

Dynamique et variabilité spatiale de la végétation

La végétation joue un rôle primordial dans les échanges surface – atmosphère. Le type de végétal, sa structure, son taux de couverture du sol, sa hauteur et son indice foliaire influencent directement les échanges. La végétation joue non seulement un rôle de premier ordre dans l'évapotranspiration en tant que surface d'échanges qui s'autorégule, mais aussi dans la détermination des longueurs de rugosité et des conditions de stabilité. Par conséquent, elle influe sur l'étendue des empreintes (ou footprints) des mesures de flux turbulents qui seront présentés dans le Chapitre 4 (§ 1.1.2) et le Chapitre 5 (§ 2.1).

L'objectif de cette partie est donc de présenter l'évolution et la variabilité spatiale de la végétation pour les parcelles sur lesquelles les flux turbulents sont mesurés. La dynamique de la végétation est représentée par la hauteur du couvert végétal et par son indice foliaire. Les données considérées étaient collectées avec des fréquences variables, de l'hebdomadaire au mensuel.

2.1. Hauteur du couvert végétal

La hauteur du couvert végétal a été mesurée sur les parcelles de mesures de flux durant les périodes d'acquisition, ainsi que sur les parcelles se trouvant dans la zone d'influence du scintillomètre durant la période de mesure correspondante.

2.1.1. Hauteur du couvert végétal sur les parcelles de mesure par covariances turbulentes

La hauteur du couvert est un paramètre important puisqu'il influence directement les longueurs de rugosité mécanique et thermiques et la hauteur de déplacement et par suite, la zone d'empreinte des mesures des flux turbulents. Dans notre cas, il fut possible d'effectuer des mesures de flux turbulents sur des parcelles de petites tailles car les cultures présentes

étaient des cultures annuelles dont les tailles dépassent le mètre sur de courtes périodes seulement.

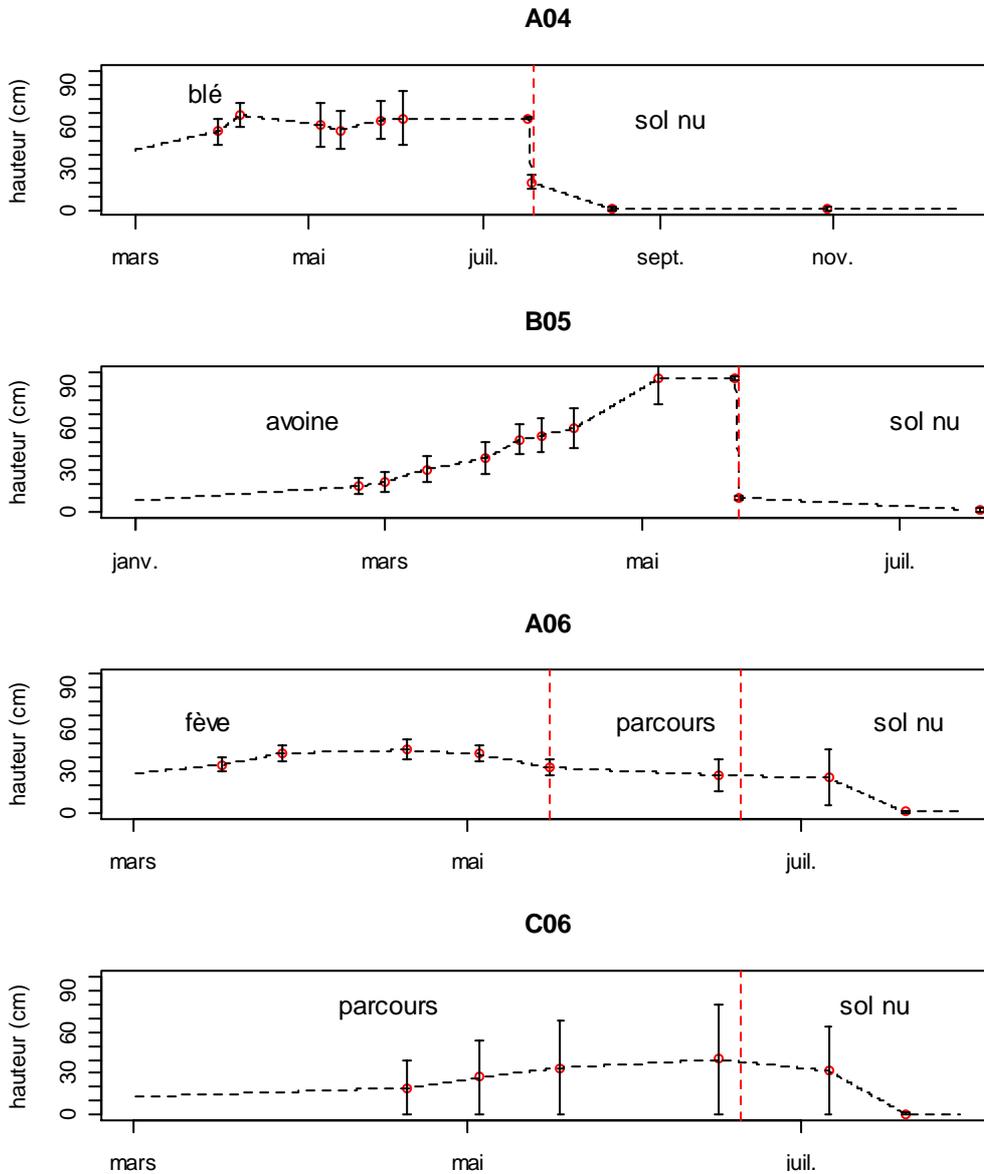


Figure 3.14. Evolution de la hauteur du couvert végétal sur les parcelles de mesures de flux: moyenne et écart-type des mesures (en cm), et interpolation linéaire (ligne discontinue). La date de récolte est représentée par une ligne verticale discontinue. Les jeux de données sont labellisés A04 (blé sur la parcelle A en 2004), B05 (avoine sur parcelle B en 2005), A06 (fève puis jachère sur parcelle A en 2006) et C06 (parcours sur la parcelle C en 2006).

Deux difficultés ont été rencontrées pour estimer la hauteur, la première est l'hétérogénéité des espèces sur une même parcelle (particulièrement sur les jachères) et la seconde est la présence de débris végétaux après récolte (après moisson des céréales par exemple) qui peuvent former des couches sur le sol dont l'épaisseur est très variable. Nous avons essayé de

compenser l'hétérogénéité spatiale par l'augmentation du nombre d'observations, c'est à dire de répétitions, à l'intérieur d'une même parcelle.

L'évolution temporelle des mesures (caractérisées par la moyenne et l'écart-type des répétitions) est représentée dans la Figure 3.14, pour les différentes parcelles de mesures des flux. Y figure aussi une interpolation linéaire entre les mesures qui permettra par la suite de prescrire de manière continue dans le temps les hauteurs de la végétation, dans les calculs de rugosité, de footprint, et de caractérisation des paramètres atmosphériques. Deux types d'évolutions des hauteurs ont été observés.

- Le premier type est caractérisé par une augmentation de la croissance jusqu'à un plateau, suivie d'une chute brutale à la récolte, caractérisée par une hauteur de coupe, elle-même suivie d'une diminution plus lente correspondant à la dégradation des débris, jusqu'au stade de sol nu, cet état restant stable jusqu'à la saison suivante. Cette dynamique est perçue sur les cultures de céréales (parcelle A en 2004 et parcelle B en 2005).
- Le deuxième type de dynamique diffère par l'absence de coupe, la croissance de la hauteur se faisant jusqu'à un seuil, suivi d'une décroissance progressive : c'est le cas des parcelles de parcours (parcelle C en 2006) et de fève (parcelle A en 2006) qui, après récolte, deviennent des jachères ou des parcours pâturés et pour lesquelles, suite aux premières pluies, de la végétation naturelle reprend.

Sur les deux cultures de céréales blé (parcelle A en 2004) et avoine (parcelle B en 2005), les écart-types montrent bien l'hétérogénéité existante. Ces hétérogénéités sont dues d'une part aux techniques traditionnelles de labour et de semis qui engendrent une levée hétérogène, et d'autre part à l'origine des semences qui ne sont pas très pures : sur tout le bassin versant, les cultures d'avoine sont toujours mélangées avec un peu d'orge et de ray-grass. S'y ajoute les résidus de semences des précédentes cultures, et l'absence de traitements de désherbage.

Sur les cultures de fève (parcelle A en 2006) et de parcours (parcelle C en 2006), on observe une plus grande hétérogénéité que sur les parcelles de céréales. Ceci est expliqué par la présence de plusieurs espèces sur la parcelle C (végétation naturelle pour le parcours), et par la reprise des mauvaises herbes après la récolte de fève sur la parcelle A. Les écarts-types sont importants et les coefficients de variation dépassent les 30%.

Les mesures de flux ont été réalisées à différentes périodes de hauteur du couvert végétal, sur sol nu, et pour différentes dynamiques de croissance : avec récolte par coupe ou avec une décroissance continue de la hauteur. Nous verrons que les périodes de coupe sont particulièrement intéressantes car elles exacerbent l'influence de la hauteur du végétal sur les écoulements et par suite sur les flux.

2.1.2. Hauteur du couvert végétal sur les parcelles représentatives du trajet optique du scintillomètre

Les évolutions des hauteurs de couvert végétal pour les différentes parcelles susceptibles d'appartenir à la zone d'influence du scintillomètre sont représentées dans la Figure 3.15. On observe une forte variabilité, spatiale et temporelle, due bien sûr aux différentes espèces présentes, mais aussi à la nature du sol et à sa profondeur.

Les hauteurs des cultures pour les céréales (jeux de données D06org, F06tri, H06blé et M06blé) atteignent des maximums plus élevés que ceux observés pour les cultures de fève (jeux de données L06fev et A06) et les parcelles de parcours (jeux de données G06plg, Ia06phb, Ib06phb, C06). Ainsi les parcelles proches du lit de l'oued, telles que la parcelle H en 2006 cultivée en blé, présentent-elles un sol plus profond et plus humide, qui permet une croissance plus importante de la végétation. Cette variabilité peut même engendrer la présence simultanée, à l'intérieur d'une même parcelle, de différentes espèces végétales spontanées telles qu'observées sur la parcelle I en 2006, occupée par un parcours herbacé permanent. Comme explique dans le Chapitre 2, cette parcelle se trouvant sur une pente prononcée, nous l'avons partagée en deux : la partie aval (Ia06phb), proche du lit d'oued, où la végétation a eu un développement important et la partie amont (Ib06phb) où la croissance de la végétation était plus réduite.

