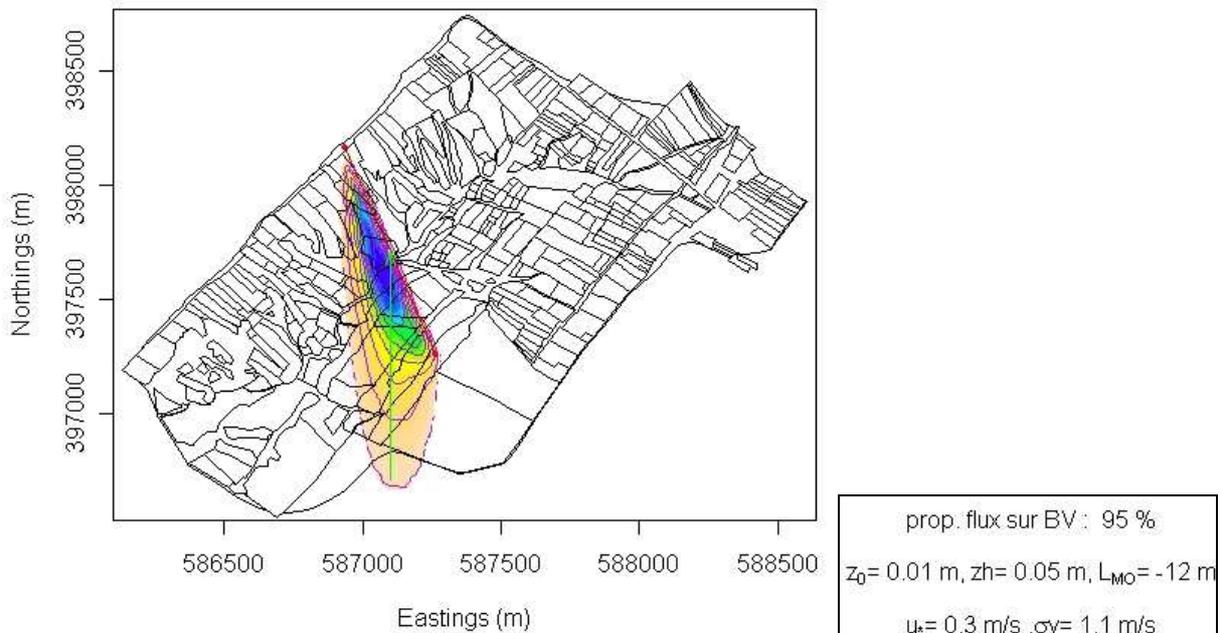


Figure 5.21. Illustration des footprints calculés pour les mesures scintillométriques, en considérant un régime de vent de sud et des conditions de sol nu, à partir des paramètres donnés dans le Tableau 5.9. La quasi totalité (95%) des sources de surface qui contribuent à la mesure sont localisées dans le bassin versant. La hauteur de végétation h_{veg} est fixée à 5 cm ($zh = 0.05m$).

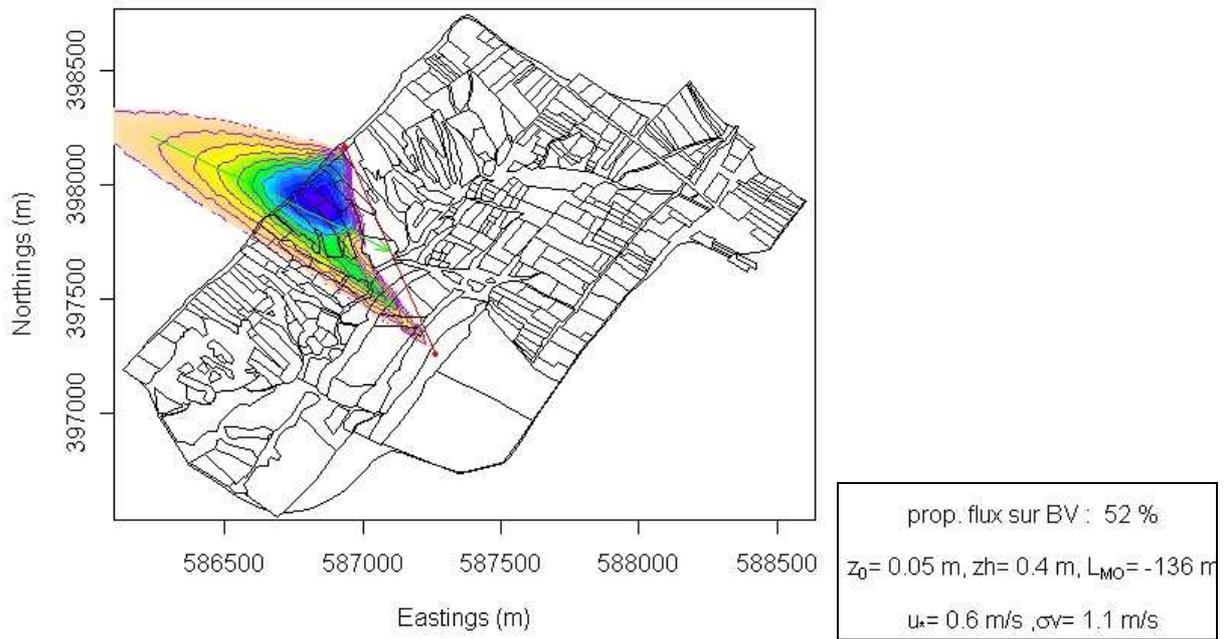


Figure 5.22. Illustration des footprints calculés pour les mesures scintillométriques, en considérant un régime de vent de Nord-Ouest et des conditions de couverture végétale, à partir des paramètres donnés dans le Tableau 5.9. La moitié (52%) des sources de surface qui contribuent à la mesure sont localisées dans le bassin versant. La hauteur de végétation h_{veg} est fixée à 40 cm ($zh = 0.40m$).

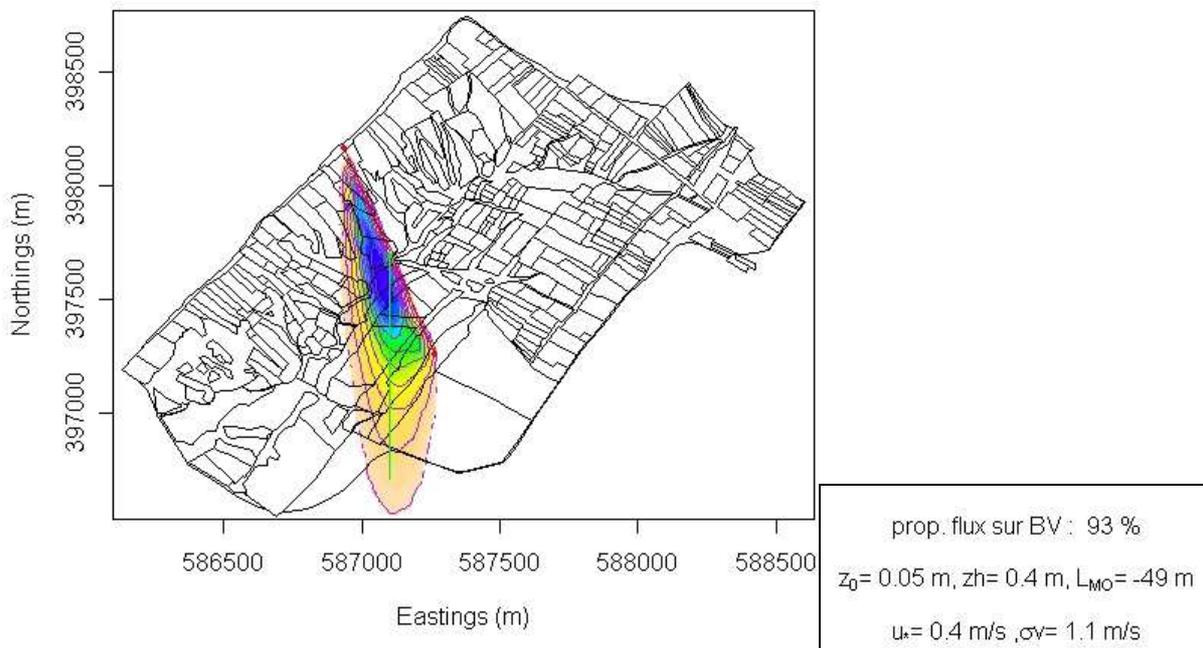


Figure 5.23. Illustration des footprints calculés pour les mesures scintillométriques, en considérant un régime de vent de sud et des conditions de couverture végétale, à partir des paramètres donnés dans le Tableau 5.9. La quasi totalité (95 %) des sources de surface qui contribuent à la mesure sont localisées dans le bassin versant. La hauteur de végétation h_{veg} est fixée à 40 cm ($zh = 0.40m$).

