

Quantification de l'évapotranspiration réelle à l'échelle d'un bassin versant agro-pastoral du semi-aride

Rim Zitouna Chebbi^{1*}, Laurent Prévot², Frederic Jacob³, Marc Voltz²

¹ LR VENC, INRGREF, rue Hedy Karray, 2080, Ariana, Tunisia.

² UMR LISAH, INRA, campus Agro.M, bât. 24, 2 place Viala, F-34060 Montpellier cedex 2, France.

³ UMR LISAH, IRD, INRGREF, rue Hedy Karray, 2080, Ariana, Tunisia.

*Corresponding auteur : rimzitouna@gmail.com

RESUME

Dans la région méditerranéenne, la connaissance des besoins en eau des cultures est primordiale, pour une gestion rationnelle des ressources en eau. L'évapotranspiration réelle (ETR) peut être estimée par plusieurs méthodes de mesures ou de modélisation. La méthode des covariances turbulentes (EC) a l'avantage de permettre la mesure directe même si des difficultés d'ordre méthodologiques sont rencontrées dans les milieux hétérogènes et collinaires. Dans l'objectif d'évaluer la variabilité de fonctionnement de la végétation d'un bassin versant durant une saison, des chroniques d'ETR mesurées pour différentes occupations de sol sont comparées.

Le bassin versant « Kamech » site de l'ORE OMERE en Tunisie, caractérisé par un milieu hétérogène, a été choisi pour mettre en place des expérimentations de suivie de l'ETR depuis 2004. Des mesures atmosphériques, les différents termes du bilan d'énergie ont été réalisées, les flux turbulents sont mesurés par EC.

L'expérimentation a permis d'évaluer la technique de mesure dans les conditions de relief et la méthodologie de reconstitution des flux à l'échelle d'une saison à partir de mesures discontinues dans le temps. Les comparaisons des chroniques d'ETR de céréales, de légumineuses et de parcours ont montré la dynamique des échanges surface-atmosphère d'un bassin versant collinaire du semi aride.

Mots-clés: Bassin versant agro-pastoral, covariances turbulentes, évapotranspiration réelle, relief collinaire, semi-aride.

SUMMARY

In the Mediterranean region, the knowledge of the crop water requirement is necessary to rational management of water. Actual evapotranspiration (ETa) could be estimated by several methods of measurements or modeling. The Eddy Covariance (EC) method has the advantage to allow a direct measurement even if methodological difficulties were encountered in heterogeneous and hilly areas. In the objective to evaluate the variability of vegetation functioning at a watershed area during a season, variations of measured ETa for several land use were compared. The "Kamech" watershed, site of ORE OMEE in Tunisia, characterized by its heterogeneity were chosen to conduct experimentations to follow ETa until 2004. The different terms of the energy balance were measured; turbulent fluxes were measured by EC.

The experiment has allowed the evaluation of the measurement technic in hilly condition and the methodology of flux gap filling at seasonal scale from discontinuous measurement. The comparison of ETa variations of cereals, legums and pasture show the dynamic of the surface-atmosphere exchange at the hilly watershed of the semi-arid.

1. INTRODUCTION

Dans la région méditerranéenne, la connaissance des besoins en eau des cultures est primordiale, pour une gestion rationnelle des ressources en eau. En effet, l'évapotranspiration réelle (ETR) est à la fois un terme majeur du bilan hydrologique et un déterminant important de la production agricole. Son estimation se fait par le par plusieurs méthodes de mesures ou par le bisais de la modélisation, sous hypothèse de topographie plane. Pour tenir compte de l'inclinaison topographique que l'on rencontre en milieux collinaires, très fréquents dans les zones agricoles méditerranéennes, il est primordial de caractériser les processus dans de telles conditions. La méthode des covariances turbulentes (EC) a l'avantage de permettre la mesure directe avec une intégration spatiale allant de un à plusieurs hectares et de permettre de caractériser la géométrie de l'écoulement de l'air. Cependant, des difficultés d'ordre

méthodologiques sont rencontrées dans les milieux hétérogènes et collinaires (Geissbühler et al 2000, Rana et al 2007, Aubinet et al 2012).

Afin d'évaluer la variabilité de fonctionnement de la végétation d'un bassin versant collinaire nous proposons d'abord d'analyser l'influence de la topographie et sa prise en compte dans l'estimation des flux de surface à partir de mesures par EC ensuite d'établir chroniques d'ETR journalières mesurées pour différentes occupations de sol.

