

Communauté française de Belgique

FACULTE UNIVERSITAIRE DES SCIENCES
AGRONOMIQUES DE GEMBLoux

**ANALYSE DES FLUX TURBULENTS
DE VAPEUR D'EAU ECHANGES
PAR UN COUVERT FORESTIER MIXTE**

Année académique 2007-2008

Mémoire de fin d'études

Promoteurs :

Dr. Marc Aubinet

Dr. Bernard Heinesch

Présenté par :

Anne De Ligne

En vue de l'obtention du grade de
Bio-ingénieur, en Génie rural

© Toute reproduction du présent document, par quelque procédé que ce soit, ne peut, être réalisée qu'avec l'autorisation de l'auteur et de l'autorité académique de la Faculté Universitaire des Sciences Agronomiques de Gembloux.

Le présent document n'engage que son auteur.

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens particulièrement à remercier,

Marc Aubinet, promoteur de ce travail, pour en avoir assuré l'encadrement, pour l'ensemble de ses conseils, pour le soutien qu'il m'a apporté tout au long de mes recherches et réflexions,

Bernard Heinesch, promoteur de ce travail, pour le temps qu'il a consacré à me conseiller et à m'aider à effectuer les analyses,

Quentin Laffineur, Alain Debacq, Michel Yernaux, et les autres membres du service de Physique pour leur sympathie, leur aide et leurs encouragements,

Yves Brostaux, pour son aide précieuse lors de l'analyse statistique des résultats,

Enfin je désire remercier ma famille, qui m'a aidée à mener à bien mes études.

Résumé

Le présent mémoire s'est attaché à l'étude des flux de vapeur d'eau échangés par un couvert forestier. L'objectif poursuivi a été la détermination d'un facteur de correction multiplicatif des mesures, de manière à représenter aux mieux les flux réels de vapeur d'eau. Récoltés sur le site de Vielsam (Belgique), ces flux ont été mesurés par la méthode d'« *eddy covariance* » (covariance de turbulences).

Les fonctions de transfert utilisées jusqu'alors ont l'inconvénient majeur de sous-estimer le facteur de correction des flux de vapeur d'eau. Celles utilisées jusqu'à présent s'avèrent être conçues initialement pour les flux de dioxyde de carbone. La première recherche investiguée a donc été l'établissement d'une équation de la fonction de transfert propre à la chaleur latente. La dépendance des paramètres de la fonction de transfert a pu être mise en évidence vis-à-vis de l'humidité relative. Par ailleurs, malgré la présence du filtre à son embouchure, l'encrassement minime du tube entraîne des phénomènes d'adsorption-désorption d'autant plus important que l'échantillon d'air est humide.

Les valeurs de facteurs de correction résultant du modèle construit sur base de la nouvelle fonction de transfert possèdent approximativement 10 % de plus que celles des facteurs de correction déterminés par les fonctions de transfert initiales. Ces facteurs de corrections sont dépendants de la teneur en humidité de l'air et de la vitesse du vent.

D'autre part, il semble que l'équation de Kaimal, permettant de construire un co-spectre de référence pour le calcul du facteur de correction, ne soit pas adaptée. Effectivement, en remplaçant le co-spectre modélisé suivant l'équation de Kaimal par les co-spectres expérimentaux, nous remarquons que le facteur de correction est fortement réduit. La modélisation du co-spectre de référence requerrait une étude supplémentaire pour une meilleure approche de la réalité.

Abstract

The present thesis concerns the study of water vapour fluxes exchanged by a forest cover. The pursued objective has been the determination of a correction factor multiplying the measurements, in order to represent for the best the real water vapour fluxes. Harvested on Vielsalm site (Belgium), these fluxes have been measured by the “*eddy covariance*” method.

The transfer functions used up to now have the major disadvantage to under estimate the correction factor of water vapour fluxes. These ones used up to now were initially conceived for the carbon dioxide fluxes. The first inquiring research has therefore been the establishment of an equation of the function transfer specific to the latent heat. The dependence of the parameters of the transfer function has been prominently displayed towards the relative humidity. Moreover, despite the presence of the filter at its mouthpiece, the minimal clogging up of the tube brings phenomenon of sorption-desorption, even more important if the air sampling is humid.

The values of the correction factors resulting from the model built upon the new transfer function possess roughly 10 % more than the correction factors calculated by the initial transfer functions. These correction factors are dependant from the air humidity content and wind speed.

On the other hand, it seems that the Kaimal equation, allowing building a co-spectrum of reference for the calculation of the correction factor, is not adapted. Effectively, by replacing Kaimal equation by experimental co-spectrum, we notice that the correction factor decreases deeply. The modelling of the co-spectrum of reference requires an extra study to approach for the best the reality.