2.2. Mesure intégrée des flux par scintillométrie en conditions de sol nu

Nous analysons ici les mesures scintillométriques en conditions de sol nu (sol nu, végétation sénescence, résidus après récolte). Nous évaluons d'abord l'influence des paramètres aérodynamiques (hauteur de végétation, rugosité mécanique, hauteur de déplacement) sur l'estimation de la vitesse de friction et de la chaleur sensible. Nous comparons ensuite, pour ces deux grandeurs, les estimations scintillométriques avec celles obtenues par la méthode des covariances turbulentes sur les parcelles A et C. Nous terminons par une comparaison entre l'énergie disponible et la chaleur sensible. Une conclusion sur la mesure des flux par scintillométrie en condition de sol nu et en situation de relief est finalement présentée.

2.2.1. Calcul de la chaleur sensible par scintillométrie : paramétrage

Tableau 5.10. Jeux de paramètres retenus pour le calcul de la vitesse de friction et de la chaleur sensible à partir des mesures scintillométriques. La variabilité spatiale et temporelle sur la hauteur du couvert végétal h_{veg} est caractérisée en considérant des valeurs extrêmes selon les mesures de terrain. La rugosité mécanique z_0 est calculée comme une fraction de la hauteur du couvert, le rapport z_0 / h_{veg} étant posé à une valeur nominale soit issue de la littérature, soit obtenue par optimisation sur le rayonnement net lors du calcul de la température de surface (Tableau 5.6). La hauteur de déplacement est posée à une valeur soit issue de la littérature, soit nulle en rapport avec des conditions de sol nu qui correspondent à du sol nu, de la végétation sénescence ou des résidus.

h_{veg} (m)	Mesure : 0.19	Végétation sèche et couverture végétale faible : 0.05
z_0 / h_{veg} (m)	Littérature : 0.13	Calcul en § 1.2.2.1 : 0.2
$D * h_{veg}$ (m)	Littérature : 0.7	Calcul en § 1.2.2.1 (sols nus) : 0

Parmi les variables qui interviennent dans le calcul de la vitesse de friction et de la chaleur sensible à partir des mesures scintillométriques (voir Chapitre 2), nous nous intéressons ici aux caractéristiques aérodynamiques du couvert végétal que sont la hauteur de végétation, la rugosité mécanique et la hauteur de déplacement. Ces variables varient en effet avec le type de culture, le stade phénologique et la récolte, ce qui induit des variabilités spatio-temporelles non négligeables sur l'ensemble des parcelles contribuant aux mesures scintillométriques. Au regard des sensibilités mises en exergue par des travaux antérieurs (Lagouarde et al., 2000 ; 2002), il est attendu que ces variables influencent les estimations scintillométriques de vitesse de friction u^* et de chaleur sensible H . Les calculs sont donc effectués en considérant plusieurs jeux de paramètres (Tableau 5.10), ces jeux étant choisis selon les propositions de la

littérature ou bien les observations effectuées dans le cadre du présent travail (la hauteur de végétation a été mesurée sur les parcelles A, C et D à L).

Le Tableau 5.11 expose les estimations obtenues, pour la vitesse de friction et le flux de chaleur sensible, à partir des différents jeux de paramètres présentés ci-dessus. Quelles que soient les valeurs de rugosité et de hauteur de déplacement, la variation de la hauteur du couvert végétal a des conséquences significatives sur la vitesse de friction, avec des corrélations positives et des variations de l'ordre de 30 %. La variation de rugosité a des conséquences moindres, avec des corrélations positives et des variations de l'ordre de 10 %. La hauteur de déplacement, en revanche, n'a pas d'influence notable. Pour le flux de chaleur sensible H , les variations observées en rapport avec la hauteur de végétation sont inférieures à 5 %. Il en est de même pour un changement de rugosité, avec des variations comprises entre 1 et 2 %, ces variations étant légèrement plus importantes lorsque la hauteur de végétation est plus grande. La hauteur de déplacement, enfin, ne présente aucune influence.

Tableau 5.11. Valeurs moyennes obtenues, à partir des mesures scintillométriques, pour la vitesse de friction u_* et la chaleur sensible H , en considérant différents jeux de paramètres pour la hauteur de la végétation h_{veg} (0.19 et 0.05 m), la rugosité z_0 (0.13 et $0.2 \cdot h_{veg}$) et la hauteur de déplacement D (0.66 et $0 \cdot h_{veg}$). Le nombre de mesures est labellisé n . Conditions de sol nu.

		$z_0 = 0.13 \cdot h_{veg}$	$z_0 = 0.2 \cdot h_{veg}$	$z_0 = 0.2 \cdot h_{veg}$
		$D = 0.7 \cdot h_{veg}$	$D = 0.7 \cdot h_{veg}$	$D = 0 \cdot h_{veg}$
n		747	747	747
u_{*sc} (m/s)	$h_{veg} = 0.05$ m	0.33	0.36	0.36
u_{*sc} (m/s)	$h_{veg} = 0.19$ m	0.43	0.47	0.46
Hsc (W/m ²)	$h_{veg} = 0.05$ m	271.2	273.3	273.5
Hsc (W/m ²)	$h_{veg} = 0.19$ m	280.7	286.8	287.1

2.2.2. Analyse des estimations pour la vitesse de friction

Les valeurs de vitesse de friction u_* mesurées à l'échelle locale sur les parcelles A et C par les dispositifs de covariances turbulentes sont comparées à celles déduites des mesures scintillométriques lors du calcul de la chaleur sensible H . Pour la vitesse de friction déduite des mesures scintillométriques (labellisée ici u_{*sc}), et suite aux résultats obtenus dans la section précédente (i.e. faible influence de la hauteur de déplacement sur les calculs de u_* et H), nous considérons quatre situations de calcul correspondant à des variations de hauteur de la végétation h_{veg} (0.05 et 0.19 m) et de rugosité mécanique z_0 (0.13 et $0.2 \cdot h_{veg}$). Pour les

mesures locales de vitesse de friction collectées sur les parcelles A et C, nous considérons celles corrigées pour la rotation planar fit (u_{*PF} , avec corrections instrumentales préalables) et celles non corrigées de cette rotation (u_{*AC} , corrections instrumentales uniquement). La comparaison est alors réalisée pour les vents de Nord-Ouest et de Sud séparément, qui induisent des régimes d'écoulement ascendant et descendant (respectivement descendant et ascendant) pour la parcelle A (respectivement C). Les résultats de la comparaison des vitesses de frictions sont indiqués dans le Tableau 5.12.

Tableau 5.12. Comparaison des valeurs de vitesse de friction obtenues 1/ via le calcul de la chaleur sensible à partir des mesures scintillométriques, et 2/ via les mesures de covariances turbulentes sur les parcelles A et C. Différents cas de hauteur de couvert (h_{veg} en m) et de rugosité (via le ratio z_0 / h_{veg}) sont considérés. Le nombre de mesures est labellisé n. Les moyennes des vitesses de friction (en m/s) sont issues soit des mesures scintillométriques (u_{*sc_m}), soit des mesures par covariances turbulentes ayant subi la correction planar fit (u_{*PF_m}), soit des mesures par covariances turbulentes n'ayant pas subi la correction planar fit (u_{*AC_m}). Sont indiqués pour chaque comparaison l'écart moyen entre les deux vitesses (ME, en m/s), l'écart quadratique moyen (RMSE, en m/s) et le coefficient de détermination (R^2). Les conditions de vent de Nord-Ouest et de Sud sont séparées, et seules les conditions de sol nu sont considérées. Les cellules grisées indiquent les cas de figures où les estimations issues des mesures scintillométriques sont les plus proches de celles issues des mesures par covariances turbulentes.