2. MATERIEL ET METHODES

2.1. Site d'étude

Le bassin versant (BV) « Kamech » se trouve au Nord Est de la Tunisie, dans la péninsule du Cap Bon, c'est un petit BV agricole de 2.5 km². Depuis 2002, il est un site expérimental de l'Observatoire de Recherche en Environnement : Observatoire Méditerranéen de l'Environnement Rural et de l'Eau (OMERE), <http://www.umr-lisah.fr/omere>. Des aménagements et dispositifs permettant le suivi du ruissellement et de l'érosion y sont installés, ainsi qu'un réseau de piézomètres pour le suivi de la nappe superficielle et des stations de mesures de l'évapotranspiration. La figure 1, montre le modèle numérique de terrain (MNT) du BV (Raclot et Albergel 2006) ainsi que le parcellaire. Les altitudes varient entre 80 et 200 m et les pentes varient en magnitude de 0 à 30 % et en direction. La topographie du BV montre une dissymétrie entre les deux rives, ceci influence le réseau hydrographique et le parcellaire (Mekki, 2003) ainsi que les écoulements de l'air et les flux turbulents (Zitouna-Chebbi et al, 2012). La plupart des parcelles sont cultivées suivant des rotations intégrant majoritairement des céréales (blé, avoine ou orge), mais aussi des légumineuses (fève ou pois chiche) afin de ne pas appauvrir le sol Ben Mechlia et al. (1998), Mekki et al. (2006). Sont utilisées comme parcours, les terrains à très fortes pentes occupés par de la végétation naturelle et les parcelles emblavées en céréales ou en légumineuses.

2.2. Dispositif expérimental

2.2.1. Protocole expérimentale

Deux parcelles d'études (A et C) situées sur les 2 rives du BV ont été étudiées (Figure 1). La parcelle « A » située sur la rive droite, est de taille moyenne (1.2 ha) et de pente assez homogène, elle a été suivie en 2004 et en 2006. En 2004, le suivi a duré du mois d'avril au mois de décembre et a permis de mesurer les quatre termes du bilan d'énergie. Les observations ont démarré en pleine croissance d'une culture de blé dur et se sont poursuivies à sa récolte puis à la période de sur le sol nu, se terminant fin décembre après labour. En 2006, trois périodes d'observation furent distinguées. La première a démarré en février lorsqu'une culture de fève était au stade floraison à la récolte. La seconde correspond à une reprise de végétation spontanée et à la mise en parcours de la parcelle après la récolte de la fève. Enfin, la troisième période est une situation de sol nu subissant une phase de dessèchement prononcé. La parcelle « C » a été choisie en 2006 pour installer une deuxième station de flux. Ce choix fut motivé par le fait qu'en 2006, la parcelle C était la plus grande parcelle de végétation naturelle utilisée comme parcours sur le BV, tout en présentant le relief le moins accidenté pour les parcelles de parcours. Il est à signaler qu'il ne s'agissait pas d'une parcelle en parcours permanent mais d'une parcelle en jachère non labourée. En effet, le choix d'une parcelle en parcours permanent ne fut pas possible, au vu de la taille et de la géométrie de ces parcelles. Les périodes d'observations correspondaient à la phase de végétation active et à la phase de végétation sénescence. La station météorologique (M) située sur la rive gauche à l'aval du BV a été suivie durant les années expérimentales.

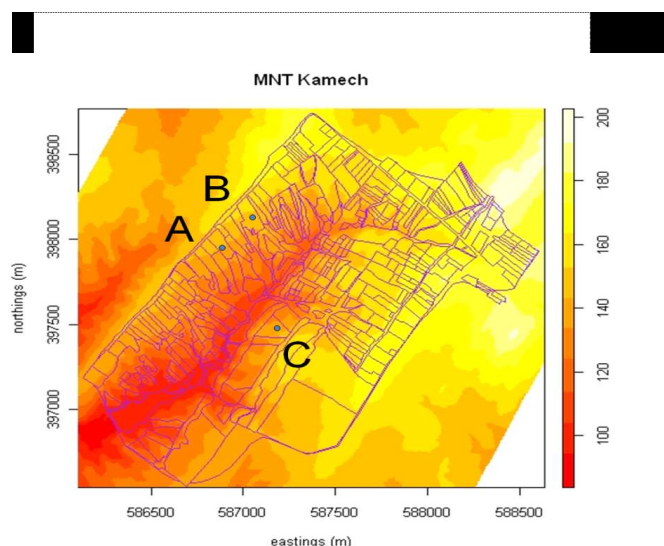


Figure 1. Représentation du MNT, du parcellaire du BV Kamech, de la localisation des parcelles expérimentales (A et C) et de la station météorologique (M).

