

ESTIMATION DE L'ETR JOURNALIÈRE À L'ÉCHELLE DE LA SAISON DE CULTURE

Dans ce chapitre nous procédons à l'estimation de l'évolution de l'évapotranspiration journalière sur l'ensemble des saisons de culture suivies aux échelles des parcelles du réseau expérimental et du transect scintillométrique. Trois objectifs justifient cette estimation.

Le premier est d'ordre cognitif. Il s'agit de procéder à la comparaison des flux d'ETR pour les différentes occupations du sol du bassin versant et pour une section représentative de l'hétérogénéité de Kamech afin d'évaluer la variabilité des fonctionnements du bassin versant durant un cycle climatique.

Les deux autres sont d'ordre méthodologique. L'un est d'évaluer une méthodologie de reconstitution des flux à l'échelle d'une saison à partir de mesures discontinues dans le temps et de résolution temporelle faible comme les mesures à pas de temps de 30 minutes. L'intérêt de ce type de reconstitution est justifié par la difficulté de stockage de données à haute fréquence dans des contextes expérimentaux en milieu agricole et naturel standard, ne bénéficiant pas des facilités de communication et d'appareillage de domaines expérimentaux. L'autre est de comparer les flux d'ETR estimés par des mesures atmosphériques avec ceux estimés à partir d'un bilan hydrique simplifié du sol. Du fait des sources d'erreurs importantes inhérentes à chacune de ces deux approches, aucune des deux approches expérimentales ne peut être considérée comme une méthode de référence, mais leur comparaison permet d'analyser la cohérence des deux estimations obtenues de manière indépendante. La comparaison nécessite d'estimer les flux à l'échelle de la saison avec un pas de temps supra-hebdomadaire, correspondant au plus petit pas de temps compatible entre les deux approches.

Dans la suite sont abordés successivement les approches menées et les résultats obtenus aux échelles parcellaire et du transect scintillométrique.

1. Estimation de l'évolution de l'ETR journalière à l'échelle parcellaire

Dans cette section sont présentées successivement la méthodologie de reconstitution des données saisonnières de flux turbulents à l'échelle parcellaire, la confrontation des estimations ainsi réalisées du flux d'évapotranspiration avec celles menées par bilan hydrique du sol et l'analyse comparative des flux d'évapotranspiration à l'échelle de la saison de culture sur l'ensemble des parcelles étudiées.

1.1. Reconstitution des flux de chaleur sensible et de chaleur latente à pas de 30 minutes

Le problème de reconstitution des flux à l'échelle de la saison de culture pour les parcelles expérimentales provient de l'existence de périodes présentant soit des données à fréquence temporelle insuffisante soit une absence complète de données. Les deux cas nécessitent des traitements différents.

Dans le premier cas, le problème est lié au besoin de corriger les flux convectifs par l'effet de relief, comme montré dans les chapitres précédents. Ainsi les flux de chaleur sensible et latente ne peuvent être estimés avec précision qu'après application de rotations (planar fit) sur les mesures des composantes de la vitesse du vent acquises à haute fréquence (10 Hz). Malheureusement, les mesures acquises à 10 Hz ne sont pas en nombre suffisant pour permettre l'estimation des flux convectifs à l'échelle de la saison de culture (voir tableau 6.1). Les mesures acquises à pas de temps de 30 minutes étant plus nombreuses, nous étudions donc ici les relations entre les flux déduits de ces dernières et ceux déduits des mesures à 10 Hz et corrigés de l'effet de relief afin de pouvoir estimer des flux corrigés à partir des mesures à 30 minutes.

Dans le second cas nous disposons sur toutes les périodes de suivi de mesures du rayonnement net et étudions donc ci-dessous les stabilités temporelles des rapports H/R_n et

LE/Rn afin de pouvoir reconstituer les flux turbulents. Cette approche a déjà été utilisée précédemment par Roupsard et al. (2006).

Pour valider la reconstitution des données menée suivant les étapes citées ci-dessus, la variation de la relation entre flux turbulents (H+LE) et énergie disponible (Rn-G) est analysée.

1.1.1. Sélection des jeux de données pour le développement des algorithmes de reconstitution

Pour calibrer les algorithmes de reconstitution, nous avons utilisé les jeux de données avec la meilleure clôture du bilan d'énergie. Le tableau 6.1 indique pour les différentes étapes, à savoir celles relatives à l'élaboration des deux algorithmes et celle correspondant à la validation de la reconstitution réalisée, les jeux de données employées.

Tableau 6.1. Etapes et jeux de données utilisés pour reconstituer les flux convectifs corrigés de l'effet relief à l'échelle saisonnière.

Pas de temps 30 minutes (Rn et Rg) > 20 W/m ²	
Etape 1: Relation entre flux convectifs corrigés et non corrigés: fl=H ou fl=LE	
Direction du vent	1/ Sud >135 & <225 ; 2/ Nord-Ouest >225 <70
Jeux de données	
A04ble/N-O, A04ble/S, A04sol/N-O, A04sol/S, B05avo/N-O, B05avo/S, B05sol/N-O, B05sol/S, A06fev/N-O, A06fev/S, A06sol/N-O, A06sol/S, C06par/N-O et C06sol/N-O	
C06par/S et C06sol/S	
$f1_PF = a * H_SC + b \rightarrow$	$f11 = a * f1_SC + b$
$f1_AC = a * f1_SC + b \rightarrow$	$f11 = a * H_SC + b$
Etape 2: Relation entre flux convectifs corrigés et rayonnement net fl=H ou fl=LE	
Direction du vent	1/ Sud >70 & <225 ; 2/ Nord-Ouest >225 <70
Jeux de données	
A04ble/N-O, A04ble/S, A04sol/N-O, A04sol/S, B05avo/N-O, B05avo/S, B05sol/N-O, B05sol/S, A06fev/N-O, A06fev/S, A06sol/N-O, A06sol/S, C06par/N-O et C06sol/N-O	
C06par/S et C06sol/S	
$f1_PF = a * Rn + b \rightarrow$	$f12 = a * Rn + b$
$f1_AC = a * Rn + b \rightarrow$	$f12 = a * Rn + b$
Etape 3: Reconstitution de fl=H ou fl=LE	
Jeux de données	
A04ble/N-O, A04ble/S, A04sol/N-O, A04sol/S, B05avo/N-O, B05avo/S, B05sol/N-O, B05sol/S, A06fev/N-O, A06fev/S, A06sol/N-O, A06sol/S, C06par/N-O et C06sol/N-O	
C06par/S et C06sol/S	
$f13 = f1_PF$ (si != de NA) sinon $f11$ (si != de NA); sinon $f12$	
$f13 = f1_AC$ (si != de NA) sinon $f11$ (si != de NA) sinon $f12$	
Pas de temps journalier (Rn et Rg) > 20 W/m ²	
Etape 4: ETR journalière	1/ ETR_BE = Rn_J - G_J - H3_J et 2/ ETR_CT = LE3_J

On notera que les jeux diffèrent en partie entre les étapes car celles-ci requièrent en partie des variables différentes, dont les périodes d'observation ne coïncident pas. On notera également que les jeux de données sont différenciés suivant la direction du vent afin de pouvoir calibrer les algorithmes en fonction des conditions aérodynamiques.

1.1.2. Recherche de relations statistiques entre flux convectifs corrigés et non corrigés

Les corrélations linéaires entre les flux turbulents non corrigés et corrigés sont présentées pour les différentes expérimentations dans le tableau 6.2. On distingue les cas des vents ascendants et descendants, dans la mesure où la différence des conditions d'écoulement peut être une source de variation des corrélations.

Tableau 6.2. Analyse de la relation entre flux turbulents corrigés et non corrigés au pas de 30 minutes. H est le flux de chaleur sensible (W/m^2), LE le flux de chaleur latente (W/m^2), n le nombre d'observations, RMSE racine carrée de la somme des écarts quadratiques (W/m^2), et R^2 le coefficient de détermination.

