

## 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  $n$  :

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

où  $f_e$  est la fréquence d'échantillonnage (ou l'inverse du temps d'intégration),  $z$  est la hauteur de mesure et  $u$  est la vitesse horizontale du vent.

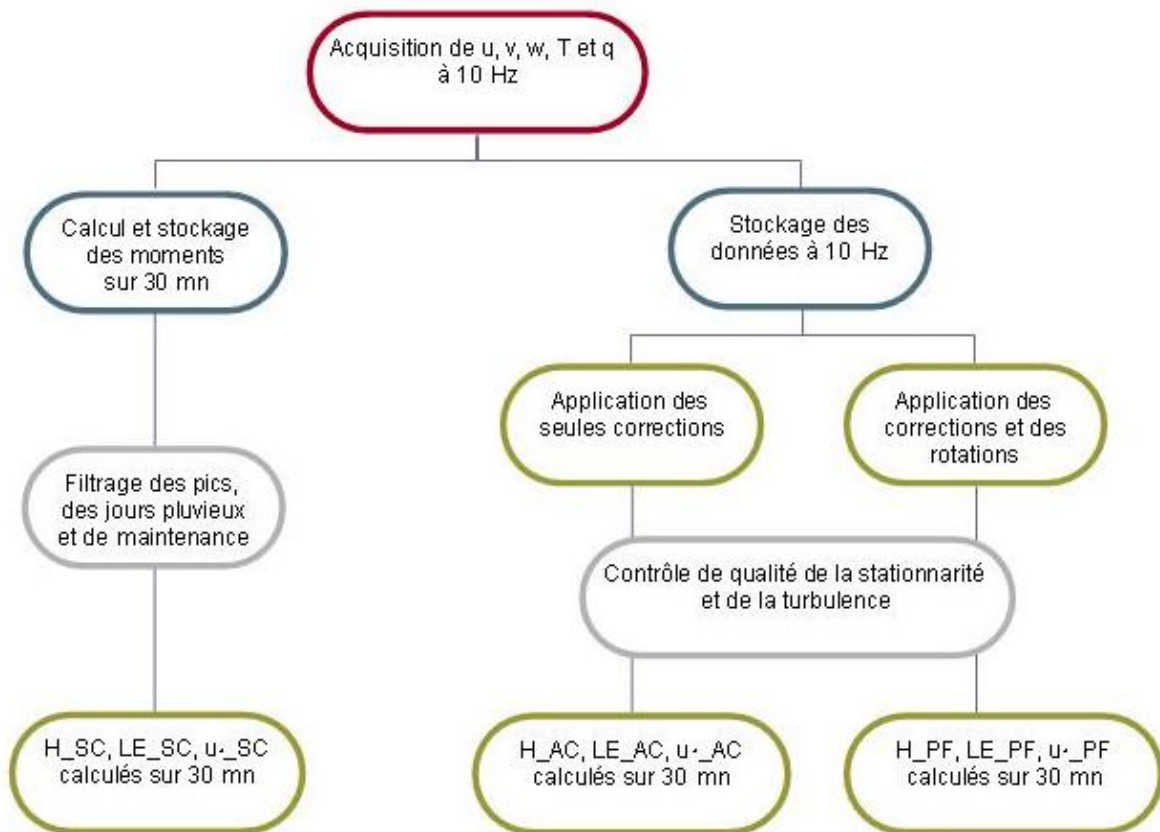
D'après Brunet et al. (1995b), la prise en compte des hautes fréquences est satisfaite avec une fréquence d'échantillonnage  $f_e$  telle que  $n = f_e z / U \approx 10$  et la prise en compte des basses fréquences est satisfaite avec un temps d'intégration  $T_i$  tel que  $n = z / (T_i U) \approx 0.001$ .

Dans notre cas, la fréquence d'échantillonnage  $f_e = 10$  Hz était imposée par le système d'acquisition. Avec une hauteur de mesure  $z = 2$  m, le critère « hautes fréquences »  $n = f_e z / U \approx 10$  n'était strictement satisfait que pour les vitesses de vent inférieures à 2 m/s. Pour une vitesse de vent de 4 m/s, le nombre  $n$  vaut 5, ce qui ne représente qu'une faible sous-estimation des flux. De plus, le logiciel de calcul des flux ECpack, utilisé dans le cadre du présent travail pour corriger les mesures par covariances turbulentes, propose une correction basée sur la forme théorique des spectres de turbulence. Pour les basses fréquences, nous avons choisi un temps d'intégration de 30 minutes qui, toujours avec une hauteur de mesure de 2 m, permet de satisfaire le critère  $n = z / (T_i U) \approx 0.001$  pour les vitesses horizontales de vent supérieures à 1 m/s, ce qui représente la majorité des situations rencontrées.

Rappelons (voir § 2.2.3.1) que les données acquises à 10 Hz par les anémomètres soniques ( $u$ ,  $v$ ,  $w$  et  $T$ ) et les hygromètres rapides ( $q$ ) étaient stockées selon deux modes :

- stockage de ces données brutes en temps réel sur un ordinateur
- calcul en temps réel des moments (moyennes, variances et covariances) selon un pas de temps de 30 minutes, donnant une estimation approchée des flux convectifs.

Les contraintes d'alimentation électrique par panneaux solaires de l'ordinateur permettant le stockage des données brutes à 10 Hz n'a pas permis un stockage continu, alors que les variances et covariances ont été acquises et stockées tout au long des expérimentations. De ce fait, différentes chaînes de traitement ont été mises en oeuvre, puisque les corrections et rotations, ainsi que les contrôles de qualité proposés dans la littérature pour obtenir des estimations aussi précises que possible des flux ne peuvent être appliqués qu'aux seules données brutes acquises à 10 Hz. La Figure 2.9 résume les traitements appliqués aux données de flux, selon les deux modes de stockage (données brutes acquises à 10 Hz ou moments – moyennes, variances et covariances – calculés en temps réel sur 30 minutes).



**Figure 2.9. Chaînes de traitement appliquées aux mesures de flux par covariances turbulentes. La nomenclature F\_XX inclut le flux F (H pour la chaleur sensible, Le pour la chaleur latente, et  $u_*$  pour la quantité de mouvement en relation avec la vitesse de friction) et le type de correction appliquée (SC pour sans aucune correction, AC pour corrections instrumentales seulement et PF pour correction instrumentale et correction de planar fit, cette dernière étant expliquée ci-après en § 3.2.1.2).**

Pour chacune des parcelles équipées d'une station de mesure des flux par covariances turbulentes, trois types d'estimation des flux convectifs furent ainsi obtenus. Les flux estimés en temps réel par les centrales CR23X à partir des moments calculés sur 30 minutes sont appelés « flux sans corrections » et seront notés « \_SC ». Les flux calculés a posteriori à partir des données brutes acquises et stockées à 10 Hz subissent deux types de traitements : flux obtenus après application des seules corrections instrumentales, que nous appelons « flux avec corrections » (notés \_AC), et flux obtenus après application des mêmes corrections instrumentales et des corrections de rotation, que nous appelons « flux avec rotations » (notés \_PF). Les contrôles de qualité approfondis ne seront appliqués qu'à ces deux derniers types de flux (\_AC et \_PF). Signalons enfin que, l'un de nos principaux objectifs étant l'estimation de l'évapotranspiration, seules les données diurnes sont considérées ici, les

conditions diurnes étant définies par un rayonnement global supérieur à 20 W/m<sup>2</sup> et un rayonnement net positif.

Plusieurs logiciels permettant le calcul des flux convectifs par la méthode des covariances turbulentes ont été développés et mis à la disposition de la communauté utilisatrice ces dernières années. Ces logiciels permettent d'appliquer les corrections instrumentales requises, les corrections de rotation et des contrôles de qualité sur les données. Citons TK2, développé à l'Université de Bayreuth, EdiRe, développé à l'Université d'Edimbourg et ECPack développé en Hollande. Le logiciel ECPack version 2.5.15 (Van Dijk et al., 2004 ; <http://www.met.wau.nl/projects/jep>) a été choisi pour le présent travail, car c'était le logiciel retenu dans le cadre du programme IRRIMED, ce qui a permis de bénéficier d'une initiation à son utilisation par O.K. Hartogensis (Université de Wageningen).

Dans les paragraphes qui suivent, nous présentons successivement les corrections instrumentales et de rotation appliquées lors du calcul des flux turbulents, les contrôles de qualité pour ces flux, et les calculs de footprint retenus pour évaluer les surfaces contribuant aux flux mesurés.

### 3.2.1. Corrections et rotations

Rappelons que les corrections et les rotations ne peuvent être appliquées qu'aux données acquises et stockées sous forme brute à 10 Hz.

#### 3.2.1.1. Corrections instrumentales et expérimentales

L'ensemble des corrections proposées par le programme ECPack furent appliquées :

- prise en compte de la distance entre l'anémomètre sonique et l'hygromètre ;
- prise en compte de l'évolution des valeurs moyennes sur l'intervalle de calcul (« linear detrend ») ;
- correction des pertes spectrales correspondant aux tourbillons de taille inférieure à celle de l'anémomètre selon les co-spectres théoriques selon Moore (1986) ;
- correction de la température mesurée par l'anémomètre pour les variations de la vitesse du son avec l'humidité selon Schotanus et al. (1983) ;

- correction de la sensibilité de l'hygromètre KH20 à l'oxygène selon Webb et al. (1980) ;
- correction de la vitesse verticale moyenne (« Webb term »).

