

Ce chapitre présente l'ensemble des procédures de collecte et de traitement de données mises en œuvre pour l'obtention d'un jeu de données qui permet de mettre en œuvre la démarche proposée. Après avoir présenté les caractéristiques géographiques et physiques du site d'étude, ainsi que la dynamique scientifique dans laquelle s'inscrit l'expérimentation (§ 1), nous discutons le dispositif expérimental mise en œuvre (§ 2) en termes 1/ de sélection des parcelles et des périodes d'observations, et 2/ de mesures effectuées pour la caractérisation des bilans de surface hydrique et énergétique en relation avec les conditions végétales de surface. Sont ensuite présentés les différents prétraitements effectués sur les données (§ 3), incluant selon les mesures considérées 1/ les théories sous-jacentes, 2/ les possibles filtrages selon les conditions expérimentales, 3/ des contrôles qualité, 4/ des analyses spatiales et temporelles, et 5/ des analyses multi variables. Pour finir, nous rappelons les originalités du jeu de données résultant, en lien avec la démarche proposée (§ 4).

Le site d'étude : le bassin versant de Kamech

Pour présenter le site d'étude, le bassin versant de Kamech, nous décrivons en premier lieu son contexte géographique, nous donnons une description détaillée du bassin versant, et nous rappelons les recherches qui y sont menées, incluant certaines mesures de routine qui sont utiles pour la présente étude.

1.1. Contexte géographique du site

Le bassin versant de Kamech se trouve au Nord Est de la Tunisie, dans la péninsule du Cap Bon. Il est situé au pied du Djebel Sidi Abd er-Rahmane (637 m) qui est la dernière montagne de la Dorsale tunisienne (Haut Tell), chaîne calcaire qui s'étend de Tébessa (Algérie) au Cap Bon. Kamech est un petit bassin versant agricole (2.5 km²) représentatif de ceux rencontrés à l'intérieur du bassin versant ressource de Lebna (218 km²), dont il fait partie.

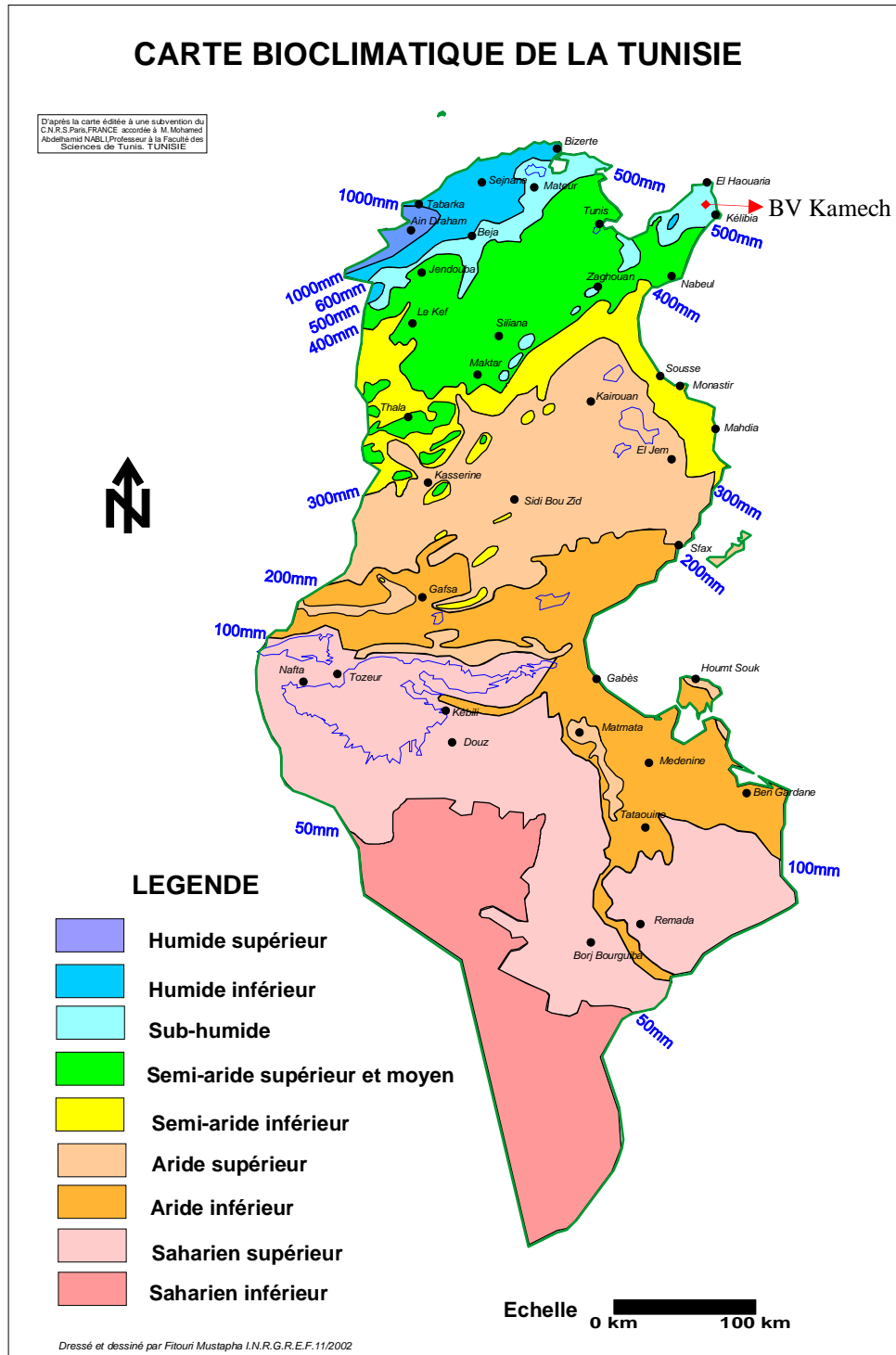


Figure 2.1. Carte bioclimatique de la Tunisie.

Administrativement, le bassin versant appartient à la délégation d'EL Haouaria du gouvernorat de Nabeul. Cette zone à vocation agricole est caractérisée par un climat méditerranéen subhumide (Figure 2.1). La station météorologique officielle de l'Institut National Météorologique la plus proche se trouve à Kélibia (environ 15 km de Kamech). Des stations pluviométriques sont aussi installées à Tazoghane (village attenant au bassin versant

de Kamech) et Dar Chichou (environ 10 km de Kamech). La station de Kélibia enregistre une pluviométrie annuelle moyenne comprise entre 450-600 mm (INM, 1999). L'évaporation Piche annuelle, représentant le pouvoir évaporant de l'air, est inférieure à 1200 mm au Nord Est du Cap Bon. C'est l'évaporation annuelle la plus faible de toute la Tunisie (INM, 1999).

1.2. Description du bassin versant

Le bassin versant de Kamech (36°52'30" N ; 10°52'30" E) a une superficie de 2.5 km², une longueur de 2.7 km et une largeur de 0.9 km. Il est traversé par l'oued el Gamh, dont l'exutoire est aménagé par un lac collinaire (140000 m³ de contenance). Le bassin versant comprend près de 273 parcelles cultivées variant de 0.08 à 13.65 ha, la taille moyenne étant de 0.62 ha (Mekki, 2003). La description du bassin versant et de son lac collinaire fut détaillée dans le cadre de plusieurs études (Mekki, 2003 ; Temple Boyer, 2006 ; Corbane, 2006). Ainsi, seul un rappel succinct des caractéristiques de la topographie, du sol et de la couverture végétale, dont la connaissance est utile pour la thèse, est présenté.

1.2.1. Le relief

Une dissymétrie est observée entre la rive droite et la rive gauche. Cette dernière est plus large, ce qui influence le réseau hydrographique et le parcellaire (Mekki, 2003). Les pentes sont variables en magnitude et en direction. Les pentes les plus douces, qui ne dépassent pas 5 %, sont localisées sur les limites du bassin versant, particulièrement sur la rive gauche et dans une moindre mesure le long du lit de l'oued. Les pentes les plus accentuées suivent le trajet de l'oued. Les variations de pentes sont en lien avec le parcellaire, selon une relation de cause à effet. Les altitudes varient entre 80 et 200 m, et les pentes varient de 0 à 30 % (15°).

Pour caractériser finement le relief dans le cadre de la présente étude, nous avons eu recours à un modèle numérique de terrain (MNT). Il fut obtenu par stéréo restitution à partir d'un couple d'images IKONOS dont la résolution spatiale était de 0.63 m. Le relief fut ensuite restitué à partir d'un MNT dérivé du précédent, à une résolution spatiale de 4 m (Figure 2.2). Le MNT et le parcellaire ont été fournis par l'IRD Tunis. Ce MNT sera utilisé ici d'une part pour caractériser le relief à proximité des stations de mesures par covariances turbulentes, et d'autre part pour caractériser le relief sous le trajet optique du scintillomètre.

