

VARIABILITÉ DES CONDITIONS AGRO- PÉDO-CLIMATIQUES ET MICROMÉTÉOROLOGIQUES A L'ÉCHELLE DU BASSIN VERSANT

Les échanges de flux d'énergie à la surface varient selon les conditions environnementales dans lesquelles ils sont situés. Ainsi, avant d'étudier les flux échangés entre sol, plantes et atmosphère en conditions de relief, il est important de présenter et analyser la variabilité des conditions dans lesquelles les observations ont été réalisées. On notera de surcroît que ces conditions ont une originalité particulière en raison du relief prononcé, de la situation climatique sur une péninsule en zone méditerranéenne et de système d'occupation du sol associant grandes cultures et parcours.

Ce chapitre analyse donc la variabilité le long de l'expérimentation des conditions de sol, de plante et de l'atmosphère, puis établit les conditions micrométéorologiques qui ont prévalu par l'analyse des flux atmosphériques observés. Pour analyser l'ensemble des conditions évoquées ci-dessus, à savoir les variabilités spatiales et / ou temporelles en termes de climat (§ 1), de végétation (§ 2), d'état hydrique (§ 3) et de micrométéorologie (§ 4), nous avons eu recours aux jeux de données présentés dans le chapitre 2 (Tableau 2.1), en considérant les parcelles (A, B, ... H, I, M) et les années (2004, 2005, 2006), mais sans différentier systématiquement les conditions de couverture végétale.

Les conditions climatiques durant l'expérimentation

Dans cette section, nous analysons successivement les variations annuelles et saisonnières des différentes variables climatiques, celles-ci étant mesurées à la station météorologique de référence localisée à l'exutoire du bassin versant. Nous déterminons ensuite la présence ou l'absence d'une variabilité spatiale climatique au sein du bassin versant, en comparant 1/ les mesures collectées par la station météorologique, et 2/ les mesures collectées sur certaines périodes par les stations de flux installées sur les parcelles, et donc sur des localisations variables à l'intérieur du bassin versant (localisations présentées dans le Chapitre 2, et rappelées ici en § 1.2). Notons enfin que ces analyses croisées sont basées sur la considération

des mesures diurnes et nocturnes, sauf si indiqué autrement, et que l'étendue des périodes de mesure peut varier d'une année sur l'autre. Ainsi les mesures collectées sur la parcelle A en 2004 s'étalaient de mars à décembre, celles collectées sur la parcelle B en 2005 s'étalaient de janvier à juin, et celles collectées sur les parcelles A et C en 2006 s'étalaient d'avril à juillet (voir Tableau 2.1 dans le chapitre 2).

1.1. Variabilités temporelles

Le climat durant l'expérimentation est représenté par les données de la station météorologique relevées pendant ces trois années. Les quelques données manquantes ont été remplacées soit par des interpolations linéaires lorsque les périodes manquantes étaient de courte durée (de quelques heures à une journée), soit à l'aide de régressions linéaires avec les mêmes variables mesurées par les stations de mesure des flux (voir chapitre 2, § 1.4). Le climat durant l'expérimentation sera présenté en trois étapes : d'abord les variations annuelles ensuite les variations saisonnières et enfin, les variations selon la direction du vent.

1.1.1. Variabilité interannuelle

Tableau 3.1. Moyennes annuelles et interannuelles pour la température de l'air (T_a , °C), l'humidité relative (HR %), le rayonnement global (R_g , $\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$), la vitesse du vent (U , m.s^{-1}), l'évapotranspiration (ET_0) et la pluie (mm), durant les trois années d'expérimentation (2004, 2005 et 2006).

	2004	2005	2006	Moyenne interannuelle
T_a (°C)	17.7	17.2	18.1	17.7
HR (%)	73.8	73.4	71.8	73.0
R_g ($\text{MJ.m}^{-2}.\text{j}^{-1}$)	16.5	17.3	18.0	17.3
U (m.s^{-1})	4.1	4.1	3.9	4.0
Total ET_0 (mm)	1247	1252	1329	1275
Total pluie (mm)	515	726	761	667

Pour les trois années, les moyennes de la température de l'air, de l'humidité relative, du rayonnement global, de la vitesse du vent et de l'évapotranspiration de référence sont comparées (Tableau 3.1). Les différences paraissent très faibles ou modérées. Toutefois les cumuls annuels de la pluie et de l'évapotranspiration de référence montrent des différences notables entre les années (Figure 3.1). La pluie annuelle est plus faible en 2004 de plus de

200 mm que celle des deux autres années. La demande climatique est plus forte en 2006 de 70 mm par rapport aux deux autres années; l' ET_0 y est plus élevée durant le printemps. Ceci peut être expliqué par des pics de hautes températures durant le printemps 2006.

Nous pouvons présenter le climat comme ayant une température moyenne de 17.7 °C, une humidité relative de 73 %, un rayonnement global de 17 MJ.m⁻².j⁻¹, une vitesse de vent de 4 m.s⁻¹, une évapotranspiration de référence moyenne (ET_0) de 3.5 mm/j et une pluie annuelle de 667 mm. Le déficit hydrique climatique, pluie moins ET_0 est de 600 mm/an. Cet important déficit, classique en régions méditerranéennes, est particulièrement sensible en été où les pluies sont presque inexistantes et où l' ET_0 est à son maximum (Figure 3.1).

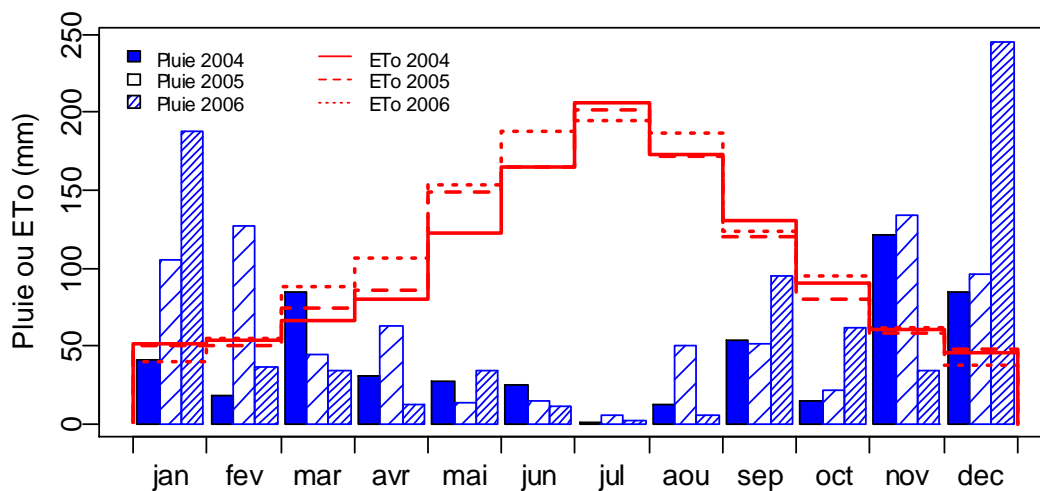


Figure 3.1. Cumul mensuel de la pluie en mm et de l'évapotranspiration de référence (ET_0) en mm durant les trois années d'expérimentation 2004, 2005 et 2006 (profils annuels).

Ces trois années d'expérimentation peuvent être considérées comme des années moyennes car elles ne sont exceptionnelles ni du point de vue des précipitations ni du point de vue de l'évaporation. Notons que la pluie sera le seul apport en eau pour les cultures dans la zone d'étude suivie car l'irrigation y est très peu développée. D'un point de vue agronomique, ce climat est considéré comme difficile pour une pratique d'agriculture pluviale menée durant toute l'année. La saison déficitaire en eau est plus longue que la saison humide, il est donc nécessaire de profiter au maximum de cette courte période. Une fois le déficit hydrique commencé, le dessèchement du sol et par conséquent celui des cultures apparaît, ainsi la période au cours de laquelle la végétation est sèche ou le sol est nu est longue. Les flux de transpiration des cultures annuelles ne seront donc significatifs que durant une très courte

période au printemps, et le reste de la saison seule l'évaporation du sol contribuera de manière importante au flux de chaleur latente.

La direction du vent est un paramètre important dans cette étude pour deux raisons. Tout d'abord, en situation de relief, la direction du vent par rapport à la pente a une influence sur les écoulements et par suite sur les flux surface – atmosphère (Finnigan et al., 2003). En second lieu, la direction du vent détermine en partie la zone d'où proviennent les flux mesurés en un point. Ceci est d'autant plus important que les parcelles du bassin versant de Kamech sont pour la plupart de petites tailles. La direction du vent illustrée par la Figure 3.2, sous forme de rose de vent pour chaque année en considérant des valeurs moyennes journalières (km/jour). Les vents dominants sont de direction Nord-Ouest suivis par les vents de Sud, d'Ouest et de Sud-Est, alors que les vents Sud-Ouest et Est sont presque inexistants. Les années 2004 et 2006 sont très similaires et l'année 2005 présente une fréquence de vents d'Ouest supérieure. Ceci fut également observé pour la station météorologique de Kélibia, située à 30 km au Sud-Est de Kamech.

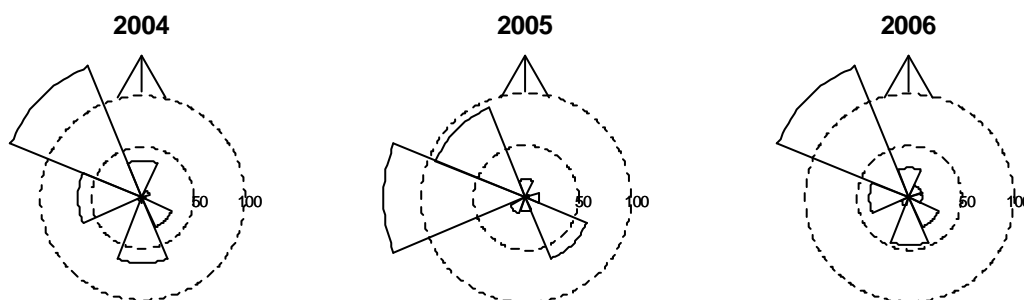


Figure 3.2. Rose des vents pour les trois années d'études 2004, 2005 et 2006. Les cercles concentriques indiquent le vent parcouru en km/jour. La flèche représente la direction Nord.