Pour l'ensemble des parcelles, la hauteur arrive à son maximum entre avril et mai, commence à décroître en juin pour devenir faible en juillet et presque s'annuler en août. Les mesures scintillométriques (du 9/4/06 au 27/07/06) ont donc eu lieu durant cette période de maximum de croissance et de décroissance de la hauteur du végétal.

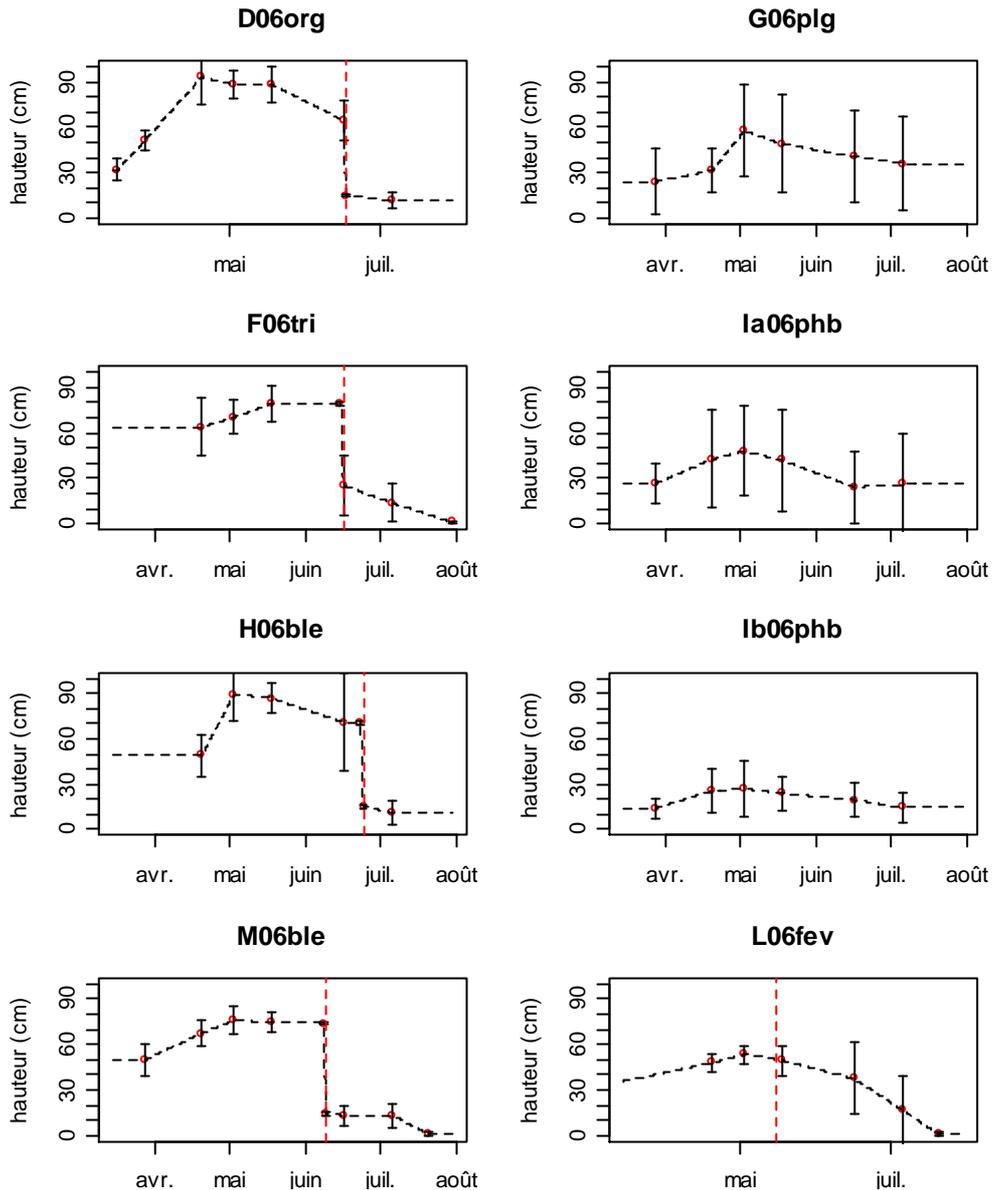


Figure 3.15. Evolution de la hauteur du couvert végétal sur les parcelles représentatives de la zone de mesure du scintillomètre : moyenne et écart-type des mesures en cm, et interpolation linéaire (ligne discontinue). La date de récolte est représentée par une ligne verticale discontinue. Les jeux de données sont labellisés D06org (culture d'orge sur la parcelle D en 2006), G06plg (parcours ligneux sur la parcelle G en 2006), F06tri (culture de triticale sur la parcelle F en 2006), Ia06phb et Ib06phb (parcours herbacés sur la parcelle I en 2006, divisée en deux sous parcelles Ia et Ib), H06ble et M06ble (cultures de blé sur les parcelles H et M en 2006), et L06fev (culture de fève sur la parcelle L en 2006).

2.2. Indice foliaire

L'indice foliaire (LAI pour *leaf area index*) est le rapport de la surface des feuilles (une seule face étant prise en compte) à la surface de sol, et s'exprime en m^2/m^2 (sans dimension). C'est

un paramètre essentiel dans l'étude des flux surface – atmosphère puisqu'il représente la surface interceptant le rayonnement solaire utile pour la photosynthèse, mais aussi la surface permettant les échanges gazeux de la plante (H_2O , O_2 et CO_2). C'est la raison pour laquelle on ne prend généralement en compte que les feuilles vertes dans la détermination de l'indice foliaire (notion de « green LAI »). De plus, les feuilles représentent souvent la majorité des éléments à l'origine des forces de traînée qui représentent l'influence du couvert végétal sur les échanges de quantité de mouvement, ce qui justifie les paramétrages des longueurs de rugosité par l'indice foliaire, en plus de la hauteur du couvert. L'indice foliaire a été suivi et mesuré selon la procédure décrite dans la partie matériel et méthode. Dans cette partie, nous analysons la variabilité spatiale et temporelle de l'indice foliaire, sur les parcelles situées dans la zone de mesure du dispositif scintillométrique.

2.2.1. Indice foliaire des parcelles de mesures par covariances turbulentes

Comme pour les hauteurs de couvert dans la partie précédente, la Figure 3.16 présente l'évolution de l'indice foliaire sur les parcelles de mesures des flux par covariances turbulentes. On observe que les indices foliaires sont très faibles, de l'ordre de $1 \text{ m}^2/\text{m}^2$ à leur maximum, sauf sur la parcelle B05 cultivée en avoine, pour laquelle l'indice foliaire atteint $3 \text{ m}^2/\text{m}^2$. Comme pour les hauteurs de couvert, la variabilité intraparcellaire est importante. Compte tenu de ces faibles valeurs d'indice foliaire, de leur variabilité et de l'éventuelle présence de plusieurs espèces à l'intérieur d'une même parcelle, nous avons choisi de recourir à l'interpolation temporelle simple comme pour les hauteurs de couvert, plutôt que d'utiliser des fonctions paramétriques telles que les régressions logistiques.

Sur la parcelle B en 2005, la récolte a eu lieu quand l'avoine est encore verte. En revanche, la récolte sur la parcelle A en 2004 a eu lieu lorsque la culture de blé était sèche, et une majeure partie des mesures de flux fut collectée en conditions de végétation sénescence. Sur la parcelle A en 2006, la fève a atteint son maximum d'indice foliaire au mois d'avril, et la reprise de la végétation naturelle n'a pas exhibé des surfaces foliaires importantes, malgré un taux de couverture important. Sur le parcours, la variabilité de l'indice foliaire est très élevée comme l'indique la valeur observée de l'écart-type, ce qui est typique de la végétation naturelle en comparaison à la végétation cultivée.

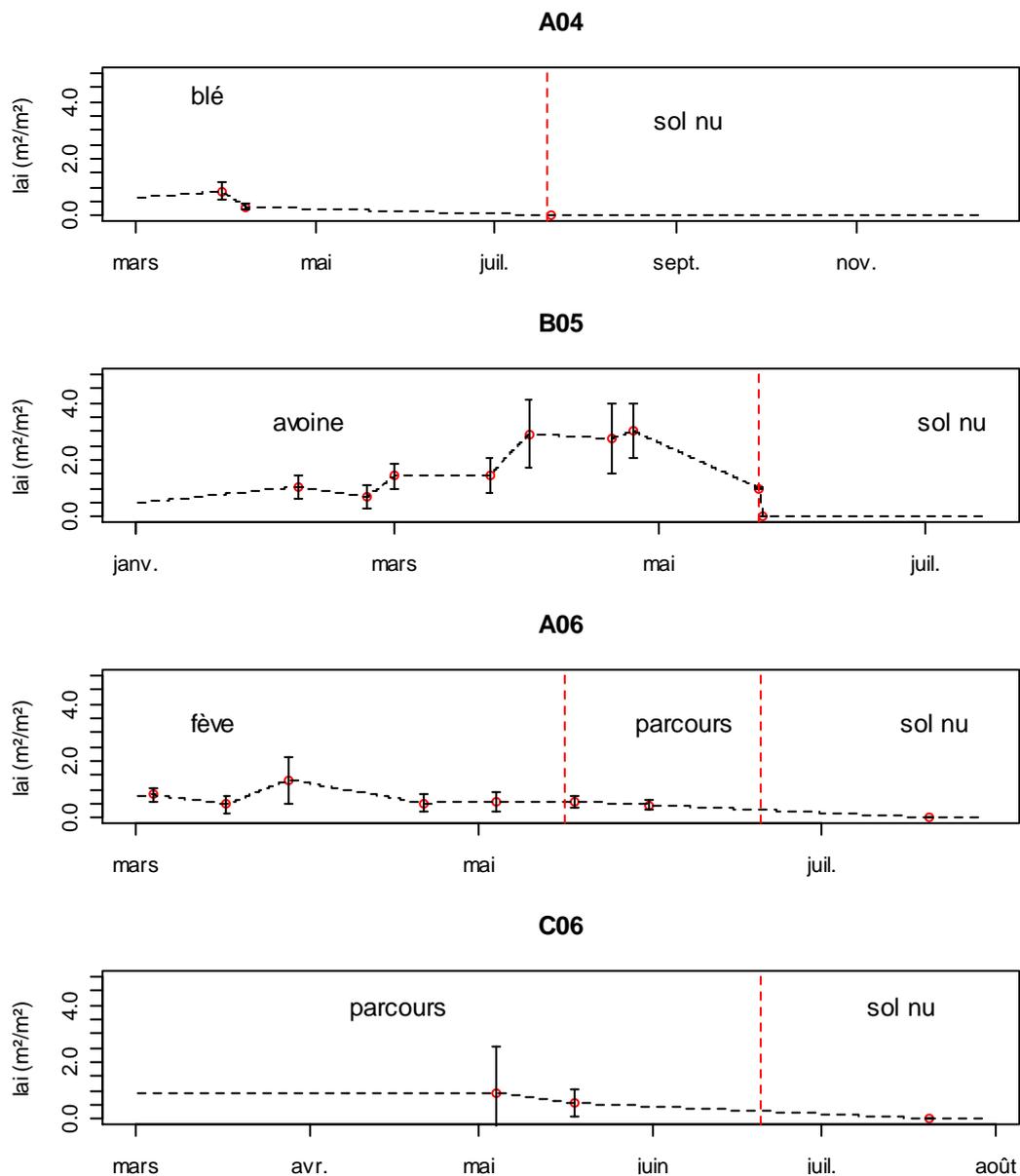


Figure 3.16. Evolution de l'indice foliaire sur les parcelles de mesures de flux : moyenne et écart-type des mesures (en m^2/m^2), et interpolation linéaire (ligne discontinue). La date de récolte est représentée par une ligne verticale discontinue. Les jeux de données sont labellisés A04 (blé sur la parcelle A en 2004), B05 (avoine sur parcelle B en 2005), A06 (fève puis jachère sur parcelle A en 2006) et C06 (parcours sur la parcelle C en 2006).