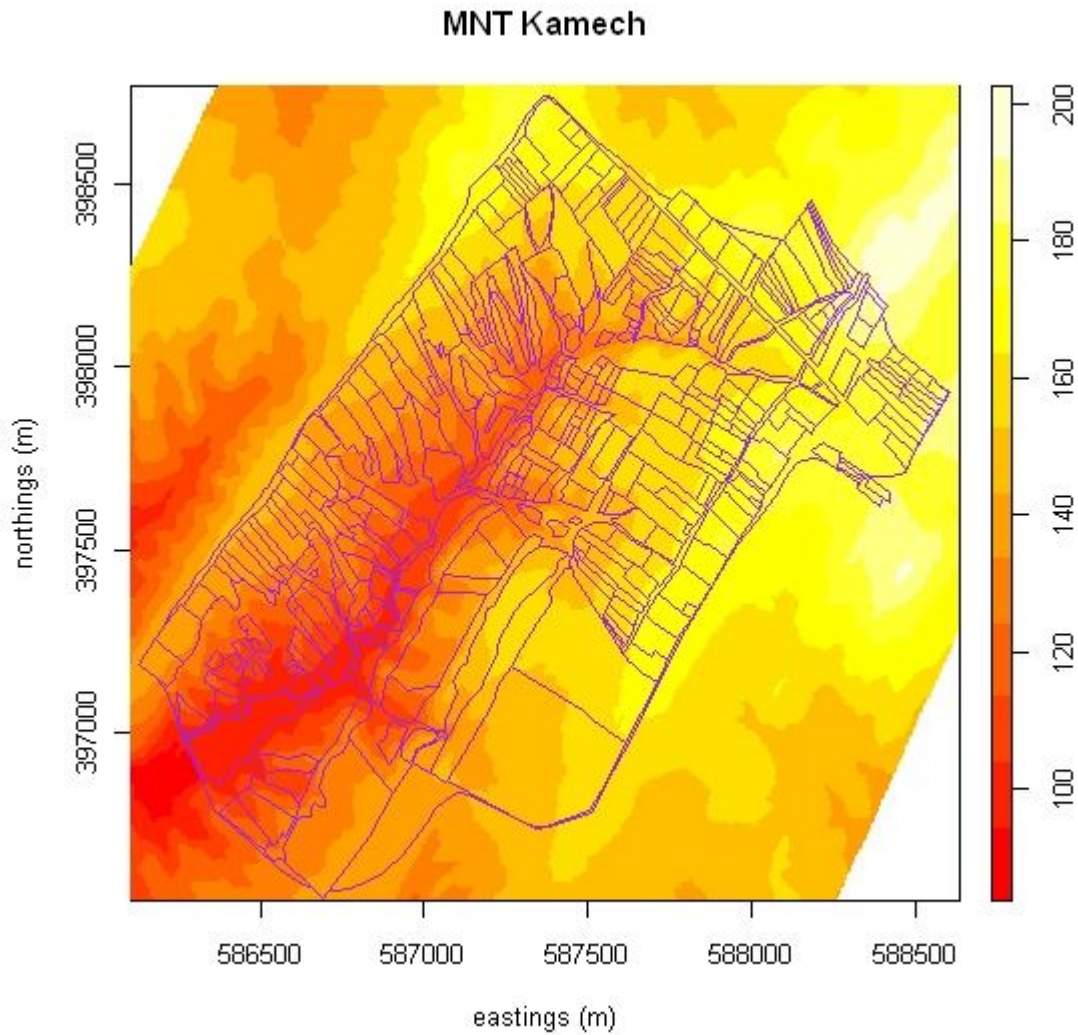


Figure 2.2. Superposition du parcellaire et de la topographie (issue d'un MNT à 4 m) du bassin versant de Kamech.

1.2.2. Les sols

Les types de sol, leurs profondeurs et leur propriétés hydrodynamiques ont été étudiés et cartographiés lors d'études précédentes Mekki (1999, 2003). Il en ressort trois classes principales de sols : a) les sols minéraux bruts sur lesquels se trouvent les habitations, les parcours permanents et le lit de l'oued, b) les sols calcimagnésiques sur lesquels se trouvent les arbres fruitiers et des cultures annuelles, c) les vertisols occupés par les cultures annuelles. La profondeur des sols varie entre quelques mm et deux mètres de profondeur. Cette variation

est corrélée à la position topographique : les sols les moins profonds et les plus soumis à l'érosion se trouvent sur les pentes les plus fortes.

1.2.3. L'occupation des sols

L'occupation du sol et sa variabilité spatiotemporelle furent étudiées par Ben Mechlia et al. (1998), Mekki (1999), Mekki (2003), Mekki et al. (2006). Il en ressort les points suivants. La plupart des parcelles sont cultivées suivant des rotations intégrant majoritairement des céréales (blé, avoine ou orge), mais aussi des légumineuses (fève ou pois chiche) afin de ne pas appauvrir le sol. On trouve aussi des cultures de triticale, de fenugrec, de vesce et d'épices, telles que la coriandre et le carvi. Sur les parcelles proches du lac collinaire on observe quelques cultures irriguées (maraîchages). La présence de l'arboriculture est restreinte à quelques parcelles d'oliviers, et l'on note la présence d'une parcelle de vigne. Les terrains à très fortes pentes sont occupés par de la végétation naturelle qui est utilisée par les éleveurs comme parcours pour le bétail.

Enfin, on notera que les parcelles emblavées en céréales ou en légumineuses peuvent être également utilisées comme parcours, selon des modalités très diverses :

- après un cycle de blé, quelques agriculteurs laissent les parcelles se « reposer », celles-ci devenant alors des jachères avec repousse de végétation naturelle ;
- après la culture de fève, qui est habituellement récoltée en vert entre mi-avril et mi-mai (avant la saison sèche), en cas de reprise de la végétation suite à des pluies tardives ;
- après la récolte des céréales, la paille est souvent utilisée comme pâturage ;
- avant les récoltes d'orge et d'avoine, les cultures ne présentant pas de perspectives de production suffisantes du fait des conditions climatiques sont parfois transformées en parcours en vert, avant l'apparition des grains.

1.3. Activités de recherches sur le site de Kamech

Depuis 1994, le bassin versant de Kamech appartient à un réseau de trente bassins expérimentaux de lacs collinaires sur la dorsale tunisienne. Ce réseau entre dans le cadre d'une convention de recherche entre la Direction de la Conservation de Eaux et du Sol du

Ministère de l'Agriculture Tunisien (CES, Tunisie) et l'Institut de Recherche pour le Développement (IRD, France).

Le bassin versant de Kamech a été l'objet de nombreux projets de recherches sur l'eau, impliquant de nombreuses expérimentations. Parmi ces projets, on peut citer le projet EU-INCO HYDROMED (HYDROMED, 2001). Depuis 2002, le bassin est un site expérimental de l'Observatoire de Recherche en Environnement OMERE (Observatoire Méditerranéen de l'Environnement Rural et de l'Eau, <http://www.umr-lisah.fr/omere>). Des aménagements et dispositifs permettant le suivi du ruissellement et de l'érosion y sont installés, ainsi qu'un réseau de piézomètres pour le suivi de la nappe superficielle. Les programmes de recherche passés ont porté, entre autres, sur la spatialisation du bilan hydrique (Mekki, 2003), la reconnaissance des états de surface par télédétection (Corbane, 2006), la conservation des eaux et des sols (Temple Boyer, 2006) et l'hydrologie (Mekki et al., 2006, Raclot et Albergel, 2006).

En ce qui concerne la mesure de l'évapotranspiration, thématique directement liée à la présente étude, plusieurs activités de recherche ont été menées sur le bassin dans le cadre du projet HYDROMED. Les données collectées concernaient la consommation en eau du blé pluvial et de la tomate irriguée par l'utilisation de la méthode du rapport de Bowen. Ces données n'ont pas été utilisées dans le cadre de cette thèse, faute de mesures simultanées sur les conditions de couverture végétale et de statut hydrique. Elles ont cependant permis de comparer l'évapotranspiration mesurée in situ avec celle mesurée à la station de Kélibia (environ 15 km de Kamech). Les différences importantes observées entre les deux stations, avec des valeurs plus importantes à Kamech (en hiver particulièrement), sont expliquées par la variabilité des conditions de vent (Mougou et al., 2006). Ces différences nous ont amenés à accorder une attention particulière à l'utilisation des données météorologiques locales.