Rappelons que le bassin versant suit une direction allant du nord-est (amont) vers le sud-ouest (aval), sens de l'oued qui le traverse. Les parcelles sont situées sur les deux rives et sont le plus souvent orientées dans le sens nord-ouest / sud-est. Il en ressort que le sens des parcelles suit généralement le vent dominant. Sur la rive nord-ouest, le vent de Nord-Ouest ou Ouest descend la pente dominante des parcelles et sur la rive sud-est, il remonte leur pente. La situation est inversée lorsque le vent est de direction Sud ou Sud-Est.

Dans la suite de ce travail, afin de simplifier l'exposé des interprétations, nous ne distinguerons que deux secteurs de vents correspondant aux deux modalités principales

observées sur les roses des vents, soit un secteur que l'on appellera «Nord-Ouest » qui regroupe les vents ayant des directions de 200° à 70° (l'origine 0° correspond au Nord géographique et les valeurs sont donnée dans le sens horaire) et comprenant les directions dominantes Nord-Ouest et Ouest, et un secteur nommé « Sud » qui regroupe les autres directions de vent et comprend les directions dominantes Sud et Sud-Est.

1.1.2. Variabilité intra annuelle

La Figure 3.3 présente l'évolution des moyennes journalières au cours de chacune des trois années, pour les principales variables climatiques. Ces variables présentent une évolution en fonction des saisons tout à fait classique, à l'exception de la vitesse du vent. Les variations saisonnières sont importantes pour la température de l'air, l'humidité de l'air et le rayonnement global.

La température de l'air journalière varie entre 10 °C en hiver et 27 °C en été. Les journées pour lesquelles sont enregistrés des pics sont caractérisées par des températures de l'air qui dépassent les 40 °C en milieu de journée. Les températures minimales sont toujours positives et restent relativement douces en hiver. L'humidité relative de l'air est plus forte en hiver (80 %) qu'en été (50 %). Le déficit de pression de vapeur (VPD) est plus fort en été où il atteint 3 kPa, les pics correspondant aux journées pour lesquelles la température de l'air est élevée. Le rayonnement global varie entre 100 et 350 W/m² et varie avec la couverture nuageuse. L'évapotranspiration de référence ET₀ varie selon la saison entre 1.5 et 7 mm/j. Les maxima pour ET₀ correspondent aux journées pour lesquelles la température de l'air, le déficit de pression de vapeur et la vitesse du vent sont élevés, et les minima correspondent aux jours pluvieux ou totalement nuageux.

Concernant la vitesse du vent dont la moyenne annuelle est aux alentours de 4 m.s⁻¹, on note une occurrence plus importante de valeurs élevées en hiver (jours de l'année inférieurs à 100 ou supérieurs à 300), avec des moyennes journalières au-delà de 10 m.s⁻¹. Le vent reste cependant fort tout au long de l'année : une moyenne annuelle de 4 m.s⁻¹ est deux fois plus importante que la valeur proposée (2 m.s⁻¹) par Allen et al. (1998) pour le remplacement des manquants, et qui correspond à une moyenne sur 2000 sites à l'échelle mondiale.

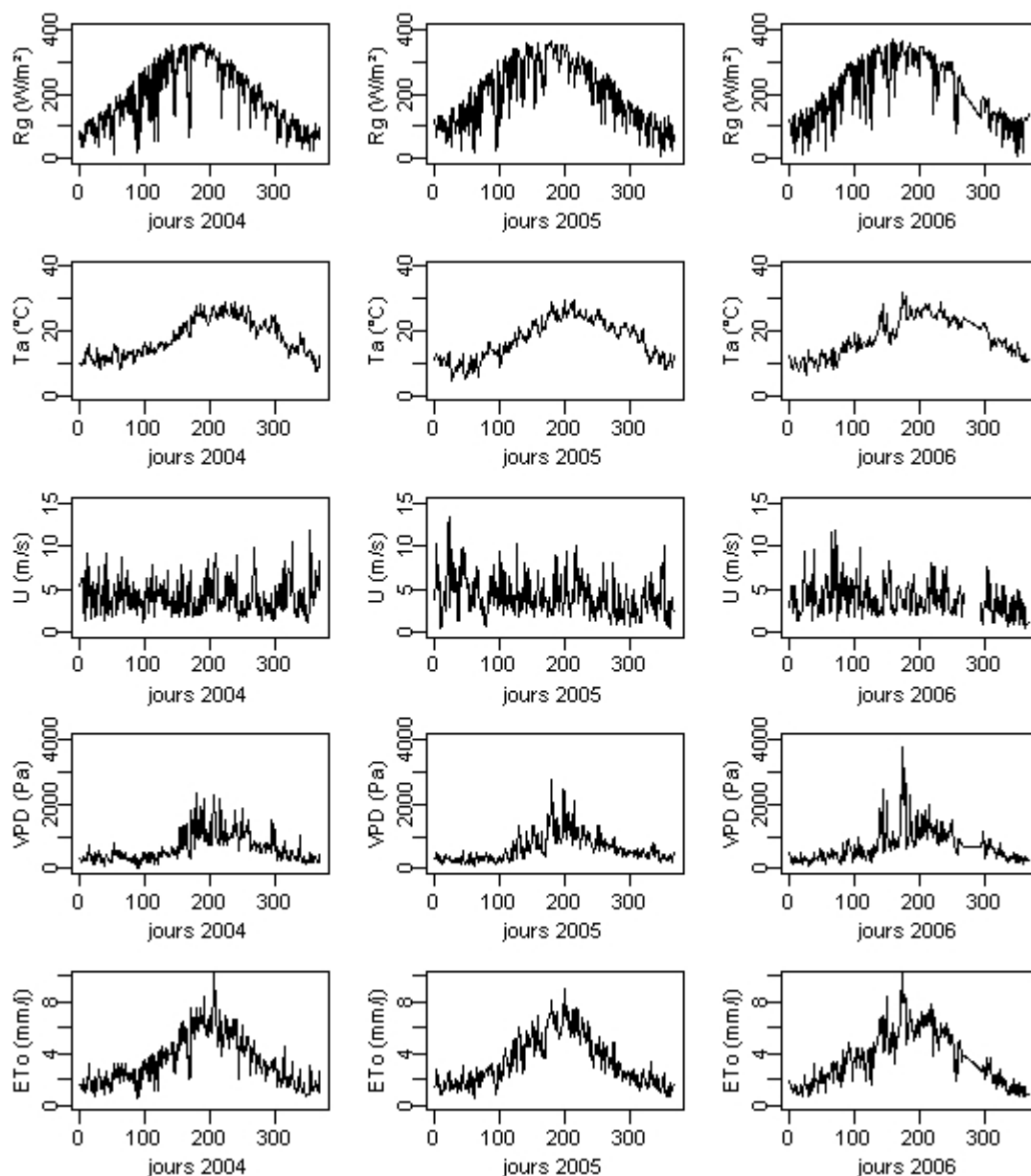


Figure 3.3. Evolution des moyennes journalières des principales variables climatiques, au cours des trois années 2004, 2005 et 2006 : rayonnement global (R_g , W/m^2), température de l'air (T_a , $^{\circ}C$), vitesse du vent (U , m/s), déficit de pression de vapeur (VPD , Pa) et évapotranspiration de référence (ET_0 , mm/j).

La Figure 3.4 présente, sous la forme de roses des vents, les variations saisonnières de la direction du vent pour les quatre saisons des trois années d'expérimentation. Un examen de cette figure révèle que quelque soit la saison, le vent dominant provient du Nord-Ouest. Les vents de Sud et Sud-Est apparaissent le plus souvent à l'automne. Le vent d'Ouest est dominant en l'absence du vent de Nord-Ouest et semble donc correspondre à une évolution de l'orientation de ce dernier, ce qui s'est produit surtout en 2005. Ces variations des conditions de vent sont supposées avoir un impact direct sur les variations des flux, et il est nécessaire

d'évaluer tout d'abord de possible changements des conditions climatiques selon que la direction du vent soit Nord-Ouest ou Sud.