2.2.2. Indice foliaire des parcelles représentatives du trajet optique du scintillomètre

La Figure 3.17 présente l'évolution en 2006 de l'indice foliaire sur les parcelles représentatives du trajet optique du scintillomètre. Comme pour les hauteurs, et pour les mêmes raisons, on constate que certaines parcelles présentent des développements foliaires nettement plus important (indice foliaire allant jusqu'à $2 \text{ m}^2/\text{m}^2$) que ceux observés pour les deux parcelles sur lesquelles étaient mesurés les flux par covariances turbulentes (parcelles A et C). La variabilité spatiale, entre parcelles comme à l'intérieur de chacune d'elle, est là aussi importante.

Au début du mois d'avril (début des mesures scintillométriques), l'indice de surface foliaire pouvait atteindre $2 \text{ m}^2/\text{m}^2$ sur certaines parcelles. Il décroît très rapidement (dessèchement de la végétation) et devient même nul pour les céréales dès le début du mois de mai (D06org, F06tri, H06blé, M06blé). Sur les parcours (G06plg, Ia06phb, Ib06phb, L06fev), la végétation reste active plus longtemps, jusque vers mi-mai, début juin. L'indice foliaire du triticale se trouvant dans la parcelle F en 2006 fut très faible à la mi-avril, ce qui peut s'expliquer par la faible profondeur du sol pour cette parcelle. A proximité du lit de l'oued (H06ble et Ia06phb) la végétation est un peu plus développée que sur les parcelles situées en amont. Les céréales (D06org, H06ble, M06ble) atteignent un indice foliaire maximal plus important que les parcelles de fève (A06, L06fev) et de parcours (C06, G06plg, I06phb). La variabilité, exprimée par les écart-types, est aussi importante sur les céréales que sur les parcours.

L'indice foliaire nous donne une idée de l'évolution potentielle de la consommation en eau durant la période de mesures scintillométriques : transpiration maximale en début de période quand l'indice foliaire est élevé, puis évaporation limitée avec un sol couvert de chaume et de débris, et enfin sol nu. Durant la période de végétation sèche et de sol nu, l'hétérogénéité en ETR est très faible et c'est donc l'hétérogénéité du relief qui sera le facteur dominant. Ceci nous sera utile par la suite dans les études des flux mesurés par scintillométrie.

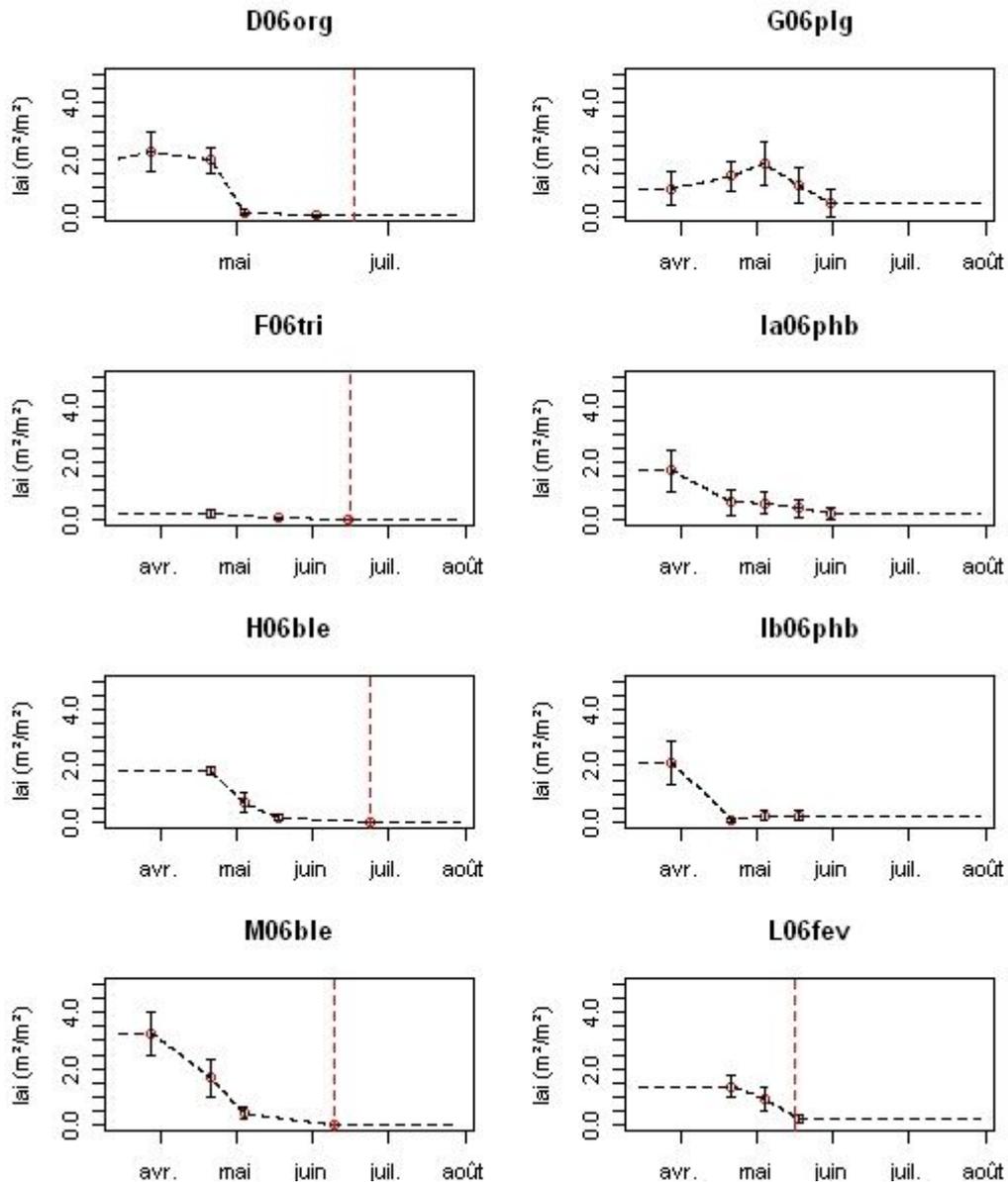


Figure 3.17. Evolution de l'indice foliaire sur les parcelles représentatives de la zone de mesure du scintillomètre : moyenne et écart-type des mesures (en m^2/m^2), et interpolation linéaire (ligne discontinue). La date de récolte est représentée par une ligne verticale discontinue. Les jeux de données sont labellisés D06org (culture d'orge sur la parcelle D en 2006), G06plg (parcours ligneux sur la parcelle G en 2006), F06tri (culture de triticale sur la parcelle F en 2006), Ia06phb et Ib06phb (parcours herbacés sur la parcelle I en 2006, divisée en deux sous parcelles Ia et Ib), H06ble et M06ble (cultures de blé sur les parcelles H et M en 2006), et L06fev (culture de fève sur la parcelle L en 2006).

2.3. Conclusion

Chaque type de culture présente une dynamique spécifique pour la hauteur végétale et l'indice foliaire, que l'on retrouve sur l'ensemble des parcelles échantillonnées. La variabilité spatiale

est toutefois importante, à l'intérieur d'une même parcelle comme entre parcelles, selon le type de sol et la position de la parcelle (amont, aval). On note d'une façon générale des hétérogénéités plus importantes sur les parcours, qui s'expliquent par la présence de plusieurs espèces de végétation naturelle.

Les céréales atteignent généralement un maximum de développement, en terme de hauteur et de surface foliaire, plus important que celui des fèves et des parcours. Le cas inverse peut toutefois être rencontré lorsque les céréales sont cultivées sur un sol peu profond (parcelle F en 2006) ou lorsque la fève est cultivée sur un sol profond. Mekki (2003) a ainsi montré qu'une culture de fève pouvait atteindre 0.8 m sur un sol profond. S'ils démarrent avec des indices foliaires plus faibles, les parcours restent verts plus longtemps puisqu'il y a une reprise de la croissance végétative suite aux pluies printanières, même tardives.

La rapidité de la transition entre la période où la végétation est active et celle où elle est totalement sénescente ou inexistante nous permettra de traiter séparément ces deux périodes lors de l'étude des échanges surface – atmosphère. La première comporte flux de transpiration et d'évaporation tandis que la seconde ne présentera que des flux d'évaporation limités.

3. Dynamique et variabilité spatiale de l'humidité du sol

Les conditions d'humidité du sol sont des facteurs limitants de l'évapotranspiration qui est le terme commun entre le bilan d'énergie et le bilan hydrique. Aussi, dans le bilan d'énergie, le flux de conduction dans le sol est lié à la conductivité thermique du milieu qui elle-même dépend des caractéristiques physiques du sol et de sa teneur en eau : plus l'humidité du sol augmente et plus sa conductivité thermique augmente (Lagouarde et al. 1995). En termes de bilan d'énergie, une augmentation du contenu en eau du sol induit aussi une diminution de l'albédo et donc une augmentation de l'énergie solaire absorbée par la surface.

Sur le bassin versant de Kamech, Mekki (2003) a observé sur différents sites des comportements similaires pour la redistribution de l'eau (i.e. répartition verticale de l'eau après une pluie), avec cependant des différences en termes de profondeur maximale humectée et de taux d'humidité.

L'objectif de cette partie est donc d'étudier la dynamique de l'humidité du réservoir sol. Dans la première partie, nous observons les parcelles sur lesquelles furent effectuées des mesures de flux par la méthode des covariances turbulentes. Dans la seconde partie, nous comparons un ensemble de parcelles qui sont représentatives de la zone source du scintillomètre.