### 3.2.1.2. Rotations

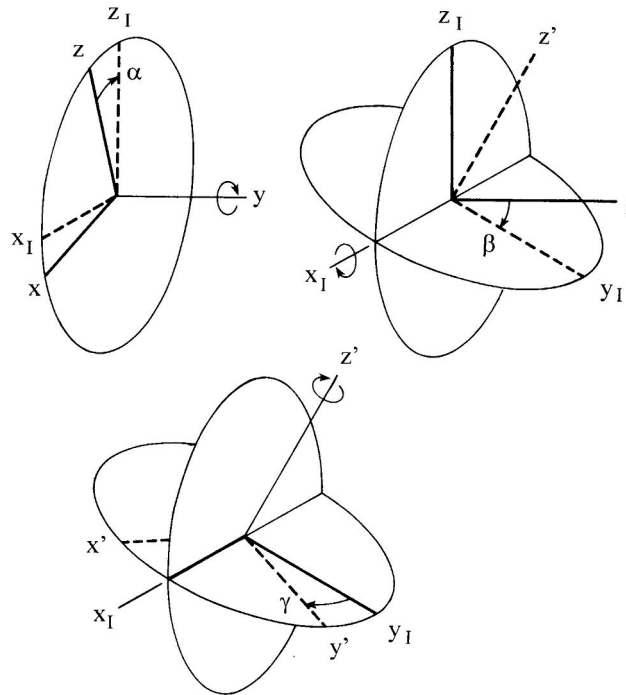
Lors du calcul des flux par la méthode des covariances turbulentes, il est classique d'effectuer des rotations du système de coordonnées de l'anémomètre sonique. Ces corrections de rotation permettent de normaliser les mesures selon une direction orthogonale à l'écoulement du vent. Pour les mesures en terrain plat, il s'agit de corriger d'éventuels défauts de verticalité de l'anémomètre sonique ; alors que dans le cas de mesures sur pentes, il s'agit « d'orienter » les mesures de l'anémomètre perpendiculairement à l'écoulement. Cette orientation de l'anémomètre, faite a posteriori, ne peut-être réalisée que lorsqu'on dispose de l'ensemble des mesures brutes des trois composantes (u, v, w) de la vitesse du vent, à 10 Hz dans notre cas. Les rotations sont effectuées selon trois directions orthonormées (Figure 2.10) :

- la correction *yaw* est une rotation autour de la verticale, qui permet d'annuler la composante latérale du vent ( $\bar{v} = 0$ ) ;
- la correction *pitch* est une rotation autour de l'axe horizontal perpendiculaire à la direction dominante du vent, qui permet d'annuler sa composante verticale ( $\bar{w} = 0$ ) ;
- la correction *roll* est une rotation autour de l'axe horizontal parallèle à la direction dominante du vent, qui permet d'annuler la covariance entre vitesses latérale et verticale ( $\overline{v'w'} = 0$ ).

La correction *yaw*, qui revient à orienter fictivement l'anémomètre face à la direction du vent dominant, est toujours appliquée. Les rotations sont appliquées à chaque intervalle de calcul des flux (30 minutes en général), soit sous la forme d'une double rotation (*yaw - pitch*), soit sous la forme d'une triple rotation (*yaw - pitch - roll*). Ce mode de détermination des angles de rotation présente toutefois l'inconvénient d'être très imprécis dans le cas de vents faibles.

Une autre méthode, appelée planar fit et proposée par Wilczak et al. (2001), diffère de celle présentée ci-dessus par l'intervalle de temps considéré pour calculer les angles de rotation. Ainsi, planar fit consiste à déterminer le plan moyen de l'écoulement à partir des composantes u, v et w acquises sur un intervalle de temps suffisamment long (de un à plusieurs jours) et à

en déduire les trois angles yaw, pitch et roll. Les angles obtenus permettent alors, durant le calcul des flux, d'orienter l'anémomètre perpendiculairement à un plan d'écoulement moyen. La méthode du planar fit, qui est implémentée dans ECPack, est recommandée dans le cas de situations complexes, telles que celles rencontrées en conditions de relief (voir Chapitre 1).



**Figure 2.10.** Illustrations des angles utilisés pour caractériser les corrections de rotations. L'angle  $\alpha$  est l'angle « pitch » que fait l'écoulement avec l'horizontal dans la direction du vent. L'angle  $\beta$  est l'angle « roll » que fait l'écoulement dans le sens transversal de la direction du vent avec l'horizontale. L'angle  $\gamma$  est l'angle « yaw » que fait la direction du vent avec une direction de référence donnée par l'orientation du système de mesure. D'après Wilczak et al. (2001).

Une des difficultés dans l'application de la méthode planar fit est le choix de la fenêtre temporelle sur laquelle est calculée l'inclinaison du plan d'écoulement via les angles de rotation pitch, roll et yaw. Il est recommandé d'éliminer les périodes avec de faibles vitesses du vent (rares dans notre cas), et d'effectuer les calculs sur de longues périodes afin d'améliorer la précision des angles de rotation. Toutefois, les conditions de surface (e.g. couverture végétale en lien avec la croissance de la végétation) ne doivent pas varier significativement durant ces périodes. De plus, en conditions de terrain hétérogène, les angles obtenus par la méthode du planar fit peuvent dépendre fortement de la direction du vent.

Dans un premier temps, nous n'avons considéré que des périodes de quelques jours au plus, afin de tenir compte de l'influence des conditions de surface (croissance de la végétation

notamment). Ensuite, nous avons tenu compte des directions dominantes du vent observées sur notre site, ce qui nous a amené à discriminer deux types de situation en rapport avec les régimes de vent prédominants sur le site : les conditions de vent de Nord-Ouest (soufflant du Nord-Ouest vers le Sud-Est) et de Sud (soufflant Sud vers le Nord). Après analyse des angles déterminés par planar fit pour les différentes directions du vent, il s'est avéré que nous pouvions considérer une fenêtre temporelle de l'ordre de la journée. En effet, de faibles différences furent observées, en termes de flux de chaleur corrigés (H et LE), selon que les corrections de rotation planar fit soit estimées à l'échelle de la journée ou à l'échelle de plusieurs jours. Les angles ainsi obtenus, caractéristiques de l'inclinaison de l'écoulement, furent par suite comparés aux pentes des parcelles (obtenues par MNT) sur lesquelles les mesures ont été effectuées (Chapitre 4).

En termes de régime de vent, notons pour finir que nous avons éliminé les données correspondantes à la direction du vent (est) pour laquelle la mesure était influencée par le dispositif expérimental (mât, structure anémomètre). Au regard du dispositif expérimental et des conditions de vent, ces données correspondaient à un vent d'est (soufflant de l'est vers l'ouest), et constituaient une infime partie du jeu de données collecté.

### **3.2.2. Contrôles de qualité**

Des filtrages furent appliqués sur les données non corrigées (\_SC). Des contrôles qualité plus élaborés furent appliqués aux données corrigées instrumentalement (\_AC), et aux données ayant subi la correction planar fit (\_PF). Nous rappelons que les données ayant subi la correction planar fit furent toujours corrigées instrumentalement au préalable. L'objectif des procédures de filtrage et des contrôles qualité est 1/ d'éliminer les valeurs aberrantes pour les flux sans corrections (\_SC), et 2/ de vérifier la qualité des données pour celles qui ont subi des corrections instrumentales et de rotation.

#### **3.2.2.1. Filtrage des mesures de flux turbulents sans correction (\_SC)**

Rappelons qu'il s'agit de flux calculés en temps réel par les centrales d'acquisition CR23X, à pas de temps de 30 minutes, sur lesquels on ne peut pas appliquer les corrections présentées ci-dessus (§ 3.2.1). Seul est possible un filtrage des données manifestement aberrantes.

A la fréquence de 10 Hz, le nombre d'échantillons acquis par l'anémomètre sonique et par l'hygromètre KH20 pour chaque demi-heure doit être de 18000. Lorsqu'il est inférieur à ce nombre, c'est qu'il y a des perturbations du signal pour diverses raisons expérimentales, entre autres la présence de pluie. Nous avons arbitrairement choisi d'éliminer les données pour lesquelles le nombre d'échantillons était inférieur à 17000 (critère de sélection de 5.5% de données manquantes au maximum).

A certaines périodes, nous avons observées des pics inexplicables. Ces valeurs de flux (chaleur latente LE, chaleur sensible H, vitesse de friction  $u_*$ ), furent éliminés selon un critère empirique sur la vitesse de friction (variation de plus de 0.35 m/s entre deux demi-heures successives). Du fait des difficultés rencontrées avec l'hygromètre KH20 (pluies, fientes d'oiseaux) un test additionnel sur la valeur de la tension de sortie de cet instrument a été appliqué au flux de chaleur latente.