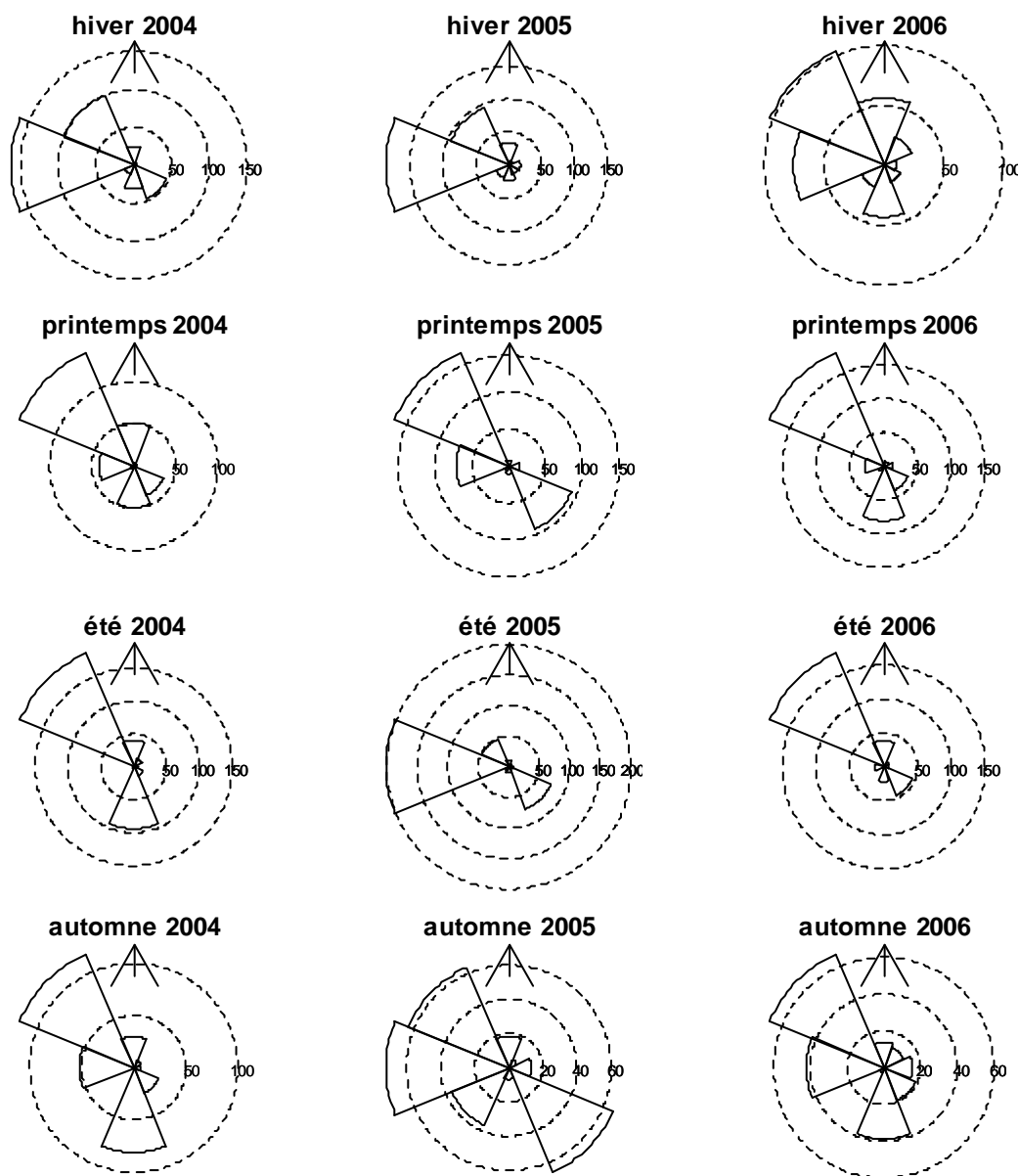


Figure 3.4. Rose des vents pour les quatre saisons des trois années (2004, 2005, 2006). Les cercles concentriques indiquent le vent parcouru en km/jour. La flèche représente la direction Nord.

1.1.3. Variabilité des conditions météorologiques selon la direction du vent

Pour analyser les conditions météorologiques selon la direction du vent, la Figure 3.5 présente une évolution journalière moyenne des principales variables climatiques pour les vents de

secteur « Nord-Ouest » et de secteur « Sud ». Les courbes montrent l'évolution journalière moyenne pour l'ensemble des données observées, selon une direction de vent spécifique.

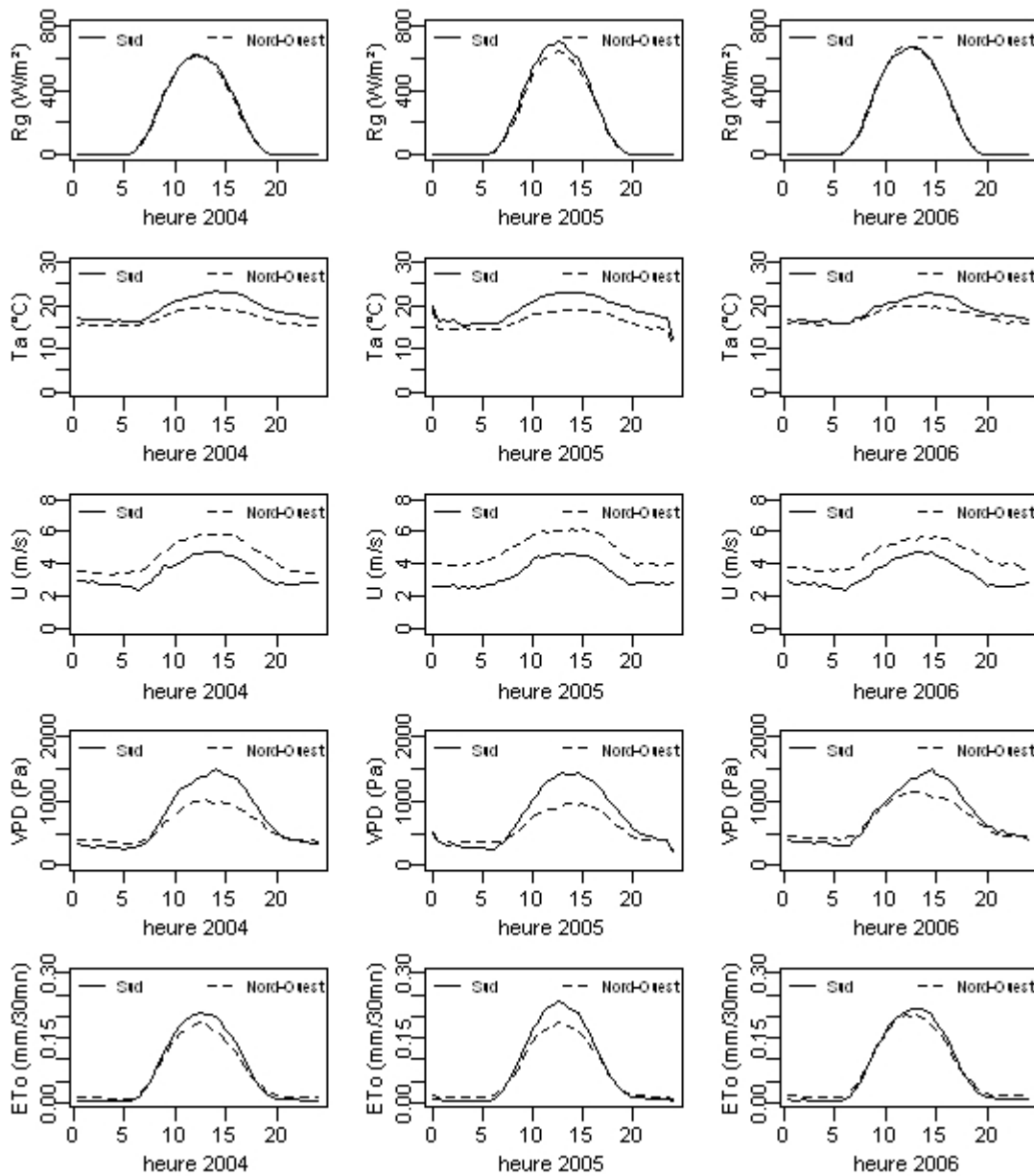


Figure 3.5. Représentation de l'évolution journalière moyenne des paramètres climatiques pour les trois années 2004, 2005 et 2006 : rayonnement global (Rg) en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$, température de l'air (Ta) en $^{\circ}\text{C}$, vitesse du vent (U) en m/s, Déficit de pression de vapeur (VPD) en Pa et évapotranspiration de référence (ET_0) en $\text{mm}\cdot 30\text{mn}^{-1}$; pour les deux directions dominantes Nord-Ouest (ligne continue) et Sud (ligne discontinue).

Toutes ces variables suivent une évolution diurne classique, augmentation pendant la journée et diminution pendant la nuit. Le rayonnement global (Rg) ne montre pas de différence entre les jours de vent de Nord-Ouest et de Sud. Par contre, la température (Ta), le déficit de pression de vapeur (VPD), la vitesse du vent (U) et l'évapotranspiration de référence (ET_0)

sont significativement différents. Ainsi, lorsque le vent est de direction Sud, la température, le déficit de pression de vapeur et l' ET_0 sont plus élevées et la vitesse du vent est plus faible.

Si la vitesse du vent suit l'évolution diurne classique, augmentation pendant la journée et diminution pendant la nuit, les vitesses minimales observées, pendant la nuit, sont supérieures à 2 m.s^{-1} et atteignent même 4 m.s^{-1} par vent de Nord-Ouest.

Il convient enfin de signaler que, contrairement à ce que l'on observe souvent sur des sites montagneux tel que ceux sur lesquels furent effectuées des mesures de flux turbulents (Geissbühler et al., 2000 ; Hammerle et al., 2007), nous n'observons pas de cycle diurne pour la direction du vent. Il s'avère donc que la direction du vent est ici imposée par les conditions météorologiques extérieures au bassin versant, et ne dépend pas du cycle de réchauffement - refroidissement diurne (vents de compensation, vents de vallées ou vents de pente) caractéristiques des milieux montagneux. Le bassin versant de Kamech présente donc l'originalité de croiser des structurations collinaires avec un forçage de vent externe.

1.2. Variabilité spatiale à l'échelle du bassin versant

Dans la partie qui précède, nous avons présenté les données mesurées à la station météorologique. Dans cette partie, nous comparons les données météorologiques relevées à différentes localisations du bassin versant. Ces différentes localisations sont celles des stations de mesure des flux qui collectaient aussi quelques variables climatiques. Les années de mesures sont analysées séparément parce que les stations de flux ne sont pas identiques et ne sont pas positionnées aux mêmes endroits (Figure 3.6).

- En 2004, deux stations de mesure des flux étaient installées : une station de mesures par la méthode du rapport de Bowen installée sur la parcelle E et équipée d'un anémomètre à coupelles, et une station de mesure par covariances turbulentes avec un anémomètre sonique CSAT3 sur la parcelle A.
- En 2005, la station de mesure par covariances turbulentes avec l'anémomètre CSAT3 était installée sur la parcelle B.
- En 2006 deux stations de mesures par covariances turbulentes, équipées d'anémomètres soniques différents (CSAT3 et Young), installées respectivement sur les parcelles A et C.