	Vent ascendant						Vent descendant					
	H			LE			H			LE		
	n	R^2	RMSE	n	R^2	RMSE	n	R^2	RMSE	N	R^2	RMSE
A04blé	34	0.95*	30.0	21	0.37	45.5	135	0.98**	68.5	123	0.75	50.5
A04sol	173	0.91*	30.3	101	0.29	34.7	183	0.99**	24.9	57	0.83	31.5
B05avo	215	0.97*	28.3				454	0.99**	33.2			
B05sol	69	0.95*	32.6				89	0.99**	28.1			
A06fev	107	0.94*	28.3				324	0.99**	25.8			
A06par	209	0.86	41.5				261	0.98**	32.2			
A06sol	144	0.86	31.4				246	0.99**	37.9			
C06par	336	0.81	49.5	249	0.49	59.5	236	0.99**	34.5	200	0.88	41.7
C06sol	273	0.84	49.3	103	0.21	43.5	90	0.99**	31.3	84	0.58	36.9

* significatif à la probabilité de 5%

** hautement significatif à la probabilité de 1%

Pour la chaleur sensible, ces corrélations sont statistiquement significatives avec des coefficients de détermination élevés, entre 0.81 et 0.99. Pour la chaleur latente, les corrélations sont moins bonnes avec des coefficients de détermination plus petits, variant entre 0.21 et 0.88. Cela peut être expliqué par une incertitude expérimentale plus forte sur les mesures de LE en raison de la sensibilité des hygromètres Krypton aux conditions

environnementales. Une conséquence en est d'ailleurs un nombre de mesures de chaleur latente inférieur à celui de la chaleur sensible.

Pour les deux types de flux, on notera que les corrélations apparaissent de meilleure qualité en vent descendant qu'ascendant. Ceci est certainement à relier à la plus grande variabilité de la pente sur la zone de footprint concernée par les mesures effectuées en vent ascendant. Cette variabilité diminue la pertinence d'une correction de type planar fit qui ajuste un plan d'écoulement moyen pour l'ensemble du footprint. Cette difficulté est particulièrement observable sur la parcelle C dont la topographie de la zone aval, incluse dans le footprint en vent ascendant, est plus fortement chahutée.

1.1.3. Relation statistique entre rayonnement net et flux turbulents

Comme précédemment, l'établissement des relations linéaires entre grandeurs micro-météorologiques a été mené séparément pour vent ascendant et vent descendant. De surcroît des tests préliminaires ont montré que les corrélations diminuaient si l'estimation des relations était menée sur de trop longues périodes. Cela peut être relié aux modifications significatives de stades végétatifs, notamment d'extension et de hauteur de végétation, qui interviennent sur les périodes longues et qui entraînent sans doute des changements de relation statistique entre R_n et les flux turbulents. En conséquence des relations différentes ont été calculées pour différentes périodes de temps. Leur durée a été choisie suite à un test de sensibilité effectué pour chaque jeu de données. Le tableau 6.3 donne ainsi par jeu de données la durée des périodes de calcul et les coefficients de détermination des relations ajustées durant chaque période. On notera que pour certains jeux de données, il s'est avéré pertinent de distinguer trois sous-périodes et donc trois relations à validité successive.

En termes de résultats, il apparaît comme précédemment pour la relation entre flux convectifs corrigés et non corrigés que la relation entre rayonnement net et flux convectifs est meilleure pour la chaleur sensible que pour la chaleur latente. La raison majeure est certainement la plus grande incertitude de mesure de la chaleur latente.

Tableau 6.3. Coefficients de détermination des relations ajustées entre rayonnement net et flux de chaleur sensible pour les différentes situations expérimentales étudiées.

parcelle	Direction du vent	Période de calcul (nombre de jours)		H/Rn			LE/Rn		
A04blé	N	106	0.81				0.6		
	S		0.88				0.76		
A04sol	N	49	0.91	0.52			0.33	0.04	
	S		0.83	0.69			0.44	0.61	
B05avo	N	35	0.91	0.85	0.82				
	S		0.98 *	0.71	0.78				
B05sol	N	35	0.92						
	S		0.89						
A06fev	N	37	0.77	0.79					
	S		0.79	0.73					
A06par	N	17	0.52	0.86					
	S		0.72	0.83					
A06sol	N	16	0.82	0.87					
	S		0.86	0.92					
C06par	N	22	0.69	0.65	0.8		0.7	0.41	0.13
	S		0.87	0.81	0.88		0.8	0.74	0.6
C06sol	N	18	0.7	0.41	0.13		0.49	0.26	
	S		0.8	0.74	0.6		0.4	0.18	

* significatif à la probabilité de 5%

** hautement significatif à la probabilité de 1%

1.1.4. Analyse de la qualité du bilan d'énergie des flux reconstitués.

Une série complète des données de flux de chaleurs sensible et latente a été reconstituée au pas de 30 minutes pour toutes les périodes de suivi des différentes parcelles. Comme indiqué précédemment, la reconstitution a été menée en deux étapes. En premier ont été corrigés de l'effet relief les flux turbulents bruts, intégrés au pas de 30 minutes, durant les périodes où l'absence de mesures à une résolution temporelle suffisante ne permettait pas d'appliquer la procédure de rotation du plan d'écoulement (planar fit). La correction a été opérée par utilisation des corrélations linéaires estimées avec les flux corrigés durant les périodes où

ceux-ci étaient disponibles. En second ont été estimés les flux turbulents pendant les périodes sans observations de flux par utilisation des relations entre flux turbulents corrigés de l'effet relief et le rayonnement net. On notera que cette seconde étape a été peu fréquente dans le cas des flux de chaleur sensible pour lesquels l'étape précédente a produit des séries quasi-complètes. Par contre elle a été utile pour la chaleur latente où existaient un nombre significatif de trous dans les chroniques de suivi.

Pour valider les reconstitutions réalisées, nous avons tout d'abord vérifié que les relations entre flux turbulents reconstitués et énergie disponible restaient similaires aux relations entre flux turbulents mesurés et énergie disponible, exposées dans §1.4 du chapitre 5. Nous avons ensuite analysé la qualité de clôture du bilan d'énergie des données reconstituées à l'échelle journalière. C'est un critère important pour juger de la cohérence des reconstitutions opérées. On peut juger de la qualité de la clôture au travers des figures 6.1 qui représentent les flux turbulents en fonction de l'énergie disponible pour les expérimentations A04blé, A04sol, C06par et C06sol et du tableau 6.4 qui donne les flux moyens calculés et les statistiques relatives aux écarts entre flux turbulents et énergie disponible journaliers.

Au vu des résultats obtenus, il s'avère que les défauts de clôture du bilan d'énergie sont dans la norme de la littérature pour des mesures réalisées dans des conditions de relief peu marqué (Hammerle et al., 2007 ; Wilson et al., 2002). On note notamment sur la figure 6.1 que les relations s'écartent peu de la droite 1 :1 et dans le tableau 6.4 que les défauts de clôture ne dépassent pas 23%. Ceci conforte globalement les corrections réalisées sur les données brutes afin de tenir compte des effets de relief. Il apparaît toutefois que le défaut de clôture du bilan d'énergie est beaucoup plus accentué sur la parcelle C que sur la parcelle A. Sur la parcelle C, les flux turbulents sont sous estimés de 18% et de 23% pour sol couvert et sol nu respectivement, tandis que sur la parcelle A ils sont de 9% et de 4%. Cela est à relier aux difficultés particulières de correction de l'effet relief sur la parcelle C, notamment en situation de vent ascendant. Pour toutes les parcelles étudiées, on notera toutefois que les écarts entre flux turbulents et énergie disponible proviennent probablement aussi, en sus d'effets de relief insuffisamment corrigés : i) d'une différence des zones de mesure des flux turbulents et de l'énergie disponible, ii) d'une sous-estimation des mesures de flux de chaleur dans le sol par absence de correction selon la profondeur du fait de la méconnaissance des profils de température.