### 3.2.2.2. Contrôle de qualité et filtrage des flux turbulents avec correction (\_AC et \_PF)

Le fait de disposer de l'ensemble des mesures brutes acquises à 10 Hz permet d'effectuer des contrôles de qualité beaucoup plus élaborés que les simples filtrages (§ 3.2.2.1) appliqués aux flux calculés en temps réel (flux « non corrigés »). Nous avons ainsi appliqué les tests classiquement utilisés pour vérifier les hypothèses 1/ d'homogénéité dans l'espace (test dit de turbulence intégrale) et 2/ de stationnarité dans le temps (test dit de stationnarité). Dans un deuxième temps, les résultats de ces deux tests furent combinés pour éliminer les données ne respectant pas ces deux conditions.

#### **a- Le test de caractéristique de turbulence intégrale (ITC)**

Le test d'homogénéité dans l'espace compare les estimations théorique et expérimentale pour différents rapports adimensionnels entre 1/ les écart-types des vitesses verticale et horizontale du vent à la vitesse de friction ( $\sigma_w/u_*$ ,  $\sigma_u/u_*$ ) et 2/ l'écart-type de la température à l'échelle de température ( $\sigma_T/T_*$ ). Les estimations théoriques reposent sur les fonctions de stabilité issues de la théorie de similitude de Monin-Obukhov. Parmi les paramétrages proposés dans la



littérature pour les fonctions de stabilité, nous avons retenus ceux recommandés par Rebmann et al. (2005) et présentées dans le Tableau 2.3.

Le test de la caractéristique de la turbulence (ITC) compare les caractéristiques modélisées à celles mesurées selon l'équation ci-dessous (x correspond à u, w, ou T, et X correspond à u ou T). La turbulence est considérée comme étant bien développée lorsque la valeur du test inférieure à 30% (ITC<0.3).

$$ITC = \left| \frac{\left( \frac{\sigma_x}{X_*} \right)_{\text{mod el}} - \left( \frac{\sigma_x}{X_*} \right)_{\text{mesure}}}{\left( \frac{\sigma_x}{X_*} \right)_{\text{mod el}}} \right| * 100 \quad (\text{Équation 2.31})$$

**Tableau 2.3. Paramétrage des caractéristiques de la turbulence intégrale des composantes verticale et horizontale de la vitesse du vent et de la température.**  $\sigma_w$  est l'écart type de la vitesse verticale du vent w,  $\sigma_u$  est l'écart type de la vitesse horizontale du vent u,  $\sigma_T$  est l'écart type de la température de l'air T,  $u_*$  est la vitesse de frottement,  $T_*$  est le facteur d'échelle de la température,  $\zeta$  est le paramètre de stabilité atmosphérique,  $z_m$  est la hauteur de mesure,  $fc$  est le paramètre de Coriolis  $fc = 2w \sin \phi$  avec  $\phi$  latitude,  $w$  : vitesse de rotation de la terre:  $2 \pi / 86400 \text{ rad.s}^{-1}$ . D'après Rebmann et al. (2005).

Caractéristique de turbulence intégrale	Echelle de stabilité	
	$-3 < \zeta < -0.2$	$-0.2 < \zeta < 0.4$
$\sigma_w / u_*$	$1.3 (1-2\zeta)^{1/3}$ Panofsky et al. (1977)	$0.21 \ln \left( \frac{z_m fc}{u_*} \right) + 3.1$
$\sigma_u / u_*$	$4.15 ( \zeta )^{1/8}$ Foken et al. (1991), Foken et al. (1997)	$0.44 \ln \left( \frac{z_m fc}{u_*} \right) + 6.3$
$ \sigma_T / T_* $	$\zeta < -1$ $-1 < \zeta < -0.0625$ $( \zeta )^{-1/3}$ $( \zeta )^{-1/4}$ Foken et al. (1991)	$-0.0625 < \zeta < 0.02$ $0.02 < \zeta$ $0.5 ( \zeta )^{-1/2}$ $1.4 ( \zeta )^{-1/4}$

**b- Le test de stationnarité**

Le test de stationnarité (ST) a été appliqué en comparant les flux calculés sur 30 minutes à la moyenne des flux calculés sur les six intervalles de 5 minutes inclus dans ces 30 minutes :

$$(ST)_{5mn} = \left| \frac{\overline{(x' w')_{5mn}} - \overline{(x' w')_{30mn}}}{\overline{(x' w')_{30mn}}} \right| * 100 \quad (\text{Équation 2.32})$$

Ce test est appliqué à chacune des variables  $x$  correspondant à :

- $u$  : composante longitudinale de la vitesse du vent ;
- $v$  : composante latérale de la vitesse du vent ;
- $T$  : température de l'air ;
- $q$  : humidité spécifique.

La turbulence est considérée comme étant stationnaire si la valeur de ce test est inférieure à 30 % ( $ST < 0.3$ ).

### **c- Classement des données**

Foken et al. (2004) et Rebmann et al. (2005) définissent des classes de qualité des données en combinant les résultats des tests de stationnarité (ST) et caractéristique de la turbulence (ITC). La première classe, définie par les deux critères ST et ITC inférieurs à 30 %, comprend les données pouvant être utilisées pour la recherche fondamentale. La deuxième classe, définie par les deux critères ST et ITC compris entre 30 % et 250 %, correspond aux données pouvant servir aux observatoires de mesure de flux à long terme. Les données pour lesquelles les deux critères ST et ITC sont supérieurs à 250 % doivent être rejetées. Les tests à appliquer pour classer les différents flux sont récapitulés dans le Tableau 2.4.

**Tableau 2.4. Tests de turbulence et de stationnarité à prendre en compte pour chaque flux turbulent : vitesse de friction ( $u_*$ ), chaleur sensible (H) et chaleur latente (LE).**

	Test de turbulence intégrale (ITC)			Test de stationnarité (ST)			
	$\sigma_w/u_*$	$\sigma_T/T_*$	$\sigma_u/u_*$	$\overline{v'w'}$	$\overline{T'w'}$	$\overline{u'w'}$	$\overline{q'w'}$
$u_*$			X	X		X	
H	X	X			X		
LE	X						X

### **3.2.3. Résultat du contrôle de la qualité des flux turbulents mesurés par la méthode de covariances turbulentes**

Pour le contrôle de qualité des données, nous avons choisi de suivre le schéma proposé par Foken et Wishura (1996) et confirmé par Foken et al. (2004). D'après ces auteurs, ces procédures sont valides pour une large gamme de conditions expérimentales, contrairement à

la clôture du bilan d'énergie et à l'impact de la correction de rotation (planar fit), dont les interprétations peuvent varier selon les conditions expérimentales, et qui restent des sujets de recherches à part entière. L'avantage des tests proposés par Foken et Wishura (1996) est qu'ils permettent une intercomparaison de la qualité des données entre différents sites.

Dans cette partie, nous commentons les résultats des tests de contrôle sur la qualité des flux turbulents relatifs à la stationnarité et la turbulence, puis nous classons les flux selon les résultats de ces tests. Une comparaison des flux ayant subi le traitement de rotation avec ceux ne l'ayant pas subi sera présentée, afin de quantifier l'amélioration apportée par la rotation, procédure qui est recommandée dans le cas de terrains en pente. En conclusion, le choix des données à utiliser pour chaque partie de la thèse sera exposé.

### 3.2.3.1. Test de stationnarité et test de turbulence

Les tests de stationnarité (ST) et de turbulence (ITC) ont été appliqués à toutes les mesures acquises à 10 Hz. Les résultats obtenus sur les différents jeux de données (parcelles, années, conditions de couverture végétale) étant similaires, et ce quelque soit la direction du vent, nous avons choisi de les représenter par des moyennes sur toutes les mesures confondues. Le Tableau 2.5 présente les résultats de ces tests selon que soit appliquée ou non la correction de rotation planar fit, ce qui permet de quantifier l'effet de cette rotation sur la qualité des données. Rappelons que pour ces deux tests, la qualité des données est considérée comme d'autant meilleure qu'un plus grand nombre de données appartiennent aux classes de rangs inférieurs, notées 0-15 et 15-30 pour les deux premières, selon les valeurs seuil assignées aux tests de stationnarité (ST) et de turbulence (ITC).

Le test de stationnarité (noté ST) compare les flux calculés sur des pas de temps de cinq minutes à ceux calculés sur des pas de temps de 30 minutes. Ce test vise donc à évaluer l'homogénéité des données dans le temps. Il permet de vérifier qu'il n'existe pas de variations importantes sur des périodes de 30 minutes, en lien avec 1/ des variations dans les conditions environnementales, et 2/ des perturbations instrumentales. Il permet aussi de valider le choix d'un temps d'intégration de 30 minutes pour calculer les flux. Ce test est appliqué aux différentes covariances entre la fluctuation de la vitesse verticale du vent  $w'$  et les fluctuations des autres variables :  $u'$ ,  $v'$ ,  $T'$  et  $q'$ . Le test ST a montré que la majorité des

données appartient à la première classe, c'est-à-dire qu'il y a moins de 15 % de différence entre les flux moyennés sur cinq minutes et ceux moyennés 30 minutes (flux indexés avec le label `_AC` dans le Tableau 2.5). Notons que si plus que 80 % des covariances  $\overline{u'w'}$  et  $\overline{T'w'}$  appartiennent à la première classe, moins de 50% des covariances  $\overline{v'w'}$  et  $\overline{q'w'}$  y appartiennent, mais 60% de ces dernières appartiennent aux deux premières classes. L'application de la rotation (flux indexés avec le label `_PF` dans le Tableau 2.5) conduit à une nette amélioration pour les covariances  $\overline{u'w'}$ ,  $\overline{T'w'}$  et  $\overline{q'w'}$ , qui se manifeste par l'augmentation des pourcentages d'appartenance à la première classe. En revanche, la rotation n'apporte pas d'amélioration sur la covariance  $\overline{v'w'}$ .