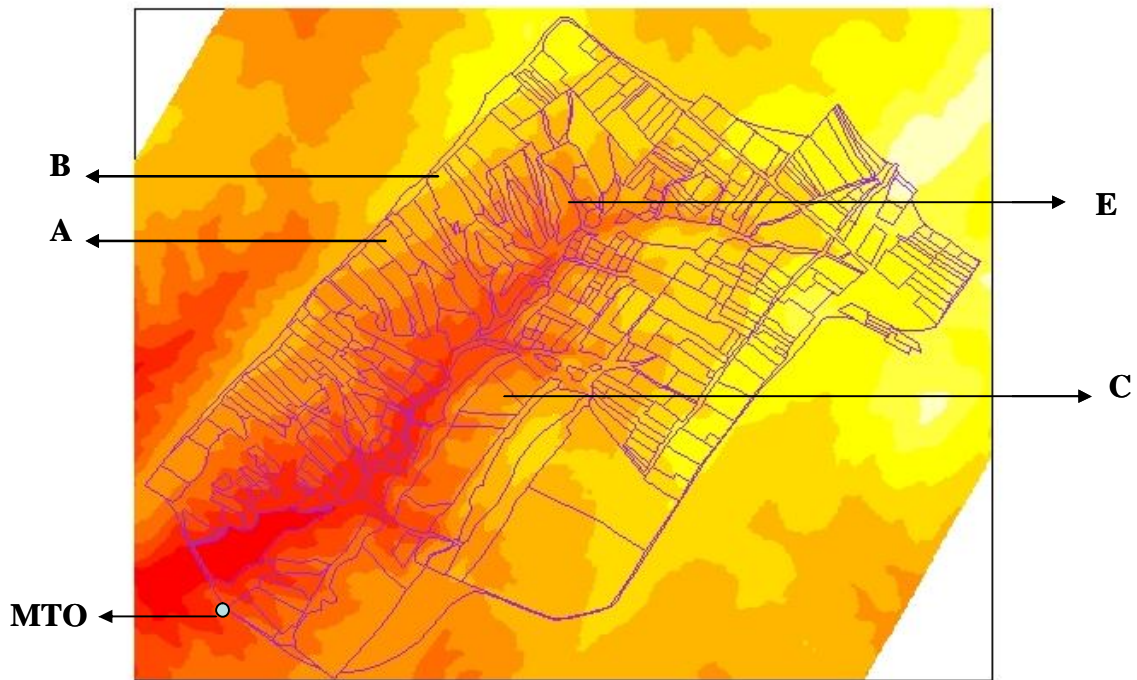


Figure 3.6. Représentation du MNT et du parcellaire pour le bassin versant de Kamech. Les parcelles sur lesquelles sont effectuées les mesures de flux turbulents (A, B, C et E) et de la station météorologique de référence du site (MTO) sont indiquées.

Les capteurs de température étaient identiques (HMP45C) pour toutes les stations, sauf pour la station « Bowen » (thermocouple cuivre - constantan). La mesure de l'humidité relative fut réalisée avec le même type de capteur (HMP45C). Signalons enfin que pour les stations de mesure des flux, les hauteurs des capteurs de vitesse du vent, de température et d'humidité de l'air, sont très proches de celles des capteurs de la station météorologique (voir Tableau 2.2 dans le chapitre 2).

L'analyse de la variabilité spatiale des précipitations ne sera pas approfondie ici, car elle a déjà été traitée par Mekki (2003). En effet, sur le bassin versant, cet auteur montre que la rive droite de l'oued Kamech reçoit plus de précipitations que la rive gauche, selon un gradient qui peut représenter de l'ordre de 50 mm à l'échelle annuelle. Cette répartition spatiale des pluies est influencée par la direction du vent.

1.2.1. Variabilité spatiale du vent

Nous analysons ici la variabilité spatiale du vent en fonction des situations de relief. Ceci est réalisé grâce aux données de vitesse et de direction de vent acquises par les différentes

stations de mesure distribuées dans le bassin, ces dernières incluant 1/ les anémomètres soniques pour les systèmes de mesures par covariances turbulentes (parcelle A en 2004 et en 2006, parcelle B en 2005 et parcelle C en 2006), et 2/ un anémomètre à coupelle pour le système de mesure utilisant la méthode du rapport de Bowen (parcelle E en 2004). Dans la suite sont intercomparées les observations des différentes stations de mesure et de la station météo. Rappelons que cette dernière se trouve sur une colline, avec un côté Nord dégagée où le relief est remontant et homogène, et un côté Sud où le relief est chahuté.

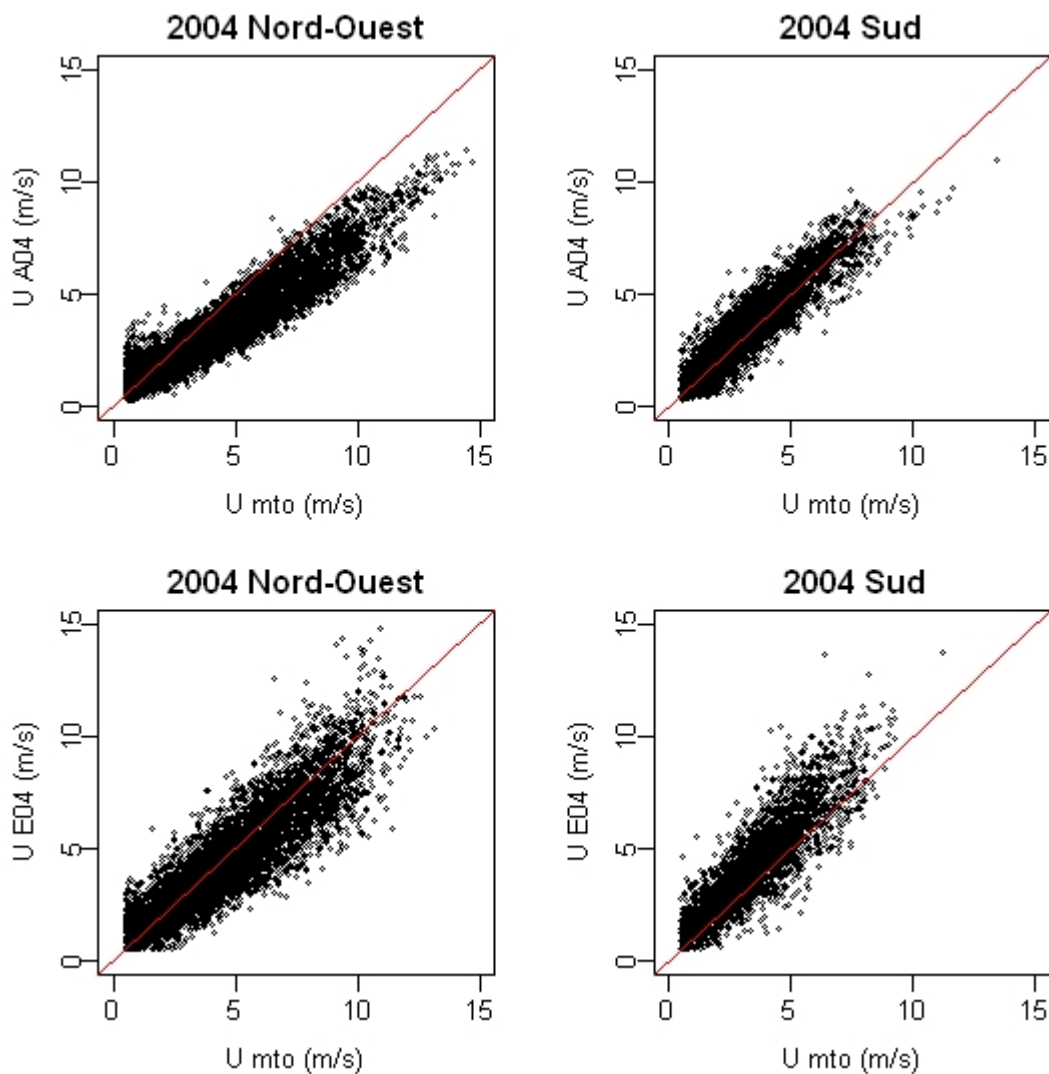


Figure 3.7. Comparaison des vitesses du vent mesurées en 2004 1/ à la station météorologique (U_{mto}), 2/ sur la parcelle A par covariances turbulentes (U_{A04}), et 3/ sur la parcelle E par le rapport de Bowen (U_{E04}). Les estimations sont des moyennes sur 30 minutes, la ligne continue est la droite 1:1.

La Figure 3.6 nous permet de rappeler que les parcelles A et B sont situées sur le versant nord-ouest (à gauche de l'oued qui s'écoule du nord-est vers le sud-ouest) du bassin versant,

que la parcelle E est située sur une crête, et que la parcelle C est localisée sur le versant sud-est (à droite de l'oued). En lien avec le régime de vent externe qui se caractérise par des vents de Nord-Ouest et Sud, nous avons donc les situations suivantes :

- un écoulement descendant pour le vent de Nord-Ouest sur le versant nord-ouest (parcelles A et B) et le vent de Sud sur le versant sud-est (parcelle C),
- un écoulement ascendant pour le vent de Nord-Ouest sur le versant sud-est (parcelle C) et le vent de Sud sur le versant nord-ouest (parcelle A et B).
- un écoulement horizontal quelque soit la direction du vent pour la parcelle E, qui est une parcelle horizontale localisée sur une crête.

Signalons tout d'abord qu'il n'a pas été observé de différence significative entre les directions du vent mesurées par la station météorologique et celles mesurées par les différentes stations de mesure des flux localisées en divers endroits à l'intérieur du bassin versant. Ceci confirme que la direction du vent est bien imposée par les conditions météorologiques extérieures au bassin versant.

Tableau 3.2. Relations entre les vitesses de vent pour les directions de vent Nord-Ouest et Sud durant l'année 2004, sur différents sites de mesures : la station météorologique (mto), la parcelle A (U A04) et la parcelle E (U E04). Le nombre de répétition est noté n, X_m est la moyenne des vents de la station X (définition sur la deuxième ligne), Y_m est la moyenne des vents de la station Y (définition dans la deuxième ligne), ME est l'écart moyen entre X et Y, RMSE est l'erreur quadratique moyenne entre X et Y, et R^2 est coefficient de détermination entre X et Y.

	Nord-Ouest			Sud		
	X=U mto Y=U A04	X=U mto Y=U E04	X=U E04 Y=U A04	X=U mto Y=U A04	X=U mto Y=U E04	X=U E04 Y=U A04
n	6937	6362	3618	3800	2984	1804
X_m	4.58	4.68	4.10	3.61	3.60	4.38
Y_m	3.62	4.52	3.10	3.73	4.37	3.52
ME	-0.96	-0.16	-0.99	0.12	0.77	-0.86
RMSE	1.46	1.17	1.42	0.80	1.31	1.22
R^2	0.87	0.79	0.83	0.83	0.76	0.83

La comparaison des observations est menée séparément pour chaque année de mesure en raison de l'évolution des emplacements des stations de mesures d'une année sur l'autre. Le nombre des données communes par période de mesure conjointe est toutefois suffisamment important pour permettre une comparaison significative.