Sommaire

1	Introduction.....	1
1.1	Contexte général	1
1.2	Cadre du projet de recherche	3
2	Théorie	5
2.1	Flux turbulents dans la couche limite atmosphérique.....	5
2.1.1	La turbulence	5
2.1.2	La stabilité.....	7
2.2	La méthode de covariance de turbulences	9
2.3	Analyse spectrale des signaux turbulents	11
2.3.1	Représentation.....	11
2.3.2	Théorie de l'analyse spectrale.....	11
2.3.3	Co-spectres turbulents.....	12
2.3.4	Convolution et fonction de transfert	14
3	Position du problème	16
3.1	Description du système de mesure à chambre fermée.....	16
3.2	Atténuation des fluctuations	17
3.3	Etat de la question.....	20
3.3.1	Fonction de transfert	20
3.3.2	Facteur de correction.....	22
3.3.3	Flux de vapeur d'eau.....	24
3.4	Objectif du travail	25
4	Matériel et méthodes.....	26
4.1	Description du site	26
4.2	Dispositif de mesure	28
4.3	Logiciels.....	32
4.3.1	Test de qualité.....	32
4.3.2	Le temps de décalage	33
4.4	Méthode - Traitement des données	35
4.4.1	Sélection des données	36
4.4.1.1	Présentation des données	36
4.4.1.2	Sélection « PPFD »	36
4.4.1.3	Sélection « Seuil »	39
4.4.2	Normalisation des co-spectres	39
4.4.3	La fonction de transfert théorique (FTth)	40
4.4.3.1	Les fonctions de transfert théorique à plusieurs variables	42
5	Résultats et discussion	43
5.1	Le co-spectre.....	43
5.2	Analyse de la fonction de transfert	45
5.2.1	Facteurs de l'humidité de l'air	45
5.2.2	Fonction de transfert selon le VPD.....	47
5.2.3	Fonctions de transfert à plusieurs variables.....	50
5.2.3.1	Equation à pente réduite (26).....	51

5.2.3.2	Equation à palier (27).....	51
5.2.4	Comparaison des fonctions de transfert ajustées	54
5.2.4.1	Tests statistiques	55
5.2.5	Fonctions de transfert modélisées.....	55
5.2.5.1	Relation linéaire	55
5.2.5.2	Relation non linéaire	56
5.2.5.3	Analyse des fonctions de transfert modélisées	58
5.2.6	Conclusion du choix de la FTth	59
5.3	Evolution temporelle de la fonction de transfert.....	60
5.3.1	L'encrassement des filtres.....	60
5.3.2	L'encrassement du tube	62
5.4	Calcul du facteur de correction (FC)	64
5.4.1	Evolution du facteur en fonction du VPD.....	65
5.4.2	Evolution du facteur de correction en fonction du vent.....	66
5.5	Analyse du facteur de correction	68
5.6	Impact sur le bilan énergétique	71
6	Perspectives	73
	Conclusions.....	74
7	Annexe : Ordinogramme des opérations principales	76

Liste des abréviations

C , le co-spectre,
 C_{ws} , la densité co-spectrale des variables w et s ,
CLA, la couche limite atmosphérique,
CLS, la couche limite de surface,
 c_p , la chaleur spécifique à une pression constante,
 D , le flux par diffusion moléculaire,
 d , la hauteur de déplacement
 e , la pression de vapeur,
 e_s , la pression de vapeur saturante,
 F_h , la densité du flux turbulent,
FC, le facteur de correction,
FT, fonction de transfert,
FTa, fonction de transfert ajustée,
FTe, fonction de transfert expérimentale,
 $FT_{HF}(f)$, fonction de transfert filtre passe-bas (*High frequency*),
 $FT_{LF}(f)$, une fonction de transfert passe-haut (*Low frequency*),
FTm, fonction de transfert modélisée,
FTth, fonction de transfert théorique,
 f , la fréquence,
 f_{co} , la fréquence de coupure (*cut-off frequency*),
 f_{co1} , la fréquence de coupure de la sigmoïde située dans les basses fréquences pour la fonction de transfert modélisée avec un palier,
 f_{co2} , la fréquence de coupure de la sigmoïde située dans les hautes fréquences pour la fonction de transfert modélisée avec un palier,
 f_0 , la fréquence limite,
 f_{min} , la fréquence de coupure pour un VPD tendant vers 0,
 f_{max} , la fréquence de coupure pour un VPD maximum,
 G , le flux de chaleur du substrat du sol,
 G_A , le spectre de variance ou d'énergie,
 G_{AB} , le spectre croisé,
 g , l'accélération de la gravitation,
 H_0 , le flux de chaleur sensible à la hauteur de mesure,
HR, l'humidité relative,
 h , la concentration de la vapeur d'eau dans l'air,
 h_m , la hauteur de mesure,
 k , la constante de von Karman,
 L , la longueur de Obukhov,
 L_{self} , l'inductance du circuit,
 N_T , le facteur de normalisation du co-spectre de la chaleur sensible,
 N_s , le facteur de normalisation du co-spectre de w et de s ,
 P_a est la pression atmosphérique,