2.2.2. Instruments de mesures et acquisition des données

Deux stations d'Eddy covariances ont été utilisées pour le suivi des quatre composantes du bilan d'énergie. Sur chaque station un anémomètre sonique à trois dimensions fut installé de type CSAT3 (Campbell Scientific Inc., USA) ou Young-81000V (R.M. Young, USA) pour les mesures des trois vitesses du vent vent horizontal (u), horizontal (v) et vertical (w) et de la température de l'air (T_s) ; un pyrromètre différentiel à thermopie type NR-lite (Kipp & Zonen, NL) pour la mesure du rayonnement net (R_n) et trois plaquettes de flux dans le sol type HFP01 (Hukseflux, NL) pour la mesure du flux de chaleur dans le sol (G), un hygromètre optique type KH20 (Campbell Scientific Inc., USA) couplé à un thermo hygromètre HMP45C (Vaisala, Finland), il permet la mesure de l'humidité de l'air (q). L'acquisition des données se fait à l'aide d'une centrale d'acquisition type CR23X (Campbell Scientific Inc., USA) et d'un ordinateur. En effet, l'acquisition des données des capteurs lents se fait toutes les secondes, une moyenne de 30 mn est stockée dans la centrale. Cependant, les mesures réalisées par les capteurs rapides soit l'anémomètre sonique et l'hygromètre optique se font à une fréquence de 10Hz et sont stockées en deux modes : les données brutes dans l'ordinateurs et les moyennes des 30 mn dans la centrale. L'alimentation électrique du système se fait via un panneau solaire et une batterie. Pour les différents jeux de données. L'anémomètre sonique et d'hygromètre optiques sont installés à 2 m de hauteurs par rapport au sol, le pyrromètre à 1.5 m et les plaquettes de flux sont enterrées entre 0.02 et 0.1 m de profondeur.

Sur la station météorologique, des mesures des températures de l'air et de l'humidité sont acquises à l'aide d'un HMP45C (Vaisala, Finland), la vitesse du vent est acquise à l'aide d'anémomètre à impulsion type A100R (Vector instruments, Rhyl, UK) et la direction du vent à l'aide d'une girouette potentiométrique W200P (Vector instruments, Rhyl, UK). Le rayonnement global est mesuré à l'aide d'un pyranomètre SP1110 (Skye, Powys, UK). Les mesures sont acquises à 2 m de hauteur sauf le rayonnement global, Dans une optique d'accessibilité pour le suivi de l'horizontalité, le pyranomètre est installé à 1.5 m au dessus du sol les données acquise toutes les secondes sont moyennées et enregistrées au pas de 30 mn dans une centrale CR10X type Campbell scientific (Logan, USA).

2.3. Estimation des flux horaires

2.3.1. Méthode des covariances turbulentes

Les mesures de la vitesse du vent verticale ainsi que la température de l'air et l'humidité à haute fréquence permettent de calculer les flux convectifs. En effet, le flux de chaleur sensible H s'exprime comme la covariance entre la vitesse verticale du vent w et la température de l'air T , multipliée par la masse volumique de l'air λ et sa chaleur spécifique à pression constante C_p , soit $H = \rho C_p \overline{w'T'}$. Le

flux de chaleur latente λE s'exprime comme la covariance entre la vitesse verticale du vent w et l'humidité spécifique de l'air q , multipliée par la masse volumique de l'air ρ et la chaleur latente de vaporisation L , soit $\lambda E = \rho L \overline{w'q'}$. Les covariances sont calculées à l'aide des mesures acquises et enregistrées à haute fréquence (10Hz) pour des périodes horaires 30 mn. Plusieurs logiciels proposent de faire ce traitement. Dans cette étude, les flux turbulents ont été calculés à l'aide du logiciel ECPACK library version 2.5.22 (<http://www.met.wau.nl/projects/jep/report/ecrump/>, van Dijk et al., 2004). Les corrections proposées par ECPack ont été appliquées. La correction de rotation par la méthode planar fit Wilczak et al. (2001), a été sélectionnée. Afin de s'adapter au milieu collinaire un traitement des flux selon la direction du vent et le sens de la pente a été réalisé (Zitouna-Chebbi et al., 2012). Un contrôle qualité sur les données de flux selon Foken et Wishura (1996) a été réalisé. Ces tests ont permis d'abord d'éliminer les flux de mauvaises qualités mais aussi de s'assurer de la faisabilité de la technique de mesure sur le milieu collinaire (Zitouna-Chebbi, 2009).