	$h_{veg} = 0.05$ m, $z_0 = 0.13 h_{veg}$, D = 0.7 m	$h_{veg} = 0.05$ m, $z_0 = 0.2 h_{veg}$, D = 0.7 m	$h_{veg} = 0.19$ m, $z_0 = 0.13 h_{veg}$, D = 0.7 m	$h_{veg} = 0.19$ m, $z_0 = 0.2 h_{veg}$, D = 0.7 m				
<i>La direction du vent est Nord-Ouest soit descendant sur A et ascendant sur C.</i>								
<i>le footprint du scintillomètre est plus présent sur A</i>								
Parcelle	A	C	A	C	A	C	A	C
n	243	300	243	300	243	300	243	300
u_{*sc_m}	0.39	0.35	0.42	0.37	0.5	0.45	0.55	0.5
u_{*PF_m}	0.41	0.39	0.41	0.39	0.41	0.39	0.41	0.39
ME	0.02	0.03	-0.01	0.01	-0.09	-0.06	-0.14	-0.11
RMSE	0.05	0.07	0.06	0.06	0.12	0.09	0.17	0.13
R^2	0.85	0.81	0.85	0.81	0.85	0.81	0.85	0.81
n	252	281	252	281	252	281	252	281
u_{*sc_m}	0.39	0.35	0.41	0.38	0.49	0.45	0.55	0.5
u_{*AC_m}	0.44	0.3	0.44	0.3	0.44	0.3	0.44	0.3
ME	0.06	-0.06	0.03	-0.08	-0.05	-0.16	-0.1	-0.2
RMSE	0.08	0.13	0.07	0.14	0.09	0.21	0.14	0.25
R^2	0.82	0.17	0.82	0.17	0.82	0.17	0.82	0.17
<i>La direction du vent est Sud soit Ascendant sur A et descendant sur C.</i>								
<i>le footprint du scintillomètre est plus présent sur C</i>								
Parcelle	A	C	A	C	A	C	A	C
n	174	95	174	95	174	95	174	95
u_{*sc_m}	0.31	0.27	0.33	0.29	0.4	0.34	0.44	0.38
u_{*PF_m}	0.42	0.44	0.42	0.44	0.42	0.44	0.42	0.44
ME	0.1	0.17	0.09	0.15	0.02	0.09	-0.02	0.06
RMSE	0.13	0.18	0.12	0.16	0.09	0.11	0.1	0.07
R^2	0.57	0.96	0.57	0.96	0.57	0.96	0.57	0.96
n	184	125	184	125	184	125	184	125
u_{*sc_m}	0.31	0.27	0.33	0.29	0.39	0.34	0.43	0.38
u_{*AC_m}	0.3	0.56	0.3	0.56	0.3	0.56	0.3	0.56
ME	-0.01	0.29	-0.03	0.27	-0.09	0.21	-0.13	0.18
RMSE	0.09	0.3	0.1	0.28	0.14	0.23	0.18	0.19
R^2	0.32	0.96	0.32	0.96	0.31	0.96	0.31	0.96

Pour un vent de Nord-Ouest, les estimations scintillométriques sont systématiquement plus proches des mesures de covariances turbulentes collectées sur la parcelle A, en comparaison de celles collectées sur la parcelle C. Ceci est cohérent avec les analyses de footprint scintillométrique, ce dernier incluant la parcelle A dans la zone de contribution maximale pour un vent de Nord-Ouest (§ 2.1). De plus, les estimations scintillométriques sont plus proches des mesures par covariances turbulentes lorsque la hauteur du végétal est fixée à la valeur la plus faible (0.05 versus 0.19 m), ce qui est cohérent avec les conditions de sol nu auxquelles nous nous intéressons. Enfin, une plus grande similitude est observée en comparant avec les mesures par covariances turbulentes ayant subi la correction planar fit.

Pour un vent de sud, les résultats de comparaisons entre estimations scintillométriques et mesures par covariances turbulentes sont plus nuancés. Primo, les écarts sont légèrement plus faibles pour la parcelle A (non localisée dans le footprint scintillométrique), et les corrélations sont bien plus élevées pour la parcelle C (localisée dans le footprint scintillométrique). Secundo, les estimations sont plus proches avec une hauteur de végétation et une rugosité plus élevées, alors que nous sommes en conditions de sol nu, et les différences sont moindres en considérant les données ayant subi la correction planar fit. Il semble difficile de conclure, au regard de ces éléments, quant à une possible cohérence entre les deux types de mesure.

2.2.3. Analyse des estimations pour la chaleur sensible

Nous effectuons ici la même comparaison que dans la section précédente, en considérant les mesures de chaleur sensible H à la place des mesures de vitesse de friction u_* . Pour les mesures scintillométriques (H_{sc}), nous considérons plusieurs estimations selon les jeux de paramètres possibles, incluant des variations sur la hauteur du couvert végétal et sur la rugosité mécanique. Pour les mesures par covariances turbulentes sur les parcelles A et C, nous considérons plusieurs estimations selon que soit appliquée (H_{PF}) ou non (H_{AC}) la correction planar fit. Enfin, les directions de vent Nord-Ouest et Sud sont discriminées. Les comparaisons des estimations de chaleur sensible sont présentées dans le Tableau 5.13.

Pour un vent de Nord-Ouest, les estimations scintillométriques sont systématiquement plus proches des mesures par covariances turbulentes collectées sur la parcelle A, en comparaison

de celles collectées sur la parcelle C. Ceci est cohérent avec les analyses de footprint scintillométrique, ce dernier incluant la parcelle A dans la zone de contribution maximale pour un vent de Nord-Ouest (§ 2.1). De plus, les estimations scintillométriques sont plus proches des mesures par covariances turbulentes lorsque la hauteur du végétal est plus faible, ce qui est cohérent avec les conditions de sol nu auxquelles nous nous intéressons. En revanche, une plus grande similitude est observée en comparant avec les mesures par covariances turbulentes n'ayant pas subi de correction planar fit.

Tableau 5.13. Comparaison des valeurs de flux de chaleur sensible obtenues 1/ via le calcul de la chaleur sensible à partir des mesures scintillométriques, et 2/ via les mesures de covariances turbulentes sur les parcelles A et C. Différents cas de hauteur de couvert (h_{veg} en m) et de rugosité (via le ratio z_0 / h_{veg}) sont considérés. Le nombre de mesures est labellisé n. Les moyennes des flux de chaleur sensible (en $W.m^{-2}$) sont issues soit des mesures scintillométriques (Hsc_m), soit des mesures par covariances turbulentes ayant subi la correction planar fit (H_PF_m), soit des mesures par covariances turbulentes n'ayant pas subi la correction planar fit (H_AC_m). Sont indiqués pour chaque comparaison l'écart moyen entre les deux vitesses (ME, en W/m^2), l'écart quadratique moyen (RMSE, en W/m^2) et le coefficient de détermination (R^2). Les conditions de vent de Nord-Ouest et de Sud sont séparées, et seules les conditions de sol nu sont considérées. Les cellules grisées indiquent les cas de figures où les estimations issues des mesures scintillométriques sont les plus proches de celles issues des mesures par covariances turbulentes.

	$h_{veg} = 0.05$ m, $z_0 = 0.13 h_{veg}$, D = 0.7 m		$h_{veg} = 0.05$ m, $z_0 = 0.2 h_{veg}$, D = 0.7 m		$h_{veg} = 0.19$ m, $z_0 = 0.13 h_{veg}$, D = 0.7 m		$h_{veg} = 0.19$ m, $z_0 = 0.2 h_{veg}$, D = 0.7 m	
<i>La direction du vent est Nord-Ouest soit descendant sur A et ascendant sur C. le footprint du scintillomètre est plus présent sur A</i>								
Parcelle	A	C	A	C	A	C	A	C
n	270	316	270	316	270	316	270	316
Hsc_m	290.3	260.35	293.3	262.5	303.8	269.9	312.2	276.1
H_PF_m	227.4	157.0	227.4	157.0	227.4	157.0	227.4	157.0
ME	-62.8	-103.3	-65.8	-105.4	-76.3	-112.8	-84.8	-119.1
RMSE	76.2	118.8	79.3	120.9	90.8	128.3	100.2	134.7
R^2	0.9	0.83	0.9	0.83	0.89	0.83	0.88	0.83
n	270	315	270	315	270	315	270	315
Hsc_m	290.3	260.0	293.2	262.4	303.8	269.9	312.2	276.0
H_AC_m	244.7	116.0	244.7	116.0	244.7	116.1	244.7	116.0
ME	-45.5	-144.2	-48.5	-146.3	-59.0	-153.8	-67.4	-160.0
RMSE	60.22	164.6	62.8	166.8	72.9	174.7	81.7	181.4
R^2	0.91	0.67	0.91	0.66	0.91	0.65	0.9	0.64
<i>La direction du vent est Sud soit Ascendant sur A et descendant sur C. le footprint du scintillomètre est plus présent sur C</i>								
Parcelle	A	C	A	C	A	C	A	C
n	182	93	182	93	182	93	182	93
Hsc_m	264.2	251.2	265.8	252.4	271.4	256.1	276.43	259.6
H_PF_m	117.9	139.8	117.9	139.8	117.9	139.8	117.99	139.8
ME	-146.2	-111.3	-147.8	-112.5	-153.5	-116.2	-158.44	-119.7
RMSE	170.6	127.5	172.5	128.7	179.1	132.9	184.93	136.9
R^2	0.63	0.8	0.63	0.8	0.62	0.8	0.61	0.8
n	183	128	183	128	183	128	183	128
Hsc_m	265.1	246.9	266.7	248.0	272.4	251.6	277.4	255.1
H_AC_m	90.4	190.6	90.4	190.6	90.48	190.6	90.4	190.6
ME	-174.6	-56.2	-176.3	-57.4	-181.9	-61.0	-186.9	-64.5
RMSE	203.5	78.0	205.5	79.0	212.1	82.2	218.0	85.3
R^2	0.37	0.82	0.36	0.82	0.35	0.82	0.34	0.82