Pour finir, notons que la présente étude, menée sur le bassin versant de Kamech, s'inscrit dans le cadre du projet IRRIMED (financement EU sur programme INCO-DC). Ce projet, qui s'est déroulé de 2003 à 2007, avait pour objectif de développer des outils d'observation et de modélisation afin d'améliorer les outils de gestion de l'eau pour les systèmes irrigués sous contraintes de ressources hydriques limitées (<http://www.irrimed.org>).

1.4. Mesures météorologiques standard sur le bassin versant de Kamech

La station météorologique, installée sur le site depuis 1998, est située près du lac collinaire à l'exutoire du bassin versant (36°52' N, 10°52' E, 108 m au dessus de la mer). C'est une station Campbell Scientific (Logan, USA) automatisée, qui est équipée des capteurs présentés ci-après (Figure 2.3). Le rayonnement global est mesuré à l'aide d'un pyranomètre SP1110 (Skye, Powys, UK). La vitesse du vent est mesurée à l'aide d'un anémomètre à impulsion A100R (Vector instruments, Rhyl, UK) et la direction du vent à l'aide d'une girouette potentiométrique W200P (Vector instruments, Rhyl, UK). La température et l'humidité de l'air sont mesurées à l'aide d'un capteur HMP45C (Vaisala, Finlande). Les capteurs sont installés à deux mètres au dessus du sol. Dans une optique d'accessibilité pour le suivi de l'horizontalité, le pyranomètre est installé à 1.5 m au dessus du sol. Une centrale d'acquisition CR10X (Campbell Scientific, Logan, USA) calcule et stocke les valeurs moyennes sur des intervalles de temps de 30 minutes. Les capteurs étant neufs ou récents, les mesures sont corrigées avec les données d'étalonnage fournies par les constructeurs.



Figure 2.3. Station météorologique à l'exutoire de Kamech en 2006.

Durant l'expérimentation, quelques problèmes de mesures ont été rencontrés, avec pour conséquences des données manquantes qu'il a fallu remplacer. Une intercomparaison avec les mesures collectées sur les stations de flux (présentées ci-après - § 2) fut réalisée, afin d'établir des relations linéaires (présentées dans le chapitre 3). Les données météorologiques manquantes ont ensuite été remplacées par celles collectées sur les stations de flux lorsque ces

dernières étaient fonctionnelles. Dans le cas contraire, des interpolations linéaires ont été appliquées sur les chroniques des données météorologiques, tant bi-horaires (30 minutes) que journalières. Par suite, la demande évaporatoire fut estimée à partir des données météorologiques, l'évapotranspiration de référence (ET_o) étant calculée via la formule de Penman-Monteith décrite dans le document FAO 56 (Allen et al., 1998) selon des pas de temps bi-horaires (30 minutes) et journaliers.

La pluie fut mesurée sur le bassin versant à l'aide d'un réseau de trois pluviographes à augets basculeurs (hauteur de pluie à 0,5 mm près à la seconde) et à enregistrement automatique. Ces trois pluviographes étaient répartis sur le bassin versant : un au niveau du lac collinaire et un sur chacune des rives droite et gauche. Les données de pluviométrie journalières et bi-horaires (30 minutes) furent fournies par l'IRD Tunis, dans le cadre des traitements de données réalisés pour la constitution de la base de données de l'ORE OMERE.

2. Dispositif expérimental

L'approche expérimentale mise en œuvre dans ce travail de thèse est présentée en deux étapes : la stratégie d'observation qui amène à sélectionner des sites et des périodes pour la collecte des données, puis le dispositif expérimental et les instruments de mesures utilisés.

2.1. Stratégie d'observation

2.1.1. Principe

Pour répondre aux deux objectifs principaux de ce travail, à savoir étudier l'effet du relief sur l'évapotranspiration au sein d'un bassin versant caractérisé par une structuration collinaire, et analyser l'intégration spatiale des flux d'évapotranspiration à l'échelle d'un petit bassin versant hétérogène, la stratégie expérimentale a consisté en un ensemble d'observations à deux échelles spatiales.

L'échelle parcellaire fut considérée afin de comprendre l'influence croisée du relief et de la nature des couverts sur les flux. Les observations furent réalisées sur un ensemble de parcelles qui différaient par l'occupation du sol et les caractéristiques topographiques. Ces observations comprenaient des mesures de flux par la méthode des covariances turbulentes, en simultanée avec des mesures de croissance du couvert végétal et de l'humidité du sol.

L'échelle du transect fut considérée pour analyser l'influence, sur les flux, du changement d'échelle entre la parcelle et le bassin versant, et ce dans des conditions de relief et d'hétérogénéité de couverts marquées. Les observations furent réalisées le long d'un transect représentatif de l'hétérogénéité du bassin versant de Kamech, en termes de relief et d'occupation du sol. Ces observations comprenaient la mesure des flux par scintillométrie, en simultanée avec des mesures de croissance du couvert végétal et d'humidité du sol. Ces dernières furent réalisées sur les parcelles situées dans la zone de mesure du scintillomètre.

2.1.2. Localisation des parcelles de mesure et période d'observation des flux parcellaires

La localisation des parcelles choisies pour les mesures de flux, de croissance végétale et d'humidité du sol, ainsi que les emplacements des stations de flux, sont indiqués sur la Figure 2.4. Les positions des stations de mesures des flux turbulents sont indiquées par des cercles. Plusieurs critères ont été pris en compte lors du choix de ces positions. Tout d'abord, ne furent retenues que des parcelles dont les surfaces étaient supérieures à un hectare, afin d'avoir un fetch adéquat. Ensuite, nous avons sélectionné, parmi ces parcelles, celles ayant des pentes les plus homogènes possible, afin d'éviter des ambiguïtés dans l'interprétation de l'effet du relief sur les flux mesurés. Enfin, du fait d'effets très probable d'advection entre le lac et les parcelles avoisinantes, dus à un gradient d'humidité important, nous avons évité les grandes parcelles situées à proximité du lac collinaire.

Les parcelles choisies et les conditions de couverture végétale en lien avec le cycle cultural (stade végétatif et actions agronomiques de type récolte et labour) sont présentées dans le Tableau 2.1, dans lequel sont aussi présentées l'ensemble des mesures effectuées. Ainsi, les parcelles permettent d'aborder la mesure de flux pour

- les principales conditions de couverture végétale rencontrées dans le bassin versant : céréales, légumineuses, parcours, sols nus,

- les différentes situations topographiques et d'exposition aux vents dominants. Le chapitre 3 montrera en effet que le choix de parcelles sur les deux rives du bassin permet de disposer de positions contrastées quant à l'influence de la direction du vent sur les flux.