2.3.2. Rayonnement net et flux de chaleur dans le sol

Les mesures de rayonnement net (R_n) moyennées et collectées à un intervalle de temps de 30 mn sont corrigées pour l'effet pente et aspect selon la méthode de Holst et al (2005). Les détails de l'application de cette méthode dans ces conditions sont décrits dans Zitouna-Chebbi et al (2012). Les mesures de trois répétitions du flux de chaleurs dans le sol (G) sont moyennées au pas de 30 mn. La correction du stock de chaleur entre la mesure et la surface n'a pas été effectuée.

2.4. Estimation de l'évapotranspiration réelle journalière

L'ETR journalière peut être estimée soit à partir des mesures de 30 mn corrigées, soit par le bilan d'énergie ($\lambda E = R_n - G - H$). Pour les deux cas une série de données horaire complète est nécessaire. Or, le jeu de données des mesures de flux convectifs brutes, à partir duquel les corrections sont possibles, est discontinu à cause des contraintes d'alimentation de l'ordinateur. Il a été, donc, nécessaire de trouver des relations avec les séries plus complètes dans le temps : 1/ les flux convectifs moyennés à un intervalle de 30 mn dans la centrale 2/ avec le rayonnement net. Les relations entre les flux corrigés et non sont linéaires et stables dans le temps pour la chaleur sensible cependant elles sont différentes avec la direction du vent (Zitouna-Chebbi, 2009). Ces relations sont de moindre qualité pour la chaleur latente. Des relations linéaires et variables dans le temps ont été trouvées entre les flux convectifs et le rayonnement net. Cette approche a été utilisée par Roupsard et al (2006). Pour valider la reconstitution des données menées selon ces relations, la clôture du bilan d'énergie entre l'énergie disponible exprimée à partir des flux turbulents ($H + \lambda E$) et celle exprimée à partir du rayonnement net ($R_n - G$) a été analysée. Les moyennes journalières sont ensuite calculées pour estimer les ETRj.

2.5. Pluviométrie et demande climatique

La demande climatique est estimée selon le modèle d'évapotranspiration de référence (ET0) proposé par Allen et al (1998). Les mesures acquises à la station météorologique de Kamech ont été utilisées. Pour obtenir une chronique complète, Les données manquantes ont été remplacées suite à une inter-comparaison à l'échelle horaire entre la station météorologique et les stations du flux (Zitouna-Chebbi 2009). La pluviométrie journalière est celle d'un capteur synthétique qui moyenne plusieurs mesures acquises à l'échelle du BV, elles nous ont été fournies dans le cadre de l'ORE OMERE.

3. RESULTATS

En premier lieu, la clôture du bilan d'énergie est étudiée pour valider la méthode de correction des flux et de reconstitution de données journalière, en suite les chroniques d'ETR journalière des trois types de cultures sont exposés et discutées en relation avec l'ET0.

3.1. Clôture du bilan d'énergie

La clôture du bilan d'énergie des données reconstituées à l'échelle journalière (pour un rayonnement global >20 et un rayonnement net $R_n > 0$) est analysée. C'est un critère important pour juger de la cohérence des reconstitutions opérées. On peut juger de la qualité de la clôture par la figure 2 qui représente les flux turbulents ($H + \lambda E$) en fonction de l'énergie disponible ($R_n - G$) pour les jeux de données A04 blé et C06 parcours et du tableau 1 qui donne les flux moyens calculés et les statistiques

relatives aux écarts entre valeurs journalière pour flux turbulents et énergie disponible. 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 2 que les relations s'écartent peu de la droite 1 : 1 et dans le tableau 1 que les défauts de clôture ne dépassent pas les 11%.

En comparant la clôture avec Zitouna-Chebbi 2009, nous observons que suite à la correction du rayonnement vis-à-vis à la pente et à l'exposition de la parcelle une nette amélioration du bilan d'énergie est observée particulièrement sur la parcelle C où la pente est plus importante. Sur la parcelle A, une plus grande dispersion est indiquée cette dispersion est expliquée d'une part par la difficulté d'estimation des flux durant la période de jours pluvieux et du nombre très faibles des données enregistrées à hautes fréquence au début de la saison. Aussi, la non prise en compte du terme de stockage dans le flux de chaleur dans le sol peut engendrer une surestimation du terme (Rn-G) particulièrement durant la période sèche qui est importante dans ces deux jeux de données.