Pour un vent de sud, les estimations scintillométriques sont plus proches des estimations par covariances turbulentes collectées sur la parcelle C, ce qui est cohérent avec les analyses de footprint scintillométrique. De même, les estimations sont plus proches avec une hauteur de végétation et une rugosité plus faible, ce qui est cohérent avec les conditions de sol nu auxquelles nous nous intéressons. En revanche, une plus grande similitude est observée en comparant avec les mesures par covariances turbulentes n'ayant pas subi de correction planar fit. Finalement, il s'avère que les estimations scintillométriques sont systématiquement plus élevées que les estimations par covariances turbulentes.

2.2.4. Comparaison entre énergie disponible et chaleur sensible

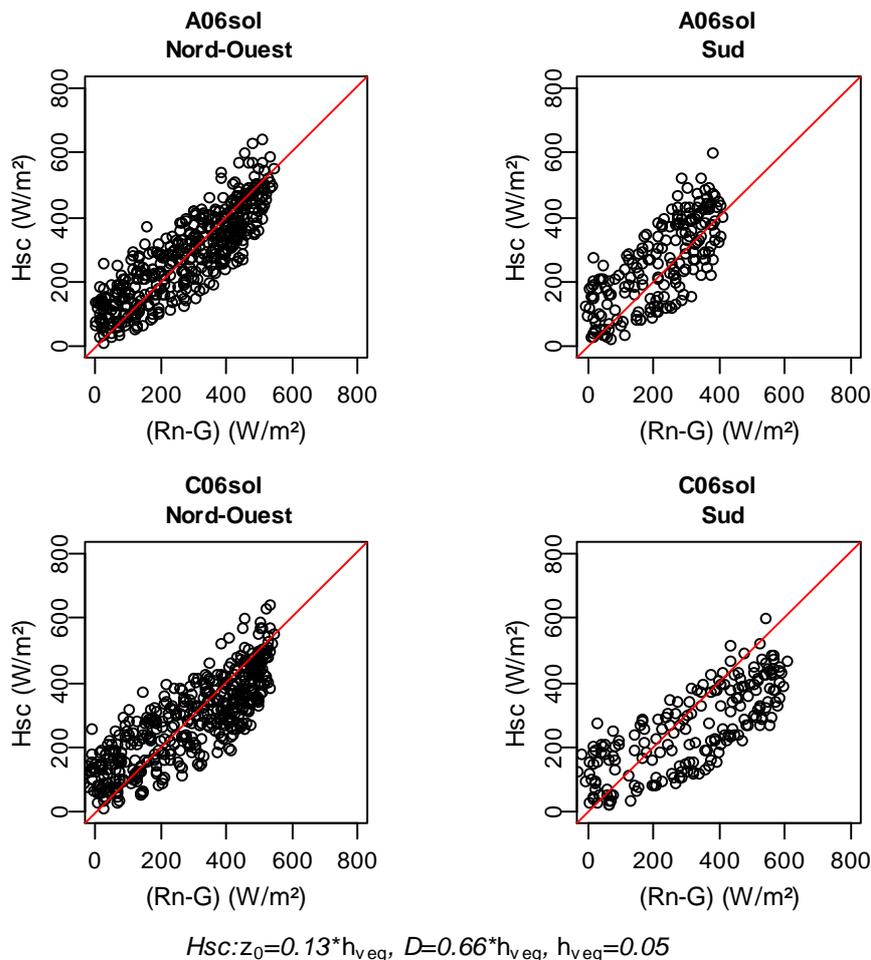


Figure 5.24. Comparaison entre le flux de chaleur sensible déduit des mesures scintillométriques (Hsc) et l'énergie disponible (Rn-G) mesurée sur les parcelles A et C. Nous distinguons la parcelle sur laquelle sont collectées les mesures (première ligne pour A et seconde ligne pour C) ainsi que le régime de vent (colonne de gauche pour le vent de Nord-Ouest et colonne de droite pour le vent de Sud). Conditions de sol nu.

Dans la continuité des travaux présentés ci-dessus pour la vitesse de friction u^* (§ 2.2.2) et la chaleur sensible H (§ 2.2.3), nous nous intéressons maintenant à intercomparer les estimations scintillométriques de chaleur sensible H_{sc} avec les mesures d'énergie disponible R_n-G sur les parcelles A et C. Ce type de comparaison fournit une indication sur la chaleur latente en tant que résidu du bilan d'énergie ($LE = R_n-G-H_{sc}$), malgré de fortes restrictions en lien avec les résultats précédents (pour u^* et H , les similitudes entre estimations scintillométriques et mesures par covariance turbulentes ne sont pas systématiquement celles attendues a priori). Les intercomparaisons sont effectuées en distinguant 1/ les deux parcelles A et C sur lesquelles est mesurée l'énergie disponible et 2/ les deux directions de vent de Nord-Ouest et de Sud. Pour l'intercomparaison, les estimations scintillométriques de chaleur sensible que nous choisissons sont celles qui sont les plus proches des estimations obtenues par covariances turbulentes sur les parcelles A et C.

Tableau 5.14. Statistiques obtenues en comparant les mesures collectées sur les parcelles A et C pour le rayonnement net R_n , le flux de chaleur dans le sol G , et l'énergie disponible (R_n-G), et les mesures de flux de chaleur sensible collectées par scintillométrie pour la chaleur sensible H . Nous nous intéressons d'abord à la comparaison entre les mesures de rayonnement net R_n et les mesures scintillométriques de H (6 premières lignes de résultats,) et ensuite à la comparaison entre l'énergie disponible (R_n-G) et H scintillométrique (6 dernières lignes de résultats). Les résultats sont discriminés selon les directions de vent. Conditions de sol nu.

Direction du vent	Nord-Ouest		Sud	
	A06sol	C06sol	A06sol	C06sol
n	467	467	195	195
(R_n) m (W/m^2)	339.8	322.5	281.8	360.0
(H) m (W/m^2)	282.7	282.7	255.4	255.4
ME (W/m^2)	-57.1	-39.8	-26.4	-104.6
RMSE (W/m^2)	121.2	109.9	111.3	165.5
R^2	0.73	0.72	0.55	0.64
n	467	467	195	195
(R_n-G) m (W/m^2)	286.4	288.6	220.8	320.1
(H_{sc}) m (W/m^2)	282.7	282.7	255.4	255.4
ME (W/m^2)	-3.6	-5.9	34.6	-64.7
RMSE (W/m^2)	79.6	95.4	97.7	137.0
R^2	0.74	0.69	0.54	0.59

Les résultats des intercomparaisons sont illustrés par Figure 5.24, et les statistiques correspondantes sont données dans le Tableau 5.14. En conditions de vent Nord-Ouest, les différences relatives entre énergie disponible et chaleur sensible sont très similaires quelle que soit la parcelle A ou C considérée, avec cependant une similitude légèrement plus prononcée sur la parcelle A (corrélation plus importante et dispersion plus petite). Une similitude plus prononcée en considérant la parcelle A est a priori attendue, sachant que pour un vent de

Nord-Ouest, cette parcelle est localisée dans le footprint des mesures scintillométriques à proximité des zones de contributions maximales. Nous observons des écarts moyens entre les estimations (R_n-G) et H_{sc} très faibles, avec des valeurs inférieures à 6 W/m^2 . Ceci est cohérent avec les conditions de sol nu dans lesquelles nous nous inscrivons, ces conditions correspondant généralement à des périodes sèches marquées par des évapotranspirations très faibles. Lorsque le vent est Sud, le terme (R_n-G) est inférieur à H_{sc} sur la parcelle A, ce qui est irréaliste car les conditions propices à condensation ne sont pas réunies. Sur la parcelle C, en revanche, le terme (R_n-G) est supérieur à H_{sc} . Ceci est cohérent avec la localisation de la parcelle C : pour un vent de sud, celle-ci se trouve dans le footprint des mesures scintillométriques à proximité des zones de contributions maximales.