Les comparaisons effectuées entre stations de mesures indiquent que les différences varient en fonction de la direction du vent. Ceci est illustré par la comparaison des vitesses du vent en 2004 représentée dans la Figure 3.7 et le Tableau 3.2. Une conséquence directe est que cela permet d'éliminer l'hypothèse de biais de mesures dus à des capteurs différents, et donc d'interpréter de manière mécaniste les différences observées. A cet égard, on peut remarquer les points suivants. Premièrement, il est confirmé que les vents de Sud ont des vitesses inférieures à celles des vents de Nord-Ouest. Deuxièmement, si les vitesses de vent en différentes localisations sur le bassin versant sont similaires au premier ordre pour un jour donné (linéarité des relations sur la Figure 3.7), des écarts significatifs existent, pouvant atteindre en moyenne 1 m/s. Enfin, les écarts apparaissent fortement liés à la direction du vent. On peut alors résumer la situation de la manière suivante :

- par vent de Nord-Ouest, la vitesse de vent mesurée à la parcelle E en 2004 est très proche de celle mesurée à la station météorologique (inférieure de 0.16 m/s en moyenne) et celle mesurée à la parcelle A est très inférieure aux deux autres (de l'ordre de 1 m/s);
- par vent de Sud, la vitesse de vent mesurée à la parcelle A en 2004 est très proche de celle mesurée à la station météorologique (supérieure de 0.12 m/s en moyenne), alors que celle mesurée à la parcelle E est très supérieure aux deux autres (de l'ordre de 0.8 m/s).

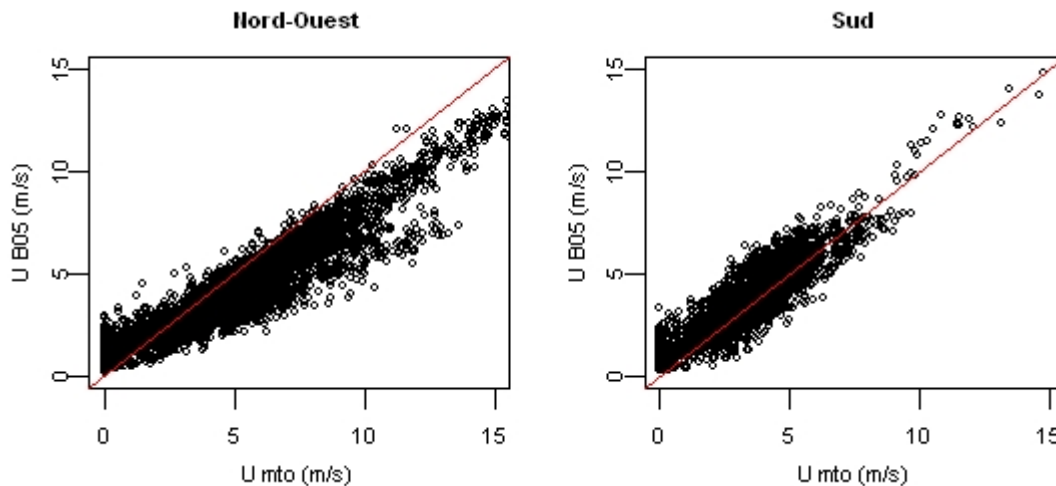


Figure 3.8. Comparaison des vitesses du vent mesurées en 2005 1/ à la station météorologique (U_{mto}) et 2/ à station de mesure de flux (U_{B05}) pour les directions Nord-Ouest et Sud séparément. Les estimations sont des moyennes sur 30 minutes. La ligne continue est la droite 1:1.

Pour la station installée sur la parcelle A en 2004, située sur le haut d'un versant régulier, cette dissymétrie dans les vitesses de vent selon sa direction par rapport à la pente est tout à fait compatible avec l'effet dynamique du relief sur le vent : accélération lorsque le vent est ascendant (ici vent de Sud) et décélération lorsque le vent est descendant (vent de Nord-Ouest). La station installée sur la parcelle E en 2004 est sur une crête par rapport au vent de Sud et de Nord-Ouest. C'est ce qui explique le vent fort pour les deux directions.

Pour l'année 2005, seule la station de mesure des flux « EC » (pour « eddy covariance ») était installée sur la parcelle B, à environ 300 m de la position qu'elle avait en 2004 et dans des conditions de relief très comparables. La comparaison des vitesses de vent mesurées à la station « EC » avec celles mesurées à la station météorologique sont données par la Figure 3.8 et le Tableau 3.3. Les différences sont très similaires à celles observées en 2004 pour la station « EC » sur parcelle A : vitesse de vent inférieure d'environ 1 m/s à celle mesurée à la station météorologique par vent de Nord-Ouest, vitesse légèrement supérieure (de 0.3 m/s en moyenne) par vent de Sud.

Tableau 3.3. Relation entre les vitesses de vent Nord-Ouest et Sud durant l'année 2005, sur deux sites de mesures : la station météorologique (mto) et la parcelle B. Le nombre de répétition est noté n, X_m est la moyenne des vents de la station X (définition sur la deuxième ligne), Y_m est la moyenne des vents de la station Y (définition dans la deuxième ligne), ME est l'écart moyen entre X et Y, RMSE est l'erreur quadratique moyenne entre X et Y, et R^2 est coefficient de détermination entre X et Y.

	Nord-Ouest	Sud
n	4860	2586
U mto m	5.21	3.38
U B05 m	4.24	3.67
ME	-0.97	0.29
RMSE	1.62	0.92
R²	0.87	0.81

Sur la Figure 3.8, un nuage de points supplémentaire apparaît dans la relation entre les deux vitesses de vents pour la direction Nord-Ouest, qui indique un régime spécifique. Ceci est confirmé par l'évolution temporelle du rapport entre la vitesse du vent de la station météorologique et celle de la station de flux sur parcelle B en 2005 (Figure 3.9). Cette courbe peut être divisée en trois phases. La première s'étend du début de l'année aux alentours du jour 70. Durant cette phase le rapport est constant. La deuxième phase, s'étale entre les jours 70 et 145, cette période montre une augmentation progressive du rapport. Le jour 145 (illustré

par la ligne verticale) correspond à la date de la récolte. La troisième phase est la période qui suit le jour 145 où le rapport chute instantanément et redevient similaire à celui de la première phase. Cette constatation, met en évidence l'effet de la végétation sur la vitesse du vent (la croissance végétale sur parcelle est indiquée via la hauteur et l'indice de surface foliaire dans les Figures 3.14 et 3.17, respectivement). Ainsi, à partir d'une certaine croissance végétative, la vitesse du vent, mesurée sur une même hauteur, commence à baisser.

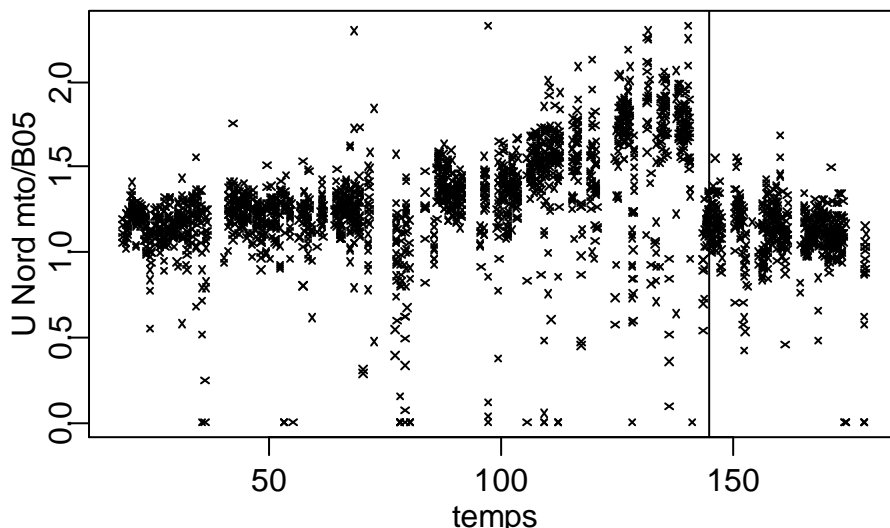


Figure 3.9. Rapport entre la vitesse du vent mesurée à la station météorologique et celle mesurée sur la parcelle B ($U_{\text{Nord mto}} / B05$) en fonction du temps (jours de l'année 2005), pour la direction de vent Nord-Ouest. Les vitesses du vent sont des moyennes sur 30 minutes. La ligne verticale représente la date de la récolte.

En 2006, la comparaison est effectuée entre la station météorologique et les deux stations de mesure des flux équipées d'anémomètres soniques placées sur les parcelles A et C (Figure 3.10 et Tableau 3.4). Pour les mesures sur la parcelle A, la station est placée au même endroit qu'en 2004 (sur le versant nord-ouest), les différences avec la vitesse du vent mesurée à la station météorologique sont similaires à celles observées en 2004 et 2005 : si la vitesse de vent est toujours inférieure à celle mesurée à la station météorologique, elle l'est beaucoup plus (1 m/s) par vent de Nord-Ouest que par vent de Sud (0.4 m/s). Pour les mesures sur la parcelle C, placée sur le versant opposé, c'est à dire sur le même versant que la station météorologique, la vitesse est toujours légèrement inférieure (d'environ 0.4 et 0.2 m/s) à celle mesurée à la station météorologique, pour la direction du vent Nord-Ouest et Sud respectivement.