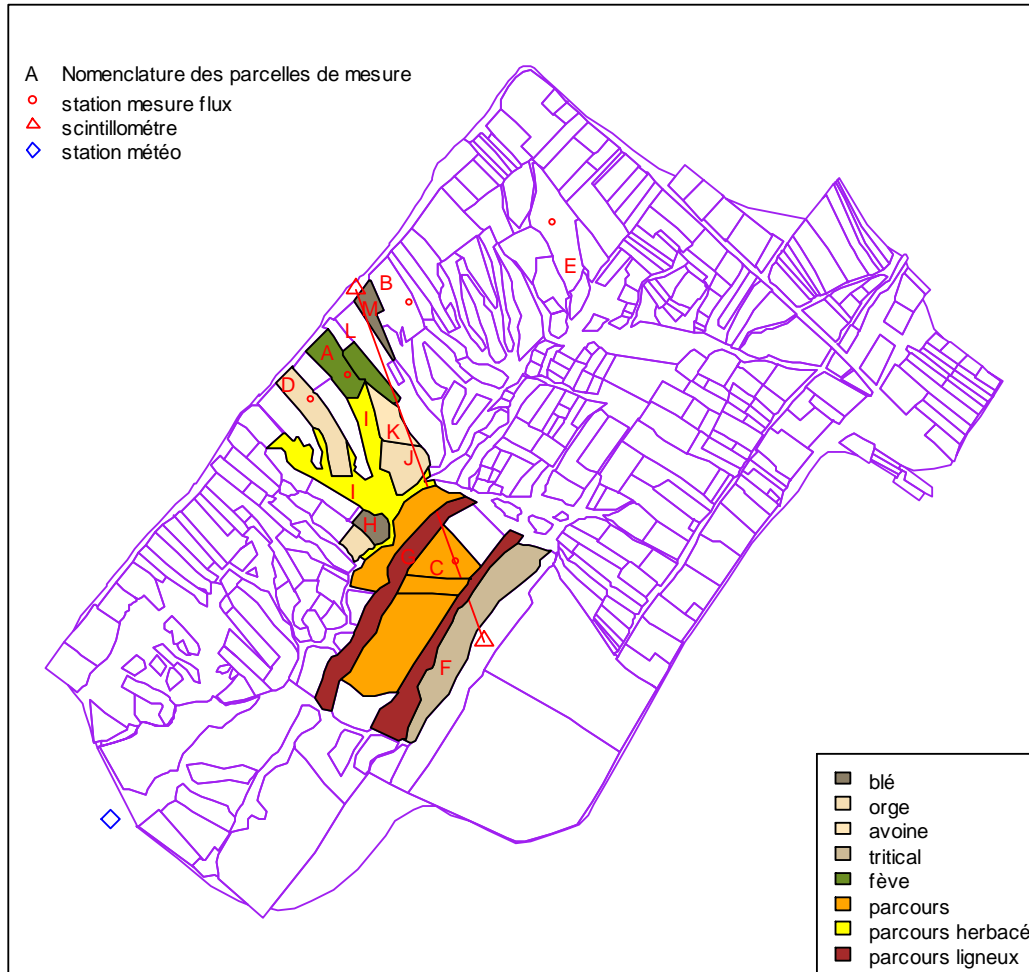


Figure 2.4. Dispositif expérimental adopté - parcelles échantillonnées et localisation des dispositifs de mesure des flux.

L'expérimentation se déroulait sur trois années, incluant plusieurs parcelles et plusieurs situations de couverture végétale. Pour la suite du document, nous désignons les jeux de données résultants par la combinaison d'une parcelle (notée A, B, C...) d'une année (04 pour 2004, 05 pour 2005, 06 pour 2006) et d'un type d'occupation du sol (représenté par trois lettres minuscules, « ble » pour couvert de blé, « sol » pour sol nu, « avo » pour couvert d'avoine, entre autres). Les jeux de données nommés selon cette nomenclature sont indiqués dans le Tableau 2.1.

Tableau 2.1. Présentation des mesures effectuées selon les parcelles et les années, incluant les nomenclatures des jeux de données résultants selon les conditions de couverture végétale (à suivre sur page suivante).

| | 2004 | | | | | | | | | | | | 2005 | | | | | | | | | | | | 2006 | | | | | | | |
|---|---|----|---|----|----|-----|-----|----|----|----|----|----|---|----|----|----|----|-----|-----|----|----|----|----|----|---|----|----------------------------------|---|----|----|-----|----|
| | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | |
| A | | | Blé PD - Sen - R Rn, G, H, LE A04ble | | | | Sol | | | La | | | | | | | | | Sol | | | | | | | | Fève PD - R Rn, G, H A1 | | | P | Sol | |
| B | | | | | | | | | | | | | Avoine DD - PD - R Rn, G, H B05avo | | | | | Sol | | | | | | | | | | | | | A2 | A3 |
| C | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | P PD - Sen Rn, G, H, LE C06par | | | Sol | C1 |
| D | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Orge S - DD - PD - Sen - R Rn, G, H D06org | | | | | | Sol | |
| E | Poid chiche S - DD - PD - Sen - R Rn, G E04pch | | | | | Sol | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| F | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Tritical PD - Sen - R F06tri | | | Sol | |
| G | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | P ligneux PD G06plg | | | | |
| H | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Blé PD - Sen - R H06ble | | | Sol | |

Tableau 2.1. Présentation des mesures effectuées selon les parcelles et les années, incluant les nomenclatures des jeux de données résultants selon les conditions de couverture végétale.

| | 2004 | | | | | | | | | | | | 2005 | | | | | | | | | | | | 2006 | | | | | | | | |
|----|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|------|----|----|----|----|----|----|----------------------------------|-----|
| | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 | 11 | 12 | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | | |
| la | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | P herbacé PD - Sen la06phb | Sol |
| lb | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | P herbacé PD - Sen lb06phb | Sol |
| L | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Fève PD - R L06feve | Sol |
| M | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | Blé PD - Sen - R M06ble | Sol |

Sont indiqués :

- 1/ l'occupation du sol
- 2/ le cycle cultural
- 2/ les mesures effectuées (hors scintillométrie)
- 3/ le nom du jeu de données résultant

La : Labour

S : Semi

DD : Début Développement végétatif

PD : Plein Développement végétatif

Sen : Sénescence

R : Récolte

Sol : chaume ou sol nu

A1 : A06fev

A2 : A06par

A3 : A06sol

P : Parcours

Rn : mesures rayonnement net

G : mesures flux de chaleur dans le sol

H : mesures chaleur sensible

LE : mesures chaleur latente

Mesures Scintillométriques

Nota : les mesures (Rn, G, H, LE, scintillométrie) sont toujours accompagnées de mesures

- du couvert végétal (indice foliaire, hauteur du couvert)
- d'humidité du sol

Notons que la mesure des flux à l'échelle locale était réalisée en même temps qu'un suivi de la croissance végétale et de l'humidité du sol sur les parcelles concernées. Les périodes de mesures pour chaque parcelle sont également présentées dans le Tableau 2.1. Ces périodes d'observations ont été choisies de manière à intégrer, pour chacune des cultures étudiées, le passage d'une végétation en pleine croissance à un sol nu, ainsi que d'une situation d'évapotranspiration significative à celle consécutive à un dessèchement, de manière à pouvoir observer les conséquences de ces transitions sur la dynamique des flux. Ces périodes correspondent à des situations typiques de printemps et d'été.

2.1.3. Description des parcelles sur lesquelles des mesures de flux ont été réalisées.

La parcelle « A », située sur la rive droite, est de taille moyenne (1.2 ha) et de pente assez homogène. Cette parcelle est la parcelle expérimentale de l'ORE OMERE, dénommée « parcelle agronomique ». Elle est suivie de manière permanente pour l'analyse de l'évolution du ruissellement de surface en fonction des pratiques culturales. On notera que les mesures de ruissellement effectuées sur cette parcelle aideront à l'établissement du bilan hydrologique de la parcelle. La parcelle « A » a été suivie en 2004 et en 2006.

- En 2004, le suivi a duré du mois d'avril au mois de décembre et a permis de mesurer les quatre termes du bilan d'énergie. On distingue deux périodes d'observation : l'une démarrant en pleine croissance d'une culture de blé et se terminant à sa récolte, et l'autre correspondant à la période de chaume de blé puis de sol nu, se terminant fin décembre après labour. Les deux jeux de données résultants sont nommés « *A04blé* », et « *A04sol* ».
- En 2006, trois périodes d'observation furent distinguées. La première a démarré en février lorsqu'une culture de fève était au stade floraison, et s'est arrêtée à la récolte. La seconde période d'observation correspond à une reprise de végétation spontanée et à la mise en parcour de la parcelle après la récolte de la fève. Enfin, la troisième période est une situation de sol nu subissant une phase de dessèchement prononcé. Les trois jeux de données résultants sont notés « *A06fev* », « *A06par* », et « *A06sol* ».
- Notons qu'en 2005, l'agriculteur a subdivisé la parcelle en plusieurs cultures, ce qui nous a obligé à transférer le dispositif de mesures sur une autre parcelle, la parcelle B.



07 avril 2004 A04ble



01 juin 2004 E04pch



11 mai 2005 B05avo



27 juin 2005 B05sol



20 avril 2006 A06fev



01 juin 2006 A06par



18 mai 2005 C06par



28 juillet 2006 C06sol

Figure 2.5. Illustrations des conditions de couverture végétale observées sur les parcelles A, B et C en 2004, 2005 et 2006. Sont aussi indiqués les noms des jeux de données correspondants.

La parcelle « B » se trouve sur le même versant que la parcelle « A ». Elle a aussi une surface adéquate pour les mesures de flux. Elle fut suivie en 2005 durant un cycle de culture d'avoine, cette dernière étant très utilisée dans le bassin versant à des fins fourragères. Parmi les options possible pour la technique de culture (pâturage, récolte en vert, récolte après maturation pour la production de grains), la récolte en vert fut l'option choisie en 2005. Deux périodes d'observation furent distinguées. La première correspondait au cycle cultural de l'avoine, et l'autre correspondait à l'après récolte. Les jeux de données résultants furent nommés « *B05avo* » et « *B05sol* ».