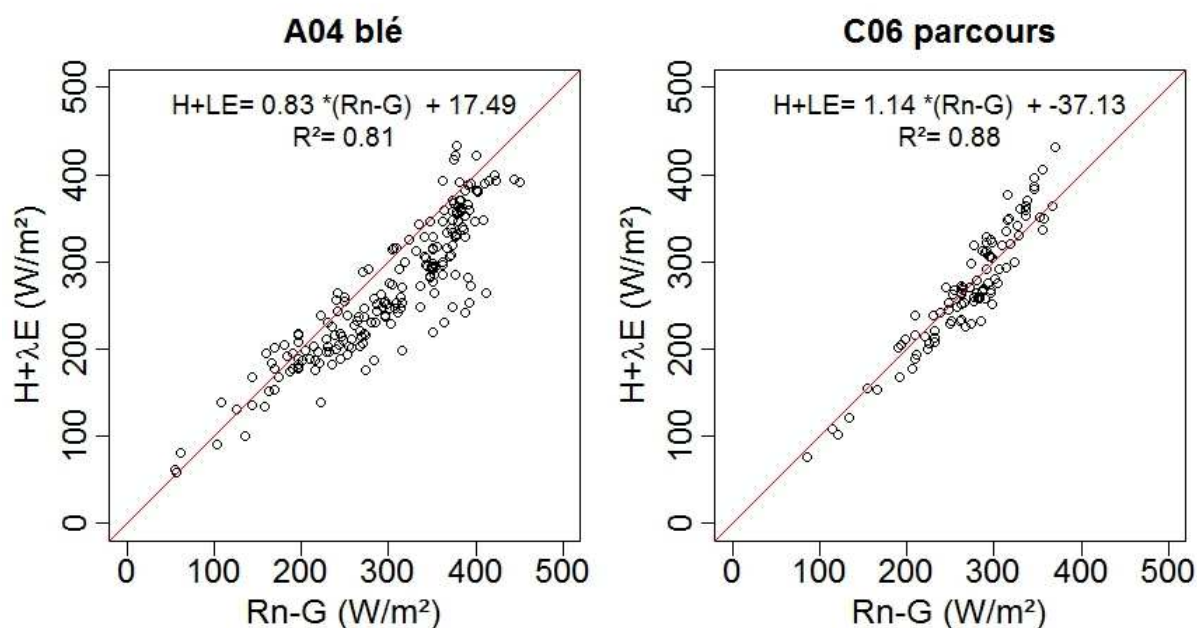


Figure 2. Relation entre les valeurs journalières estimées des flux turbulents, (H+λE), et l'énergie disponible, Rn-G, pour les expérimentations A04blé, A04sol, C06par et C06sol.

Tableau 1. Caractéristiques statistiques pour les valeurs journalières des flux turbulents, H+λE, et de l'énergie disponible, Rn-G et de leurs écarts pour les jeux de données A04 blé, C06 parcours. n : le nombre de jours de calcul ; (Rn-G)_m : moyenne de Rn-G sur la période de l'expérimentation (W.m⁻²) ; (H+λE)_m : moyenne de (H+λE) (W.m⁻²), ME : écart moyen entre Rn-G et H+λE en (W.m⁻²), RMSE : racine quadratique des écarts entre (Rn-G) et (H+λE) (W.m⁻²), EBR: ratio entre (H+λE)_m et (Rn-G)_m.

	n	(Rn-G) _m	(H+λE) _m	ME	RMSE	EBR
A04 Blé	198	299	266,3	-32,4	48,5	0,89
C06 parcours	100	272	271,9	-0,1	24,3	1,00