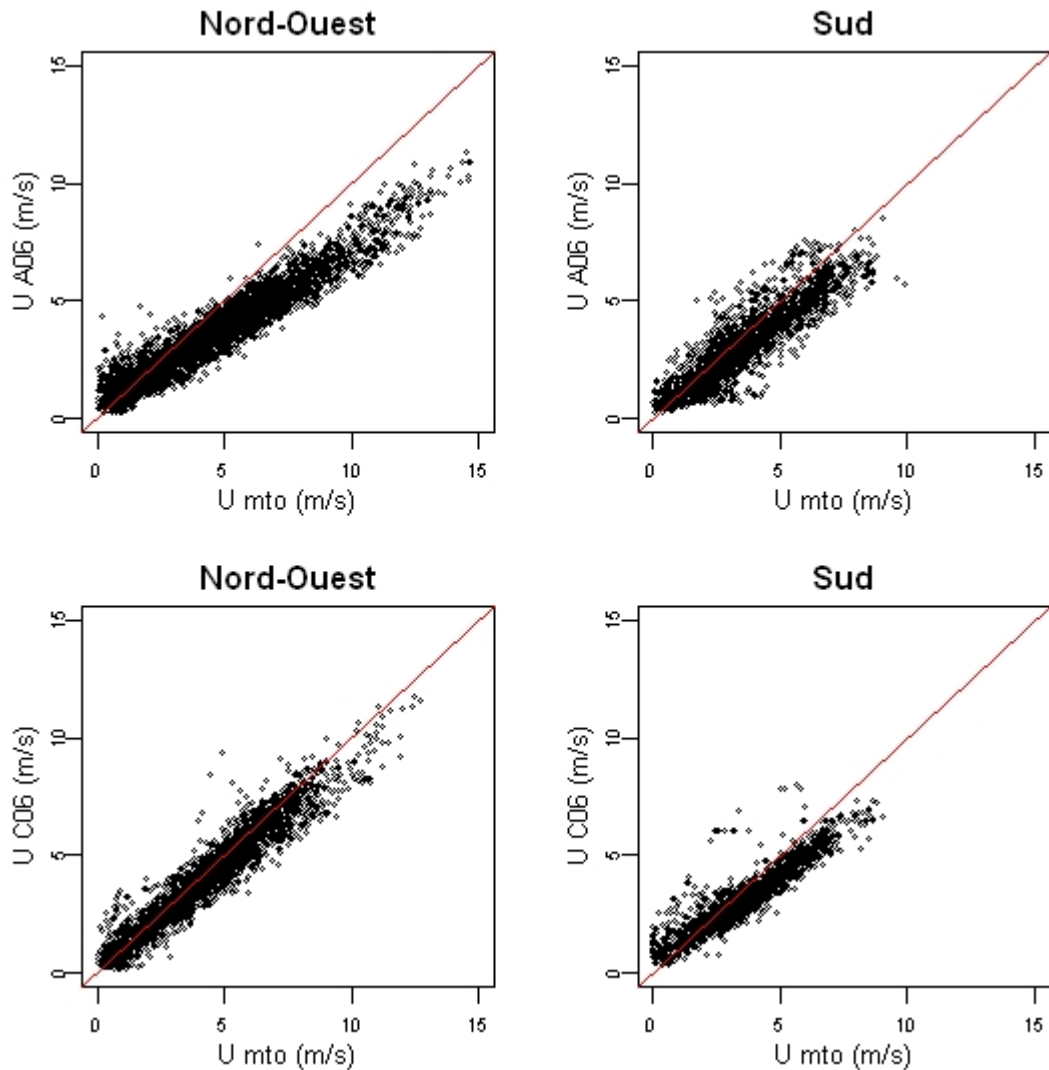


Figure 3.10. Comparaison des vitesses du vent mesurées en 2006 1/ à la station météorologique (U_{mto}), 2/ sur les parcelles A et C par covariance turbulentes (U_{A06} et U_{C06}) pour les directions Nord-Ouest et Sud séparément. Les estimations sont des moyennes sur 30 minutes. La ligne continue est la droite 1:1.

Au total, cette comparaison des mesures anémométriques réalisées sur plusieurs années et en différents points sur le bassin versant montre que si la vitesse du vent est globalement homogène au sein du bassin versant en termes de direction et d'ordre de grandeur de la vitesse du vent, il existe toutefois des différences significatives et systématiques entre les vitesses mesurées en différentes localisations. Le déterminisme de ces différences apparaît être, en premier lieu, la direction du vent relativement à l'orientation de la pente sur laquelle sont effectuées les mesures. Dans la situation particulière du bassin versant de Kamech, où les deux directions dominantes du vent, de « Nord-Ouest » et de « Sud », sont parallèles aux pentes dominantes, on observe une diminution de la vitesse du vent lorsque celui-ci est descendant (vent de Nord-Ouest sur le versant nord-ouest, vent de Sud sur le versant sud) et

une augmentation lorsqu'il est ascendant (vent de Sud sur le versant nord-ouest, vent de Nord-Ouest sur le versant sud). En second lieu, la végétation bien développée peut influencer sur la vitesse du vent, comme observé sur la parcelle B. Le fait que son influence est bien prononcée lorsque le vent est descendant uniquement suggère une probable différence dans les écoulements de vent ascendant et descendant.

Tableau 3.4. Relation entre les vitesses de vent Nord-Ouest et Sud durant l'année 2006, sur différents sites de mesures : la station météorologique (mto), la station de covariances turbulentes sur parcelle A06 et celle sur C06, n : nombre de répétition, Xm: moyenne des vents de la station X définie dans la deuxième ligne, Ym: moyenne des vents de la station Y définie dans la deuxième ligne, ME: écart moyen entre X et Y, RMSE: l'erreur quadratique moyenne, R²: coefficient de détermination.

	Nord-Ouest			Sud		
	X= U mto Y=U A06	X=U mto Y=U C06	X=U C06 Y=U A06	X= U mto Y=U A06	X=U mto Y=U C06	X=U C06 Y=U A06
n	4240	2651	2637	2510	2000	1828
Xm	4.71	4.31	4.12	3.52	3.43	3.12
Ym	3.69	4.10	3.43	3.09	3.05	3.15
ME	-1.01	-0.20	-0.69	-0.43	-0.38	0.04
RMSE	1.50	0.71	1.06	0.92	0.80	0.74
R²	0.91	0.92	0.91	0.80	0.85	0.78

1.2.2. Variabilité spatiale de la température de l'air, de l'humidité de l'air et de l'évapotranspiration de référence

1.2.2.1. La température de l'air

Dans le bilan d'énergie, la température de l'air est le paramètre qui influence directement le flux de chaleur sensible. Le relief a une influence sur la température, via une décroissance avec l'altitude de 0.6 K/100 m. Via les échanges de chaleur entre la surface et l'atmosphère, la température de l'air varie aussi avec le rayonnement solaire direct, où ce dernier diffère selon l'exposition du versant. En général la température est plus élevée au versant sud mais ceci peut changer en fonction des interactions avec d'autres paramètres.

De même que pour la vitesse du vent, la comparaison des mesures de la température de l'air est réalisée séparément pour les différentes années en raison des différents emplacements des

stations de mesure des flux. Les moyennes des températures de l'air des différentes stations sont présentées dans le Tableau 3.5 pour les trois années 2004, 2005 et 2006.

Tableau 3.5. Moyenne des températures de l'air (°C) mesurées en 2004, 2005 et 2006, 1/ à la station météorologique (Ta mto), 2/ sur la parcelle E avec la station de mesure « Bowen » (Ta E04) et 3/ sur les parcelles A, B et C avec les stations de mesure par covariances turbulentes (Ta A04, Ta B05, Ta A06 et Ta C06), pour les directions Nord-Ouest et Sud séparément.

		(Ta Sud) – (Ta Nord-Ouest)	Nord-Ouest	Sud
		Ta mto -Ta A04		
2004	Ta mto	3.0	-0.1	0.1
	Ta A04	2.8		
	Ta mto -Ta E04			
	Ta mto	3.2	0.9	1.0
	Ta E04	3.1		
		Ta mto -Ta B05		
2005	Ta mto	3.1	0.2	0.0
	Ta B05	3.3		
		Ta mto – Ta A06		
2006	Ta mto	1.2	-0.1	0.0
	Ta A06	1.0		
	Ta mto – Ta C06			
	Ta mto	0.2	-0.2	-0.1
	Ta C06	0.1		

Les différences entre températures de l'air mesurées par la station météorologique et par les stations de mesures des flux sont très faibles (de l'ordre de 0.1 °C), sauf pour la station « Bowen » placée à la parcelle E en 2004, qui présente un écart systématique de 1 °C. Le mode de mesure différent (thermocouple) pour cette station pourrait expliquer cette différence. On retrouve l'écart quasi systématique entre températures avec la direction du vent (observée précédemment, voir Figure 3.5) : les températures mesurées par vent de Sud sont toujours supérieures (jusqu'à 3 °C de différence) à celles mesurées par vent de Nord. Par contre, on n'observe pas d'inversion des relations entre températures mesurées par la station météorologique et par les stations de flux selon la direction du vent (Nord-Ouest ou Sud), comme c'est le cas pour la vitesse du vent.

Enfin, les différences observées pour (Ta Sud) – (Ta Nord-Ouest) en 2006 par rapport à 2004 et 2005 (troisième colonne du Tableau 3.5) peuvent s'expliquer par les différences de calendrier pour la collecte des mesures. Ainsi les mesures collectées sur la parcelle A en 2004 s'étaient de mars à décembre, celles collectées sur la parcelle B en 2005 s'étaient de janvier à juin, et celles collectées sur les parcelles A et C en 2006 s'étaient d'avril à juillet (voir Tableau 2.1 dans le chapitre 2).