Afin de comprendre les dynamiques observées sur les profils d'humidité du sol, nous comparons les résultats observés avec les propriétés hydrodynamiques. Dans le cadre des activités de l'ORE, ces propriétés sont issues de caractérisations pédologiques (texture, granulométrie) via des fonctions de pédotransfert standard. La capacité de rétention et l'humidité à saturation, pour les parcelles A, B et C, sont représentées dans le Tableau 3.11. De ce dernier, on remarque que la capacité de rétention est plus importante sur la parcelle A et B que sur la parcelle C, et de même pour l'humidité à saturation. Une variation selon les profondeurs est aussi observée.

Tableau 3.11. Profils des capacités de rétention et de l'humidité à saturation des parcelles A, B et C.

Parcelle et profondeur	Capacité de rétention (%)	Humidité à saturation (%)
A et B_ 0-20	37.7	51.8
A et B_ 20-40	36.3	43.8
A et B_ 40-70	34.9	41.8
C_ 0-10	29.3	37.4
C_ 10-30	31.3	39.6
C_ 30-50	32.9	46.2
C_ 50-80	30.4	37.5

3.1 Conditions d'humidité des parcelles de mesures par covariances turbulentes

Le stock hydrique du sol sur 1 m de profondeur est obtenu par intégration des profils issus des mesures gravimétriques. Son évolution pour les parcelles sur lesquelles furent réalisées les mesures de flux turbulents est montrée dans la Figure 3.18. La pluie est indiquée pour mieux comprendre les variations de stock. Pour les profils hydriques, caractérisés par les humidités volumiques (cm^3/cm^3) exprimées en pourcentage à une profondeur donnée, les moyennes des répétitions par parcelle sont illustrés dans la Figure 3.19 (les écart-types ne sont pas présentés pour des raisons de clarté). On note que les coefficients de variation de l'incertitude pour trois à six prélèvements ont très rarement dépassé les 30 %.

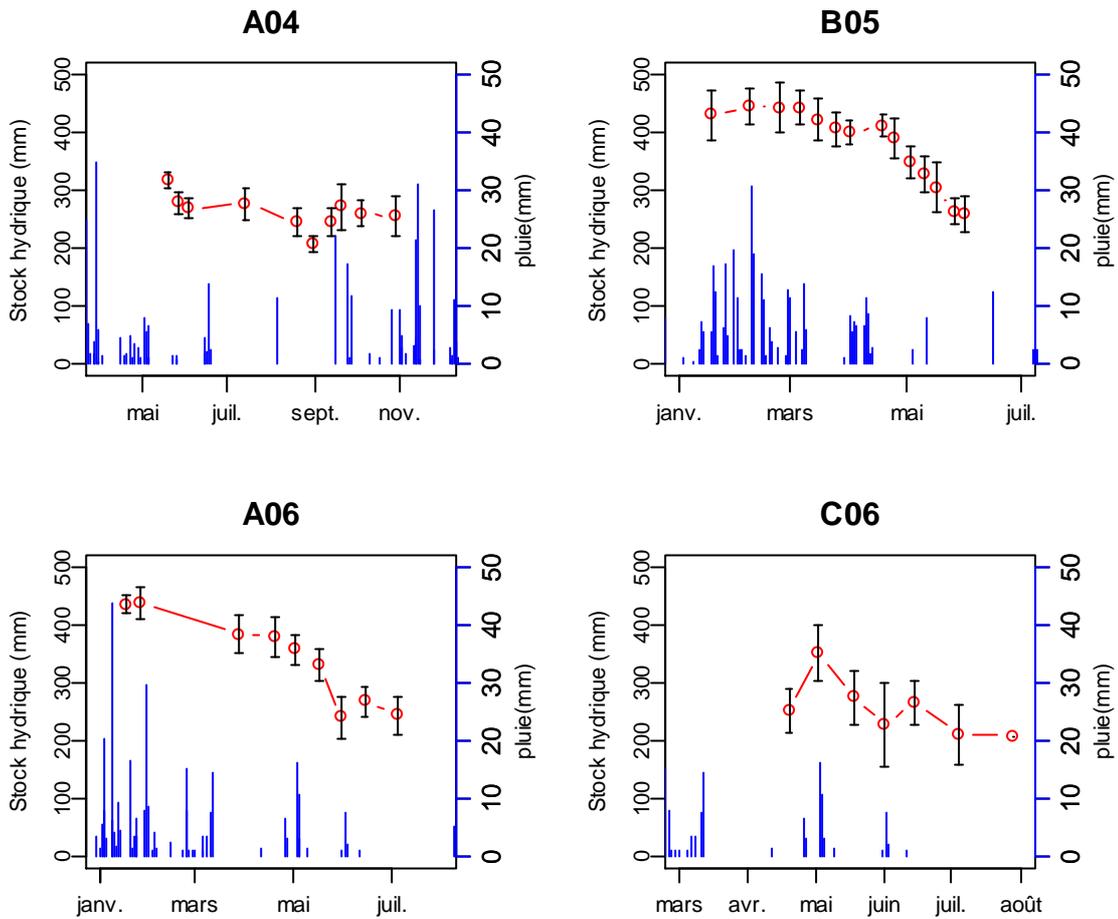


Figure 3.18. Évolution de la réserve en eau jusqu'à 1 m de profondeur en mm et la pluviométrie en mm sur les parcelles de mesures de flux turbulents. Sont considérées les parcelles A en 2004 (A04) et 2006 (A06), B en 2005 (B05), et C en 2006 (C06).

Un examen général de ces figures révèle que le stock hydrique varie entre 200 et 400 mm, et que l'humidité du sol varie entre 8 et 50%. Ce sont des variations qui dépendent de la saison et de la profondeur. Comme habituellement observé, les plus grandes et les plus rapides variations d'humidité sont observées en surface, zone d'échange avec l'atmosphère. Les 40 premiers centimètres montrent une zone très dynamique, c'est la première partie qui évapore (de janvier à mars sur la parcelle A en 2006), et c'est elle qui est la première humectée par les pluies automnales après la sécheresse de l'été (entre 31 août et 04 octobre sur la parcelle A en 2004).

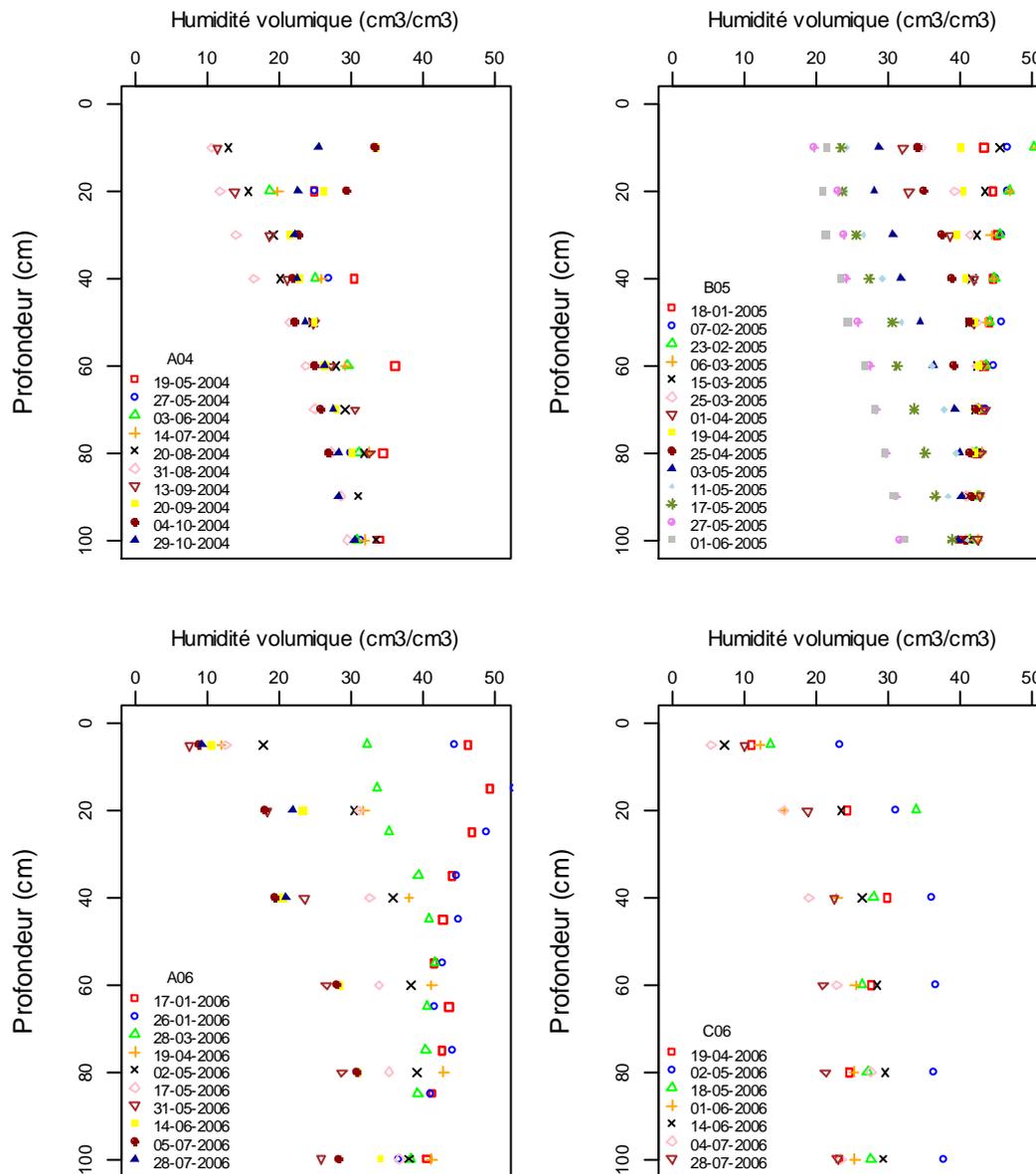


Figure 3.19. Evolution des profils hydriques sur les parcelles de mesures de flux par covariances turbulentes. Sont considérées les parcelles A en 2004 (A04) et 2006 (A06), B en 2005 (B05), et C en 2006 (C06).