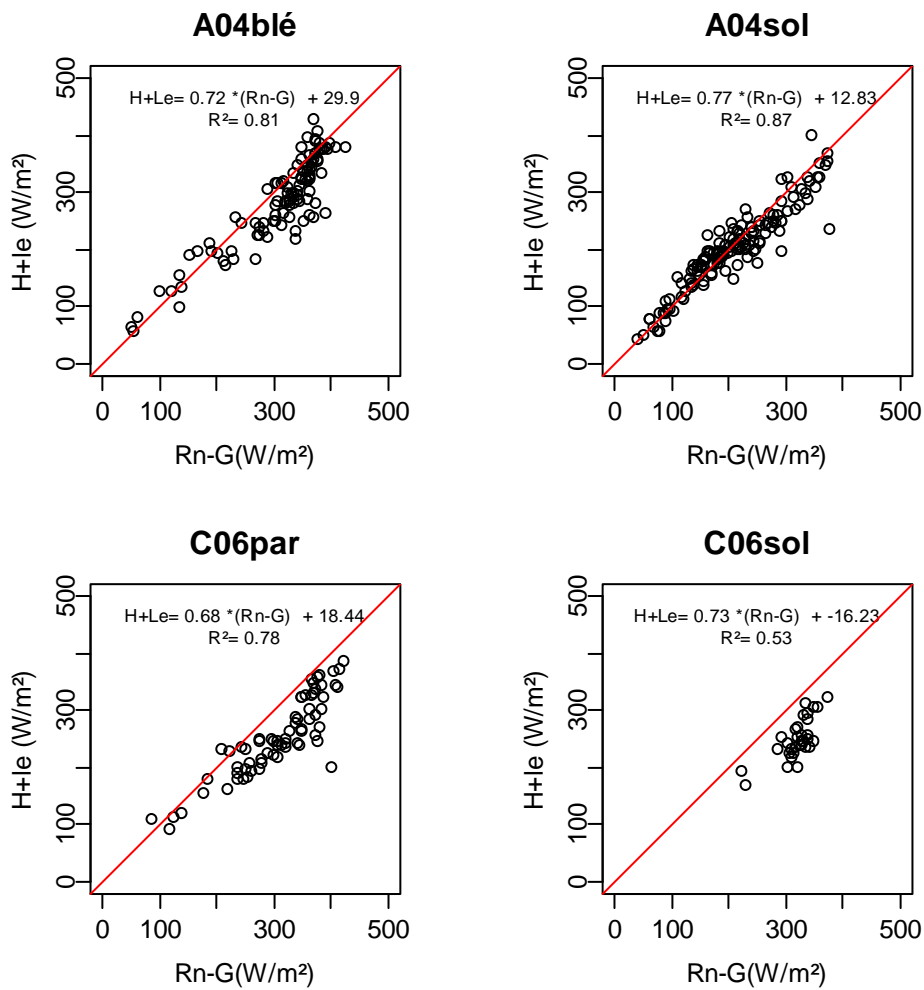


Figure 6.1. Relation entre les valeurs journalières estimées des flux turbulents, H+Le, et l'énergie disponible, Rn-G, pour les expérimentations A04blé, A04sol, C06par et C06sol.

Tableau 6.4. Caractéristiques statistiques des flux journaliers turbulents, H+LE, et d'énergie disponible, Rn-G) et de leurs écarts pour les expérimentations A04blé, A04sol, C06par et C06sol. n : le nombre de jours de calcul ; $(Rn-G)_m$: moyenne de Rn-G sur la période de l'expérimentation ($W.m^{-2}$) ; $(H+LE)_m$: moyenne de (H+LE) ($W.m^{-2}$), ME : écart moyen entre Rn-G et H+LE en ($W.m^{-2}$), RMSE : racine quadratique des écarts entre (Rn-G) et (H+LE) ($W.m^{-2}$), EBR: ratio entre $(H+LE)_m$ et $(Rn-G)_m$.

	A04blé	A04sol	C06par	C06sol
N	104	144	68	32
$(Rn-G)_m$	312	210	309	321
$(H+LE)_m$	283	202	252	248
ME	-28	-8	-56	-72
RMSE	46	30	67	76
EBR	0.91	0.96	0.82	0.77

1.2. Comparaison de l'ETR issue du bilan d'énergie avec celle déduite du bilan hydrique

Dans cette section, nous comparons les estimations de l'évapotranspiration réelle par covariance turbulente et bilan d'énergie à celles par bilan hydrique du sol. Comme toutes ces estimations présentent des incertitudes importantes, aucune ne peut réellement servir de référence pour évaluer la précision des autres approches. En effet, les approches micrométéorologiques sont basées sur des mesures atmosphériques caractérisées par une certaine intégration spatiale, et incluant de multiples difficultés en lien avec le relief (représentativité de la mesure, correction sur les flux, fermeture du bilan d'énergie). Et par ailleurs, la méthode du bilan hydrique est basée sur des mesures locales de surface et subsurface (humidité du sol entre la surface et une certaine profondeur, précipitation, ruissellement) sujettes à forte variabilité à l'échelle parcellaire, et repose sur des hypothèses souvent simplificatrices pour le calcul du bilan. Ainsi la confrontation qui est menée ci-après a surtout pour objectif de détecter la cohérence entre les résultats obtenus par les différentes approches. On notera que la comparaison n'intègre pas les estimations d'ETR par mesure directe de flux de chaleur latente. En effet le nombre de données manquantes à l'échelle des périodes de mesure du bilan hydrique était trop important pour que la comparaison soit pertinente.

1.2.1. Principes de calcul de l'ETR par bilan hydrique des sols

La détermination de l'ETR moyenne journalière par bilan hydrique est réalisée selon l'équation (6.1), valide entre deux dates successives de mesure des stocks hydriques du sol.

$$ETR_{BH} = (P - \Delta S - R) / \Delta t \quad \text{eq (6.1)}$$

avec

ETR_{BH} (mm/j); évapotranspiration journalière moyenne entre deux dates de mesure du stock hydrique du sol

ΔS (mm): différence du stock hydrique du sol à 1m de profondeur entre deux dates de mesures

P (mm) : pluie cumulée entre les deux dates de mesures du stock hydrique

R (mm) : ruissellement cumulé entre les deux dates de mesures du stock hydrique

$\Delta\tau$ (j): nombre de jour entre les deux dates considérées de mesure du stock hydrique

Il est à rappeler que le stock hydrique est mesuré sur 1 m de profondeur sur plusieurs points de chaque parcelle. Les données de pluie et de ruissellement nous ont été fournies par la base de donnée de l'ORE. On notera que dans cette procédure d'estimation de l'ETR par bilan hydrique nous négligeons plusieurs paramètres du bilan hydrique tels que remontées capillaires, écoulements latéraux, dont l'estimation nous était inaccessible. Le tableau 6.5 ci-après fournit des estimations de l'incertitude des valeurs estimées de l'ETR par Bilan hydrique. L'incertitude calculée ne prend en compte que l'erreur liée au calcul d'une moyenne surfacique par un nombre limité de points de mesure sur la surface d'estimation. Pour ce calcul il a été supposé l'indépendance des mesures ponctuelles entre elles, ce qui a permis d'utiliser l'estimateur classique de l'écart-type d'erreur d'une moyenne à partir d'un échantillon fini d'observations.

1.2.2. Analyse de la comparaison ETR_BH et ETR_BE

La figure 6.2 et le tableau 6.5 illustrent cette comparaison. On observe des divergences importantes entre ETR_BH et ETR_BE, avec des périodes comprenant des valeurs ETR_BH supérieures à celles de l'ETR_BE et d'autres où l'inverse peut être constaté. Par ailleurs, on observe sur la figure 6.2 une grande variabilité des valeurs journalières moyennes estimées par le bilan hydrique en comparaison de celles estimées par bilan d'énergie. Les premières varient approximativement entre -2 mm/j et 6 mm/j tandis que les secondes s'inscrivent dans un intervalle allant de près de 1 mm/j à $3,5$ mm/j.