**Tableau 2.5. Tests de turbulence et de stationnarité à prendre en compte pour chaque flux turbulent : vitesse de friction ( $u_*$ ), chaleur sensible (H) et chaleur latente (LE). Pourcentage des données (sans application de la rotation notées « `_AC` », et avec application de la rotation notées « `_PF` ») acceptés pour chacune des classes selon le test de stationnarité ST et le test de turbulence ITC. Le test ST est appliqué pour les covariances  $\overline{u'w'}$ ,  $\overline{v'w'}$ ,  $\overline{T'w'}$  et  $\overline{q'w'}$ . Le test ITC est appliqué à  $\sigma_w/u_*$ ,  $\sigma_u/u_*$  et  $\sigma_T/T_*$ .**

Avant l'application de la rotation par planar fit							
ST				ITC			
	$\overline{u'w'}_{AC}$	$\overline{v'w'}_{AC}$	$\overline{T'w'}_{AC}$	$\overline{q'w'}_{AC}$	$\sigma_w/u_{*AC}$	$\sigma_u/u_{*AC}$	$\sigma_T/T_{*AC}$
<b>(0,15]</b>	81%	35%	90%	47%	59%	49%	29%
<b>(15,30]</b>	7%	23%	5%	15%	33%	27%	25%
<b>(30,50]</b>	4%	17%	2%	10%	6%	15%	23%
<b>(50,75]</b>	3%	10%	1%	6%	1%	7%	18%
<b>(75,100]</b>	2%	5%	1%	4%	0%	1%	2%
<b>(100,250]</b>	3%	6%	1%	8%	0%	0%	2%
<b>&gt; 250</b>	2%	5%	1%	10%	0%	0%	1%
Avec application de la rotation par planar fit							
ST				ITC			
	$\overline{u'w'}_{PF}$	$\overline{v'w'}_{PF}$	$\overline{T'w'}_{PF}$	$\overline{q'w'}_{PF}$	$\sigma_w/u_{*PF}$	$\sigma_u/u_{*PF}$	$\sigma_T/T_{*PF}$
<b>(0,15]</b>	92%	36%	93%	58%	67%	81%	38%
<b>(15,30]</b>	4%	20%	3%	12%	32%	14%	25%
<b>(30,50]</b>	2%	14%	1%	8%	1%	3%	21%
<b>(50,75]</b>	1%	10%	1%	4%	0%	1%	12%
<b>(75,100]</b>	0%	6%	0%	4%	0%	0%	1%
<b>(100,250]</b>	1%	8%	1%	6%	0%	0%	1%
<b>&gt;250</b>	1%	6%	1%	8%	0%	0%	1%

Nous pouvons conclure que l'homogénéité dans le temps est excellente pour les covariances  $\overline{u'w'}$  et  $\overline{T'w'}$ , très bonne pour  $\overline{q'w'}$  et bonne pour  $\overline{v'w'}$ . L'application de la rotation selon la méthode de planar fit améliore significativement la qualité des covariances, sauf pour  $\overline{v'w'}$ .

Ces résultats sont meilleurs que ceux de Hammerle et al. (2007) qui ont obtenu, sur un terrain en pente avec une culture de hauteur inférieure à un mètre, 68 % des mesures appartenant à la première classe (15-30) pour le test de stationnarité. Ceci peut s'expliquer par 1/ l'exclusion des données de nuit dans notre cas, 2/ des conditions instrumentales différentes, et 3/ des conditions environnementales différentes (e.g. situations montagneuses et collinaires).

Le test de présence de turbulence homogène dans l'espace (ITC) est basé sur la comparaison des caractéristiques de la turbulence à des fonctions théoriques de stabilité. Il détecte la non homogénéité de la température de surface et des conditions d'humidités, mais ne détecte pas l'hétérogénéité de la rugosité de surface, comme montré par de Bruin et al. (1991) et confirmé par Wishura et Foken (1995). Dans le cas de notre étude, ce test montre que les première et seconde classes sont les plus représentées. La majorité de nos données suivent les modèles théoriques avec des différences de moins de 30%, tandis qu'une amélioration est observée après application de la rotation. Le paramètre  $\sigma_T/T_*$  montre une moins bonne correspondance avec le modèle théorique que les deux autres paramètres  $\sigma_w/u_*$  et  $\sigma_u/u_*$ .

Le test de la turbulence intégrale montre ainsi que nos données sont de bonne qualité, particulièrement après application de la rotation. Ce résultat est similaire à celui obtenu par Turnipseed et al. (2003) qui travaillaient sur un terrain à topographie accentué, et qui ont indiqué que 10% des données obtenues en conditions instables étaient hors de l'intervalle  $ITC < 30\%$ . Quant à l'étude de Hammerle et al. (2007) sur un couvert inférieur à 1 m de hauteur en montagne, 69 % des données appartenaient à l'intervalle  $ITC < 30\%$ . Ces derniers auteurs ont signalé que les mesures rejetées par le test étaient généralement obtenues en conditions stables et neutres, et lorsque le vent provenait d'une forêt proche, induisant un fort changement de rugosité d'un facteur 10.

### 3.2.3.2. Classement et filtrage des données

Pour classer les flux, nous avons suivi la procédure proposée par Mauder et Foken (2004) et Foken et al. (2004). Il s'agit d'appliquer une combinaison des tests ST et ITC en utilisant les paramètres qui sont impliqués pour chacun des flux considérés.

- La qualité de la vitesse de friction  $u_*$  est évaluée selon le test ST de stationnarité des covariances  $(\overline{u'w'})$ ,  $(\overline{v'w'})$  et le test de turbulence ITC sur  $(\sigma_u/u_*)$ .
- La qualité du flux de chaleur sensible H est évaluée selon de stationnarité ST des covariances  $(\overline{T'w'})$  et le test de turbulence ITC sur  $(\sigma_w/u_*, \sigma_T/T_*)$ .
- La qualité du flux de chaleur latente LE est évaluée selon de stationnarité ST des covariances  $(\overline{q'w'})$  et le test de turbulence ITC sur  $\sigma_w/u_*$ .

La première classe correspond aux données pour lesquelles ST et ITC ont des valeurs inférieures à 30%, la seconde classe correspond aux données pour lesquelles ST et ITC ont des valeurs inférieures à 250%, et la troisième classe correspond aux données pour lesquelles ST et ITC sont supérieures à 250%.

**Tableau 2.6. Qualité des donnée pour la vitesse de friction ( $u_*$ ), la chaleur sensible (H) et la chaleur latente (LE) selon que ces flux calculés sans ( $\_AC$ ) et avec la correction de rotation planar fit ( $\_PF$ ). La qualité est exprimée en pourcentage des données appartenant aux classes un, deux et trois. La classe un correspond à ST et ITC < 30%, la classe deux correspond à ST et ITC < 250%, et la classe trois correspond à ITC et ST > 250%.**

classes	$u_{*\_AC}$		$H\_AC$		$LE\_AC$	
	ST( $\overline{u'w'}$ ), ST( $\overline{v'w'}$ ), ITC( $\sigma_u/u_*$ )		ST( $\overline{T'w'}$ ), ITC( $\sigma_w/u_*$ ), ITC( $\sigma_T/T_*$ )		ST( $\overline{q'w'}$ ), ITC( $\sigma_w/u_*$ )	
	Nord - Ouest	Sud	Nord - Ouest	Sud	Nord - Ouest	Sud
1	45%	41%	51%	47%	55%	64%
2	48%	51%	47%	51%	32%	27%
3	7%	8%	3%	2%	13%	9%
	$u_{*\_PF}$		$H\_PF$		$LE\_PF$	
	Nord - Ouest	Sud	Nord - Ouest	Sud	Nord - Ouest	Sud
1	48%	61%	60%	68%	66%	79%
2	43%	32%	37%	29%	22%	16%
3	8%	7%	3%	3%	12%	5%

Suite à l'application de ce filtre, nous pouvons affirmer que la très grande majorité de nos données sont d'excellente (classe 1) ou de bonne (classe 2) qualité. L'application de la rotation par planar fit diminue la proportion de données appartenant à la classe 3 et augmente celle des données appartenant à la classe 1. La qualité des flux de chaleur sensible est légèrement de meilleure qualité que celle de la vitesse de friction et de chaleur latente. .

Le Tableau 2.6 donne les pourcentages des données appartenant à chacune de ces trois classes, et ce en différenciant 1/ les direction de vents de Nord-Ouest et de Sud définies précédemment (§ 3.2.1.2) et 2/ l'application ou non de la correction de rotation planar fit.