Sur la parcelle A en 2004, les mesures ont eu lieu du 19 mai au 29 octobre (Figure 3.18). Différentes occupations du sol sont observées. Jusqu'au 20 juillet, date de récolte, ce sont les stades de montaison et de maturation de la culture de blé qui ont lieu, puis le sol est resté couvert de chaume avant de devenir nu. Début octobre, un labour est pratiqué. La baisse du stock hydrique est bien claire durant la première période (19 mai - 03 juin). C'est une période peu pluvieuse où la perte d'eau du sol peut être expliquée par la consommation en eau de la culture. En examinant les profils hydriques (Figure 3.19), on remarque d'ailleurs le

dessèchement de la couche [40 – 60] cm qui correspondrait à la zone d'extraction racinaire (la culture de blé n'a pas dépassé les 65 cm de hauteur comme le montre la Figure 3.14). Du 03 juin au 14 juillet, le stock et le profil hydrique n'ont pas varié, étant donné que c'est une période où la végétation est sèche, et l'on peut dire que l'apport de pluie est équivalent à l'évaporation. Jusqu'à fin août, un dessèchement progressif est observé, avec des diminutions de stock et de profil, jusqu'à 40 cm de profondeur où l'humidité descend à 15% pour ce dernier. En profondeur, l'humidité a beaucoup moins varié et restait autour de 30 %. Suite à la saison sèche d'été, début septembre, le stock a atteint son minimum de 200 mm. Après une première pluie automnale, une augmentation du stock est observée. La ré-humectation des 30 premiers cm commence et continue au 04 octobre. A cette période, l'humidité est toutefois encore loin de sa valeur à saturation.

Sur la parcelle B en 2005, le suivi de l'humidité du sol a eu lieu du 18 janvier (levée de l'avoine) au 1^{er} juin (chaume). Jusqu'au 06 mars le sol est très humide, il est à saturation ou presque, c'est une période pluvieuse et la végétation n'est pas encore très développée. L'humidité a commencé à décroître à 30 cm de profondeur dès le 15 mars puis à 40 cm le 25 avril. Le dessèchement a continué entre le 25 avril et le 03 mai jusqu'à 60 cm, puis a atteint 1 m le 27 mai (date de récolte). Notons que ces zones d'extraction, qui sont influencées par la profondeur des racines, correspondent à la hauteur du végétal. En effet, la période de chute importante du stock hydrique est celle de développement maximal de la végétation de point de vue hauteur du couvert et LAI (Figure 3.14 et Figure 3.16). Cette chute de stock hydrique correspond bien à la consommation en eau de la culture.

Sur la parcelle A en 2006, les mesures ont eu lieu du 17 janvier (stade de levée pour la fève) au 28 juillet (sol nu). Les profils du 17 et 26 janvier montrent que le sol est très humide, et le stock hydrique est de plus de 400 mm. En comparant avec les humidités à saturation du Tableau 3.11, on peut dire qu'à cette période le sol est à saturation. Ensuite, un dessèchement des premiers horizons (40 cm) est clairement observé entre le 26 janvier et le 28 mars. Cependant, durant la période de développement de la fève l'humidité du sol des profondeurs dépassant 60 cm n'a pas varié du 17 janvier au 19 avril (notons la culture de fève n'a pas dépassé les 60 cm de hauteur). C'est durant le mois de mai que le dessèchement de tout le profil a eu lieu même si il y a eu des pluies au début du mois. Ces pluies ont favorisé le développement rapide de la végétation naturelle, et donc certainement de sa profondeur

racinaire, ce qui a permis la consommation de la réserve hydrique du sol. Les fentes de retraits ont commencé à paraître, ce qui favorise aussi l'évaporation du sol en profondeur.

Sur la parcelle C en 2006, les mesures ont eu lieu du 19 avril au 28 juillet. Le stock en eau de la parcelle est faible par rapport aux autres parcelles pour la même période, ceci peut s'expliquer par le fait que le sol de cette parcelle est caractérisé par de moindres capacités de rétention et de plus faibles humidités à saturation. La date du 02 mai a montré une humidité du sol atteignant la saturation sur tout le profil, avec un stock total de 350 mm. Les écart-types des mesures de stock sont les plus élevés sur cette parcelle, ce qui illustre la variabilité intrinsèque de la parcelle.

3.2. Conditions hydriques d'un ensemble de parcelles représentatives des mesures scintillométriques

Les conditions hydriques des parcelles, pouvant appartenir à la zone source des mesures scintillométriques, sont décrites ici sur la période allant de mars 2006 à juillet 2006. L'évolution des stocks hydriques à 1 m de profondeur, et les profils des humidités volumiques sont illustrés avec les Figures 3.20 et 3.21, respectivement. Le stock varie entre 180 et 480 mm et l'humidité volumique entre 5 et 50% selon la date, l'occupation du sol, le sol et la profondeur.

La parcelle F en 2006 avec une culture de triticales montre des humidités très faibles, ne dépassant pas les 20%. Les profils n'ont pas pu être prélevés jusqu'à un mètre en raison du sol peu profond et sec. Cette réserve faible en eau explique le végétal très chétif et asséché très tôt dans la saison. Notons que dans l'étude de Mekki (2003), la culture de triticales a montré une hauteur de 90 cm lorsqu'elle était cultivée sur une parcelle à sol profond proche du lit d'oued

La parcelle de parcours I, divisée en Ia (lit oued) et Ib (haut de colline) illustre bien les différences d'humidité du sol selon la topographie. La parcelle Ia montre des écart-types plus grands, c'est aussi la parcelle qui montre une plus grande variabilité de la couverture végétal (hauteur et indice foliaire).

La parcelle H en 2006, cultivée en blé (situé au lit d'oued) montre un stock d'eau plus important que celui de la parcelle M06blé (située en haut de la rive). En effet, les profils hydriques montrent que les humidités sont assez proches sur les 20 premiers centimètres, mais que des différences significatives entre les deux parcelles apparaissent en profondeur.

La parcelle D en 2006, cultivée en orge, a été suivie durant tout le cycle de culture, de la levée au stade post-récolte. En effet, elle a fait l'objet d'un suivi de mesures de flux de décembre à début mars. Le stock hydrique est important durant la première période d'hiver, où la végétation consomme encore très peu et la pluie est assez abondante. Durant cette période on remarque que les horizons de surface sont plus humides que les horizons profonds. La végétation s'est développée durant le mois de mars avec peu de pluie, celle-ci étant presque inexistante au mois d'avril. Ces conditions ont eu une répercussion directe sur le stock hydrique qui a considérablement baissé le 18 avril. Le stock n'a pas trop varié par la suite.

La comparaison des parcelles adjacentes A et D en 2006, cultivées en fève et en orge, révèle que le stock d'eau de la parcelle D a bien plus baissé que celui de la parcelle A, ce qui confirme les résultats de Mekki (2003). Cet auteur a en effet observé sur le même site une consommation plus rapide des céréales, alors qu'elles sont semées en même temps que les fèves, montrant des besoins en eau plus importants.

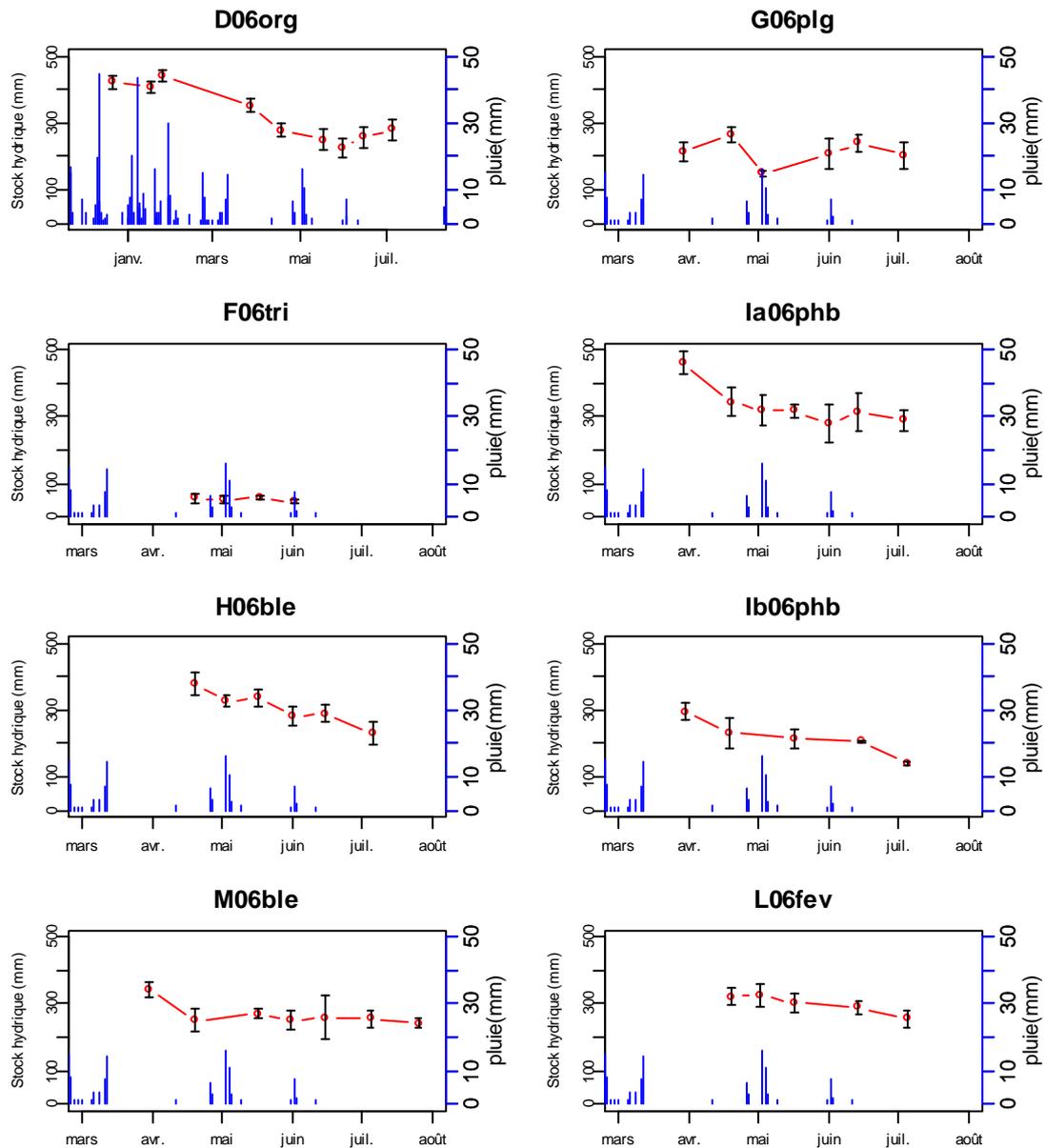


Figure 3.20. Evolution de la réserve en eau sur les parcelles représentatives de la zone de mesure du dispositif scintillométrique (réserve à 1 m de profondeur, à l'exception de la parcelle F – à 40 cm). Sont considérées la culture d'orge sur la parcelle D en 2006 (D06org), le parcours ligneux sur la parcelle G en 2006 (G06plg), la culture de triticale sur la parcelle F en 2006 (F06tri), les parcours herbacés sur la parcelle I en 2006, divisée en deux sous parcelles Ia et Ib (Ia06phb et Ib06phb), les cultures de blé sur les parcelles H et M en 2006 (H06ble et M06ble), et la culture de fève sur la parcelle L en 2006 (L06fev).