PPF_D, la densité de flux de photons photosynthétiques (*Photosynthetic Photon Flux Density*)
 Q , le spectre de quadrature (Chapitre 2),
 Q , la somme de toutes les sources et puits d'énergie (Chapitre 5),
 R , la constante de gaz,
 R_n , la radiation nette,
 S , le taux de production ou d'absorption du scalaire (Chapitre 2),
 S , le stockage de chaleur sensible et latente dans l'air et le stockage de chaleur dans la biomasse (Chapitre 5),
 s , la concentration de scalaire,
 T_0 , la température de l'air à la hauteur de mesure h_m ,
 T_a , la température de l'air,
 $\overline{T_{son}}$, la température sonique,
 TF_A , la transformée de Fourier de la fonction A ,
 TF_A^* , est le complexe conjugué de TF_A ,
 u , la vitesse du vent dans la direction x ,
 u' , la fluctuation de la vitesse du vent dans la direction x ,
 u_* , est la vitesse de friction,
 \overline{u} , la moyenne de la vitesse du vent dans la direction x ,
 VPD, le déficit de pression de vapeur (*Vapour pressure deficit*)
 v , la vitesse du vent dans la direction y ,
 v' , la fluctuation de la vitesse du vent dans la direction y ,
 w , la vitesse du vent dans la direction z ,
 w' , la fluctuation de la vitesse du vent dans la direction z ,
 z , la différence entre la hauteur de mesure h_m et la hauteur de déplacement d ,
 α , la proportion de la distance entre la valeur 1 de la fonction de transfert et le palier de la fonction,
 θ , la température potentielle de l'air,
 θ' , la fluctuation de la température potentielle de l'air,
 ρ , la densité de la masse de l'air,
 ρ_s , la concentration du scalaire s par unité de volume,
 σ_A^2 , la variance de la variable A ,
 τ , le temps de réponse
 ζ , l'indice de stabilité de Monin-Obukhov,

1 Introduction

1.1 Contexte général

Les récents rapports de « l'Intergovernmental Panel on Climate Change » (IPCC) présentés en 2007 (GIEC, 2007) ont confirmé la réalité d'un changement climatique et de son origine anthropique, liés à une augmentation de la concentration de l'atmosphère en gaz à effet de serre. D'ici la fin de ce siècle, une augmentation de la température globale de l'air en surface est prévue, variant de 1,8 à 4°C selon les scénarios envisagés par l'IPCC.

Les écosystèmes jouent un rôle significatif dans ce problème, notamment en échangeant du dioxyde de carbone (CO₂) avec l'atmosphère. C'est pour cette raison notamment que des campagnes de mesure des flux de CO₂ ont été menées avec l'objectif de quantifier ces échanges mais également pour étudier la réponse des écosystèmes au changement climatique.

Pour mesurer les densités de flux de carbone, le procédé le plus utilisé est la covariance de turbulences, '*eddy covariance*' en anglais. Cette méthode de mesure requiert l'installation de tours à flux. Initiés à la fin des années 90, les réseaux de tours à flux (réseaux *Carboeurope*, *Asiaflux*, *Ameriflux*, *Chinaflux*, *Carboafrika*, *Fluxnet*, ...) s'étendent maintenant sur plus de 300 sites à travers le monde, la plupart d'entre eux étant consacrés à l'analyse des flux de CO₂ (Baldocchi, 2003).

Ces dernières années, une attention particulière s'est de plus portée sur les échanges de vapeur d'eau. En effet, le changement climatique perturbe à long terme les cycles météorologiques. Il est prédit que les précipitations annuelles seront plus élevées pour les hautes latitudes et seront réduites aux basses latitudes (GIEC, 2007). Les situations météorologiques extrêmes (précipitations plus intenses, vagues de chaleur, ...) seront de plus en plus probables. Il est aussi à prévoir que les périodes sans précipitations seront de plus en plus longues entraînant des sécheresses plus fréquentes et plus intenses.

Ces perturbations climatiques affecteront les flux de vapeurs d'eau mais également les flux de CO₂. Effectivement, les échanges de CO₂ et de vapeur d'eau se font tous les deux au travers des stomates. La plante régule la conductance des stomates de manière à établir le meilleur compromis entre la perte d'eau et l'assimilation du CO₂, la perte d'eau provenant principalement de la transpiration. En cas de sécheresse, la plante, étant en stress hydrique, ferme ses stomates pour éviter un excès de transpiration, ce qui entraîne également une réduction de l'assimilation de carbone. Les nouvelles conditions climatiques affecteront nécessairement le comportement des écosystèmes terrestres. Ciais et al., 2005, ont notamment montré que la réduction d'assimilation résultant de la vague de chaleur qui a affecté l'Europe en juillet - août 2003 s'était élevée à 0,5 Pg de carbone ce qui représente 30% de l'assimilation annuelle totale du continent.