2.2.5. Discussion et conclusion

Pour le calcul des flux de quantité de mouvement et de chaleur sensible à partir des données scintillométriques, la phase de paramétrage a mis en évidence l'influence de la hauteur de la végétation sur le calcul de la vitesse de friction. En revanche, aucune sensibilité n'a été observée pour le flux de chaleur sensible, que ce soit à la hauteur de végétation, à la rugosité mécanique ou à la hauteur de déplacement. Cette phase de paramétrage a aussi indiqué que les flux de quantité de mouvement et de chaleur sensible augmentent avec la rugosité mécanique, ce qui était a priori attendu.

Pour la vitesse de friction et la chaleur sensible, l'intercomparaison entre estimations par scintillométrie et estimations par covariances turbulentes a donné des résultats en cohérence avec notre compréhension des processus. Ainsi les estimations sont généralement plus proches sur la parcelle localisée à proximité des zones de contributions maximales dans le footprint scintillométrique, selon que le vent soit de Nord-Ouest (parcelle A sur le versant nord) ou de Sud (parcelle C sur le versant sud). A l'exception de la parcelle C, les estimations sont aussi plus proches avec une hauteur de végétation plus basse, en lien avec les conditions de sol nu dans lesquelles nous nous plaçons. Des observations cohérentes sont aussi reportées pour la comparaison entre énergie disponible mesurée sur les parcelles et chaleur sensible mesurée par scintillométrie. Nous notons dans ce cas un bilan d'énergie dont la magnitude correspond à ce qui est observé en conditions de sol nu (évapotranspiration quasi nulle). Enfin, les intercomparaisons donnent des résultats plus ou moins bons d'une parcelle à une

autre selon que l'on considère une rugosité mécanique plus ou moins élevée. Une explication possible est la topographie spécifique dans le voisinage de la parcelle C, avec un effet de crête en amont et deux oueds en aval, en comparaison à la parcelle A localisée sur un versant plan.

Les résultats reportés ci-dessus doivent être nuancés par ceux obtenus en analysant la prise en compte de la correction planar fit sur les estimations par covariances turbulentes. En effet, et bien que la correction planar fit induise de meilleurs résultats pour la comparaison des estimations de vitesse de friction, les estimations scintillométriques de flux de chaleur sensible sont plus proches des estimations par covariances turbulentes lorsque ces dernières n'ont pas subi la correction planar fit. Une explication possible est la combinaison de deux facteurs, à savoir 1/ une surestimation systématique des mesures de covariances turbulentes par les mesures scintillométriques (voir ci-dessous), et 2/ une diminution systématique des flux de quantité de mouvement et de chaleur sensible par la correction planar fit (Tableau 5.1) dans les conditions d'écoulement descendant où nous nous inscrivons ici (§ 2.1).

Quels que soient les paramétrages choisis pour les calculs, nous observons que le flux de chaleur sensible mesuré par scintillométrie est systématiquement plus élevé que celui mesuré par covariances turbulentes à l'échelle locale. Après avoir considéré plusieurs facteurs d'influence possible dont aucun n'est avéré (§ 2.2.1), une explication possible est la prise en compte du relief. En effet, nous avons corrigé les mesures scintillométriques pour une topographie correspondant à celle au dessous du trajet optique, alors que les flux proviennent d'un footprint réparti sur l'un ou l'autre des deux versants selon les conditions de vent. Des vérifications ultérieures sont nécessaires.

2.3. Mesure intégrée des flux par scintillométrie en conditions de végétation

Après avoir analysé les mesures scintillométriques en conditions de sol nu, nous effectuons ici les analyses en conditions de couverture végétale. Les résultats sont reportés de la même façon que dans la section précédente, à savoir :

1. une phase de paramétrage, avec évaluation de l'influence des variables aérodynamiques (hauteur de végétation, rugosité, hauteur de déplacement) sur les flux calculés (quantité de mouvement et chaleur sensible) ;

2. un exercice d'intercomparaison, pour les flux précités, entre estimations issues des mesures scintillométriques et des mesures par covariances turbulentes ; et
3. un exercice d'intercomparaison entre les mesures d'énergie disponible collectées sur les parcelles des deux rives du bassin versant, et les estimations de flux de chaleur sensible issues des mesures scintillométriques.

Il est a priori attendu des observations différentes de celles reportées dans la section précédente, en rapport avec des propriétés aérodynamiques qui varient suite à la présence d'une couverture végétale.

2.3.1. Calcul de la chaleur sensible par scintillométrie : paramétrage

Le paramétrage est effectué en considérant plusieurs jeux de paramètres, en rapport avec des variations de hauteur de végétation, de rugosité mécanique et de hauteur de déplacement (Tableau 5.15). En adéquation avec des conditions de couverture végétale, nous considérons des hauteurs de végétation de 0.4 et 0.5 m. La rugosité et la hauteur de déplacement sont fixées aux mêmes valeurs que dans le cas du sol nu, en rapport avec les propositions de la littérature et les résultats obtenus dans le cadre du présent travail. Pour la hauteur de déplacement, nous avons considéré une valeur unique. En effet, l'analyse des estimations obtenues en conditions de sol nu a montré que cette variable n'a pas d'influence sur les estimations de vitesse de friction et de chaleur sensible.

Tableau 5.15. Jeux de paramètres retenus pour le calcul de la vitesse de friction et de la chaleur sensible à partir des mesures scintillométriques. La variabilité spatiale et temporelle sur la hauteur du couvert végétal h_{veg} est caractérisée en considérant des valeurs extrêmes selon les mesures de terrain. La rugosité mécanique z_0 est calculée comme une fraction de la hauteur du couvert, le rapport z_0 / h_{veg} étant posé à une valeur nominale soit issue de la littérature, soit obtenue par optimisation sur le rayonnement net lors du calcul de la température de surface (Tableau 5.6). La hauteur de déplacement est posée à une valeur issue de la littérature. Conditions de couverture végétale.

h_{veg} (m)	Mesure : 0.4	Mesure : 0.5
z_0 / h_{veg} (m)	Littérature : 0.13	Calcul en § 1.2.2.1 : 0.2
$D * h_{veg}$ (m)	Littérature : 0.7	

Les résultats obtenus pour les calculs de vitesse de friction et de chaleur sensible sont reportés dans le Tableau 5.16. La vitesse de friction affiche des sensibilités modérées, avec des variations de 15 et 8 % en réponse aux variations proposées ci-dessus pour la rugosité mécanique et la hauteur du couvert végétal, respectivement. Pour la chaleur sensible, nous observons des sensibilités nettement moins prononcées que pour la vitesse de friction, de

l'ordre de 5 % et 2.5 % en réponse aux variations proposées ci-dessus pour la rugosité mécanique et la hauteur du couvert végétal, respectivement.

Tableau 5.16. Valeurs obtenues, à partir des mesures scintillométriques, pour la vitesse de friction u_* et la chaleur sensible H , en considérant différents jeux de paramètres pour la hauteur de la végétation h_{veg} (0.4 et 0.5 m), la rugosité z_0 (0.13 et $0.2 * h_{veg}$) et la hauteur de déplacement D ($0.66 * h_{veg}$). Le nombre de mesures est labellisé n . Conditions de couverture végétale.

	u_*m (m/s)	Hm (W/m ²)
n	1314	1264
$h_{veg}=0.5, z_0=0.13 * h_{veg}$	0.52	206.49
$h_{veg}=0.5, z_0=0.2 * h_{veg}$	0.6	216.88
$h_{veg}=0.4, z_0=0.13 * h_{veg}$	0.48	201.76

2.3.2. Analyse des estimations pour la vitesse de friction

Les valeurs de vitesse de friction u_* mesurées à l'échelle locale sur les parcelles A et C par les dispositifs de covariances turbulentes sont comparées à celles déduites des mesures scintillométriques lors du calcul de la chaleur sensible H . Pour la vitesse de friction déduite des mesures scintillométriques (labellisées u_{*sc}), nous considérons trois situations de calcul correspondant à des variations de hauteur de végétation (0.4 et 0.5 m) et de rugosité mécanique z_0 (0.13 et $0.2 * h_{veg}$). Pour les mesures locales de vitesse de friction collectées sur les parcelles A et C, nous considérons celles corrigées pour la rotation planar fit (u_{*PF} , avec corrections instrumentales préalables) et celles non corrigées de cette rotation (u_{*AC} , corrections instrumentales uniquement). La comparaison est réalisée en séparant les vents de Nord-Ouest et de Sud, qui induisent des régimes d'écoulement ascendant et descendant (respectivement descendant et ascendant) pour la parcelle A (respectivement C).