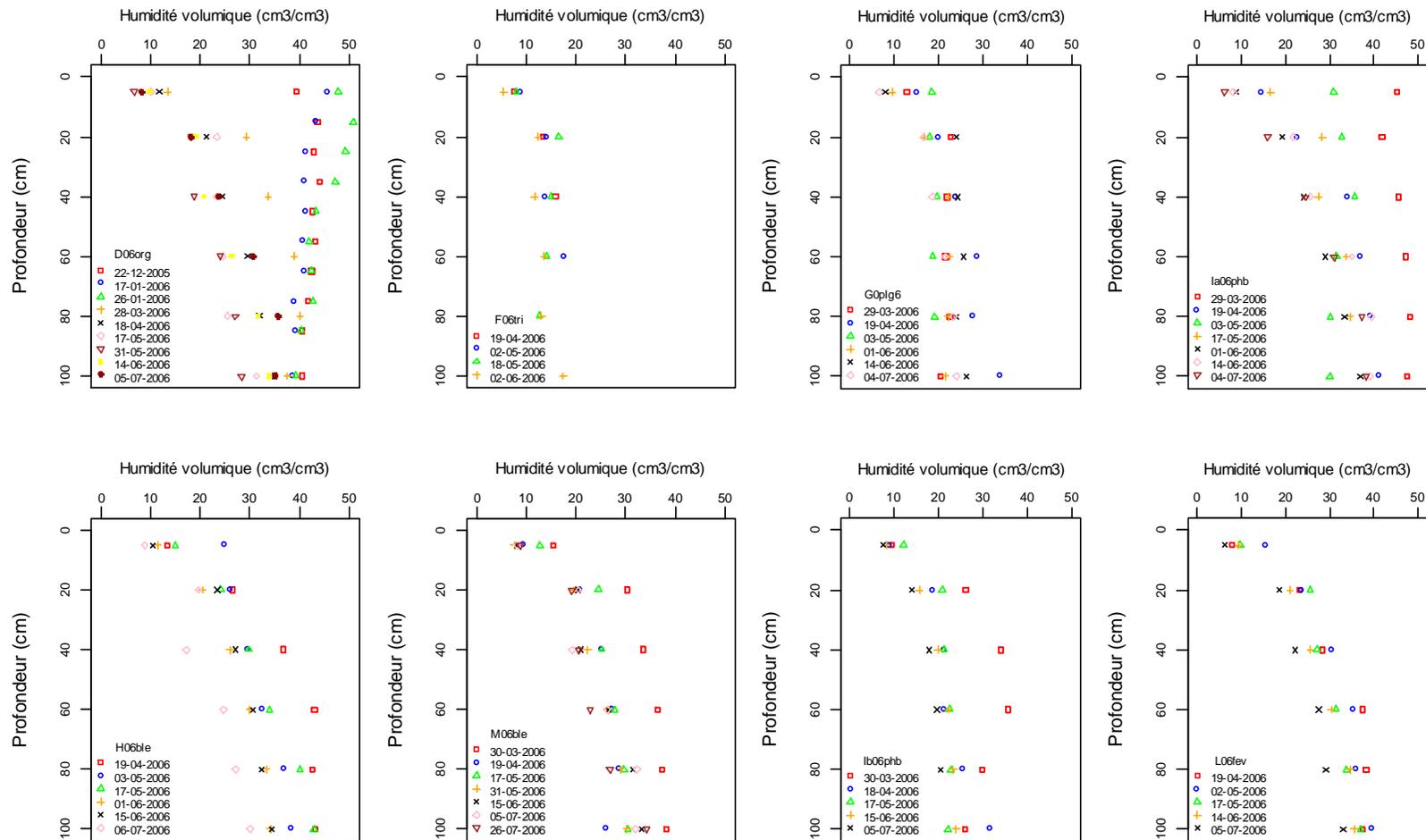


Figure 3.21. Evolution des profils hydriques sur les parcelles incluses dans la zone de mesure du dispositif scintillométrique. Sont considérées la culture d'orge sur la parcelle D en 2006 (D06org), le parcours ligneux sur la parcelle G en 2006 (G06plg), la culture de triticale sur la parcelle F en 2006 (F06tri), les parcours herbacés sur la parcelle I en 2006, divisée en deux sous parcelles Ia et Ib (Ia06phb et Ib06phb), les cultures de blé sur les parcelles H et M en 2006 (H06ble et M06ble), et la culture de fève sur la parcelle L en 2006 (L06fev).

3.3. Conclusion

Les évolutions des conditions d'humidité des parcelles montrent des ressemblances importantes dues aux faits que l'agriculture est conduite en pluviale. Les variations saisonnières sont donc similaires, avec un sol sec en été et à saturation en hiver, tandis que le printemps est la saison où la consommation en eau des cultures est maximale. Les variations entre parcelles sont dues à la nature de la végétation et de son système racinaire, une céréale provoquant par exemple une dessiccation du sol plus prononcée qu'une fève, à la texture du sol et à sa profondeur, et à la position de la parcelle sur le bassin versant – particulièrement à sa distance du lit de l'oued. Des variations importantes d'humidité au sein de la parcelle existent, particulièrement sur les parcours, similairement aux variabilités observées sur ces mêmes parcelles de parcours pour les caractéristiques du couvert végétal.

4. Conditions micrométéorologiques

Les échanges d'énergie entre la surface et l'atmosphère, et donc les mesures qui les caractérisent (e.g. leurs extensions spatiales) dépendent des conditions micrométéorologiques. Dans cette section, nous nous intéressons à trois paramètres principaux pour caractériser ces conditions : la vitesse de friction, la stabilité atmosphérique et la longueur de rugosité mécanique. Pour estimer ces paramètres nous avons besoin de la hauteur végétale, de certains paramètres météorologiques tels que la vitesse du vent et la température de l'air, ainsi que des flux de chaleur sensible et de quantité de mouvement obtenues à partir des mesures par covariances turbulentes (moyenne intervalle de 30 minutes).

Suite à l'étude des conditions climatiques et végétales, nous avons mis en avant la présence de deux régimes de vent dominants (Nord-Ouest et Sud), et de deux phases d'occupation du sol (couverture végétale et sol nu) durant les expérimentations. Par conséquent, nous avons choisi de caractériser les conditions micrométéorologiques selon ces différentes situations, ce qui nous permettra d'appréhender les variabilités temporelles sur chacune des parcelles considérées. La variabilité spatiale sera abordée via des analyses croisées de périodes identiques sur des parcelles différentes.

Les flux turbulents utilisés sont ceux ayant subi une correction et une rotation planar fit, parce qu'ils ont montré une meilleure qualité de données (voir Chapitre 2, § 3.2.2).

Cette partie consacrée aux conditions micrométéorologiques sera donc divisée en quatre sections, les trois premières étudierons les variabilités de la vitesse de friction (u_*), de la stabilité atmosphérique (ζ) et de la longueur de rugosité (z_{0m}), selon la présence de végétation et la direction du vent. La quatrième est réservée pour conclure.

4.1. Variabilité de la vitesse de friction

La vitesse de friction (u_*) étudiée dans ce paragraphe est celle mesurée par l'anémomètre sonique après application de la rotation « planar fit ».

La vitesse de friction peut être un critère de qualité des données de flux turbulents tel que proposé par Goulden et al. (1996), qui suggèrent une valeur de 0.3 m/s comme limite inférieure. Cette limite a été utilisée comme filtre des mesures acquises par covariances turbulentes dans certains travaux tels que ceux de Gockede et al. (2004). Pour des valeurs plus faibles, la turbulence est peu développée, et par conséquent la théorie de similitude, base des calculs de footprint (Chapitre 4 § 1.1.2 et Chapitre 5 § 2.1), n'est pas applicable. De plus, pour de très faibles vitesses de friction, la zone de mesure des flux (footprint) peut prendre des dimensions très, voire trop, grandes. Dans notre cas, les vitesses de friction inférieures à 0.1 m/s sont très rares ce qui est dû à l'exclusion des données nocturnes. Les vitesses de friction comprises entre 0.2 et 0.3 peuvent toutefois être assez fréquentes (Figure 3.22). Les fortes intensités de turbulences peuvent aussi être des conditions non adéquates pour l'application de la théorie de similitude de Monin-Obukhov. Pour les différentes situations présentées dans la Figure 3.22, u_* a très rarement dépassé la valeur de 1 m/s.

La vitesse de friction est plus élevée sur couvert végétal que sur sol nu (Figure 3.22). La distribution est relativement large et s'étend de 0.2 à 0.8 m/s pour les couverts végétaux et de 0.2 à 0.6 m/s pour les sols nus. Les valeurs des médianes pour les différentes expérimentations sont comparables, de l'ordre de 0.5 m/s pour les couverts végétaux et de

0.4 m/s pour les sols nus. Ces vitesses de friction peuvent paraître élevées, mais rappelons que le site est soumis à des vents forts, et qu'elles correspondent approximativement à 10 % de la vitesse moyenne du vent.