La parcelle « C » a été choisie en 2006 pour installer une deuxième station de flux, en supplément de celle localisée sur la parcelle A. Cette parcelle se trouve sur la rive gauche du bassin versant, et donc sur le versant opposé à celui des parcelles A et B. Ce choix fut motivé par le fait qu'en 2006, la parcelle C était la plus grande parcelle de végétation naturelle utilisée comme parcours sur le bassin versant, tout en présentant le relief le moins accidenté pour les parcelles de parcours. Il est à signaler qu'il ne s'agissait pas d'une parcelle en parcours permanent mais d'une parcelle en jachère non labourée. En effet, le choix d'une parcelle en parcours permanent ne fut pas possible, au vu de la taille, de la géométrie et de la pente de ces parcelles. Les périodes d'observations correspondaient à la phase de végétation active et à la phase de végétation sénescence. Les jeux de données résultant furent nommés « *C06par* » et « *C06sol* ».

La parcelle « D » fut choisie en 2004 pour installer une station de mesure de flux par la méthode de rapport de Bowen, sur une culture de pois chiche. Les données ne furent pas exploitées dans le cadre du présent travail, à l'exception du rayonnement net

La parcelle « E » a été choisie en décembre 2005 pour réaliser des mesures par covariances turbulentes sur une culture d'orge. La station de mesures de flux fut retirée début mars. De même que sur la parcelle D, seules les mesures de rayonnement net furent exploitées dans le présent travail.

La Figure 2.5 un aperçu de la couverture végétale sur les trois parcelles A, B et C.

2.1.4. Choix du trajet du scintillomètre et des parcelles représentatives du transect

Le trajet du scintillomètre a été choisi afin de représenter les hétérogénéités de relief et de couvert végétal à l'intérieur du bassin versant. Pour minimiser l'influence extérieure du bassin versant et pour ne pas avoir un trop grand nombre de parcelles à suivre en termes de stock hydrique du sol et de croissance végétale, nous avons choisi un transect qui traverse le bassin versant en largeur d'un bord à l'autre. Les émetteur et récepteur du dispositif scintillométrique furent installés à une hauteur de deux mètres au dessus du sol. Les critères de choix ont été définis en concertation avec des experts (Gilles Boulet, UMR CESBIO et Jean-Pierre Lagouarde, UR EPHYSE). Le choix définitif du trajet optique du scintillomètre fut opéré sur le terrain en concertation avec Marc Irvine (UR EPHYSE) et Laurent Prévot (UMR LISAH). Le transect résultant est représenté sur la Figure 2.4 (ligne continue de couleur rouge avec deux triangles aux extrémités représentant l'émetteur et le récepteur).

Pour caractériser la couverture végétale et le bilan hydrique du sol à l'intérieur de la zone de mesure du scintillomètre, nous avons effectué des suivis de terrain (couverture végétale et bilan hydrique) sur un ensemble de parcelles représentant la diversité des couverts végétaux et des sols (natures et profondeurs). Durant la période d'observation scintillométrique, d'avril à juillet 2006, nous avons considéré les parcelles suivantes.

- Les parcelles G et I correspondaient à deux types de parcours permanents. La parcelle G, localisée sur des bandes de grès avec de très fortes pentes, correspondait à de la végétation ligneuse et basse. La parcelle I, localisée sur le lit de l'oued, était herbacée et presque verte toute l'année. Cette parcelle se trouvant sur une pente prononcée, nous l'avons partagée en deux : la partie aval Ia, proche du lit d'oued, où la végétation avait un développement plus important ; et la partie amont Ib, où la croissance végétale était réduite. Les jeux de données résultants furent nommés « G06plg », « Ia06phb », et « Ib06phb ».
- Les parcelles F, H, M correspondaient à des cultures céréalières dans différentes conditions de profondeur de sol et de topographie. La parcelle F, cultivée en triticale, était située sur la rive gauche où le sol est peu profond. La parcelle H, cultivée en blé, était située sur le lit d'oued où le sol est profond. La parcelle M, cultivée en blé, était localisée

à la bordure de la rive droite, où le sol est moyennement profond. Les jeux de données résultants furent nommés « *F06tri* », « *H06blé* » et « *M06blé* ».

- La parcelle L, adjacente à la parcelle A, correspondait à une culture de légumineuse, à savoir de la fève. Le jeu de données résultant fut nommé « *L06fev* ».

Les observations scintillométriques, couplées aux observations d'humidité de sol et de croissance végétale sur les parcelles précitées, ont été menées sur une période intégrant la fin de la croissance végétative et la période de dessèchement pour l'ensemble des parcelles.

2.2. Instrumentation et acquisition des données

Dans cette partie, nous présentons l'instrumentation utilisée, les modes d'acquisition des données et les fréquences de mesures, pour l'ensemble des observations effectuées, incluant les mesures d'humidité du sol, de la hauteur végétale et de la surface foliaire, et des composantes du bilan d'énergie.

2.2.1. Humidité du sol

L'humidité du sol fut estimée par la méthode gravimétrique. Pour chaque parcelle suivie, des mesures gravimétriques furent menées durant les périodes d'observation des flux avec une fréquence bihebdomadaire (deux fois par semaine) durant les périodes où la végétation était active, et bimensuelle (deux fois par mois) durant l'été où le sol était nu et sec. A chaque date de mesure, des prélèvements de sol ont été effectués à la tarière manuelle tous les 10 à 20 cm, jusqu'à un mètre de profondeur. La profondeur de prélèvement fut réduite pour des sols moins profonds ou des sols très compacts en été. Le nombre de profils de sol prélevés fut de trois à six par parcelle, en répartissant les prélèvements (haut, milieu et bas des parcelles en pente) de telle sorte que soit prise en compte la variabilité du sol. Les échantillons prélevés ont été stockés dans des boîtes en verre. A leur arrivée au laboratoire, leur poids frais a été pesé à l'aide d'une balance de précision, puis leur poids sec a été déterminé après passage à l'étuve à 105 °C pendant 24 heures.

2.2.2. Caractérisation de la végétation

Deux caractéristiques de la végétation, importantes pour les échanges surface – atmosphère, ont été suivies au cours des expérimentations : la hauteur de la végétation et son indice foliaire. La fréquence de mesure était hebdomadaire ou bimensuelle selon les vitesses de croissance végétale observées sur le terrain.

2.2.2.1. Hauteur de la végétation

La hauteur du végétal a été mesurée à l'aide d'un mètre. Le nombre d'observations par parcelle à chaque date de mesure a varié de 30 pour les cultures annuelles (plus homogènes) à 100 pour les parcours (couverts hétérogènes avec présence de plusieurs espèces végétales).

2.2.2.2. Indice foliaire

Des prélèvements de la partie aérienne furent réalisés sur des surfaces délimitées des couverts végétaux. Le nombre de répétitions par parcelle variait de 5 à 10 selon l'hétérogénéité du couvert. Le végétal prélevé était pesé, puis un sous échantillon correspondant à environ 1/3 du poids faisait l'objet d'une mesure de surface foliaire à l'aide d'un planimètre WinDIAS (DELTA-T Devices Ltd, Cambridge, UK).

2.2.3. Composantes du bilan d'énergie

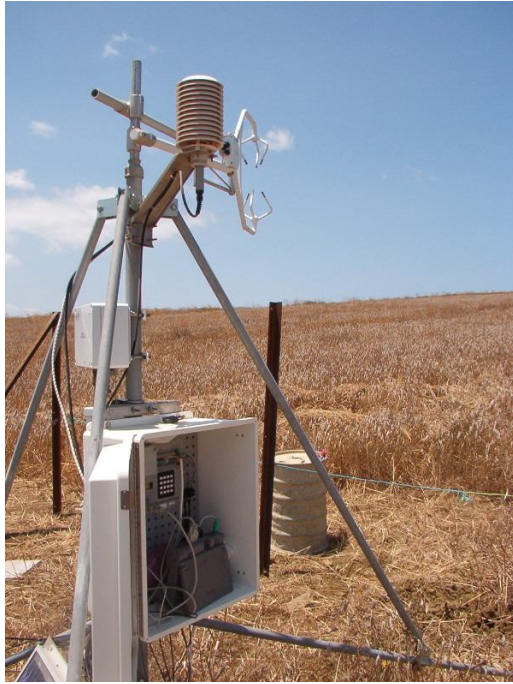
A l'échelle parcellaire, les flux échangés entre les surfaces et l'atmosphère étaient mesurés par la méthode des covariances turbulentes, associée à des mesures de rayonnement net et de flux de chaleur dans le sol. A l'échelle du transect recoupant un ensemble de parcelles, les mesures étaient effectuées par scintillométrie optique, cette technique fournissant une estimation spatialement intégrée du flux de chaleur sensible. Les types d'instruments utilisés et le mode d'acquisition des données sont détaillés ci-après.

2.2.3.1. Mesure des composantes du bilan d'énergie à l'échelle parcellaire

Description du dispositif

Deux stations de mesure de flux ont été utilisées. La différence de matériel entre ces deux stations résidait principalement dans le type d'anémomètre sonique utilisé. Au total, chacune des deux stations incluait les capteurs présentés ci-dessous.