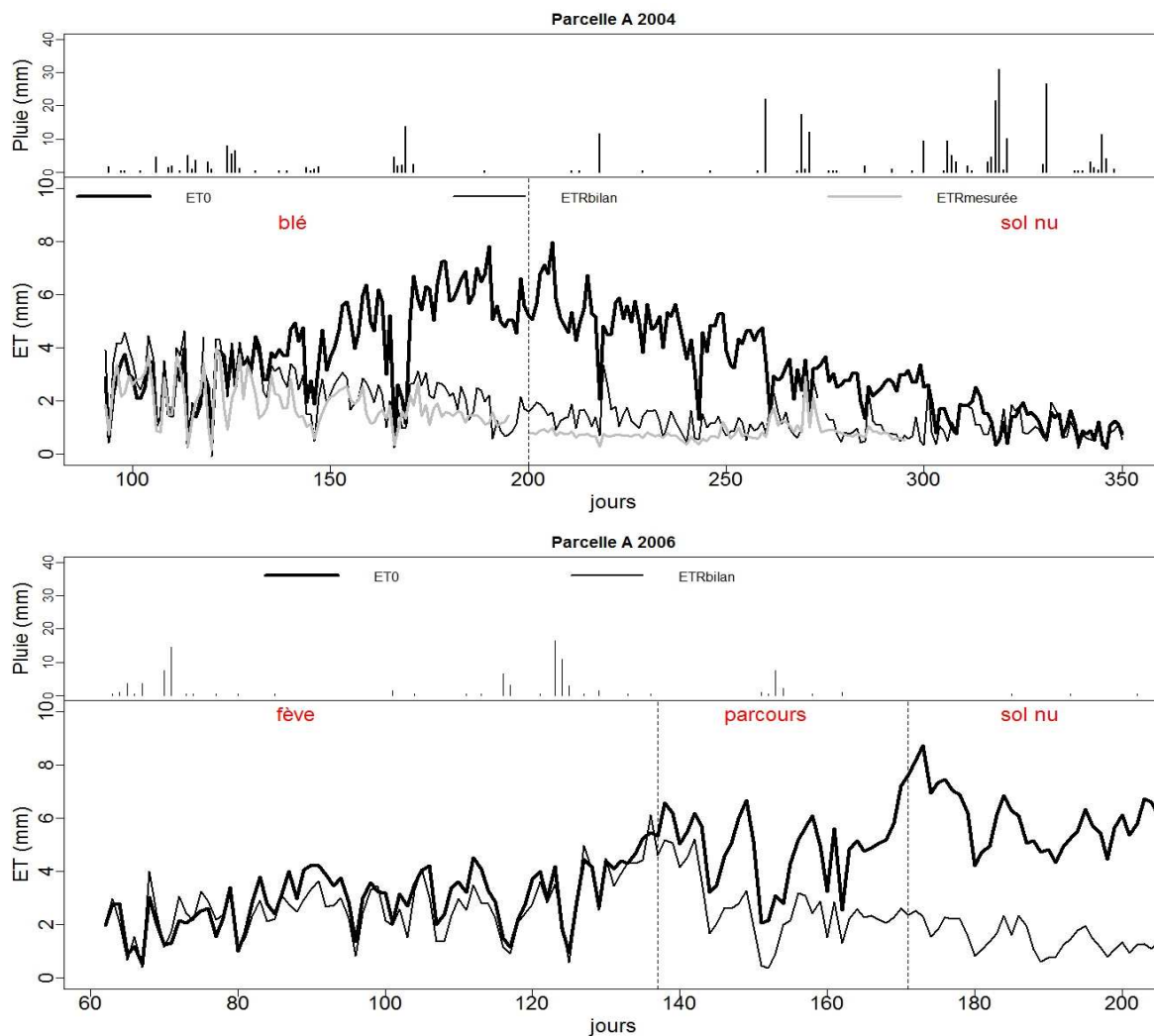
3.2. Variabilité de l'ETR à l'échelle du bassin versant

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. Ainsi, les chroniques des apports en eau (pluie), de la demande climatique (ET0) et de la consommation en eau journalière (ETR) sont présentés pour la parcelle A en 2004, et les parcelles A et C en 2006 sur la figure 3. Les deux estimations micrométéorologiques : celles déduites de la mesure de chaleur latente et corrigée pour l'effet du relief (ETR_{mesurée}) et celles déduites par bilan d'énergie, où le flux de chaleur sensible est corrigé pour l'effet relief et reconstitué

pour avoir les données journalières (ETR_Bilan). Sur la parcelle A en 2006, seul ETR_bilan est représentée vu l'indisponibilité des mesures d'ETR.

Rappelons que la pluie est le seul apport en eau pour ces cultures et que les années 2004 et 2006 sont des années moyennes en termes de cumul pluviométrique. Comme l'indique la figure 3 l'ET₀ des 2 années d'observation a varié d'environ 1 mm/j en hiver à 6 mm/j en été.

Les mesures sur la parcelle A en 2004 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 déduite par bilan et mesurée du blé sont en moyenne de 2.3 et 3 mm/j variant entre 0.5 et 4 mm/j selon les conditions climatiques, l'ETR déduit par bilan est plus élevée. 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 mesurée et celle déduite par bilan sont moyenne de 0.8 et 1.3 mm/j respectivement, puis une légère ré-augmentation survient lors des pluies automnales. On note également que l'ETR suit bien les principales variations journalières d'ET₀ à l'échelle infra-mensuelle. L'ETR se rapproche de l'ET₀ durant la période de plein développement de la culture, le rapport ETR/ET₀ chute progressivement entre mi-mai et juillet pour se stabiliser à mois que 0.3 après la récolte. Durant l'automne suite aux pluies et au labour du sol, le rapport ETR/ET₀ croît et atteint 0.6. Il est à noter que la diminution du rapport ETR/ET₀ en fin de printemps se produit dès que l'ET₀ atteint 4 mm/j. La différence entre l'ETR mesurée et celle déduite par bilan est expliquée par le fait que pour ce jeu de données est particulièrement avant la récolte les mesures de flux instantanées avec lesquelles les corrections sont possibles sont peu nombreuses.