Les résultats de la comparaison pour les estimations de vitesse de friction sont reportés dans le Tableau 5.17. Pour un vent de Nord-Ouest, les estimations scintillométriques sont plus proches des estimations par covariances turbulentes collectées sur la parcelle A, en comparaison avec celles collectées sur la parcelle C. Nous notons dans ce cas une surestimation par les estimations scintillométriques. Comme en conditions de sol nu, la similitude entre les deux types d'estimation (i.e. par scintillométrie et par covariances turbulentes) est plus grande en calculant les estimations scintillométriques avec une hauteur de végétation plus faible. La corrélation entre les deux types d'estimation est plus importante en considérant les estimations par covariances turbulentes qui ont subi la correction planar fit, mais la dispersion est alors plus grande. Pour un vent de Sud, les estimations issues des

mesures scintillométriques sont mieux corrélées aux estimations par covariances turbulentes collectées sur la parcelle C. Dans ce cas, l'écart moyen entre les deux types d'estimation est plus faible lorsque celles issues des mesures par covariances turbulentes ont subi la correction planar fit. Similairement aux résultats obtenus pour le vent de Nord-Ouest, les estimations scintillométriques surestiment celles issues des mesures par covariances turbulentes.

Tableau 5.17. Comparaison des valeurs de vitesse de friction obtenues 1/ via le calcul de la chaleur sensible à partir des mesures scintillométriques, et 2/ via les mesures de covariances turbulentes sur les parcelles A et C. Différents cas de hauteur de couvert (h_{veg} en m) et de rugosité (via le ratio z_0 / h_{veg}) sont considérés. Le nombre de mesures est labellisé n. Les moyennes des vitesses de friction (en m/s) soit des mesures scintillométriques (u_{*sc_m}), soit des mesures par covariances turbulentes ayant subi la correction planar fit (u_{*PF_m}), soit des mesures par covariances turbulentes n'ayant pas subi la correction planar fit (u_{*AC_m}). Sont indiqués pour chaque comparaison l'écart moyen entre les deux vitesses (ME, en m/s), l'écart quadratique moyen (RMSE, en m/s) et le coefficient de détermination (R^2). Les conditions de vent de Nord-Ouest et de Sud sont séparées, et seules les conditions de couverture végétale sont considérées. Les cellules grisées indiquent les cas de figures où les estimations issues des mesures scintillométriques sont les plus proches de celles issues des mesures par covariances turbulentes.

	$h_{veg} = 0.50$ m, $z_0 = 0.13 h_{veg}$, $d = 0.7 h_{veg}$		$h_{veg} = 0.50$ m, $z_0 = 0.2 h_{veg}$, $d = 0.7 h_{veg}$		$h_{veg} = 0.40$ m, $z_0 = 0.13 h_{veg}$, $d = 0.7 h_{veg}$	
	A06fev	C06par	A06fev	C06par	A06par	C06par
<i>La direction du vent est Nord-Ouest soit descendant sur A et ascendant sur C. le footprint du scintillomètre est plus présent sur A</i>						
Parcelle	A	C	A	C	A	C
n	315	313	315	313	315	313
u_{*sc_m}	0.63	0.65	0.72	0.75	0.58	0.6
u_{*PF_m}	0.47	0.48	0.47	0.48	0.47	0.48
ME	-0.16	-0.17	-0.25	-0.26	-0.11	-0.11
RMSE	0.18	0.19	0.28	0.29	0.13	0.13
R^2	0.97	0.91	0.97	0.91	0.97	0.91
n	358	341	358	341	358	341
u_{*sc_m}	0.62	0.69	0.72	0.8	0.57	0.63
u_{*AC_m}	0.51	0.37	0.51	0.37	0.51	0.37
ME	-0.12	-0.32	-0.21	-0.42	-0.06	-0.26
RMSE	0.14	0.38	0.24	0.49	0.09	0.32
R^2	0.94	0.46	0.94	0.46	0.94	0.46
<i>La direction du vent est Sud soit Ascendant sur A et descendant sur C le footprint du scintillomètre est plus présent sur C</i>						
Parcelle	A	C	A	C	A	C
n	147	118	147	118	147	118
u_{*sc_m}	0.39	0.39	0.45	0.44	0.36	0.36
u_{*PF_m}	0.35	0.39	0.35	0.39	0.35	0.39
ME	-0.04	0	-0.1	-0.05	-0.01	0.03
RMSE	0.07	0.03	0.12	0.06	0.06	0.04
R^2	0.8	0.96	0.8	0.96	0.8	0.96
n	147	124	147	124	147	124
u_{*sc_m}	0.4	0.39	0.46	0.44	0.37	0.36
u_{*AC_m}	0.28	0.5	0.28	0.5	0.28	0.5
ME	-0.12	0.12	-0.18	0.06	-0.09	0.15
RMSE	0.15	0.12	0.21	0.07	0.13	0.15
R^2	0.55	0.94	0.55	0.94	0.55	0.94

2.3.3. Analyse des estimations pour la chaleur sensible

Tableau 5.18. Comparaison des valeurs de flux de chaleur sensible obtenues 1/ via le calcul de la chaleur sensible à partir des mesures scintillométriques, et 2/ via les mesures de covariances turbulentes sur les parcelles A et C. Différents cas de hauteur de couvert (h_{veg} en m) et de rugosité (via le ratio z_0 / h_{veg}) sont considérés. Le nombre de mesures est labellisé n. Les moyennes des flux de chaleur sensible (en $W \cdot m^{-2}$) sont issues soit des mesures scintillométriques (Hsc_m), soit des mesures par covariances turbulentes ayant subi la correction planar fit (H_PF_m), soit des mesures par covariances turbulentes n'ayant pas subi la correction planar fit (H_AC_m). Sont indiqués pour chaque comparaison l'écart moyen entre les deux vitesses (ME, en W/m^2), l'écart quadratique moyen (RMSE, en W/m^2) et le coefficient de détermination (R^2). Les conditions de vent de Nord-Ouest et de Sud sont séparées, et seules les conditions de couverture végétale sont considérées. Les cellules grisées indiquent les cas de figures où les estimations issues des mesures scintillométriques sont les plus proches de celles issues des mesures par covariances turbulentes.

	$h_{veg} = 0.50$ m, $z_0 = 0.13 h_{veg}$, $d = 0.7 h_{veg}$		$h_{veg} = 0.50$ m, $z_0 = 0.2 h_{veg}$, $d = 0.7 h_{veg}$		$h_{veg} = 0.40$ m, $z_0 = 0.13 h_{veg}$, $d = 0.7 h_{veg}$	
	A06fev	C06par	A06fev	C06par	A06fev	C06par
<i>La direction du vent est Nord-Ouest soit descendant sur A et ascendant sur C le footprint du scintillomètre est plus présent sur A</i>						
Parcelle	A	C	A	C	A	C
n	316	313	316	313	316	313
Hsc_m	239.3	240.8	253.8	257.1	232.5	233.0
H_PF_m	174.3	130.6	174.3	130.6	174.3	130.6
ME	-65	-110.1	-79.5	-126.4	-58.1	-102.4
RMSE	80.1	128.7	95.6	147.9	73.3	119.5
R^2	0.85	0.87	0.84	0.85	0.85	0.88
n	356	337	356	337	356	337
Hsc_m	230.0	239.5	244.4	256.4	223.1	231.4
H_AC_m	189.6	81.8	189.6	81.8	189.6	81.8
ME	-40.3	-157.7	-54.7	-174.6	-33.4	-149.5
RMSE	61.8	185.9	73.8	205.9	57.5	176.4
R^2	0.85	0.46	0.86	0.43	0.84	0.48
<i>La direction du vent est Sud soit Ascendant sur A et descendant sur C. le footprint du scintillomètre est plus présent sur C</i>						
Parcelle	A	C	A	C	A	C
n	151	122	151	122	151	122
Hsc_m	217.0	214.0	223.9	220.5	214.3	211.5
H_PF_m	93.9	114.9	93.9	114.9	93.9	114.9
ME	-123.1	-99.0	-129.9	-105.5	-120.3	-96.5
RMSE	152.1	125.9	160.6	134.5	148.7	122.4
R^2	0.65	0.82	0.65	0.81	0.65	0.82
n	148	124	148	124	148	124
Hsc_m	218.2	214.9	225.0	221.3	215.5	212.3
H_AC_m	72.8	159.2	72.8	159.2	72.8	159.2
ME	-145.4	-55.6	-152.2	-62.1	-142.7	-53.0
RMSE	177.5	79.7	186.1	87.5	173.9	76.5
R^2	0.56	0.85	0.55	0.85	0.56	0.85