- Un **anémomètre sonique** tridimensionnel mesurait à haute fréquence les fluctuations (c'est à dire les variations rapides par rapport à la valeur moyenne) des trois composantes de la vitesse de vent : horizontale et parallèle à la direction du vent (u), horizontale et perpendiculaire à la direction du vent (v) et verticale (w), ainsi que la température de l'air (T) à partir de la vitesse du son. Deux types d'anémomètres furent utilisés : le modèle CSAT3 de Campbell (Logan, USA) sur les parcelles A et B (Figure 2.6a) et le model 81000V de Young (Traverse city, USA) sur la parcelle C (Figure 2.6b). Ces mesures furent par suite utilisées pour quantifier les flux de chaleur sensible H et latente LE .
- Un **hygromètre optique** KH20 (Campbell, Logan, USA) mesurant à haute fréquence les fluctuations (c'est à dire les variations rapides par rapport à la valeur moyenne) de la vapeur d'eau dans l'atmosphère (q). Ce capteur ne pouvant mesurer la pression de vapeur absolue, il fut couplé avec un thermo-hygromètre HMP45C (Vaisala, Finlande) installé à la même hauteur par rapport au sol, et qui mesurait indépendamment l'humidité. Ces mesures furent par suite utilisées pour quantifier le flux de chaleur latente LE . On notera que les mesures collectées par l'hygromètre optique KH20 furent fréquemment perturbées par les précipitations et les fientes d'oiseaux, et que l'instrument a subi une dégradation au cours du temps en rapport avec les conditions météorologiques (dessiccation du système d'étanchéité en été, diminution de l'imperméabilité de ce même système d'étanchéité pendant les périodes de pluie). En conséquence, les mesures n'ont pu être collectées sur certaines parcelles, comme indiqué dans le Tableau 2.1.
- Trois **capteurs de flux thermique** de type HFP01 (Huskseflux, Delft, NL) furent installés dans le sol à des profondeurs comprises entre 0.02 à 0.05 m pour mesurer le flux de chaleur dans le sol G .
- Un **pyrradiomètre différentiel** (bilan mètre) à thermopile de type NR-Lite (Kipp & Zonen, Delft, NL) permettait de mesurer le rayonnement net R_n .



a) Parcelle A cultivée en blé le 13 juillet 2004



b) Parcelle C en parcours le 30 mai 2006

Figure 2.6. Vues des stations de mesures et des systèmes d'acquisitions des données.

La hauteur de mesure des instruments et le type d'anémomètre sonique utilisé sont récapitulés dans le Tableau 2.2 pour les différentes périodes de mesure. La hauteur de mesure est en effet un des éléments les plus importants puisqu'elle détermine le fetch et la proportion des flux mesurés provenant de la parcelle, comme nous le verrons dans la section 3 de ce chapitre (traitement de données pour le calcul des zones de représentativité spatiale des instruments, appelées footprints).

Tableau 2.2. Type d'anémomètre sonique utilisé selon les parcelles et les années, et hauteur d'installation pour l'anémomètre.

| Parcelle - année | Hauteur de mesure par rapport au sol (m) | Type d'anémomètre sonique |
|------------------|---|------------------------------|
| A - 2004 | 1.96 | CSAT3 |
| B - 2005 | 2.05 | CSAT3 |
| D - 2006 | 1.9 | CSAT3 |
| A - 2006 | 1.78 | CSAT3 |
| C - 2006 | 2.02 | Young |

Acquisition des données

L'acquisition des données a été réalisée à l'aide d'une centrale d'acquisition de type CR23X (Campbell, Logan, USA) couplée à un ordinateur pour décharger la centrale en temps réel et

donc remédier à la faible capacité de stockage de celle-ci. Les fréquences d'acquisition et de stockage des données variaient selon des variables concernées.

- Les données provenant de l'anémomètre sonique (u, v, w et T) et de l'hygromètre optique (q) étaient acquises à une fréquence de 10 Hz par la centrale, puis stockées sur l'ordinateur en temps réel. Parallèlement la centrale calculait les statistiques de ces données sur 30 minutes (moyennes, variances et covariances), ce qui permettait d'obtenir des estimations approchées des flux convectifs, stockées dans la mémoire de la centrale.
- Les mesures de rayonnement net, de température et d'humidité de l'air, ainsi que de flux de chaleur dans le sol, étaient acquises avec une fréquence de 1 Hz par la centrale, puis moyennées sur des intervalles de 30 minutes et stockées dans la centrale.

L'ensemble de ces capteurs ayant été achetés en 2004 et 2005, nous avons utilisé les coefficients d'étalonnage fournis par leurs constructeurs.

Continuité des observations selon les possibilités du dispositif expérimental

Chacune des deux stations de mesure des flux incluait la centrale d'acquisition et les capteurs d'une part, et l'ordinateur assurant le stockage des données acquises à 10 Hz d'autre part. L'ordinateur, consommateur d'énergie, avait un système d'alimentation indépendant et similaire à celui installé pour la centrale et les instruments (batteries et panneaux solaires). Ce système d'alimentation indépendant permettait de conserver les valeurs moyennes sur 30 minutes en cas de dysfonctionnement de l'ordinateur, et donc d'absence de données à 10 Hz. Ce cas de Figure s'est produit à plusieurs reprises lors de chaque période de mesure des flux à l'échelle de la parcelle, ce qui impliquât des travaux de reconstitution pour les chroniques des flux de chaleur latente et sensible à l'échelle journalière (voir chapitre 6).

2.2.3.2. Scintillométrie

La scintillométrie, ou méthode des scintillations, repose sur l'analyse des fluctuations d'intensité que subit un signal optique le long de son trajet entre un émetteur et un récepteur. Ces fluctuations sont causées par les variations de l'indice de réfraction de l'air, elles-mêmes

liées à la turbulence et donc aux échanges d'énergie entre la surface et l'atmosphère. Les scintillomètres, constitués d'un émetteur et d'un récepteur, fournissent une mesure du paramètre de structure pour l'indice de réfraction, noté C_N^2 , dont on déduit le flux de chaleur sensible. Le matériel de mesure a été prêté par l'UR EPHYSE, qui a aussi aidé pour son installation sur le terrain et pour l'analyse des données obtenues. Le scintillomètre utilisé dans cette expérimentation était un scintillomètre à large ouverture (LAS) construit par le département de météorologie de l'Université de Wageningen (NL). La largeur du faisceau était de 0.15 m, l'instrument opérant dans le proche infrarouge selon une longueur d'onde de 935 nm. Une illustration de l'instrument est donnée en Figure 2.7.



Figure 2.7. Vue du récepteur du scintillomètre installé en date du 31 mai 2006.

Le récepteur et l'émetteur étaient installés de part et d'autre du bassin versant, à la même altitude, à une distance de 968.5 m selon un axe SSE – NNW (voir Figure 2.4). La Figure 2.8 montre la topographie sous le trajet optique du scintillomètre. Celle-ci présente globalement la forme d'un V, tout en étant assez irrégulière, surtout sur la rive Sud du bassin (partie droite de la courbe sur la Figure 2.8). L'émetteur et le récepteur furent été soigneusement alignés lors de l'installation du dispositif, à l'aide de lunettes de visée, et l'alignement fut régulièrement contrôlé au cours de l'expérimentation. Le récepteur du scintillomètre

fournissait directement les valeurs du paramètre de structure, enregistrées à la fréquence de 2 Hz par une centrale CR10X (Campbell, Logan, USA) et moyennées toutes les 15 minutes.