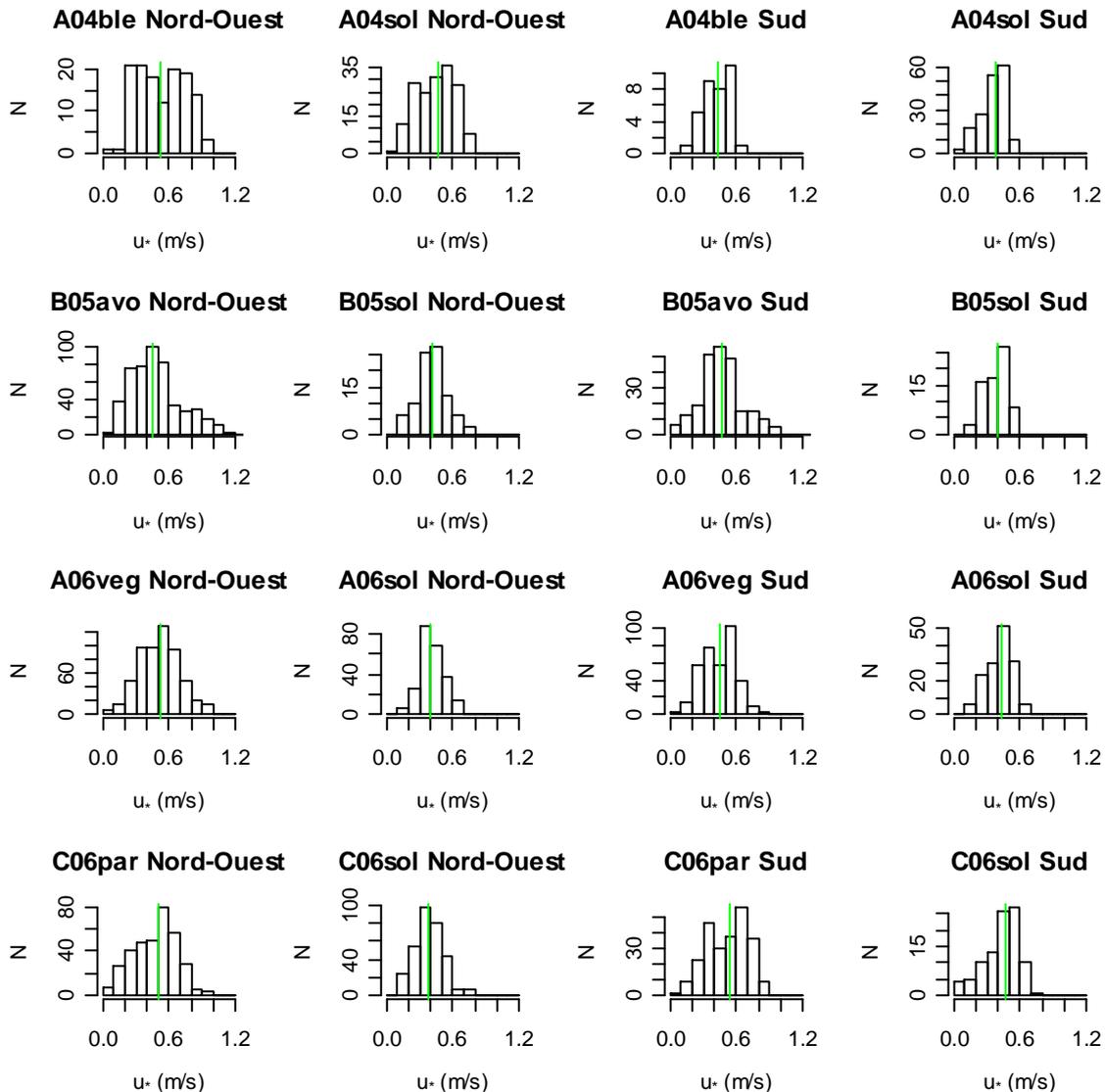


Figure 3.22. Distribution des vitesses de friction pour différentes parcelles (A, B, C), différentes années (2004, 2005, 2006), différentes conditions de couverture végétale (« veg » pour culture, « sol » pour sol nu, « par » pour parcours), et différentes directions de vent (Nord-ouest, Sud). La ligne verticale représente la médiane.

La comparaison des distributions de la vitesse de friction pour les vents de direction Nord-Ouest et de direction Sud montre que les valeurs de u_* sont plus élevées avec les vents de Nord-Ouest qu'avec les vents de Sud, quelques soient les conditions de couverture végétale.

4.2. Variabilité du paramètre de stabilité atmosphérique

Pour caractériser les conditions de stabilité, nous utilisons le paramètre adimensionnel ζ correspondant à $(z_m - D) / L_{MO}$, où z_m est la hauteur de mesure, D est la hauteur de déplacement et L_{MO} est la longueur de Monin-Obukhov. Pour quantifier la variabilité de ce paramètre, nous différencions chaque parcelle et chaque année, mais sans discriminer les conditions de vent dans un premier temps (cela sera fait dans un second temps à la fin de la présente section).

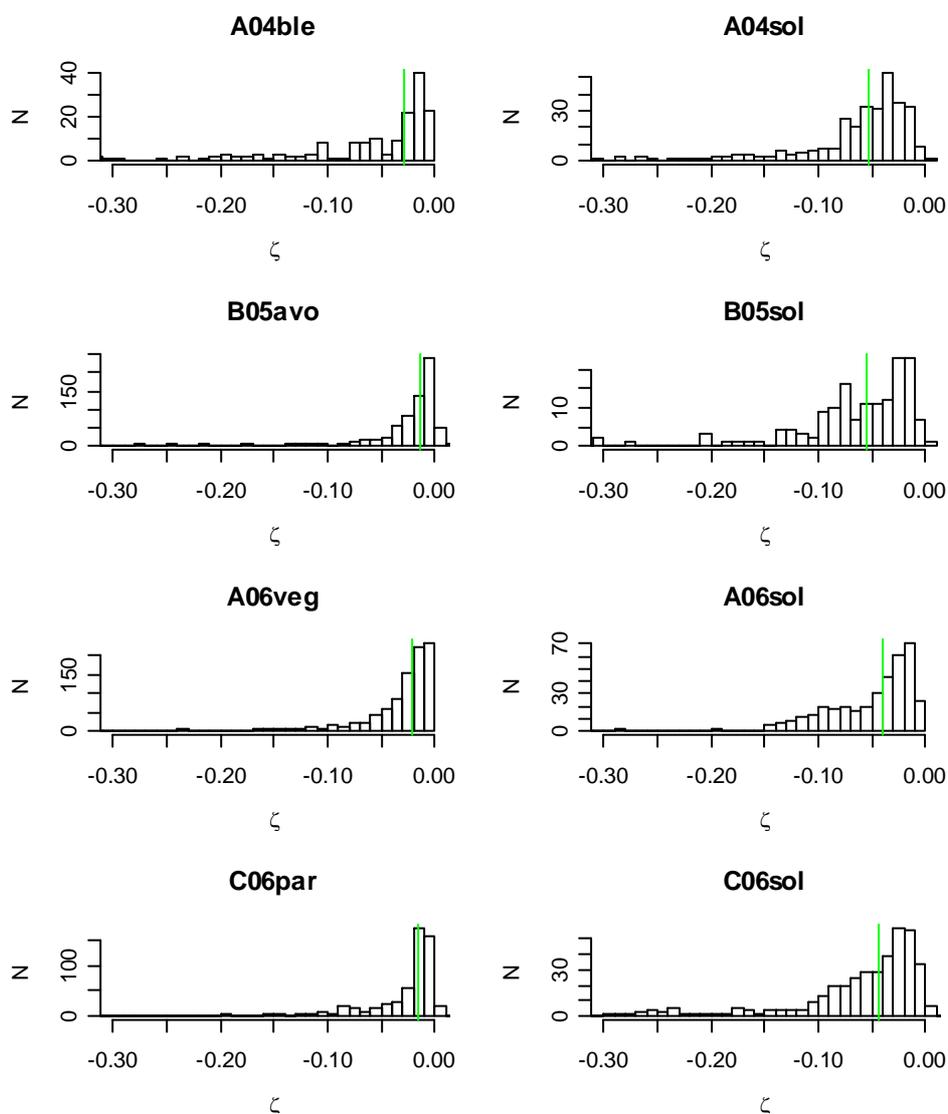


Figure 3.23. Histogrammes de fréquence pour le paramètre de stabilité atmosphérique $\zeta = (z_m - D) / L_{MO}$ sur les différentes situations (parcelle, année, couverture végétale). La ligne verticale représente la médiane.

La Figure 3.23 présente les histogrammes de fréquence du paramètre de stabilité, pour les différentes périodes de mesures de flux, en conditions de sol nu et de couverture végétale. Les calculs ont été réalisés avec les flux de chaleur sensible et la vitesse de friction, après application de la correction rotative planar fit. Les valeurs inférieures à -0.03 étant très rares, cette limite a été choisie pour la clarté des graphiques.

- Sur les parcelles en végétation, les distributions sont semblables, les maxima se trouvant sur les classes [0 -0.1] et [-0.1 -0.2], la classe [-0.2 -0.3] restant marginale. La médiane de ces quatre cas est située entre -0.015 et -0.03.
- La répartition des histogrammes est plus large en conditions de sols nus qu'en conditions de couverture végétale, les médianes étant comprises entre -0.04 et -0.06. En comparant les deux parcelles A et C, nous remarquons que la parcelle C montre des conditions plus instables que celles rencontrées sur la parcelle A, que la végétation soit présente ou non.

Les conditions de l'expérimentation sont en majorité proche de la neutralité, avec dans une grande partie des cas de figure un paramètre de stabilité très rarement inférieur à -0.1. Ceci correspond majoritairement à de la convection forcée et, dans une moindre mesure à de la convection mixte. Ce résultat est en accord avec les analyses climatiques de la Section 1, dont l'un des résultats majeurs est que le site est soumis à un forçage de vent externe avec des vitesses de vent élevées. Par ailleurs, l'absence de conditions instables s'explique par l'exclusion des données nocturnes. Le vent est donc le facteur principal moteur des échanges d'énergie entre la surface et l'atmosphère.

Concernant les cas de sols nus, les conditions tendent vers plus d'instabilité ce qui est expliqué d'une part par le terme (z_m-D) plus élevé (la hauteur de déplacement D est presque nulle) et d'autre part, la longueur de Monin-Obukhov plus faible (médiane aux alentours de -40 m pour un sol nu et entre -50 et -100 pour un sol couvert). Il est à rappeler que les conditions de sol nu sont des périodes d'été où la température de la surface peut être très élevée, ce qui induit de la convection libre par réchauffement de l'air. Les quelques cas où le paramètre de stabilité est positif se produisent à proximité du lever et du coucher du soleil, mais le paramètre de stabilité reste proche de 0, nous sommes donc toujours proches de la neutralité.

Dans une dernière partie, nous avons comparé le paramètre de stabilité atmosphérique pour les vents Nord-Ouest et Sud. Les médianes obtenues pour ce paramètre sont indiquées dans le

Tableau 3.12. Ces conditions de proche de la neutralité sont aussi bien valables pour les vents Nord-Ouest que pour les vents Sud. Même s'il existe des différences entre les directions du vent, les conditions sont en général les mêmes, et il n'est pas possible de dégager une quelconque tendance.

Tableau 3.12. Médianes du paramètre de stabilité atmosphérique ζ (z_m-D/L_{MO}) pour les différentes parcelles pour les conditions de vents de direction Nord-Ouest et Sud. 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).

Parcelles	Nord-Ouest	Sud
A04ble	-0.023	-0.04
A04sol	-0.042	-0.059
B05avo	-0.014	-0.014
B05sol	-0.064	-0.038
A06fev	-0.015	-0.026
A06par	-0.03	-0.018
A06sol	-0.053	-0.022
C06par	-0.018	-0.014
C06sol	-0.057	-0.022

4.3. Variabilité de la longueur de rugosité

La longueur de rugosité mécanique z_{0m} définit la hauteur à laquelle la vitesse du vent s'annulerait si l'on prolongeait ce profil. Elle est donc déduite du profil logarithmique de la vitesse du vent. Dans la pratique, on l'estime le plus souvent comme une fraction (1/10) de la hauteur des éléments de la surface (végétation ou sol).