Nous effectuons ici la même comparaison que dans la section précédente, en considérant les mesures de chaleur sensible H à la place des mesures de vitesse de friction u_* . Pour les estimations scintillométriques, nous considérons plusieurs cas de figure selon les jeux de paramètres choisis, incluant des variations sur la hauteur de végétation et sur la rugosité

mécanique. Pour les estimations issues des mesures par covariances turbulentes, nous considérons plusieurs cas de figure selon que ces mesures aient subi (H_PF) ou non (H_AC) la correction planar fit. Enfin, les vents de Nord-Ouest et de Sud sont discriminés.

Les résultats de l'intercomparaison sont présentés dans le Tableau 5.18. Les résultats sont similaires à ceux obtenus en conditions de sol nu, avec une meilleure adéquation entre les deux types estimations (i.e. par scintillométrie et par covariances turbulentes) 1/ sur la parcelle A en conditions de vent de Nord-Ouest, et 2/ sur la parcelle C en conditions de vent de Sud. Aussi, les deux types d'estimations sont plus proches lorsque les estimations scintillométriques sont calculées avec des valeurs plus faibles pour les paramètres aérodynamiques (hauteur de végétation et rugosité mécanique). Enfin, les estimations issues des mesures par covariances turbulentes sont plus proches des estimations scintillométriques en considérant les mesures n'ayant pas subi de correction planar fit.

2.3.4. Comparaison entre énergie disponible et chaleur sensible

Tableau 5.19. Statistiques obtenues en comparant les mesures collectées sur les parcelles A et C pour le rayonnement net Rn, le flux de chaleur dans le sol G, et l'énergie disponible (Rn-G), et les mesures de flux de chaleur sensible collectées par scintillométrie pour la chaleur sensible H. Nous nous intéressons d'abord à la comparaison entre les mesures de rayonnement net Rn et les mesures scintillométriques de H (6 premières lignes de résultats,) et ensuite à la comparaison entre l'énergie disponible (Rn-G) et H scintillométrique (6 dernières lignes de résultats). Les résultats sont discriminés selon les directions de vent. Conditions de couverture végétale.

	Nord-Ouest		Sud	
	A06fev	C06par	A06fev	C06par
n	720	720	340	340
Rn_m (W/m ²)	356.8	322.8	312.3	368.5
Hsc_m (W/m ²)	223.4	223.4	192.7	192.7
ME (W/m ²)	-133.4	-99.5	-119.6	-175.8
RMSE (W/m ²)	186.3	155.1	186.2	135.6
R ²	0.68	0.63	0.51	0.61
N	720	720	340	340
(Rn-G)_m (W/m ²)	314.1	288.7	266.7	331.6
Hsc_m (W/m ²)	223.4	223.4	192.7	192.7
ME (W/m ²)	-90.7	-65.3	-73.9	-138.8
RMSE (W/m ²)	138.6	124.9	141.7	195.5
R ²	0.69	0.62	0.5	0.6

La dernière étape consiste à comparer les estimations scintillométriques de chaleur sensible avec les estimations d'énergie disponible collectées sur les parcelles A et C. Nous rappelons

que la différence entre les deux grandeurs fournit une indication sur l'évapotranspiration. L'intercomparaison est effectuée en distinguant 1/ les deux parcelles A et C sur lesquelles est mesurée l'énergie disponible et 2/ les deux directions de vent de Nord-Ouest et de Sud.

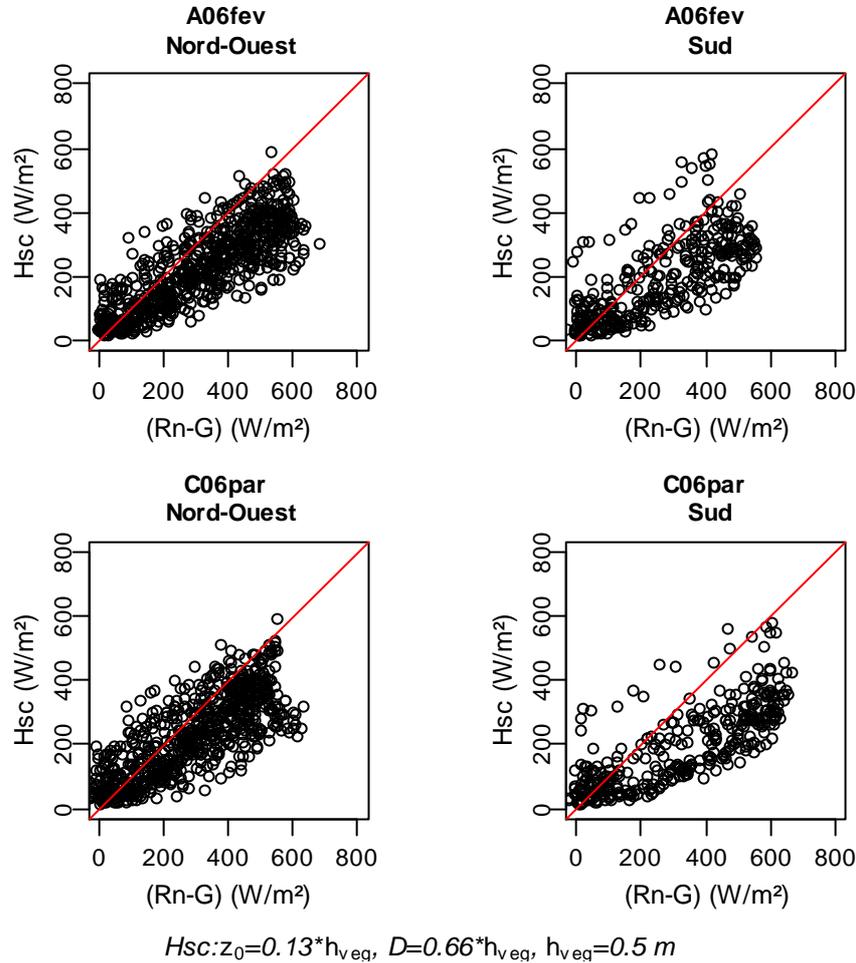


Figure 5.25. Comparaison entre le flux de chaleur sensible déduit des mesures scintillométriques (Hsc) et l'énergie disponible (Rn-G) mesurée sur les parcelles A et C. Nous distinguons la parcelle sur laquelle sont collectées les mesures (première ligne pour la parcelle A et seconde ligne pour la parcelle C) ainsi que le régime de vent (colonne de gauche pour le vent de Nord-Ouest et colonne de droite pour le vent de Sud). Conditions de couverture végétale.

Les résultats de cette intercomparaison sont illustrés par la Figure 5.25, et les statistiques correspondantes sont données dans le Tableau 5.19. Quelles que soient les conditions de vent, les estimations scintillométriques sont Hsc sont systématiquement et significativement différentes des estimations in situ (Rn-G). Ces résultats sont très différents de ceux obtenus en condition de sol nu, ce qui s'explique par une grande variabilité des conditions de surface (e.g. hauteur et couverture végétale) lorsque nous sélectionnons les conditions de couverture végétale. Enfin, les différences observées entre (Rn-G) et Hsc sont cohérentes avec ce que nous attendions a priori, à savoir une composante non négligeable du bilan d'énergie dédiée à l'évapotranspiration.