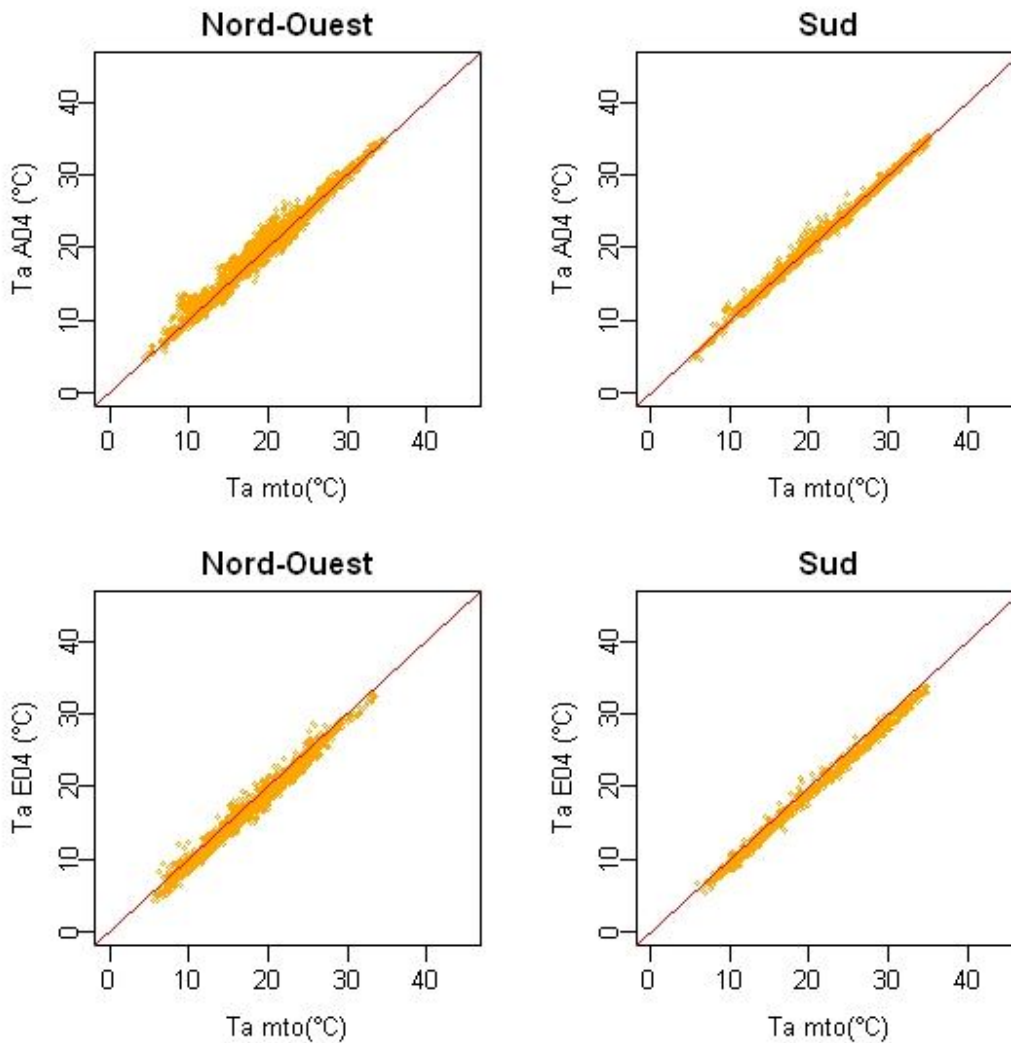


Figure 3.11. Comparaison des températures de l'air mesurées en 2004 à la station météorologique (Ta mto) et sur les parcelles A (Ta A04, 1^{ère} ligne) et E (Ta E04, 2^{ème} ligne) pour le jeu de données correspondant aux observations collectées à pas de temps 30 minutes. Les conditions de vent Nord-Ouest (colonne de gauche) et Sud (colonne de droite) sont différenciées. La ligne continue est la droite 1:1.

Les corrélations entre les mesures de température de l'air aux différentes stations sont systématiquement importantes, avec des valeurs de R^2 très proches de 1 et des différences très faibles, comme illustré avec des exemples représentatifs sur la Figure 3.11 et le Tableau 3.6.

Finalement, aucune différence significative de température n'apparaît entre les diverses localisations des stations de mesure. Les effets de relief, notamment sur la vitesse du vent, ne semblent donc pas affecter de manière significative la température de l'air. Il faut toutefois rappeler qu'aucune des stations de mesure n'était située au «bas-fond» du bassin versant au niveau de l'oued, ce qui élimine l'analyse d'une situation extrême au sein du bassin.

Tableau 3.6. Statistiques des régressions linéaires (pentes et ordonnées à l'origine, coefficient de corrélation R²) entre les températures de l'air mesurées en 2004 à la station météorologique (Ta mto) et sur les parcelles A (Ta A04) et E (Ta E04) pour le jeu de données correspondants aux observations collectées à pas de temps 30 minutes. Les conditions de vent Nord-Ouest et Sud sont différenciées.

Nord Ouest		Sud	
Ta A04 = 1.01 * Ta mto - 0.11	R ² =0.98	Ta A04 = 0.99 * Ta mto + 0.09	R ² =0.99
Ta E04 = 1.01 * Ta mto - 1.05	R ² =0.99	Ta E04 = 0.98 * Ta mto - 0.65	R ² =0.99
Ta A04 = 1.01 * Ta E04 + 0.8	R ² =0.99	Ta A04 = 1.01 * Ta E04 + 0.79	R ² =0.99

1.2.2.2. L'humidité de l'air

Le Tableau 3.7 récapitule les moyennes des VPD pour les différentes stations et les différentes années. Il s'avère que les variations entre les stations sont très faibles et que les conditions de vent de Sud sont plus sèches.

Tableau 3.7. Moyenne des déficits de pressions de vapeur (Pa) mesurées à la station météorologique (VPD mto), sur les parcelles A et E en 2004 (VPD A04 et VPD E04), sur la parcelle B en 2005 (VPD B05), et sur les parcelles A et C en 2006 (VPD A06 et VPD C06). Les conditions de vent Nord-Ouest et Sud sont différenciées.

	Nord-Ouest	Sud
2004		
VPD mto	630.25	855.72
VPD A04	621.08	830.46
2004		
VPD mto	525.87	715.33
VPD E04	490.70	664.60
2005		
VPD mto	442.13	604.61
VPD B05	407.68	585.60
2006		
VPD mto	794.96	962.37
VPD A06	847.65	1002.65
2006		
VPD mto	945.07	1127.58
VPD C06	932.36	1099.99

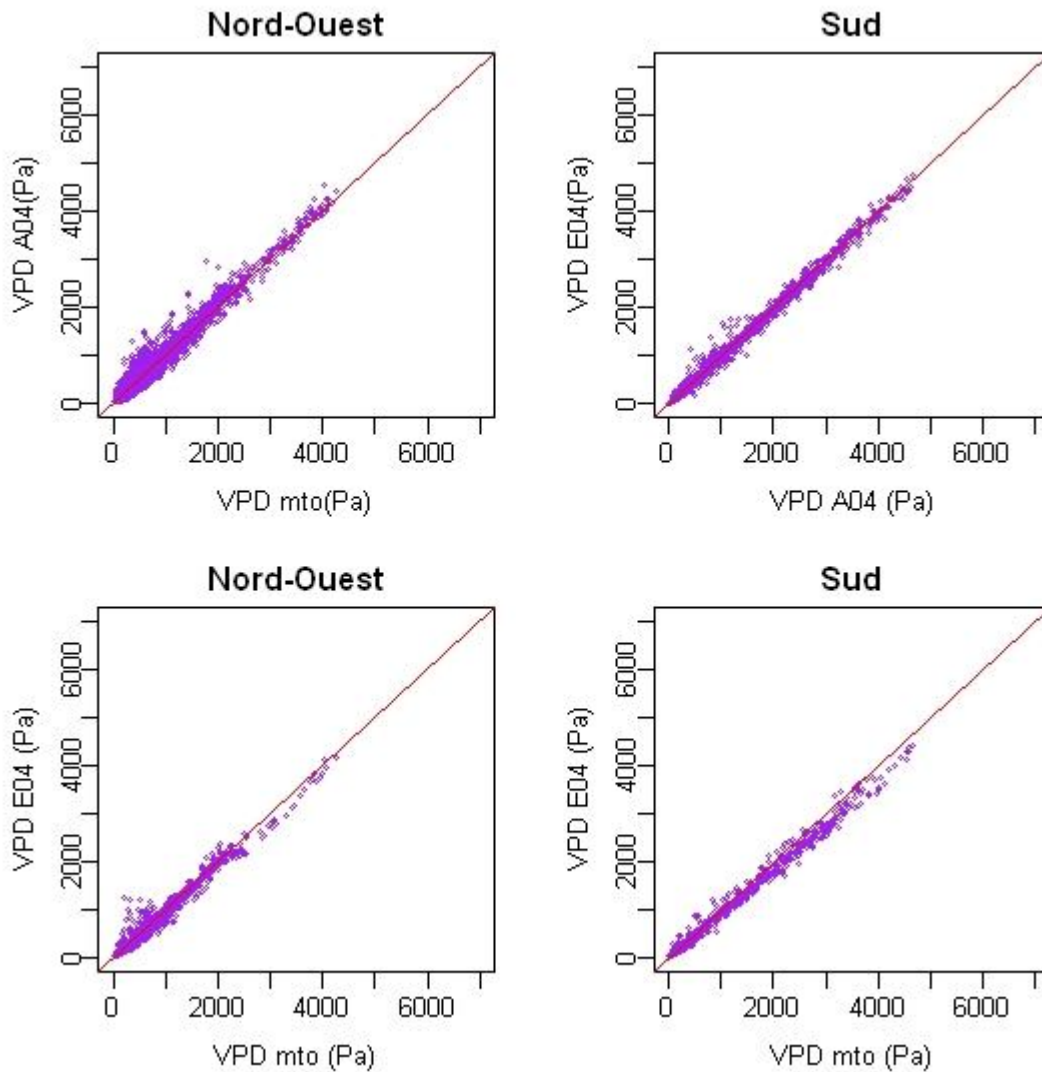


Figure 3.12. Comparaison des déficit de pression de vapeur de l'air mesurées à la station météorologique (VPD mto) et aux parcelles A (VPD A04) (1^{ère} ligne) et E (VPD E04) (2^{ème} ligne) pour le jeu de données correspondant aux observations collectées, à pas de temps 30 minutes, en 2004 sur la parcelle A et sur la parcelle E respectivement. Les conditions de vent Nord-Ouest (colonne de gauche) et Sud (colonne de droite) sont différenciées. Est aussi indiquée la droite 1:1 en ligne continue.

Tableau 3.8. Statistiques des régressions linéaires (pentes et ordonnées à l'origine, coefficient de corrélation R²) entre les déficits de pression de vapeur de l'air mesurés mesurées en 2004 à la station météorologique (VPD mto) et sur les parcelles A (VPD A04) et E (VPD E04) pour le jeu de données correspondants aux observations collectées à pas de temps 30 minutes. Les conditions de vent Nord-Ouest et Sud sont différenciées.

Nord Ouest		Sud	
VPD A04 = 1.04 * VPD mto - 33.1	R ² = 0.97	VPD A04 = 0.99 * VPD mto - 18.0	R ² =0.99
VPD E04 = 0.97 * VPD mto - 21.2	R ² = 0.98	VPD E04 = 0.92 * VPD mto + 4.3	R ² =0.99
VPD A04 = 1.09 * VPD E04 - 40.5	R ² = 0.99	VPD A04 = 1.08 * VPD E04 - 34.9	R ² =0.99

Enfin, les corrélations entre les températures de l'air mesurées sur les différentes stations durant les trois années sont illustrées avec des exemples représentatifs via la Figure 3.12 et le Tableau 3.8. Il s'avère ici aussi que les corrélations sont fortes, tout comme pour la température de l'air.