Nous constatons tout d'abord que les données appartenant à la troisième classe sont très peu nombreuses : elles ne représentent qu'entre 2 et 13 % du total. Ces données ne seront pas prises en considération dans la suite des travaux. Les données appartenant à la première classe sont considérées comme étant d'excellente qualité et peuvent être utilisés dans des recherches théoriques en lien avec turbulence. Plus de la moitié de nos données appartiennent à cette classe avant application de la rotation et, quasiment les deux tiers après la correction de rotation planar fit. Les données de la seconde classe sont considérées comme valides pour les mesures de flux à long terme. Nous conserverons ces données, puisque nous cherchons à obtenir l'évapotranspiration à l'échelle du bassin versant pour des objectifs hydrologiques, et que ce travail entre dans le cadre d'un observatoire de recherches en environnement.

Ce contrôle de qualité nous permettra par la suite de choisir les données de flux pour les différentes parties de la thèse, en fonction des objectifs spécifiques. Ainsi, pour l'analyse des conditions de stabilité et les calculs de footprint nous utiliserons les flux obtenus après rotation. Les flux obtenus sans application de la rotation seront utilisés pour 1/ comprendre l'effet du relief sur les écoulements, et 2/ approfondir l'intérêt de la correction de rotation planar fit via des analyses croisées sur différentes variables.

#### **3.2.4. Footprint des mesures de flux**

Le « footprint » des mesures de flux turbulents caractérise les zones qui contribuent aux flux mesurés en un point et à une hauteur donnés. Schuepp et al. (1990) le définissent comme étant la zone affectant le plus probablement une mesure de flux. Sa forme et ses dimensions dépendent de la hauteur de mesure, de la vitesse et de la direction du vent, de la vitesse de friction, de la stabilité atmosphérique, mais aussi de la rugosité de la surface et de son hétérogénéité. Dans le contexte de cette thèse, où les parcelles sont de relativement petite taille, les footprints des mesures par covariances turbulentes serviront de critère de qualité de ces mesures, en quantifiant la proportion des flux provenant de la parcelle étudiée.

Différentes approches de modélisation des footprint ont été proposées, comme le reporte l'état de l'art proposé par Schmid (2002). Nous avons retenu l'approche de Horst et Weil (1994) pour plusieurs raisons. Premièrement, elle est relativement facile à mettre en œuvre et sa précision est suffisante pour notre application. Deuxièmement, Meijninger et al. (2002) l'ont

étendue aux mesures scintillométriques, ce qui nous permettra d'utiliser une même approche de modélisation des footprints pour les deux types de mesures des flux.

Basé sur une solution analytique de l'équation de diffusion, le modèle de footprint de Horst et Weil (1994) relie le flux mesuré à une hauteur de mesure  $z_m$ ,  $F(x,y,z_m)$ , à la distribution spatiale des flux de surface à l'intérieur du footprint  $F(x,y,0) \equiv F_0(x,y)$  :

$$F(x, y, z_m) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} F_0(x', y', z'=0) f(x-x', y-y', z_m) dx' dy' \quad (\text{Équation 2.33})$$

Où  $f$  est la fonction de footprint, qui correspond à la pondération du flux en chaque point à l'intérieur du footprint. Ce modèle de footprint suppose que l'écoulement turbulent est horizontal et homogène. Le footprint ne dépend donc que de la distance entre le point de mesure et chaque élément de surface qui contribue au flux mesuré. Cette distance est exprimée par sa composante dans la direction du vent ( $x-x'$ ) et sa composante dans la direction transversale au vent ( $y-y'$ ).

En considérant que l'intégrale  $\bar{f}^y$  de la fonction de footprint  $f$ , dans la direction latérale au vent, est égale au flux intégré dans la direction latérale, en aval d'un point source, Horst et Weil (1994) ont proposé une approximation analytique satisfaisante de la fonction de footprint :

$$\bar{f}^y(x, z_m) \approx \frac{d\bar{z}}{dx} \frac{z_m}{\bar{z}^2} \frac{\bar{u}(z_m)}{U(c\bar{z})} A \exp(-(z_m / b\bar{z})^r) \quad (\text{Équation 2.34})$$

Où  $\bar{z}$  est la hauteur moyenne du panache de diffusion d'une surface source,  $\bar{u}(z)$  est le profil moyen de vitesse du vent et  $r$  est un facteur de forme. Les fonctions empiriques  $A$  et  $b$  sont exprimées à l'aide de la fonction  $\Gamma$  :  $A = r\Gamma(2/r)/r\Gamma^2(1/r)$  et  $b = \Gamma(1/r)/\Gamma(2/r)$ . Le paramètre  $c$  a été évalué numériquement par Horst (1979) comme étant respectivement égal à 0.66, 0.63 et 0.56 pour les conditions stables, neutres et instables. Les valeurs de  $r$  proposées par Horst et Weil (1994) sont respectivement égales à 1, 1.5, 2 pour les conditions atmosphériques instables, neutres et stables. Le code de calcul fut fourni par l'UR EPHYSE (Quesada, 2003).



### 3.3. Détermination des flux turbulents par scintillométrie

#### 3.3.1 Principe de la scintillométrie

La scintillométrie est basée sur l'analyse des fluctuations de l'intensité lumineuse le long du trajet optique entre un émetteur de lumière et un récepteur. Ces fluctuations sont liées aux variations de l'indice de réfraction de l'air, elles-mêmes liées aux fluctuations de température, et d'humidité et à leur covariance (Kohsiek, 1982 ; Hill, 1992). La scintillométrie est ainsi une méthode indirecte de mesure des flux turbulents, mais son grand avantage est de permettre une mesure intégrée sur un trajet optique pouvant être important, hectométrique à kilométrique avec les scintillomètres à large ouverture (LAS).

La grandeur mesurée par un scintillomètre est le paramètre de structure pour l'indice de réfraction  $C_N^2$ , qui décrit l'intensité turbulente de l'indice de réfraction  $n$  sur un intervalle de temps et une distance spatiale donnés. Selon Wang et al. (1978), pour les scintillomètres à large ouverture tels que celui utilisé dans cette étude, la variance du logarithme de l'intensité lumineuse mesurée par le récepteur est égale à l'intégration du paramètre de structure  $\langle C_N^2 \rangle$  le long du trajet optique, selon l'équation :

$$\langle C_N^2 \rangle = \int_0^1 C_N^2(u) W(u) du \quad (\text{Équation 2.35})$$

où  $u$  est la distance à l'émetteur, normalisée par la longueur du trajet optique émetteur-récepteur,  $C_N^2(u)$  est le paramètre de structure à la distance  $u$  et  $W(u)$  est la fonction de pondération instrumentale ayant la forme d'une courbe en cloche dont le maximum est atteint au milieu du trajet optique ( $u=0.5$ , voir Figure 2.8). La forme de cette fonction de pondération fait que le scintillomètre est plus sensible aux turbulences – et donc aux flux – localisées au milieu du trajet optique qu'à celles localisées aux extrémités du trajet optique.

### 3.3.2. Calcul du flux de chaleur sensible à partir des mesures scintillométriques

Selon Kohsiek (1982) et Hill (1992), le paramètre de structure  $C_N^2$  peut s'exprimer comme une combinaison linéaire de trois paramètres de structure :  $C_T^2$ ,  $C_Q^2$  et  $C_{TQ}^2$ , respectivement liés aux fluctuations de température, d'humidité et à la covariance des flux de température et d'humidité. Pour la scintillométrie optique, les flux dus à l'humidité ont moins d'influence que ceux dus à la température, ce qui a permis à Wesely (1976) de relier les paramètres de structure pour l'indice de réfraction  $C_N^2$  et pour la température  $C_T^2$  par l'équation :

$$C_T^2 = C_N^2 \left( \frac{T_a^2}{\gamma P} \right)^2 \left( 1 + \frac{0.03}{\beta} \right)^{-2} \quad (\text{Équation 2.36})$$

où  $T_a$  est la température de l'air (K),  $P$  est la pression atmosphérique (Pa),  $\gamma$  est un coefficient reliant l'indice de réfraction de l'air à la pression atmosphérique, égal à  $7.9 \cdot 10^{-7} \text{ K Pa}^{-1}$ ,  $\beta$  est le rapport de Bowen, égal au rapport du flux de chaleur sensible  $H$  sur le flux de chaleur latente  $LE$ ,  $C_N^2$  est exprimé en  $\text{m}^{-2/3}$  et  $C_T^2$  en  $\text{K}^2 \text{m}^{-2/3}$ . Le terme incluant le rapport de Bowen  $\beta$  est un terme correctif prenant en compte les flux d'humidité, en considérant que ceux-ci sont parfaitement corrélés aux flux de température. Ce terme est négligeable pour les valeurs de  $\beta$  supérieures à 0.6.

D'après Panofsky et Dutton (1984) et Hill (1992), le paramètre de structure  $C_T^2$  peut être relié à l'échelle de température  $T_*$  via la théorie de similitude de Monin-Obukhov :

$$C_T^2 = T_*^2 (z - D)^{-2/3} f(\zeta) \quad (\text{Équation 2.37})$$

où  $z$  est la hauteur de mesure,  $D$  est la hauteur de déplacement,  $\zeta$  est le paramètre de stabilité égal à  $(z-D)/L_{MO}$ , et  $L_{MO}$  est la longueur de Monin-Obukhov.