2.3.5. Discussion et conclusion

Il était a priori attendu que l'analyse des flux scintillométriques, et plus particulièrement leur comparaison avec les mesures par covariances turbulentes, fournirait des résultats plus nuancés en conditions de couverture végétale que ceux observés en conditions de sol nu, et ce en raison d'un plus large panel de conditions de surface (hauteur et couverture végétale). Pour le calcul des flux de quantité de mouvement et de chaleur sensible à partir des données scintillométriques, la phase de paramétrage n'a mis en évidence aucune influence notable de la part des paramètres utilisés pour les calculs, avec des variations inférieures à 10 % dans tous les cas de figure, et de variations inférieures à 5 % pour la chaleur sensible.

Les intercomparaisons des estimations scintillométriques avec celles issues des mesures par covariances turbulentes sont en accord avec notre compréhension des processus, en ce qui concerne la vitesse de friction u_* et la chaleur sensible H . Ainsi les corrélations entre les deux types d'estimations sont plus importantes sur la parcelle A lorsque le vent est de Nord-Ouest et sur la parcelle C lorsque le vent est de sud. De même, l'analyse de la fermeture du bilan d'énergie montre que l'évapotranspiration a une magnitude de l'ordre de 100 W/m^2 , ce qui est a priori cohérent avec les conditions de couverture végétale considérées ici. Enfin, les estimations scintillométriques surestiment systématiquement les estimations par covariances turbulentes pour la chaleur sensible, ce qui s'explique par les simplifications apportées sur la hauteur de mesure lors du paramétrage.

En revanche, les deux types d'estimation pour le flux de chaleur sensible (i.e. par scintillométrie et par covariances turbulentes) sont plus proches lorsque les mesures par covariances turbulentes n'ont pas subi la correction planar fit, le cas contraire étant observé pour la vitesse de friction. Cette tendance, observée pour les conditions de couverture végétale et de sol nu, peut s'expliquer par la combinaison de deux facteurs, à savoir 1/ une surestimation systématique des mesures de covariances turbulentes par les mesures scintillométriques, et 2/ une diminution systématique des flux de quantité de mouvement et de chaleur sensible par la correction planar fit dans les conditions d'écoulement descendant.

3. Conclusion

Après avoir caractérisé les conditions d'écoulement en lien avec la topographie et le régime de vent dans le chapitre précédent, le présent chapitre avait pour ambition d'analyser de façon approfondie les composantes du bilan d'énergie. L'influence de la topographie sur ces composantes fut appréhendée 1/ à l'échelle de la parcelle à partir des mesures par covariances turbulentes, et 2/ à l'échelle du transect incluant plusieurs parcelles à partir des mesures par scintillométrie. De par les conditions spécifiques dans lesquelles nous nous plaçons, à savoir des conditions de relief collinaire couplées à un forçage de vent externe, il était attendu des résultats originaux.

L'analyse des flux convectifs à l'échelle de la parcelle montre systématiquement des changements significatifs en termes de magnitude, selon que les écoulements soient ascendants ou descendants, avec des variations conséquentes pouvant atteindre 50 % en relatif. La correction de rotation planar fit proposée pour les mesures par covariances turbulentes tend à amoindrir ces variations, selon des magnitudes de l'ordre de 10 à 20 % en relatif. Cependant, la magnitude de la correction effectuée n'est pas systématiquement liée au degré d'inclinaison de l'écoulement, selon que ce dernier soit ascendant (inclinaison plus forte en conditions de sol nu) ou descendant (inclinaison plus forte en conditions de couverture végétale). Il n'est donc pas possible de statuer sur le lien entre intensité de correction et inclinaison de l'écoulement quelle que soit l'occupation du sol. En revanche, la correction de rotation planar fit s'avère avoir un comportement linéaire, ce qui permet d'envisager des méthodes de corrections simples pour des mesures sur le long terme, lorsque les fréquences de collectes plus faibles ne permettent pas de disposer de l'information nécessaire à des corrections fines de type planar fit.

L'analyse du rayonnement net à l'échelle de la parcelle met en évidence des changements significatifs en termes de magnitude, selon que les écoulements soient ascendants ou descendants, avec des variations conséquentes pouvant atteindre 100 W/m^2 en absolu. Ces variations sont cohérentes avec celles observées pour les flux convectifs, en rapport avec la fermeture du bilan d'énergie. Afin de comprendre ces variations, les différents facteurs qui influent le bilan d'énergie sont inspectés. La prise en compte des influences de nature météorologique uniquement ne permet pas de reconstituer adéquatement les mesures de

rayonnement net. Il est donc nécessaire de reconstituer la température de surface à partir des mesures par covariances turbulentes, via l'inversion de la chaleur sensible. Une reconstitution adéquate des mesures de rayonnement net passe alors par un calcul d'optimisation, qui ajuste la rugosité mécanique intervenant dans l'expression de la chaleur sensible basée sur la relation flux - gradient. Les valeurs observées pour la rugosité s'avèrent varier d'un ordre 10, selon que l'écoulement soit ascendant ou descendant. Nous notons finalement que les valeurs plus faibles de rayonnement net en conditions d'écoulement ascendant sont en lien avec des valeurs plus élevées pour la température de surface, de 5 à 10 K. Bien évidemment, ces résultats originaux devront être confirmés par des mesures radiothermométriques.

L'analyse, à l'échelle de la parcelle, des mesures de flux de chaleur dans le sol, et du rapport entre le flux de chaleur dans le sol et le rayonnement net, permet de vérifier la consistance des données, étape préalable pour la fermeture du bilan d'énergie. En revanche, aucune relation n'est mise en évidence quant à un possible lien avec les conditions d'écoulement, les variations observées étant nettement inférieures aux incertitudes sur les grandeurs considérées.

La dernière étape à l'échelle de la parcelle consiste à analyser le lien entre conditions d'écoulement et fermeture du bilan d'énergie. Les valeurs obtenues pour cette fermeture sont similaires à celles reportées dans la littérature. Il n'y a pas de différence selon les conditions d'occupation du sol (sol nu ou couverture végétale), mais il y en a selon les conditions d'écoulement ascendant ou descendant. Bien que la correction de rotation planar fit puisse parfois induire une non fermeture du bilan d'énergie plus prononcée (parcelle C en conditions d'écoulement descendant) via une erreur systématique (biais), notons qu'elle diminue systématiquement l'erreur aléatoire (dispersion).

Pour l'ensemble des observations reportées ci-dessus, il est important de noter que les résultats sont souvent plus nuancés sur la parcelle C. Cette tendance est imputée à la topographie accidentée qui caractérise le voisinage de cette parcelle, et donc aux conséquences sur la qualité des flux mesurés par la méthode des covariances turbulentes.

La dernière étape de ce chapitre consiste à analyser les mesures collectées à l'échelle du transect de plusieurs parcelles par scintillométrie. Dans un premier temps, l'évaluation du footprint des mesures scintillométriques permet de vérifier que les parcelles choisies a priori

pour les analyses sont bien incluses dans ce footprint. La zone de contribution maximale à l'intérieur du footprint s'avère alors être située à proximité de l'une ou l'autre des parcelles sur lesquelles sont mesurés les flux convectifs par la méthode des covariances turbulentes (parcelle A sur le versant nord et parcelle C sur le versant sud). Ceci permet une comparaison entre mesures locales et intégrées. Une étape préalable de paramétrage montre que le calcul de la chaleur sensible n'est pas influencé par les paramètres aérodynamiques de surface requis. La similitude, selon que le vent soit de Nord-Ouest ou de Sud, entre les mesures locales sur l'une ou l'autre des parcelles d'une part, et les mesures intégrées sur le transect d'autre part, met en évidence la cohérence entre les deux types d'observations. De même, la fermeture du bilan d'énergie obtenue en croisant mesures locales et mesures intégrées est-elle consistante avec les conditions de surface, avec une évapotranspiration nulle en conditions de sol nu et non négligeable en conditions de couverture végétale. L'ensemble de ces résultats atteste de la cohérence entre deux jeux de données indépendants considérés. En revanche, des questions subsistent quant à la similitude entre ces mesures, selon que les estimations locales soient corrigées ou non pour l'inclinaison de l'écoulement (correction planar fit).

Dans l'ensemble, l'analyse des composantes du bilan d'énergie montre la consistance des mesures collectées, via la compréhension et la caractérisation de ces observations selon les conditions d'écoulement spécifiques, et ce aux échelles de la parcelle et de l'agrégat de parcelles. Les mesures étant consistantes, il est possible d'aller plus loin dans l'analyse, et de confronter ces mesures de bilan d'énergie de surface avec les mesures de bilan hydrique.