1.2.2.3. L'évapotranspiration de référence

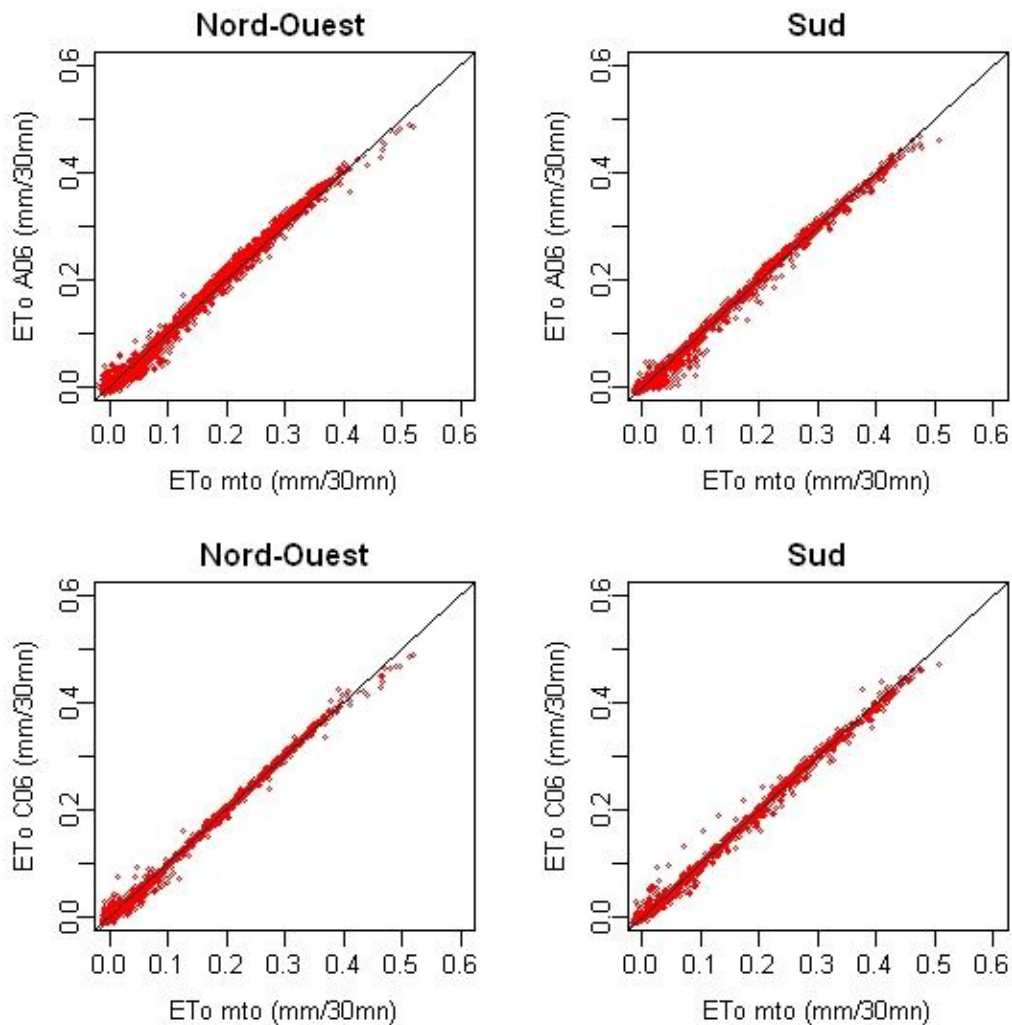


Figure 3.13. Comparaison des évapotranspiration de référence mesurées en 2006 à la station météorologique (ET_0 mto) et sur les parcelles A (ET_0 A06, 1^{ère} ligne) et C (ET_0 E06, 2^{ème} ligne) pour le jeu de données correspondant aux observations collectées à pas de temps 30 minutes. Les conditions de vent Nord-Ouest et Sud sont différenciées. La ligne continue est la droite 1:1.

La comparaison de l' ET_0 estimée à partir des mesures sur les différentes locations à l'intérieur du bassin versant entre les sites est illustrée via deux exemples représentatifs par la Figure 3.13 et le Tableau 3.9. Ces illustrations n'indiquent pas de différence notable, même

pour les situations où il existe des différences importantes sur la vitesse du vent, tel qu'entre la station météorologique et station « EC » sur la parcelle A en 2004, par vent de Nord-Ouest. Dans tous les cas, la différence entre ET_0 calculées à partir des données de la station météorologique ou des stations de mesure des flux est très faible, au maximum de 0.11 mm/j.

Tableau 3.9. Statistiques des régressions linéaires (pentes et ordonnées à l'origine, coefficient de corrélation R^2) entre les évapotranspiration de référence mesurés en 2006 à la station météorologique (ET_0 mto) et sur les parcelles A (ET_0 A06) et E (ET_0 C06) pour le jeu de données correspondants aux observations collectées à pas de temps 30 minutes. Les conditions de vent Nord-Ouest et Sud sont différenciées.

Nord Ouest		Sud	
$ET_{0_A06} = 1.03 * ET_{0_mto} + 0$	$R^2 = 0.99$	$ET_{0_A06} = 1 * ET_{0_mto} + 0$	$R^2 = 0.99$
$ET_{0_C06} = 1.01 * ET_{0_mto} + 0$	$R^2 = 1$	$ET_{0_C06} = 1 * ET_{0_mto} + 0$	$R^2 = 1$
$ET_{0_A06} = 1.02 * ET_{0_C06} + 0$	$R^2 = 1$	$ET_{0_A06} = 1 * ET_{0_C06} + 0$	$R^2 = 1$

1.3. Conclusion

Cette section nous a permis de situer les conditions climatiques de notre étude. Le climat est de type méditerranéen, avec pour caractéristiques principales des conditions hydriques déficitaires sur la période s'étendant d'avril à septembre, et donc sur des fenêtres temporelles importantes d'un point de vue cycle cultural.

Le site présente la particularité d'être soumis à 1/ un forçage de vent externe, et 2/ des vitesses de vent élevées. L'analyse des conditions météorologiques rencontrées a montré qu'il existait deux classes dominantes de directions du vent, dites de « Nord-Ouest » et de « Sud », toutes deux étant approximativement parallèles aux pentes dominantes rencontrées sur le bassin versant. En situation de vent de Nord-Ouest, les vitesses de vent sont supérieures et les températures, les déficits de pression de vapeur et l'évapotranspiration de référence sont inférieurs à ceux observés par vent de Sud.

Comme les mesures de flux ont été conduites à différents emplacements sur le bassin versant, une analyse de la variabilité spatiale des variables climatiques a été conduite. Cette analyse a montré que seule la vitesse du vent présentait des variations spatiales significatives, et que ces variations étaient liées principalement à la direction du vent par rapport au relief local. Il résulte du couplage entre direction du vent et relief des conditions simultanées de vents ascendant et

descendants sur les deux versants, les analyses des mesures laissant à penser que la vitesse du vent est plus importante pour les écoulements ascendants.

Tableau 3.10. Moyenne diurne ($R_g > 20 \text{ W/m}^2$) des mesures à la station météorologique (Mt) et aux stations de flux (Fl), du rayonnement global (Rg), de la vitesse du vent (U), de la température de l'air (Ta) et du déficit pression de vapeur (VPD) durant les périodes de mesure des flux. Les directions Nord-Ouest et Sud sont séparées. Sont considérées les parcelles (A, B, C), les années (2004, 2005, 2006) et les conditions de couverture végétale (cultures de blé, avoine, fève, parcelle de parcours et sol nu).

	Rg (W.m^2)		U (m/s)				Ta ($^{\circ}\text{C}$)				VPD (kPa)			
	Nord- Ouest	Sud	Nord- Ouest		Sud		Nord- Ouest		Sud		Nord- Ouest		Sud	
	Mt	Mt	Mt	Fl	Mt	Fl	Mt	Fl	Mt	Fl	Mt	Fl	Mt	Fl
A04ble 30/03-17/07	491	518	5.1	3.5	4.2	3.9	20.0	20.4	21.8	21.9	0.89	0.91	1.22	1.20
A04sol 18/07-04/11	384	387	5.3	4.5	4.4	4.6	21.7	21.9	24.4	24.3	1.02	1.03	1.30	1.27
B05avo 18/01-24/05	398	484	6.4	4.9	4.3	4.1	13.5	13.3	17.0	17.1	0.49	0.44	0.72	0.69
B05sol 25/05-20/06	530	486	5.0	4.6	3.8	4.5	23.0	22.7	24.5	24.6	0.11	0.10	1.39	1.41
A06fev 03/03-16/05	470	488	6	4.3	4.3	3.7	15.6	15.9	17.8	17.9	0.65	0.68	0.68	0.72
A06par 17/05-20/06	512	549	5.2	3.9	4.6	3.8	21.2	21.6	25.2	25.6	1.20	1.29	1.70	1.77
A06sol 21/06-28/07	559	514	4.6	4.1	4.0	3.4	27.0	27.6	30.1	30.8	1.50	1.75	2.80	2.91
C06par 13/04-20/06	508	533	5.1	4.8	4.3	3.6	19.8	20.0	22.2	22.4	1.02	1.00	1.23	1.22
C06sol 21/06-27/07	560	513	4.6	4.8	4.0	3.7	27.1	27.4	30.7	31.0	1.59	1.60	2.82	2.85

Les mesures de flux ont été réalisées sur diverses périodes de l'année correspondant à différentes conditions climatiques. Afin d'avoir une idée plus fine des conditions climatiques durant l'expérimentation, nous reprenons ici les données analysées dans la Section 1, qui correspondent à des mesures collectées tout au long des années 2004, 2005 et 2006, et nous restreignons l'analyse aux périodes de collecte des mesures de flux (les mesures collectées sur la parcelle A en 2004 s'étalaient de mars à décembre, celles collectées sur la parcelle B en 2005 s'étalaient de janvier à juin, et celles collectées sur les parcelles A et C en 2006 s'étalaient d'avril à juillet, voir Tableau 2.1 dans le chapitre 2). Le Tableau 3.10 synthétise les conditions climatiques rencontrées durant les périodes de mesures des flux, pour chaque parcelle et pour chaque occupation du sol. Etant donné que les flux ne seront étudiés par la suite que pour les conditions diurnes, les données climatiques indiquées correspondent à des périodes diurnes où le rayonnement global dépasse les 20 W.m^2 . De plus, les mesures correspondant à une direction de vent Est ont été éliminées. En effet, nous avons expliqué