Plusieurs paramétrages de la fonction de stabilité  $f(\zeta)$  sont proposés dans la littérature. Celui que nous avons adopté est très souvent utilisé. Il fut proposé par Wyngaard (1973) :

- pour les conditions instables ( $\zeta \leq 0$ ) :  $f(\zeta) = 4.9(1 + 7|\zeta|)^{-2/3} \quad (\text{Équation 2.38})$

- pour les conditions stables ( $\zeta > 0$ ) :  $f(\zeta) = 4.9(1 + 2.4|\zeta|)^{2/3}$  (Équation 2.39)

Le flux de chaleur sensible  $H$  est alors calculé comme suit :

$$H = -\rho C_p u_* T_* \quad (\text{Équation 2.40})$$

Les conditions de stabilité ( $\zeta$ ) dépendent du flux de chaleur sensible  $H$ . La détermination de ce dernier passe donc par la résolution numérique d'un système d'équations, qui repose sur une procédure itérative dont 1/ les conditions initiales sont la neutralité ( $\zeta = 0$ ), et 2/ le critère de convergence est la stabilité de la longueur de Monin-Obukhov. La vitesse de friction  $u_*$  est déterminée dans le même processus itératif, à partir de l'Équation 2.21 qui fait intervenir la longueur de rugosité  $z_{0m}$  et la hauteur de déplacement  $D$ . Lagouarde et al. (2000) ont montré que la robustesse de cette méthode dépendait de la précision de l'estimation de ces deux paramètres. Ce point sera discuté dans le chapitre 5.

### 3.3.3. Influence de la topographie

La hauteur entre le trajet optique et la surface du sol intervient à plusieurs niveaux dans la détermination du flux de chaleur sensible à partir de mesure scintillométriques, notamment dans 1/ le calcul de l'échelle de température  $T_*$  à partir du paramètre de structure  $C_T^2$  et 2/ le calcul du paramètre de stabilité  $\zeta$  et du flux de chaleur sensible  $H$ . Lorsque les mesures sont effectuées au dessus d'une surface à topographie variable, une hauteur de mesure équivalente  $z_{eq}$  est habituellement définie. Dans le cas de l'utilisation d'un scintillomètre au dessus d'une vallée, Meijninger et de Bruin (2000) la définissent comme la hauteur moyenne entre le sol et le trajet optique. Nous avons choisi l'approche de Lagouarde et al. (2005) qui intègre la distance entre le sol et le trajet optique, le long de celui-ci.

### 3.3.4. Estimation du footprint des mesures scintillométriques

Le footprint associé à la mesure des flux par scintillométrie correspond à l'intégration des footprints associés à chaque point de mesure le long du trajet optique. Meijninger et al. (2002)

ont ainsi proposé, pour une zone sans relief, une adaptation aux mesures scintillométriques d'un modèle de footprint pour mesures ponctuelles, 1/ en adoptant la méthode de Horst et Weill (1992) pour la détermination de la fonction  $f$  (équation 2.34) et 2/ en l'intégrant, le long du trajet optique, selon la fonction de pondération  $W(u)$  du scintillomètre (Équation 2.35). L'équation 2.34 est ainsi modifiée en :

$$\int_{y=0}^{L_{sci}} \bar{f}^y(x, z_m) W(u) dy \quad (\text{Équation 2.41})$$

où  $z_m$  est la hauteur moyenne de mesure du scintillomètre,  $y$  est la distance le long du trajet optique et  $L_{sci}$  est la longueur de ce dernier.

Pour rester cohérent avec l'approche adoptée pour la prise en compte de la topographie, cette équation a été modifiée en remplaçant la hauteur moyenne de mesure  $z_m$  par la distance  $z_y$  entre le trajet optique et la surface, pour chaque pas d'espace  $y$ . Cette simple modification de l'Équation 2.41 donne :

$$\int_{y=0}^{L_{sci}} \bar{f}^y(x, z_y) W(u) dy \quad (\text{Équation 2.42})$$

Le code de calcul correspondant nous a été fourni par l'UR EPHYSE (Quesada, 2003) et a été optimisé au niveau temps de calcul à l'UMR LISAH.

### 3.4. Détermination de l'énergie disponible

Pour la définition du bilan d'énergie, nous retenons pour convention que les gains (respectivement pertes) diurnes sont le rayonnement net  $R_n$  (respectivement flux de chaleur dans le sol  $G$ , flux de chaleur sensible  $H$  et flux de chaleur latente  $LE$ ). Dans ces conditions, l'énergie disponible est définie comme l'énergie emmagasinée par la surface qui se trouve à disposition pour les flux convectifs. Elle s'exprime donc comme la somme des flux convectifs et donc la soustraction du flux de chaleur dans le sol  $G$  au rayonnement net  $R_n$  :

$$Rn - G = H + LE \quad (\text{Équation 2.43})$$

### 3.4.1. Le rayonnement net

Le rayonnement net  $Rn$  est le bilan radiatif de la surface sur les domaines spectraux des courtes et grandes longueurs d'ondes, classiquement exprimé sous la forme :

$$Rn = (1 - a)Rg + \varepsilon(L \downarrow - \sigma Ts^4) \quad (\text{Équation 2.44})$$

où  $Rg$  est le rayonnement global incident et  $a$  est l'albédo, tous deux sur le domaine spectral solaire (ou courtes longueurs d'onde). Les autres grandeurs sont définies sur le domaine spectral grandes longueur d'ondes (de 3 à 100  $\mu\text{m}$ ) :  $L \downarrow$  est le rayonnement atmosphérique incident,  $\varepsilon$  est l'émissivité de la surface, et  $Ts$  est la température radiative de surface.

#### 3.4.1.1. Mesure du rayonnement net

Lors de nos expérimentations, le rayonnement net était mesuré en simultané avec les mesures des flux convectifs, à l'aide de pyrromètres différentiels. Comme nous le verrons dans le chapitre 5, les valeurs de rayonnement net mesurées ont présenté des variations notables avec la direction du vent selon que ce dernier soit de Nord-Ouest ou de Sud. Aussi, pour comprendre l'origine de ces variations, nous avons utilisé deux méthodes d'estimation du rayonnement net, qui diffèrent par la prise en compte ou non de la température de surface.

#### 3.4.1.2. Estimation du rayonnement net à partir des seules données météorologiques

Le rayonnement net n'étant pas mesuré directement au niveau des stations météorologiques, plusieurs méthodes permettant de l'estimer à partir des données météorologiques ont été proposées dans la littérature. Evett (2002) liste ces méthodes et rappelle que la température de surface n'étant pas mesurée, elle est souvent remplacée par la température de l'air. Pour évaluer l'influence des variables météorologiques sur le rayonnement net, nous avons utilisé

la méthode recommandée par la FAO-56 (Allen et al. 1998). Dans cette approche, le bilan radiatif de grandes longueurs d'ondes  $R_{nl} = \varepsilon(L\downarrow - \sigma T_s^4)$  est estimé par la formulation :

$$R_{nl} = -\sigma T_a^4 \left( 0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left( 1.35 \frac{R_g}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (\text{Équation 2.45})$$

où  $\sigma$  est la constante de Stefan Boltzmann,  $T_a$  est la température de l'air (K),  $e_a$  est la pression de vapeur (kPa),  $R_g$  est le rayonnement global ( $\text{MJ m}^{-2} \text{ jour}^{-1}$ ). Le terme  $(0.34 - 0.14 \sqrt{e_a})$  représente l'effet de l'humidité de l'atmosphère et le terme  $(1.35 R_g / R_{so} - 0.35)$  représente l'effet de la nébulosité. Le rayonnement global par temps clair  $R_{so}$  est évalué selon la formulation :

$$R_{so} = (0.75 + 2.10^{-5} z) R_a \quad (\text{Équation 2.46})$$

où  $z$  est l'altitude par rapport au niveau de la mer (m) et  $R_a$  est le rayonnement solaire extra-terrestre, calculé à partir de la position géographique (latitude, longitude, altitude), de la date et de l'heure.

Le rayonnement global  $R_g$  étant dans notre cas mesuré, le rayonnement net  $R_n$  est finalement évalué par (l'albédo  $a$  est posé à une valeur standard de 0.23) :

$$R_n = (1 - a) R_g - \sigma T_a^4 \left( 0.34 - 0.14 \sqrt{e_a} \right) \left( 1.35 \frac{R_g}{R_{so}} - 0.35 \right) \quad (\text{Équation 2.47})$$

Notons que dans le cadre de la présente étude, cette formulation ne sera pas utilisée pour des estimations précises du rayonnement net, puisque celui-ci était mesuré en simultané avec les flux convectifs, mais pour évaluer de possibles liens entre les variations des conditions météorologiques et les variations de rayonnement net.