La grande variabilité des valeurs estimées par bilan hydrique et l'estimation de valeurs négatives d'ETR suggère nettement la grande incertitude de cette approche telle qu'elle a pu être appliquée ici. En effet, l'absence d'observations directe du ruissellement sur la plupart des placettes, de flux profonds et d'identification des zones racinaires efficaces entraîne certainement la variabilité constatée. On observe notamment une très grande surestimation par bilan hydrique sur une période très pluvieuse du 18/01/05 au 17/05/05 sur la parcelle B avec avoine. L'hypothèse d'infiltration totale de l'eau de pluie et d'absence de flux de drainage est ainsi probablement la cause de la surestimation constatée. Réciproquement, sur la plupart des autres périodes d'estimation, c'est ETR_BE qui est supérieur à ETR_BH. La sous-estimation

éventuelle du bilan hydrique peut avoir pour origine principale l'absence de prise en compte de remontées capillaires des couches de sol profondes vers la zone racinaire ou une sous-estimation de la profondeur de la zone racinaire considérée égale à 1m en référence à la profondeur de prélèvement d'échantillons de sol par tarière.

Dans l'ensemble, en comparaison des mesures par bilan hydrique, les mesures par bilan d'énergie apparaissent plus cohérentes, car plus représentatives de valeurs d'ETR de sols nus ou de couverts modérément développés tels que ceux rencontrés sur le réseau de parcelles. On note toutefois une valeur élevée d'ETR estimée pour la parcelle en parcour du mois d'avril 2006 au mois de juin 2006 (C06par) et un écart particulièrement important avec la valeur du bilan hydrique. Dans ce cas précis, on ne peut exclure un biais significatif de la valeur ETR_BE. Cette hypothèse est d'autant plus probable que la valeur d'ETR estimée à partir de la mesure du flux de chaleur latente est de 101 mm, c'est à dire bien inférieure aux 161 mm du bilan d'énergie. Elle l'est aussi parce qu'on ne peut supposer l'existence de flux de remontées capillaires de plus de 100 mm, qui expliqueraient une telle sous-estimation de l'ETR_BH sur cette période de mesure.

Au total, la comparaison indique en premier une probable inadéquation de la méthode de bilan hydrique utilisée pour estimer l'ETR. Un effort expérimental plus conséquent serait nécessaire pour mieux cerner les termes non observés par notre protocole, ce qui aboutirait sans doute à un investissement expérimental plus conséquent que celui consenti pour la mise en place de mesures micrométéorologiques. En second on peut noter une cohérence plus grande des mesures micrométéorologiques, malgré les difficultés engendrées par les conditions de relief. Notamment, la variabilité des estimations par bilan d'énergie s'avère très modérée par rapport à celle du bilan hydrique, ce qui suggère une variance d'estimation plus réduite pour le bilan d'énergie.

Tableau 6.5. Comparaison des estimations d'ETR par bilan d'énergie et bilan hydrique. ETR_BH : évapotranspiration estimée par bilan hydrique, ETR_BE : évapotranspiration estimée par bilan d'énergie. Le cumul des pluies et l'évapotranspiration de référence sont indiqués en mm pour ces périodes.

Parcelles	Période	ETR_BH	ETR_BE	Pluie	ET0
A04blé	19/05-14/07	68 (23,7)	110	27	285
A04sol	14/07-29/10	91 (29,9)	110	70	427
B05avo	18/01-17/05	334 (34,6)	241	305	263
B05sol	17/05-01/06	50 (29,9)	34	0	74
A06fev	28/03-17/05	95 (24,6)	120	40	175
A06par	17/05-04/06	68 (21,8)	74	7	137
A06sol	14/06-05/07	24 (29,2)	40	0	139
C06par	19/04-14/06	33 (32,5)	161	46	235
C06sol	14/06-28/07	58 (16,3)	96	0	249
Cumuls		821	986	495	1984

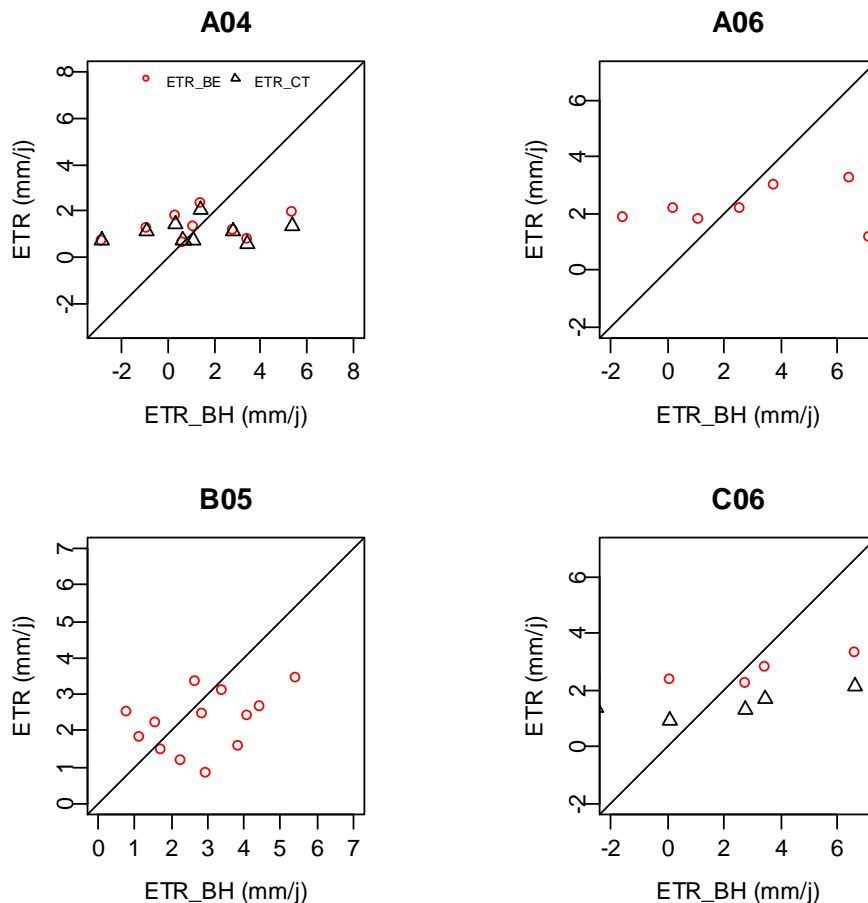


Figure 6.2. Comparaison de l'évapotranspiration estimée par le bilan hydrique (ETR_BH) à l'évapotranspiration calculée par bilan d'énergie (ETR_BE). Les évapotranspirations sont les moyennes journalières de la période entre deux mesures de stock hydrique (mm/j). Les quatre figures représentent les quatre campagnes expérimentales (A04, B05, A06 et C06), sur les parcelles A, B et C durant les années 2004, 2005 et 2006.

1.3. Evolution de l'ETR journalière durant la saison

Parmi les objectifs spécifiques annoncés, nous visons à estimer l'évolution des ETR journalières durant la saison de certaines cultures de la région. Suite aux reconstitutions des ETR estimées par bilan d'énergie avec la prise en compte du relief, il nous est possible à présent d'analyser les dynamiques d'ETR de différentes occupations du sol sur plusieurs mois consécutifs.

L'évolution de l'évapotranspiration journalière durant les campagnes expérimentales menées ainsi que celle de la demande climatique et du ratio ETR/ET_0 sont représentées dans les figures 6.2 et 6.3. Les valeurs mensuelles d'ETR et du ratio ETR/ET_0 sont indiquées dans les tableaux 6.6 et 6.7. Pour la parcelle C nous présentons les deux estimations micrométéorologiques : celles déduites de la mesure de chaleur latente par la méthode de covariance turbulente et corrigée pour l'effet du relief (ETR_CT), celles déduites par bilan d'énergie, où le flux de chaleur sensible est corrigé pour l'effet relief et complété pour avoir les données journalières (ETR_BE). La comparaison de l'ETR à la demande climatique via le rapport ETR/ET_0 permet de mieux visualiser les situations de stress.