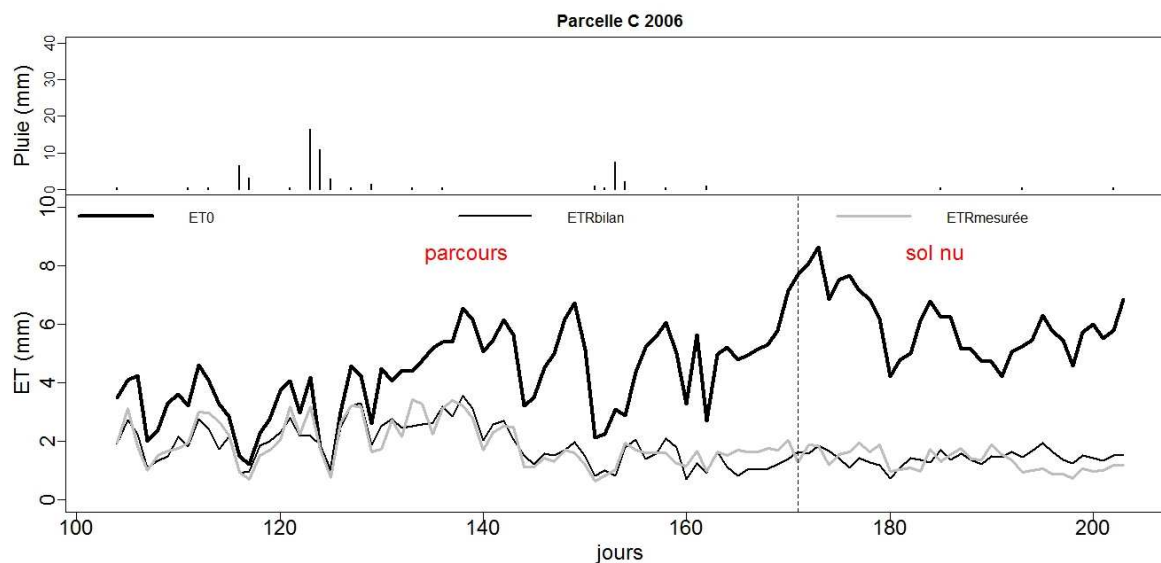


Figure 3. Evapotranspiration de référence (ET_0) et évapotranspiration réelle (ETR) sur parcelle A en 2004 (A04), sur parcelle A en 2006 (A06) et sur parcelle C en 2006 (C06). Pour chaque campagne, la pluie est indiquée en haut de la figure, l'occupation du sol est indiquée et la séparation entre deux occupations est montrée par une ligne verticale en pointillée.

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. Un décrochage est enregistré lorsque l' ET_0 atteint les 4mm/j, 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.

Sur la parcelle C en 2006, le sol est occupé par une jachère non labourée utilisée comme parcours. L'ETR estimée à partir des mesures de chaleur latente est assez similaire de celle estimée par bilan d'énergie. Pour la période occupée par la végétation l'ETR a été de 2.1 mm/j, puis chute en période de sol nu à 1.3 mm/j. On note que le rapport ETR_{BE}/ET_0 est proche de 0.6 d'avril à mai. Par contre en période de sol nu, ce rapport reste à 0.2.

4. CONCLUSIONS

En condition de relief collinaire, suite aux corrections des flux convectifs et de du rayonnement net, il a été possible d'estimer une ETR à l'aide des observations par la méthode des covariances turbulentes. Les ETR par bilan d'énergie et par mesure sont cohérentes même s'il existe une différence des zones de mesure (footprint) pour les flux turbulents et par l'énergie disponible, et une sous-estimation des mesures de flux de chaleur dans le sol. Ceci est expliqué par absence de correction selon la profondeur en raison de la méconnaissance des profils de température.

L'évolution de l'ETR journalière, déterminée par la méthode de fluctuations turbulentes, des cultures suivies (blé, 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. La période étudiée durant l'automne a montré de grandes évaporations. 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.

Les quatre phases observées sont bien évidemment classiques dans ce contexte Méditerranéen. 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. Ceci est particulièrement important pour la modélisation du fonctionnement des cultures.