### 3.4.1.3. Estimation du rayonnement net à partir des données météorologiques et du flux de chaleur sensible

L'un des inconvénients de la formulation précédente est qu'elle néglige l'effet de la température de surface  $T_s$ . Nous avons donc mise en œuvre une seconde méthode d'estimation du rayonnement net qui inclut cette variable. Dans la mesure où aucune mesure de température ne fut effectuée au cours de l'expérimentation, nous avons eu recours à une estimation déduite de la mesure du flux de chaleur sensible  $H$ , via la formulation de  $H$  comme le ratio d'un gradient de température par une résistance aérodynamique (équation 2.28) :

$$T_s = T_a + \frac{r_a H}{\rho c_p} \quad (\text{Équation 2.48})$$

Estimer la température de surface  $T_s$  revenait donc à estimer la résistance aérodynamique  $r_a$ , qui sera évaluée à partir des longueurs de rugosité pour les échanges de quantité de mouvement ( $z_{0m}$ ) et de chaleur ( $z_{0h}$ ), et de la hauteur de déplacement  $D$  (équation 2.29).

Dans cette seconde méthode d'estimation du rayonnement net, le rayonnement de grandes longueurs d'ondes  $L \downarrow$  est estimé par la formulation classique :

$$L \downarrow = \sigma \varepsilon_a T_a^4 \quad (\text{Équation 2.49})$$

où  $T_a$  est la température de l'air et  $\varepsilon_a$  est l'émissivité de l'air, donnée par :

$$\varepsilon_a = 1.24(e_a / T_a)^{\frac{1}{7}} \quad (\text{Équation 2.50})$$

### 3.4.2. Le flux de chaleur dans le sol G

Les coefficients d'étalonnage des fluxmètres ont été appliqués à chacun d'entre eux et le flux de chaleur dans le sol était calculé, à chaque pas de temps de 30 minutes, comme la moyenne des mesures des trois fluxmètres, après élimination des éventuelles valeurs aberrantes. Il est à noter qu'en l'absence de mesures des profils de température du sol et faute de mesure de la conductivité thermique et de la capacité thermique du sol, nous n'avons pas pu appliquer de

correction des variations de stock thermique entre les fluxmètres et la surface, ce qui a pu conduire à des incertitudes sur les mesures du flux de chaleur dans le sol  $G$ .

### 3.5. Caractérisation de la végétation

#### 3.5.1. Surface foliaire

Du fait de la lourdeur des mesures de surface foliaire (mesures au planimètre sur chaque prélèvement, avec 5 à 10 prélèvements de 25 x 25 cm<sup>2</sup>, par parcelle et par jour de collecte), il s'est avérée nécessaire de mettre au point une méthode d'extrapolation. Pour chaque prélèvement, un sous-échantillon de feuilles (un tiers) a été pesé et la surface foliaire correspondante a été mesurée au planimètre. Cette surface a été extrapolée au prélèvement tout entier, et donc à l'unité de surface de sol, via les relations entre surface et poids des feuilles. La Figure 2.11 montre que pour les monocultures et pour une date donnée, ces relations sont bien linéaires, ce qui autorise l'extrapolation.

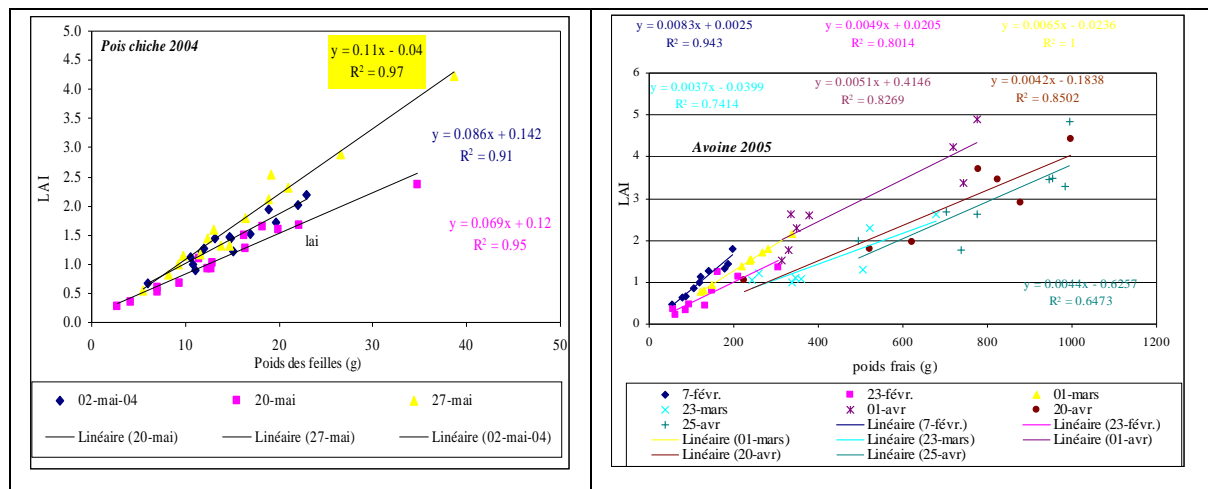


Figure 2.11. Exemples de relations entre poids frais des feuilles et indice foliaire déterminé par planimétrie (a) : Poids chicche en 2004, (b) : Avoine en 2005.

Notons cependant que dans le cas de présence de végétation naturelle, et particulièrement dans le cas des parcours, la forte hétérogénéité de la végétation et son caractère plurispécifique compliquent cette méthodologie et la rendent moins précise.



### 3.5.2. Hauteur du couvert végétal

L'évaluation de la précision des mesures de hauteur de la végétation a été réalisée en calculant l'écart-type et le coefficient de variation des mesures effectuées sur une même parcelle, pour une date donnée. Comme pour la surface foliaire, cette évaluation est plus complexe - et sans doute plus imprécise - lorsque plusieurs espèces sont présentes sur les parcelles de parcours.

### 3.6. Détermination de l'humidité du sol

Les humidités gravimétriques du sol (g/g) ont été calculées par différence en entre pesée humide et pesée sèche des échantillons de sol, rapportée à la pesée sèche. Les humidités volumiques ( $m^3/m^3$ ), nécessaires à l'établissement des bilans hydriques, ont été calculées en multipliant les humidités gravimétriques par les densités apparentes, mesurées sur le bassin versant par Mekki (2003).

## 4. Conclusion

Au-delà du dispositif expérimental et des méthodologies mise en œuvre pour le traitement des données collectées dans le cadre de la présente étude, nous mettons ici l'accent sur l'originalité de la base de données collectée. Cette originalité réside dans la considération 1/ d'un bassin versant soumis à des régimes de vent spécifique, avec des rives situées face aux vents dominants, et 2/ d'un agrosystème orienté polyculture – élevage et donc caractérisé par des hétérogénéités intra – et extra – parcellaire.

Dans un premier temps, la base de données obtenue est représentative de l'hétérogénéité à l'intérieur du bassin versant, en termes de conditions de sol, de couverture végétale et de topographie. Elle permet aussi d'envisager cette hétérogénéité à partir de mesure à différentes échelles, au niveau de la parcelle avec les mesures par covariances turbulente, et au niveau du transect avec les mesures par scintillométrie. Par ailleurs, la collecte de ces mesures en simultanée avec des observations de l'humidité du sol permettront d'aborder la problématique

des échanges surface – atmosphère selon les points de vue aérien (bilan d'énergie de surface) et de subsurface (bilan hydrique de surface).

Dans un second temps, la présente étude fut conduite dans des conditions environnementales spécifiques, en lien avec les conditions de vents. Il est alors intéressant de considérer plusieurs traitements intermédiaires, tels que ceux relatifs aux flux convectifs (absence de correction, corrections instrumentales uniquement, corrections instrumentales et corrections de rotation planar fit) et au rayonnement net (considération de facteurs météorologiques et de température de surface séparément). Ces différents stades de traitements seront utiles pour évaluer la cohérence et la qualité de ces données, qui furent collectées dans des conditions non envisagées jusqu'à présent (i.e. structurations collinaires soumises à un forçage de vent externe). Il est d'ailleurs important de noter à ce sujet que les premiers indicateurs furent très positifs, étant donné que les contrôles qualité ont suggéré la possibilité d'utiliser les deux tiers des données collectés pour des analyses fines, ce qui est un bon résultat en comparaison à ceux présentés dans la littérature.

Ayant maintenant présenté les données brutes et produits intermédiaires considérés dans la présente étude, nous pouvons présenter l'ensemble des investigations conduites à partir de ces données et produits intermédiaires. La Figure 2.12 présente les investigations relatives aux chapitres 3, 4 et 5.

Le chapitre 3 se focalise sur l'analyse des données disponibles, afin de faire émerger des facteurs d'influence d'ordre 1. Sont considérées l'ensemble des informations disponibles en rapport avec la topographie, les conditions de couverture végétale, les conditions de météorologie et de micrométéorologie, ainsi que les conditions hydriques de surface.

Le chapitre 4 s'intéresse à la caractérisation des conditions de relief, via une intercomparaison entre 1/ les inclinaisons topographiques issues du MNT et 2/ les inclinaisons d'écoulement issues des corrections de rotation planar fit (ou corrections rotatives). Un travail préalable consiste à déterminer les footprints des mesures de flux convectifs après correction planar fit ( $H_{PF}$ ,  $LE_{PF}$ ,  $u_{*PF}$ ), afin d'en déduire l'extension spatiale sur laquelle doit être déterminée l'inclinaison topographique.