Rappelons que la pluie est le seul apport en eau pour ces cultures et que les années 2004, 2005 et 2006 sont des années moyennes en termes de cumul pluviométrique avec toutefois une pluviométrie de janvier à mai plus faible en 2005 d'environ 100 mm par rapport aux deux années. Comme l'indique la figure 6.2 l' ET_0 des 3 années d'observation a varié d'environ 1 mm/j en hiver à 6 mm/j en été.

Nous commentons ci-après les évolutions observées pour chaque campagne de mesure avant d'aborder la synthèse des tendances générales.

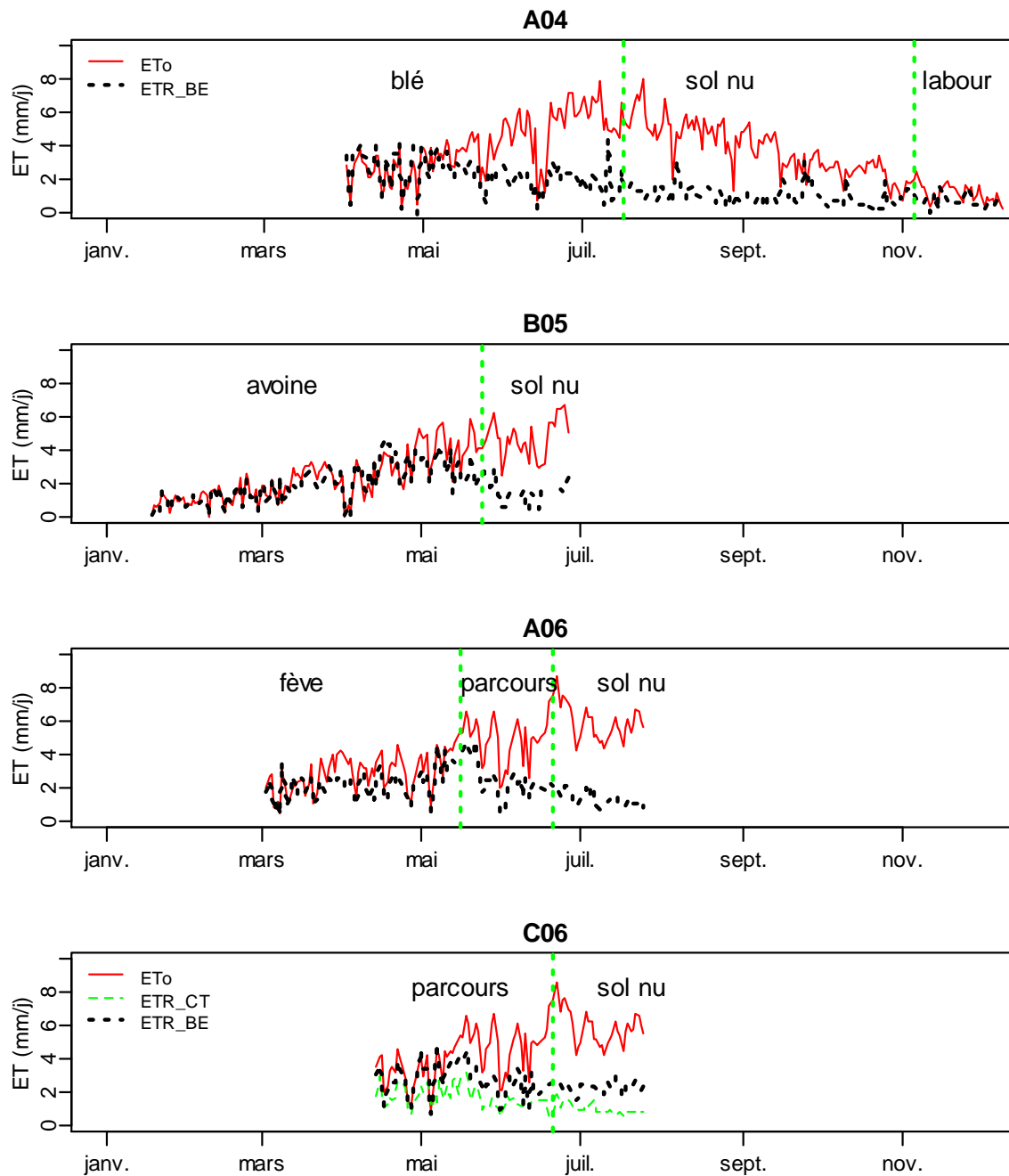


Figure 6.2. Evapotranspiration de référence (ET_0) et évapotranspiration réelle (ETR) sur parcelle A en 2004 (A04), sur parcelle B en 2005 (B05), sur parcelle A en 2006 (A06) et sur parcelle C en 2006 (C06). Pour chaque campagne, l'occupation du sol est indiquée et la séparation entre deux occupations est montrée par une ligne verticale en pointillée.