Les résultats obtenus dans la section précédente ont montré que les conditions de stabilité sont toujours proches de la neutralité, en lien avec un régime caractéristique de convection forcée. Dans un souci de simplification, nous avons donc la possibilité, pour déterminer la rugosité à partir des mesures par covariance turbulentes, de négliger les fonctions de stabilité. La forme logarithmique du profil du vent pour estimer la longueur de rugosité mécanique z_{0m} est alors donnée en inversant l'équation 2.16 :

$$z_{0m} = (z_m - D)e^{-ku/u_*} \quad (\text{Équation 3.1})$$

où z_m est la hauteur de mesure (m), D est la hauteur de déplacement correspondant à 2/3 de la hauteur du couvert (m), u est la vitesse du vent (m/s), u_* est la vitesse de friction mesurée par l'anémomètre sonique et corrigée avec la rotation planar fit (m/s), et k est la constante de von Karman.

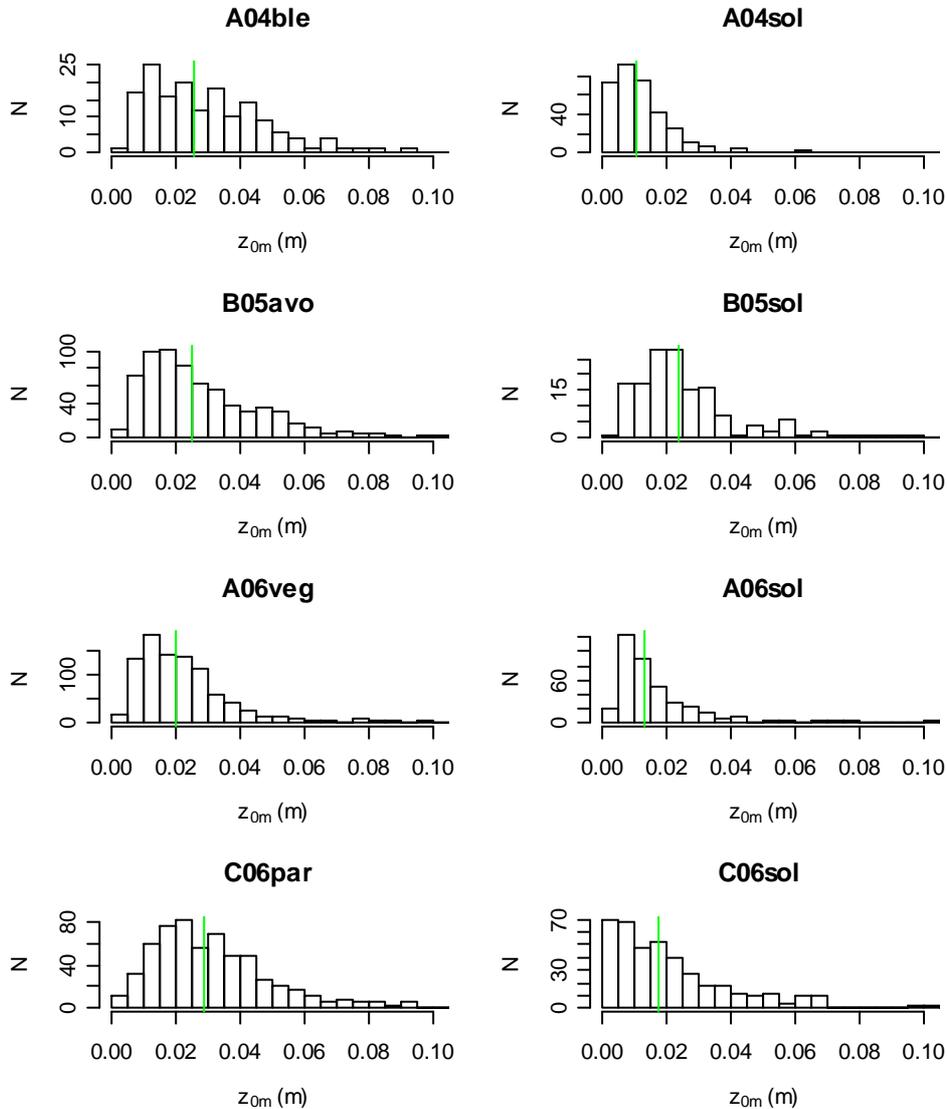


Figure 3.24. Distribution de la longueur de rugosité sur les différentes périodes de mesure. Sont considérées les parcelles (A, B, C), les années (2004, 2005, 2006) et les conditions de couverture végétale (cultures de blé, avoine, fève, parcelle de parcours et sol nu).

La Figure 3.24 représente la distribution des longueurs de rugosité pour les différentes parcelles, les différentes années et les différentes occupations du sol. Cette distribution est oblique, la longueur de rugosité est très rarement supérieure à 0.08 m. Les médianes sur sol nu varient entre 0.01 et 0.02 m, et elles sont un peu plus élevées en conditions de couverture végétale, variant alors entre 0.02 et 0.03 m.

Les valeurs médianes pour z_{0m} obtenues en différenciant les vents de Nord-Ouest et de Sud sont indiquées dans le Tableau 3.13. Nous remarquons que les longueurs de rugosité sont généralement supérieures de 0.01 m pour les vents Sud. Sur la parcelle C en 2006 dans les conditions de sol nu, cette augmentation est particulièrement remarquable lorsque le vent est de direction Sud. A ce stade nous ne pouvons pas apporter des éléments de réponse sur ces différences.

Tableau 3.13. Médiane des longueurs de rugosité z_{0m} (en m) sur les différentes parcelles pour les conditions de vents de direction Nord-Ouest et Sud. 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).

parcelles	z_{0m} (m)	
	Nord-Ouest	Sud
A04ble	0.023	0.034
A04sol	0.010	0.011
B05avo	0.020	0.041
B05sol	0.020	0.029
A06fev	0.018	0.027
A06par	0.020	0.021
A06sol	0.010	0.020
C06par	0.020	0.040
C06sol	0.013	0.044

Suite à cette analyse nous pouvons dire qu'il existe des différences selon l'occupation du sol et les directions de vent. Cependant, ces différences sont faibles. En général, les gammes de valeurs obtenues se situent autour de 10 % de la hauteur de la culture, et dans l'ordre de grandeur de 0.03 m. Ceci est en cohérence avec les valeurs reportées par Troen et Petersen (1989) dans European Wind Atlas pour une surface sans présence de brise vent.

4.4. Conclusion

Les conditions micrométéorologiques des différentes expérimentations ont été caractérisées, en différenciant les deux principales directions du vent, à partir de trois variables clés : la vitesse de friction, la stabilité atmosphérique et la longueur de rugosité. Les analyses des mesures montrent que les expérimentations se sont déroulées dans des conditions

généralement semblables. Les vitesses de frictions sont de l'ordre de 10% des vitesses de vent. Elles sont assez élevées, ce qui favorise la mesure des flux turbulents, alors que les conditions de vitesses extrêmes (très faibles ou très fortes) sont peu nombreuses.

Une valeur de vitesse de friction moyenne de 0.4 et 0.5 m/s, ce qui est plutôt élevé, favorise les échanges par convection forcée, ce qui conduit à des conditions de stabilité proche de la neutralité, particulièrement en condition de végétation. Le sol nu et la chaleur de l'été entraîne plus de flottabilité, et les conditions sont alors un peu plus instables. Les longueurs de rugosité sont dans les normes des ordres de grandeurs de la bibliographie, cependant certaines différences enregistrées entre les directions de vent ne peuvent être expliquées avec cette analyse générale.

5. Conclusion

Le bilan d'énergie de surface est influencé par les conditions du milieu dans lequel se font les échanges, qui n'est autre que le continuum sol – plante – atmosphère. Ce chapitre visait à caractériser ces conditions, à partir des mesures présentées précédemment.

Le climat est caractérisé par un forçage de vent externe, avec des vitesses de vent élevées, ce qui induit des conditions majoritaires de convection forcée. Ce forçage externe est caractérisé par deux directions de vent privilégiées, Nord-Ouest et Sud. Ceci induit une spécificité additionnelle en rapport avec la topographie du bassin versant qui inclut deux versants sud-est et nord-ouest orientés face au vent : l'existence en simultanée d'écoulements ascendant et descendant, avec des vitesses de vent plus élevées pour les écoulements ascendants (nous avançons comme explication les effets d'accélération et de décélération). Cette caractéristique demande d'effectuer les analyses en découplant les deux régimes de vent. Les conditions climatiques diffèrent selon ces deux directions de vent. La température, le déficit de vapeur de pression et l' ET_0 sont plus élevés par vent de Sud, quelque soit la localisation de la mesure à l'intérieur du bassin versant (versant sud-ouest, versant nord-est, exutoire au sud).

En terme de couverture végétale, nous avons noté un développement fort durant le printemps, avec un cycle végétal qui bénéficie de la réserve en eau de l'hiver. Par contre, le

dessèchement arrive rapidement, dès la première période de déficit hydrique à la fin du printemps. La croissance végétative dépend considérablement du climat et aussi de la position de la parcelle dans le bassin versant. Ainsi, les hauteurs de végétation enregistrées n'ont pas dépassé la valeur de 1 m, et l'indice foliaire maximum enregistré est de 3 (sur la culture d'avoine). Au regard de la dynamique temporelle pour la couverture végétale, incluant une période de transition rapide entre la phase de pleine croissance et celle de sénescence, il s'avère possible d'effectuer les analyses en discriminant clairement les conditions de couverture végétale (couplées avec une transpiration végétale importante) et les conditions de sénescence et de sol nu (couplées avec une évaporation du sol limitée).

Les observations en rapport avec l'humidité du sol sont très cohérentes avec celle traitant de la couverture végétale. Les dynamiques temporelles pour l'ensemble des parcelles sont en cohérence avec le cycle saisonnier, avec des sols saturés durant l'hiver et des sols très secs durant l'été. La couche superficielle est la plus variable, et répond rapidement aux gains (pluies) et pertes (consommation par les plantes ou évaporation). Les conditions d'humidité varient non seulement avec l'occupation du sol (types de culture qui induisent des dessiccations plus ou moins importantes) et sa nature (propriétés hydrodynamiques) mais aussi et de façon non négligeable avec sa profondeur et sa distance à l'oued en lien avec la topographie (nous avançons comme explication l'influence du toit de la nappe superficielle).

Les paramètres micrométéorologiques montrent des différences dues à la hauteur du végétal et à la direction du vent. Globalement, les expérimentations se sont déroulées dans des conditions de stabilité atmosphérique similaires, et correspondant à des situations proches de la neutralité, les conditions d'instabilité étant plus présentes en été lorsque le vent est relativement calme (vent de Sud) et la température de l'air est très élevée. Ces observations soulignent la prédominance d'une convection forcée, ce qui est en accord avec le forçage de vent externe caractérisé par l'analyse des données climatiques (Section 1).