Remerciements

Ce travail est réalisé dans le cadre de la JEAI Jasmin, les expérimentations ont été réalisées dans le cadre du programme IRRIMED et de l'ORE OMERE.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D. and Smith, M. (1998) : Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. 465 pp.
- Aubinet M., Vesala T., Papale D. (2012) : Eddy Covariance. A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. ISBN 978-94-007-2350-4. Springer. 449 pp.
- Ben Mechlia N., Mekki I. and Zante P. (1998) : Spatialisation de l'activité agricole et de l'occupation du sol dans une région au relief accidenté'. CNES, Colloque International, L'observation spatiale: Un outil pour l'étude du bassin méditerranéen.
- Foken T. and Wishura B. (1996) : "Tools for quality assessment of surface-based flux measurements." *Agricultural and Forest Meteorology***78**: 83-105.
- Geissbühler P., Siegwolf R. and Eugster W. (2000) : "Eddy covariance measurements on mountain slopes: The advantages of surface-normal sensor orientation over a vertical set-up." *Boundary-Layer Meteorology***96**: 371-392.
- Hammerle A., Haslwanter A., Schmitt M., Bahn M., Tappeiner U., Cernusca A. and Wohlfahrt G. (2007) : "Eddy covariance measurements of carbon dioxide, latent and sensible energy fluxes above a meadow on a mountain slope." *Boundary-layer meteorology***122**: 397-416.
- Holst T., Rost J., Mayer H. (2005) : Net radiation balance for two forested slopes on opposite sides of a valley. *Int. J. Biometeorol.* **49**, 275-284.
- Mekki I. (2003) : Analyse et modélisation de la variabilité des flux hydriques à l'échelle d'un bassin versant cultivé alimentant un lac collinaire du domaine semi-aride méditerranéen (Oued Kamech, Cap Bon, Tunisie). Thèse de doctorat. Université Montpellier II. p 176.
- Mekki I., Albergel J. Ben Mechlia N. and Voltz M. (2006) : "Assessment of overland flow variation and blue water production in a farmed semi-arid water harvesting catchment." *Physics and Chemistry of the Earth***31**: 1048-1061.
- Raclot D., Albergel J. (2006) : Runoff and water erosion modelling using WEPP on a Mediterranean cultivated catchment. *Phys. Chem. Earth.***31** (17), 1038-1047.
- Rana G., Ferrara R. M., Martinelli N., Personnic P. and Cellier P. 2007. "Estimating energy fluxes from sloping crops using standard agrometeorological measurements and topography." *Agricultural and Forest Meteorology***146**: 116-133.
- Roupsard O., Bonnefond J.-M., Irvine M., Berbigier P., Nouvellon Y., Dautat J., Taga S., Hamel O., Jourdan C., Saint-André L., Mialet-Serra I., Labouisse J.-P., Epron D., Joffre R., Braconnier S., Rouzière A., Navarro M. and Bouillet J.-P. (200) : "Partitioning energy and evapo-transpiration above and below a tropical palm canopy." *Agricultural and Forest Meteorology***139** 252-268.
- Van-Dijk A., Moene A. F and DeBruin H. A. R. (2004) : The principles of surface flux physics ; theory, practice and description of the ECPACK library,. Internal report 2004/1. the Netherlands, Meteorology and Air Quality Group, Wageningen.
- Wilson K., Goldstein A., Falge E., Aubinet M., Baldocchi D., Berbigier P., Bernhofer C., Ceulemans R., Dolman H., Field C., Grelle A., Ibrom A., Law B. E., Kowalski A., Meyers T., Moncrieff J., Monson R., Oechel W., Tenhunen J., Valentini R. and Verma S. (2002) : "Energy balance closure at FLUXNET sites." *Agricultural and Forest Meteorology***113**: 223-243.

- Wilczak, J. M., Oncley S. P. and Stage S. A. (2001) : "Sonic anemometer tilt correction algorithms." *Boundary-Layer Meteorology* 99: 127–150.
- Zitouna-Chebbi, R. (2009) : Observation et caractérisation des échanges d'eau et d'énergie dans le continuum sol-plante-atmosphère en condition de relief collinaire. Cas du bassin versant Kamech, Cap Bon, Tunisie. Thèse de Doctorat Montpellier SupAgro, France. 292 pp.
- Zitouna-Chebbi R., Prévot L., Jacob F., Mougou R., Voltz M. (2012) : Assessing the consistency of eddy covariance measurements under conditions of sloping topography within a hilly agricultural catchment. *Agricultural and Forest meteorology*. **164**, 123-135.