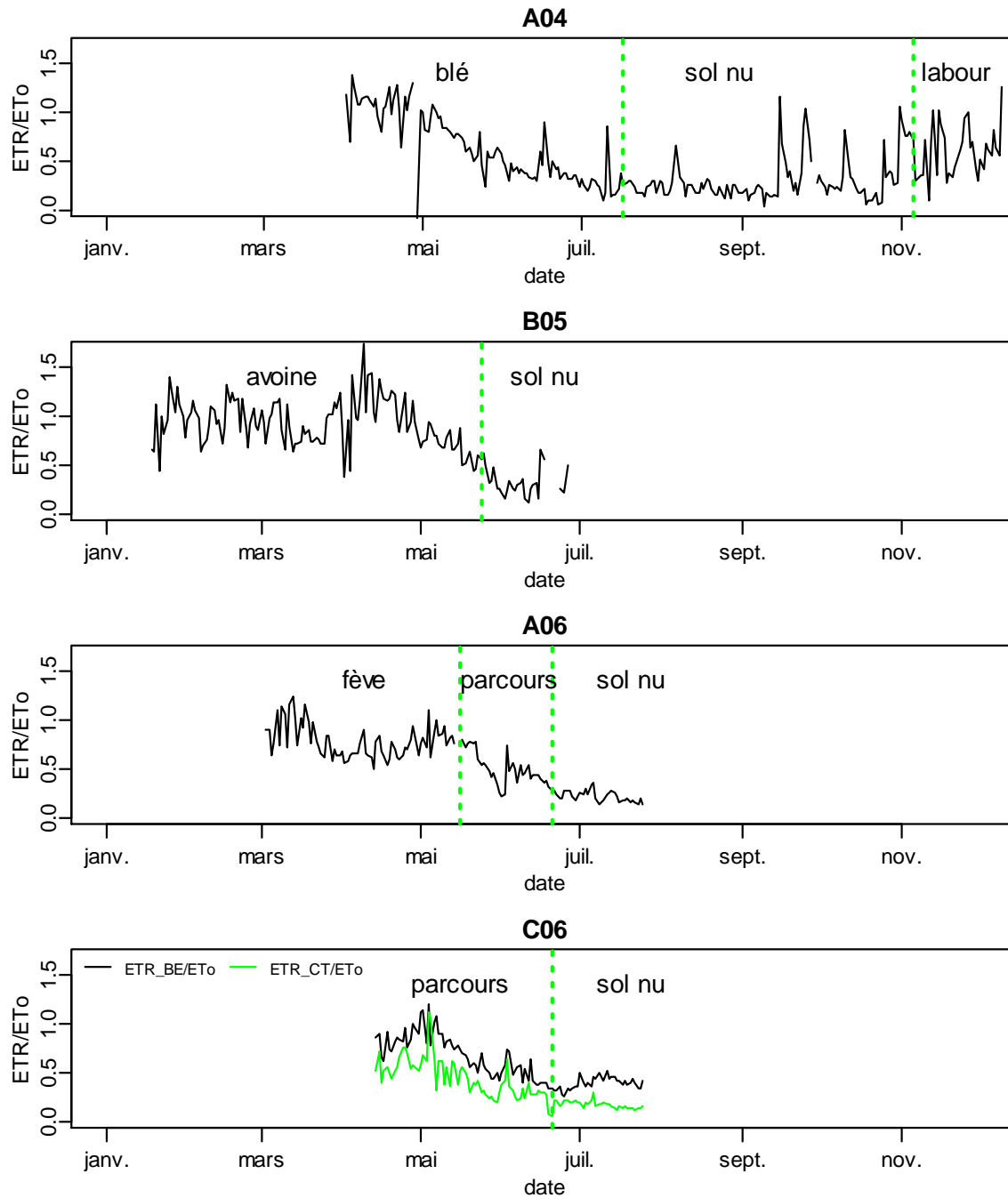


Figure 6.3. Evolution du ratio ETR/ET_0 sur parcelle A en 2004 (A04), sur parcelle B en 2005 (B05), sur parcelle A en 2006 (A06) et sur parcelle C en 2006 (C06). Pour chaque campagne, l'occupation du sol est indiquée et la séparation entre deux occupations est montrée par une ligne verticale en pointillée.

Tableau 6.6. Valeurs mensuelles observées de l'évapotranspiration sur parcelle A en 2004 (A04), sur parcelle B en 2005 (B05), sur parcelle A en 2006 (A06) et sur parcelle C en 2006 (C06).

	A2004	B2005	A2006	C2006	C2006
	ETR_BE	ETR_BE	ETR_BE	ETR_BE	ETR_CT
février		32			
mars		62	58		
avril	74	84	64		
mai	81	83	89	97	61
juin	60		57	68	40
juillet	47		30	59	24
août	36				
septembre	31				
octobre	20				
novembre	25				

Tableau 6.7. Valeurs mensuelles observées du rapport ETR/ET₀ sur parcelle A en 2004 (A04), sur parcelle B en 2005 (B05), sur parcelle A en 2006 (A06) et sur parcelle C en 2006 (C06).

	A2004	B2005	A2006	C2006	C2006
	ETR_BE/ET ₀	ETR_BE/ET ₀	ETR_BE/ET ₀	ETR_BE/ET ₀	ETR_CT/ET ₀
février		0,95			
mars		0,88	0,83		
avril	1,07	1,09	0,69		
mai	0,73	0,61	0,64	0,71	0,44
juin	0,39		0,35	0,41	0,25
juillet	0,26		0,22	0,42	0,17
août	0,24				
septembre	0,29				
octobre	0,27				
novembre	0,60				

1.3.1. Parcelle A en 2004 : blé dur puis sol nu

Les mesures sur la parcelle A en 2004 (A04) ont débuté au printemps sur une culture de blé dur en pleine croissance végétative et se sont poursuivies jusqu'à l'automne suite au labour. En pleine période de développement végétatif entre le 1 avril et le 15 mai, l'ETR du blé est en moyenne de 2.1 mm/j variant entre 0.5 et 4 mm/j selon les conditions climatiques. Une diminution progressive de l'ETR est enregistrée par la suite marquant la période de dessèchement du sol. Après la récolte, lorsque le sol est couvert de chaume, l'ETR est en moyenne de 0.7 mm/j, puis une légère ré-augmentation survient lors des pluies automnales.

On note également que l'ETR suit bien les principales variations journalières d' ET_0 à l'échelle infra-mensuelle.

Le rapport ETR/ET_0 se rapproche de 1 durant la période de plein développement de la culture et chute progressivement entre mi-mai et juillet (récolte à mi juillet) pour se stabiliser à 0.2 après la récolte. Durant l'automne suite aux pluies et au labour du sol, le rapport ETR/ET_0 croît et atteint 0.6. Il est à noter que la diminution du rapport ETR/ET_0 en fin de printemps se produit dès que l' ET_0 atteint 4 mm/j.

1.3.2. Parcelle B en 2005 : avoine puis sol nu

Pour la parcelle B en 2005, les mesures sont réalisées à partir du stade levée de la culture d'avoine à l'après récolte. De mi-janvier à mi-avril l'ETR a suivi la progression de l' ET_0 et a été du même ordre de grandeur, à savoir de l'ordre de 1 mm/j de mi-janvier à mi-février pour atteindre mi-avril 3.3 mm/j. Ensuite de mi-avril à mi-mai l'ETR s'est stabilisée à la valeur moyenne de 3,3 mm/j mais avec une décroissance du ratio ETR/ET_0 à partir de début mai liée à la poursuite de l'augmentation de l' ET_0 au-delà de 4 mm/j. Ensuite, du fait du dessèchement du sol qui s'installe, une décroissance progressive de l'ETR et du ratio ETR/ET_0 est enregistrée jusqu'à la récolte (en vert), suivie d'une stabilisation de l'ETR et de l' ETR/ET_0 en juin-juillet autour de 1 mm/j et de 0.2, respectivement.

1.3.3. Parcelle A en 2006 : fève puis parcours et sol nu

Le suivi de la culture de fève sur la parcelle A a débuté en mars 2006 lorsque la culture avait déjà atteint son développement maximal, qui correspond toutefois à une couverture végétale limitée. On observe que de mars à mi-mai l'ETR est maximale, approximativement égal à l' ET_0 et montre une augmentation continue. Après la récolte qui a eu lieu mi-mai, la végétation résiduelle a servi de parcours. Durant une courte période l'ETR a poursuivi son augmentation. Comme lors des campagnes décrites précédemment, elle a ensuite diminué de manière constante en raison de l'installation de la sécheresse jusqu'à atteindre un niveau minimal pour la situation de sol nu, estimé à 1 mm/j d'ETR et à 0,2 de ratio en moyenne à mi-juillet.

1.3.4. Parcelle C en 2006 : parcours puis sol nu

Sur la parcelle C en 2006, le sol est occupé par une jachère non labourée utilisée comme parcours. Sur cette parcelle, une forte hétérogénéité de la végétation a été observée. L'ETR estimée à partir des mesures de chaleur latente est assez différente de celle estimée par bilan d'énergie. C'est pourquoi sur les figures 6.3 et 6.4 nous illustrons les deux ETR estimées, dont on peut remarquer que leurs évolutions sont parallèles mais décalées d'environ 1 mm/j, ce qui est considérable à l'échelle de la saison et par rapport à la moyenne. Pour la période occupée par la végétation l'ETR a été de 2.8 à 1.7 mm/j pour ETR_BE et ETR_CT, puis chute en période de sol nu à 2.3 à 1.1 mm/j respectivement. On note que le rapport ETR_BE/ET_0 est proche de 1 d'avril à mai. Ceci est proche des observations réalisées pour les autres couverts suivis sur la même période. Par contre en période de sol nu, ce rapport reste à 0.3-0.4, ce qui semble élevé. Le rapport ETR_CT montre au contraire une valeur faible en première période et une valeur plus en accord avec les autres mesures réalisées en période de sol nu. Il est probable que l'ETR_BE surestime donc l'ETR sur la parcelle C en période de sol nu. Ceci peut sans doute être expliqué par une sous-estimation du flux de chaleur dans le sol, qui est particulièrement nette en sol nu.

1.3.5. Synthèse

En définitive, la consommation en eau des différentes cultures pluviales observées sur le bassin de Kamech montre des similitudes fortes, malgré la grande différence des espèces considérées. On peut distinguer quatre phases du printemps à l'été.

Dans une première phase, l'ETR dépasse rarement les 3 mm/jour, atteignant les 4 mm en pleine période de développement végétatif. Le ratio ETR/ET_0 est égal à 1, ce qui indique une bonne satisfaction des besoins en eaux des cultures. Il faut toutefois rappeler que l'ensemble des cultures montre un développement modéré avec des indices foliaires généralement proches de 1 au maximum de leur développement. Ainsi jusqu'au 15 mai environ pour les années étudiées, les pluies et la réserve en eau du sol assurent l'alimentation de la végétation. La limite de cette première phase semble intervenir lorsque l' ET_0 dépasse un seuil approximatif de 4 mm/j.