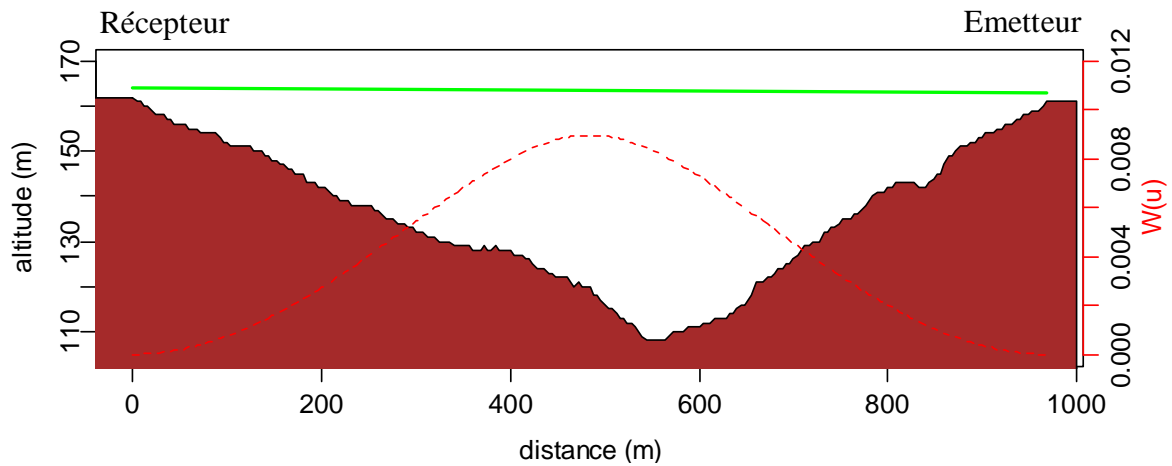


Figure 2.8. Illustration des conditions d'acquisition des données scintillométriques : topographie sous le trajet optique du scintillomètre déduite du MNT présenté en Figure 2.2 (zone colorée), trajet optique du scintillomètre (ligne verte) et courbe de pondération $W(u)$ du scintillomètre (ligne discontinue de couleur rouge).

3. Traitement des données

Dans cette partie, nous présentons les différentes méthodes appliquées pour le traitement des données présentées ci-dessus (§ 2 et 3). Pour ceci, nous exposons successivement les notions essentielles relatives aux flux turbulents, le traitement des données de flux turbulents acquises par covariances turbulentes d'une part et par scintillométrie optique d'autre part, le traitement des données pour estimer l'énergie disponible, et le traitement des données collectées pour caractériser la couverture végétale et le bilan hydrique. L'ensemble de ces traitements est effectué via des programmes écrits dans le langage GNU R (<http://www.r-project.org>).

3.1. Notions sur les flux turbulents

Dans les conditions naturelles, la turbulence assure l'essentiel des échanges convectifs entre la surface (sol nu ou couvert végétal) et l'atmosphère : transferts de chaleur, de quantité de mouvement et de masse (vapeur d'eau, dioxyde de carbone, gaz biogéniques, ...). Du fait

qu'il est impossible de décrire le comportement individuel de l'ensemble des tourbillons qui caractérisent les écoulements turbulents, le comportement moyen des flux turbulents est le plus souvent décrit via des méthodes statistiques (Baldocchi, 2006). Dans cette partie nous présentons successivement l'expression des flux turbulents selon la décomposition de Reynolds, qui est à la base de la détermination des flux par la méthode des covariances turbulentes, puis la notion de K-théorie et la théorie de similitude de Monin-Obukhov, qui seront utilisées pour certains des calculs de flux. Nous ne nous intéresserons qu'aux flux verticaux, en supposant la couche limite homogène (absence d'advection).

3.1.1. Expression des flux turbulents selon la décomposition de Reynolds

La décomposition de Reynolds peut être appliquée à toute variable mesurée à haute fréquence : vitesse, température, concentration en gaz. Elle consiste à décomposer les valeurs instantanées d'une variable x en une valeur moyenne \bar{x} , sur un intervalle de temps donné, et une fluctuation x' par rapport à cette moyenne :

$$x = \bar{x} + x' \quad (\text{Équation 2.1})$$

La densité de flux, qu'on nomme généralement « flux », est la quantité transportée par unité de temps et de surface. Le flux vertical instantané F_c d'une grandeur quelconque s'exprime comme le produit de la vitesse verticale du vent w par la concentration c de cette grandeur :

$$F_c = wc \quad (\text{Équation 2.2})$$

Sur un intervalle de temps donné, la valeur moyenne du flux s'écrit :

$$\overline{F_c} = \overline{wc} \quad (\text{Équation 2.3})$$

En appliquant la décomposition de Reynolds, on obtient :

$$\overline{F_c} = \overline{wc} = \overline{(w + w')(c + c')} \quad (\text{Équation 2.4})$$

qui se développe sous la forme :

$$\overline{F_c} = \overline{wc} + \overline{wc'} + \overline{w'c} + \overline{w'c'} \quad (\text{Équation 2.5})$$

Par suite de la définition de la décomposition de Reynolds, $\overline{w'} = 0$ et $\overline{c'} = 0$. De plus, dans un écoulement de couche limite horizontalement homogène, la vitesse moyenne du vent vertical est nulle, soit $\overline{w} = 0$. L'équation 2.5 devient ainsi :

$$\overline{F_c} = \overline{w'c'} \quad (\text{Équation 2.6})$$

Sur un intervalle de temps donné, la moyenne du flux vertical F_c est donc égale à la moyenne du produit des fluctuations de la vitesse verticale et de la concentration, qui peut aussi s'exprimer comme la covariance entre ces deux variables. Cette expression est à la base des mesures de flux par la méthode des covariances turbulentes et tous les flux turbulents peuvent être exprimés de cette manière.

Le flux de chaleur sensible H s'exprime comme la covariance entre la vitesse verticale du vent w et la température de l'air T , multipliée par la masse volumique de l'air ρ et sa chaleur spécifique à pression constante C_p .

$$H = \rho C_p \overline{w'T'} \quad (\text{Équation 2.7})$$

Le flux de chaleur latente LE s'exprime comme la covariance entre la vitesse verticale du vent w et l'humidité spécifique de l'air q , multipliée par la masse volumique de l'air ρ et la chaleur latente de vaporisation L .

$$LE = \rho L \overline{w'q'} \quad (\text{Équation 2.8})$$

Le flux de quantité de mouvement τ , ou contrainte de cisaillement, s'exprime comme la covariance entre la vitesse verticale w et la vitesse horizontale u du vent, multipliée par la masse volumique de l'air ρ .

$$\tau = -\rho \overline{u'w'} \quad (\text{Équation 2.9})$$

On utilise souvent la variable u_* , appelée vitesse de friction et définie par :

$$u_* = \sqrt{|\tau|/\rho} \quad (\text{Équation 2.10})$$

3.1.2. Diffusivité turbulente et profil de vitesse du vent

A l'intérieur de la couche limite de surface, zone où les écoulements ne sont pas directement dépendants des propriétés locales de la surface - typiquement entre quelques mètres et quelques dizaines de mètres d'altitude - on montre que les flux ne varient pas avec l'altitude, soit :

$$\frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} = 0 \quad (\text{Équation 2.11})$$

Pour connaître les valeurs des grandeurs c et leurs variations avec l'altitude, il faut introduire des hypothèses supplémentaires. Par analogie entre les transferts turbulents et les lois de diffusion, on supposera que les flux sont proportionnels aux gradients, avec un coefficient de proportionnalité appelé *diffusivité turbulente* et noté K . Le flux vertical F_c de la grandeur c s'écrira ainsi :

$$F_c = -\rho K \frac{\partial \overline{c}}{\partial z} \quad (\text{Équation 2.12})$$

Par exemple, le flux de quantité de mouvement τ s'écrira :

$$\tau = -\rho K_m \frac{\partial \overline{u}}{\partial z} \quad (\text{Équation 2.13})$$

Le coefficient de diffusivité turbulente est proportionnel à la hauteur au dessus de la surface z , à la vitesse de frottement u_* et à un coefficient k appelé constante de von Karman, dont la valeur généralement admise et utilisée dans cette thèse est $k = 0.4$. Pour le flux de quantité de mouvement, le coefficient de diffusivité turbulente K_m s'exprime sous la forme :

$$K_m = k u_* z \quad (\text{Équation 2.14})$$

En combinant les équations 2.10, 2.13 et 2.14, on obtient l'expression du profil vertical de vitesse du vent :

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \frac{kz}{u_*} = 1 \quad (\text{Équation 2.15})$$

dont l'intégration entre un niveau donné z et la surface conduit à un profil logarithmique de la vitesse moyenne du vent :

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z}{z_{0m}} \right) \quad (\text{Équation 2.16})$$

Dans cette expression, la *longueur de rugosité mécanique* z_{0m} est l'altitude à laquelle la vitesse du vent s'annulerait si le profil logarithmique était valable jusqu'à la surface. La longueur de rugosité est généralement estimée comme le dixième de la hauteur moyenne des aspérités de la surface.

Dans le cas des flux au dessus d'un couvert végétal, tout se passe comme si la présence de la végétation surélevait la surface d'une *hauteur de déplacement* D généralement estimée comme égale à 2/3 de la hauteur de la végétation (Kailman et Finnigan, 1994) et on remplacera z par $z-D$ dans les équations précédentes.

La notion de diffusivité turbulente est à la base des mesures de flux à partir de la mesure du gradient de la variable scalaire considérée. La formulation proposée via l'équation 2.14 ne tient cependant compte que de la convection forcée induite par le vent. Il est cependant indispensable de prendre en compte la convection libre induite par la flottabilité de l'air sous l'influence du gradient vertical de température, comme expliqué ci-après.