Le chapitre 5 se propose d'analyser les flux d'énergie aux échelles de la parcelle et du transect. Diverses analyses sont menées :

- intercomparaisons des flux convectifs mesurés par covariances turbulentes à l'échelle de la parcelle (chaleur sensible, chaleur latente et quantité de mouvement) et corrigés selon les différentes procédures envisagées (\_SC pour « sans correction », \_AC pour « avec correction » c'est-à-dire corrections instrumentales, et \_PF pour « planar fit » c'est-à-dire corrections instrumentales et rotatives),
- analyse de la clôture du bilan d'énergie pour les mesures collectées à l'échelle de la parcelle, et ce en considérant les différents niveaux de correction envisagées (voir ci-dessus avec \_SC, \_AC et \_PF),
- intercomparaisons des flux d'énergie à l'échelle de la parcelle (mesurés par covariances turbulentes) et à l'échelle du transect (mesurés par scintillométrie) et ce en considérant les différents niveaux de correction envisagées pour les mesures à l'échelle de la parcelle (voir ci-dessus avec \_SC, \_AC et \_PF).

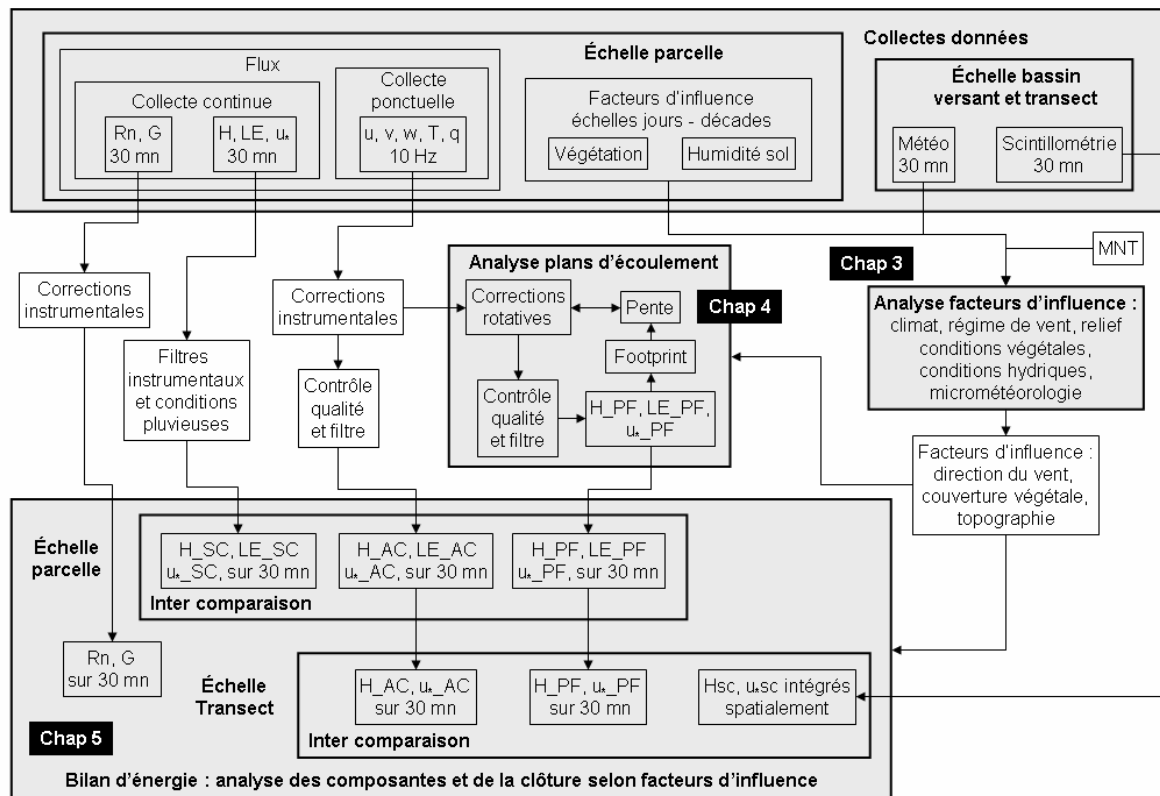


Figure 2.12. Illustration des travaux effectués pour les chapitres 3 à 5, à partir des données et produits intermédiaires considérés.

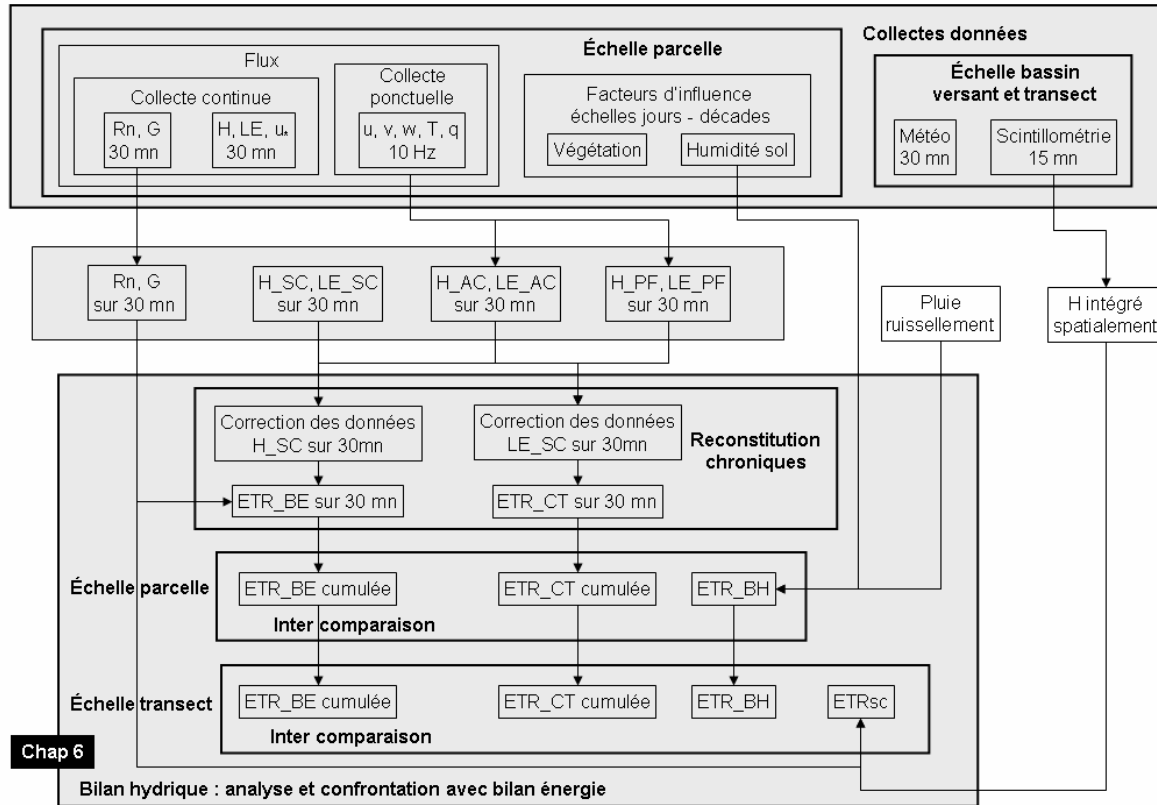


Figure 2.13. Illustration des travaux effectués pour le chapitre 6, à partir des données et produits intermédiaires considérés.

Le chapitre 6 (Figure 2.13), s'intéresse à l'analyse du bilan hydrique via une confrontation avec le bilan d'énergie.

- Une première étape, nécessaire pour appréhender en simultanément les bilans hydrique et énergétique, consiste à reconstruire des chroniques de mesures continues. Pour cela, nous avons corrigé les mesures de flux convectifs stockées en continu sur les centrales d'acquisition (labellisées \_SC, car non traitées pour les perturbations instrumentales et les inclinaisons d'écoulement) à partir des mesures ponctuelles à 10 Hz qui se prêtaient aux corrections instrumentales et rotatives (labellisées \_AC et \_PF).
- Les bilans hydrique et énergétique sont ensuite intercomparés à l'échelle de la parcelle via l'évapotranspiration journalière ETR, où celle-ci est
  - o déterminée via la résolution du bilan hydrique qui consiste en une différentielle du stock hydrique entre deux dates, différentielle à laquelle est ajoutée la pluie et soustrait le ruissellement (ETR\_BH),
  - o déterminée à partir des mesures de covariances turbulentes directement (ETR\_CT),

- déterminée via la résolution du bilan d'énergie (ETR\_BE) qui consiste à soustraire le rayonnement net  $R_n$  et le flux de chaleur  $G$  à la chaleur sensible  $H$  mesurée par covariance turbulente.

Notons que les estimations ETR aériennes (ETR\_CT et ETR\_BE), c'est-à-dire issues des mesures de flux convectifs, sont cumulées sur des périodes de plusieurs jours, dans un souci de normalisation temporelle avec le bilan hydrique (ETR\_BH).

- Les bilans hydrique et énergétique sont finalement comparés à échelle du transect via les estimations par scintillométrie (ETRsc).