La seconde phase correspond à une diminution du rapport ETR/ET_0 . Elle correspond également à une diminution de la pluviométrie et indique l'installation de la sécheresse. Cette phase est rapide, de l'ordre du mois, mais de durée apparemment plus variable que la précédente. Elle est allée de début mai ou mi-mai jusqu'à mi-juin ou fin juin suivant la culture et l'année considérée. Elle est plus difficile à délimiter car la transition avec la phase suivante est très progressive.

La troisième phase correspond à un flux d'évaporation quasi stabilisé de sol nu, qui démarre à 1 mm/j dès fin juin et se poursuit jusqu'aux premières pluies d'automne.

La dernière phase, uniquement observée en 2004, représente le régime d'automne et d'hiver avec une ET_0 et une ETR faibles, mais un ratio ETR/ET_0 en augmentation par rapport à la phase estivale, proche de 0,5.

Les quatre phases observées sont bien évidemment classiques dans ce contexte Méditerranéen semi-aride. Le fait le plus remarquable est la grande similitude des niveaux d'ETR mesurées et de leurs dynamiques temporelles entre des couverts très différents, marquant ainsi sans doute la prépondérance du contrôle climatique qui s'impose à tous ces couverts au-delà de leurs différences écophysologiques.

2. Estimation de l'évolution de l'ETR journalière pour un ensemble de parcelles

L'ETR journalière d'un ensemble de parcelles du bassin versant est estimée d'une part par les mesures intégrées au pas de la demi-heure par le biais de la scintillométrie et d'autre part par des mesures locales de l'humidité du sol sur un échantillon de parcelles appartenant au footprint du scintillomètre. L'évolution de l'ETR de cette zone est étudiée en comparant ces deux techniques de mesures. Nous débuterons par l'estimation du flux de chaleur latente journalière à partir des mesures scintillométriques et comparerons les flux estimés avec les mesures par covariances turbulentes locales et par bilan hydrique.

2.1. Estimation du flux de chaleur latente à l'échelle du transect scintillométrique et comparaison avec flux mesurés par covariances turbulentes

L'ETR estimée par scintillométrie est déduite de l'équation du bilan d'énergie, la chaleur sensible est celle calculée à partir des mesures par le scintillomètre, le rayonnement net et le flux de chaleur sont ceux des parcelles A et C selon la direction du vent. Dans notre situation, terrain à topographie complexe, les mesures de flux par scintillométrie ont montré des flux de chaleur sensible plus importants que ceux des mesures locales par covariance turbulente (§ 2.2.3 du chapitre 5) ce qui aura comme répercussion des ETR sous-estimées.

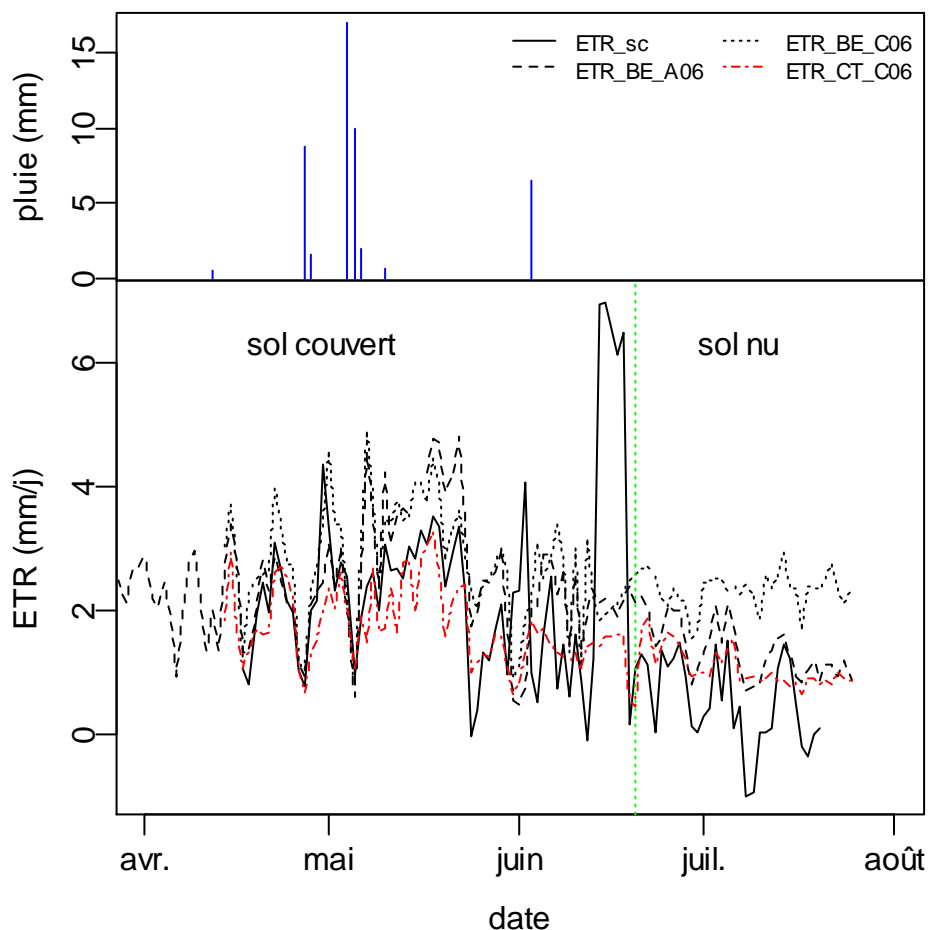


Figure 6.4. Evolution des évapotranspirations journalières déduites des mesures scintillométriques (ETR_sc en mm) et des évapotranspirations journalières estimées sur les parcelles A et C (ETR_BE_A06, ETR_BE_C06 et ETR_CT_C06).

L'évolution de l'ETR journalière estimée par scintillométrie (ETR_sc) est représentée dans les figures 6.4 et 6.5 pour la période de sol nu et celle de sol couvert respectivement. Sur les mêmes figures sont représentées les évolutions journalières de l'ETR estimées par bilan d'énergie sur la parcelle A et celle sur la parcelle C ainsi que l'ETR estimée par mesure directe du flux de chaleur latente par covariance turbulente sur C. De ces figures, nous confirmons que, comme attendu, l'ETR_sc estimée est plus faible que celle des mesures locales par bilan d'énergie, ce qui engendre des estimations erronées d'ETR, allant jusqu'à être négatives en plein été, période de très faible évaporation. En fait, seules les mesures locales de chaleur latente par covariances turbulentes semblent proches de celles par scintillométrie.

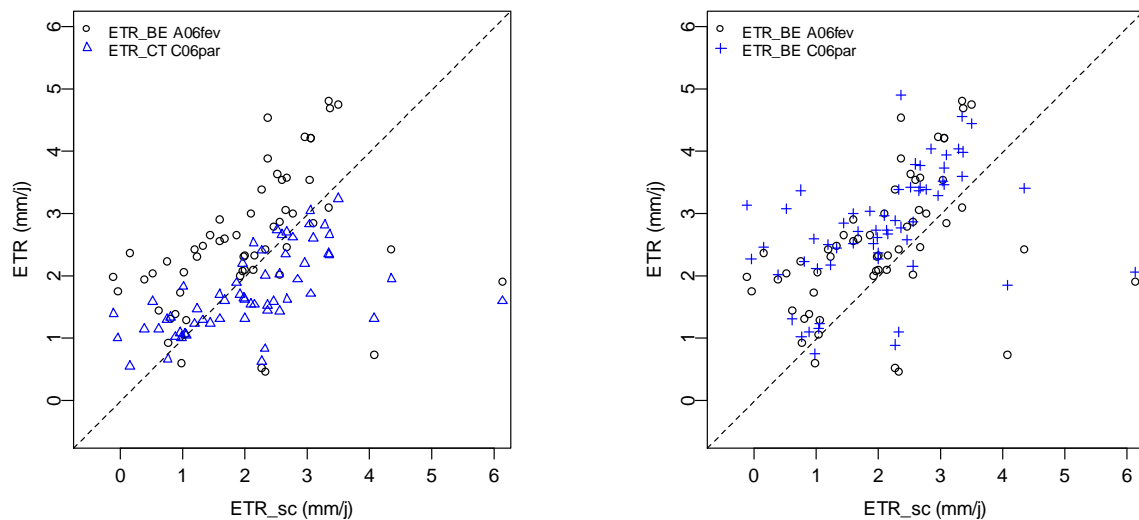


Figure 6.5. Comparaison des valeurs estimées d'évapotranspirations journalières par scintillométriques (ETR_sc en mm) et par covariances turbulentes sur les parcelles A et C (ETR_BE_A06, ETR_BE_C06 et ETR_CT_C06).