3.1.3. Théorie de similitude de Monin-Obukhov

Du fait des variations de la masse volumique de l'air avec sa température, les échanges turbulents sont augmentés lorsque la surface est plus chaude que l'air (conditions dites

instables) et sont inhibés lorsque la surface est plus froide (conditions dites stables). Selon la théorie de la similitude de Monin-Obukhov, toute variable adimensionnelle du type $\frac{\overline{\partial u}}{\partial z} \frac{z}{u_*}$ est une fonction universelle du paramètre adimensionnel de stabilité atmosphérique ζ défini par :

$$\zeta = z/L_{MO} \quad (\text{Équation 2.17})$$

où z est la hauteur de mesure, à laquelle on soustrait éventuellement la hauteur de déplacement D . L_{MO} est la longueur de Monin-Obukhov, qui fait intervenir le flux de quantité de mouvement τ et le flux de chaleur sensible H :

$$L_{MO} = \frac{-u_*^3}{k \frac{g}{T} w' T'} = \frac{-u_*^3}{k \frac{g}{T} \frac{H}{\rho C_p}} \quad (\text{Équation 2.18})$$

où g est l'accélération de la pesanteur.

La valeur du paramètre ζ caractérise la stabilité de l'écoulement : instabilité si $\zeta < 0$, neutralité si $\zeta \approx 0$, stabilité si $\zeta > 0$.

Dans le cadre de la similitude de Monin-Obukhov, les profils adimensionnels ne sont plus égaux à 1 comme dans le cas de la neutralité (équation 2.15) mais donnés par des fonctions universelles $\Phi(\zeta)$. Le gradient adimensionnel de vitesse de vent est ainsi défini par :

$$\frac{\overline{\partial u}}{\partial z} \frac{z}{u_*} = \Phi_m(\zeta) \quad (\text{Équation 2.19})$$

L'intégration du gradient adimensionnel de vitesse entre deux niveaux z_1 et z_2 conduit à l'expression :

$$u_1 - u_2 = \frac{u_*}{k} \left\{ \ln\left(\frac{z_1}{z_2}\right) - \Psi_m(\zeta_1) + \Psi_m(\zeta_2) \right\} \quad (\text{Équation 2.20})$$

et l'intégration entre la surface et le niveau z conduit à la formulation :

$$\bar{u}(z) = \frac{u_*}{k} \left\{ \ln\left(\frac{z}{z_{0m}}\right) - \Psi_m(\zeta) \right\} \quad (\text{Équation 2.21})$$

où la nouvelle fonction Ψ_m résulte de l'intégration de la fonction Φ_m entre la surface et le niveau z :

$$\Psi_m = \int \frac{\Phi_m}{(1-z)} dz \quad (\text{Équation 2.22})$$

Le profil logarithmique de vitesse du vent obtenu en conditions neutres (convection forcée) est ainsi transformé en un profil pseudo-logarithmique.

Pour le flux de chaleur sensible, le gradient adimensionnel de température s'écrit :

$$\frac{\partial \bar{T}}{\partial z} \frac{z}{T_*} = \Phi_h(\zeta) \quad (\text{Équation 2.23})$$

où T_* est une échelle de température définie par :

$$T_* = -\frac{H}{\rho C_p u_*} \quad (\text{Équation 2.24})$$

La fonction $\Phi_h(\zeta)$ est la fonction universelle pour les transferts de chaleur équivalente à la fonction $\Phi_m(\zeta)$ pour les transferts de quantité de mouvement.

L'intégration du gradient adimensionnel de température (Équation 2.23) entre deux niveaux z_1 et z_2 conduit à l'expression :

$$\bar{T}_1 - \bar{T}_2 = \frac{T_*}{k} \left\{ \ln\left(\frac{z_1}{z_2}\right) - \Psi_h(\zeta_1) + \Psi_h(\zeta_2) \right\} \quad (\text{Équation 2.25})$$

où la fonction Ψ_h est l'équivalent pour les transferts de chaleur de la fonction Ψ_m pour les transferts de quantité de mouvement.

En remplaçant T_* par son expression, le flux de chaleur sensible H s'exprime comme :

$$H = \rho C_p \frac{\bar{T}_1 - \bar{T}_2}{r_a} \quad (\text{Équation 2.26})$$

où r_a est la résistance aérodynamique définie par :

$$\frac{1}{r_a} = \frac{k^2 (\bar{u}_1 - \bar{u}_2)}{\left\{ \ln \left(\frac{z_1}{z_{2m}} \right) - \Psi_m(\zeta_1) + \Psi_m(\zeta_2) \right\} \left\{ \ln \left(\frac{z_1}{z_{2h}} \right) - \Psi_h(\zeta_1) + \Psi_h(\zeta_2) \right\}} \quad (\text{Équation 2.27})$$

où z_{2m} et z_{2h} sont les constantes d'intégration pour les transferts de quantité de mouvement et de chaleur, en relation avec les valeurs prises par les profils pseudo-logarithmique au voisinage de la surface (i.e. la *longueur de rugosité mécanique* z_{0m} est l'altitude à laquelle la vitesse du vent s'annulerait si le profil logarithmique était valable jusqu'à la surface, la signalisation de z_{2h} est expliquée ci-dessous).

Si l'intégration est réalisée entre le niveau z à la température T_a et la surface à la température T_s , l'équation 2.26 devient :

$$H = \rho C_p \frac{T_s - T_a}{r_a} \quad (\text{Équation 2.28})$$

et l'équation 2.27 devient :

$$\frac{1}{r_a} = \frac{k^2 \bar{u}}{\left\{ \ln \left(\frac{z}{z_{0m}} \right) - \Psi_m(\zeta) \right\} \left\{ \ln \left(\frac{z}{z_{0h}} \right) - \Psi_h(\zeta) \right\}} \quad (\text{Équation 2.29})$$

De manière analogue à la définition de la longueur de rugosité mécanique z_{0m} , la *longueur rugosité pour les transferts de chaleur* z_{0h} représente le niveau fictif auquel la température de l'air prendrait la valeur de surface T_s si le profil pseudo-logarithmique était valable jusqu'à la surface. On trouvera l'expression des fonctions de stabilité $\Psi_m(\zeta)$ et $\Psi_h(\zeta)$ dans de nombreux ouvrages (Brutsaert, 1982 ; Guyot, 1997)

Selon les équations 2.26 ou 2.28, Le flux de chaleur sensible H est exprimé comme un gradient de température, divisé par une résistance. Cette formulation, analogue à la loi d'Ohm, est très souvent utilisée en modélisation.

Dans le cadre de la présente étude, la théorie de similitude de Monin-Obukhov sera appliquée (i) pour le contrôle de qualité des flux turbulents mesurés par la méthode des covariances turbulentes (ii) pour le calcul du flux de chaleur sensible à partir de mesures scintillométriques et (iii) pour les calculs de résistances aérodynamiques.

3.2. Détermination des flux turbulents par la méthode des covariances turbulentes

La mesure des flux par la technique des covariances turbulentes est considérée comme étant la méthode de référence de détermination des flux échangés entre surface et atmosphère. En effet, elle permet une estimation directe des flux, car elle ne repose sur aucune hypothèse quant à la forme des profils verticaux, et elle n'utilise ni la théorie des diffusivités turbulentes, ni la théorie de similitude. Les vitesses horizontale (u), latérale (v) et verticale (w) du vent, la température (T) et l'humidité spécifique (q) sont mesurées selon une fréquence élevée, et les flux sont calculés comme la covariance entre la vitesse verticale du vent et la grandeur scalaire considérée (équations 2.7 à 2.9). Toutefois, pour l'application de ces équations, des hypothèses sont généralement émises afin de réaliser des simplifications dans la décomposition de Reynolds : les mesures étant réalisées dans la couche limite, celle-ci est supposée homogène (pas de variation des variables suivant le plan horizontal) et caractérisés par des phénomènes stationnaires (pas de variations instantanées).

Pour obtenir une estimation correcte des flux, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble de leurs composantes spectrales, des basses fréquences caractérisant les grands tourbillons, aux hautes fréquences traduisant la dissipation de l'énergie en tourbillons de petite taille. Le choix de la fréquence des mesures et du temps d'intégration pour le calcul des covariances est ainsi une étape importante. Pour caractériser le domaine spectral des flux mesurés, il est habituel de normaliser la fréquence de mesure selon les valeurs prises par le nombre adimensionnel n :

$$n = f z / U \quad (\text{Équation 2.30})$$