Tableau 6.8. Comparaison des ETR moyennes journalières entre les mesures scintillométriques sur le transect et les mesures de covariance turbulentes sur les parcelles A et C.

			ETR_BE	ETR_CT	Pluie	ET ₀
végétation	17/04-19/06	A	2,35		0,70	4,05
		C	2,65	1,67		
		transect	2,29			
sol nu	20/06-20/07	A	1,47		0,00	6,15
		C	2,39	1,12		
		transect	0,54			

2.2. Comparaison avec l'ETR déduite par le bilan hydrique

L'ETR scintillométrique est comparée à celle estimée par bilan hydrique sur l'ensemble de parcelles représentatives de la zone d'influence supposée du transect scintillométrique. Cette comparaison est réalisée en distinguant deux périodes au sein de la période d'observation : la période de présence majoritaire de végétation entre le 15 avril et le 14 juin et la période de sol nu majoritaire entre 14 juin et le 5 juillet. Durant ces deux périodes l'ETR journalière moyenne estimée par scintillométrie est de 2.1 et 0.9 mm/j, respectivement pour sol couvert et sol nu, tandis qu'elle est de 1.6 et 1.1 mm/j pour l'ETR bilan hydrique. On observe ainsi des différences de l'ordre de 25% en période de végétation et de 20% en période de sol nu. Elles sont à attribuer aux incertitudes des deux méthodes et notamment à celle importante des mesures de bilan hydrique. Guyot et al. (2009) trouvent des résultats semblables en termes de comparaison des estimations par scintillométrie et par bilan hydrique.

Tableau 6.9. Valeurs journalières moyennes d'évapotranspiration réelle estimée par bilan hydrique sur les parcelles représentatives du footprint du scintillomètre (ETR_BH) pour les périodes i) avec végétation (19 avril au 14 juin 2006) et ii) en sol nu ((15 juin au 05 juillet). L'Ecart-type est représenté par la somme des deux écart-types de chacune des mesures du stock hydrique divisée par le nombre de jour entre les deux mesures. Le coefficient de variation est indiqué par CV.

	ETR_BH (mm/j)		Ecart-type d'erreur (mm/j)		CV	
	Période		Période		Période	
	avec végétation	avec sol nu	avec végétation	avec sol nu	avec végétation	avec sol nu
A06fev	2.8	1.1	1.07	2.77	38%	245%
C06par	0.6	2.6	1.36	4.25	230%	162%
D06org	1.2	-1.1	0.92	2.97	76%	-267%
G06plg	1.3	1.8	0.85	2.99	67%	169%
H06blé	2.4	2.7	1.03	2.74	42%	101%
Ia06phb	1.4	1.2	1.79	4.11	133%	335%
L06fev	1.4	1.6	0.86	2.18	60%	135%
M06blé	0.7	0.2	1.80	4.30	267%	1975%
Moyenne Parcelles	1.6	1.1	1.21	3.29	76%	305%

Au total, la comparaison entre mesures d'évapotranspiration de natures très différentes illustre fortement l'importance des différences d'estimation entre méthodes. Elle ne permet pas en

tant que tel de conclure sur la ou les méthodes pertinentes. Elle suggère toutefois de grosses limitations à la méthode d'estimation par bilan hydrique à moins de consentir à un effort expérimental qui devrait être très conséquent pour établir des flux surfaciques à l'échelle de parcelles ou d'un bassin. Elle fait aussi suspecter un biais potentiel si l'estimation est menée à partir d'une mesure de la chaleur sensible par scintillométrie. Elle confirme toutefois, par comparaison avec les méthodes précédentes, la cohérence et par là même la faisabilité des mesures par covariances turbulentes en situation de relief.

3. Conclusion

La reconstitution des données de 30 mn par des relations linéaires entre les flux corrigés et ceux non corrigés a été réalisée. L'analyse du bilan d'énergie avec les flux mesurés et ceux reconstitués est très similaire ce qui a permis de calculer les flux journaliers.

L'analyse du bilan d'énergie journalier a montré une clôture plus importante sur la parcelle A que sur la parcelle C. Les flux turbulents sont plus petits que l'énergie disponible de 4 à 23%. En calculant l'ETR comme le reste de $R_n - G - H$ toute l'erreur de la non clôture est introduite dans l'ETR ce qui peut montrer des surestimations tel que le cas de la parcelle C. En effet, l'analyse de l'évolution de l'ETR journalière sur cette parcelle et la comparaison avec l'évapotranspiration de référence a révélé que l'ETR estimée par bilan d'énergie est grande par rapport à une période de sol nu. Ce qui laisse à penser que la sous estimation du flux de chaleur dans le sol dans cette période peut être considérable.

L'estimation de l'ETR journalière par bilan hydrique à travers des mesures de stock hydrique dans le sol montre des erreurs assez importantes dues à l'hétérogénéité dans la parcelle. Cette erreur de mesure variant à moins de 30% pour le stock ce qui est acceptable devient importante en calculant une variation du stock particulièrement pour des courtes périodes. La non-estimation de l'infiltration est visible surtout durant les périodes de pluies. La différence entre ETR estimée par mesure selon méthode de covariance turbulente et celle déduite du bilan d'énergie sur la saison est moins variable que celle avec l'ETR estimée par bilan hydrique sur une zone de 1 m de profondeur. En récapitulant la variation de l'ETR journalière estimée par bilan hydrique, en négligeant l'infiltration et la zone racinaire utilisée, est assez

importante et montre que les erreurs sont plus importantes que celles d'estimation de l'ETR par covariance turbulente avec problème de pente. L'estimation de l'ETR des espaces hétérogènes avec des mesures intégrées est plus fiable qu'avec des mesures locales telles que le bilan hydrique.

L'ETR journalière des cultures suivies (blé, avoine, fève et végétation naturelle utilisée comme parcours) a montré une gamme de grandeur similaire. L'ETR dépasse rarement les 3 mm/j et peut atteindre les 4 mm/j, elle est très liée à la pluie et à la demande climatique. En effet, dès que l' ET_0 dépasse les 4 mm/j la chute du rapport ETR/ ET_0 commence, la baisse de ce rapport se fait sur une période courte. La présence de faibles pluies durant cette période augmente ce rapport momentanément, pour profiter plus de la culture une irrigation d'appoint durant cette période pourrait être bénéfique. Une seule période est étudiée durant l'automne A04 (labour), elle a montré de grandes évaporations durant cette période. Ces évaporations peuvent être considérées comme des pertes en eau pour une région qui en manque. Il est important d'essayer de profiter de ces pluies.

L'estimation de l'ETR à l'échelle de l'ensemble des parcelles sur une saison semble peu différente entre les mesures scintillométriques et celles déterminées par bilan hydrique bien que les critiques et les erreurs d'estimation des deux méthodes sont nombreuses qu'elles soient dues au relief, à l'hétérogénéité des parcelles de point de vu occupation et nature du sol, aux conditions sèches.