Il est nécessaire de prévoir comment l'assimilation des écosystèmes peut évoluer en fonction des nouvelles conditions climatiques et, pour cela, il est nécessaire de mieux comprendre les relations hydriques dans les écosystèmes.

1.2 Cadre du projet de recherche

Une collaboration à l'étude complète du comportement des forêts en stress hydrique a été proposée par l'unité de « Forêts » de l'Université Catholique de Louvain. Cette étude s'intéresse au phénomène de réduction d'assimilation du carbone suite aux sécheresses. Ce phénomène sera étudié sur base de l'efficacité d'utilisation de l'eau (WUE, 'Water Use Efficiency' en anglais). L'efficacité de l'utilisation de l'eau est définie, pour une période donnée, comme le rapport du gain net en matière sèche et de la perte d'eau. Nous pouvons aussi le définir comme le rapport du flux de CO₂ et du flux de vapeur d'eau.

Ce projet de recherche vise à quantifier l'effet « espèce » sur la réponse hydrique d'un peuplement mixte de hêtre-douglas-épicéa. Une première partie ciblera la caractérisation du fonctionnement hydrique de chaque espèce, du bilan hydrique du peuplement et des risques de sécheresse édaphique. L'objectif de la deuxième partie sera d'ajuster les mesures de flux de sève (échelle arbres/espèces) avec les mesures de vapeur d'eau (méthode des flux turbulents ; échelle peuplement). La troisième partie visera le calcul de la WUE i) à l'échelle du peuplement et ii) en séparant les espèces (Vincke, comm. pers.). Pour rendre cette étude possible, il est essentiel de disposer de données de flux d'évapotranspiration de bonne qualité et en particulier d'affiner la correction à apporter aux mesures de covariance de turbulences réalisées depuis 1996.

C'est dans ce contexte que se situe notre travail. Notre participation à cette étude consiste à préparer les mesures de flux de vapeur d'eau à l'échelle du peuplement. La technique utilisée pour ces mesures est celle de la covariance de turbulences. Nous montrerons en effet qu'un flux de scalaire peut être estimé en mesurant les fluctuations temporelles des vitesses du vent et des concentrations de ce scalaire dans l'air. Cependant, les fluctuations à hautes fréquences sont atténuées par le dispositif de mesure et une correction doit être appliquée au flux mesuré pour qu'il représente le flux réel. La mise au point de cette correction a été menée en son temps pour le CO₂. Toutefois, il apparaît maintenant que les procédures mises en place pour ce traceur ne sont pas adaptées pour la vapeur d'eau. En effet, comme la vapeur d'eau est un traceur actif, elle ne répond pas de la même manière au phénomène d'atténuation que le CO₂. Notamment, il apparaît que les atténuations des fluctuations du flux de vapeur d'eau à haute fréquence sont corrélées à l'humidité de l'air (Clement, 2004). Une analyse spécifique des corrections à appliquer aux flux de vapeur d'eau s'impose donc.

Pour ce faire, nous devons tout d'abord analyser la réponse à haute fréquence des flux de vapeur d'eau et la relier aux variables météorologiques pertinentes. Ensuite, nous devons calculer un facteur de correction en fonction des facteurs atmosphériques influents, de façon à pouvoir estimer le flux de vapeur d'eau réel.

Le travail commencera par une présentation de la théorie au chapitre suivant. Nous introduirons la théorie de la turbulence ainsi que des notions d'analyse spectrale. Nous décrirons la méthode de la covariance de turbulences. Le troisième chapitre expliquera la

problématique rencontrée. Le quatrième chapitre sera axé sur la description du site et du dispositif de mesure ainsi que sur la méthode du traitement de données. Ensuite, nous présenterons et discuterons nos résultats pour terminer par une conclusion et une mise en perspective des résultats obtenus.

2 Théorie

2.1 Flux turbulents dans la couche limite atmosphérique

La surface de la terre représente la limite inférieure de l'atmosphère et entraîne des modifications sur celle-ci. Les premiers 100 à 3000 mètres de l'atmosphère constituent ce qu'on appelle la couche limite atmosphérique (CLA). Les modifications de l'atmosphère sont dues aux effets de la rotation de la terre, au relief et à l'hétérogénéité du terrain et aux processus de transport tels que la résistance au frottement, l'évaporation, la transpiration, le transfert de chaleur ou l'émission de polluants (Stull, 1988).

Un mécanisme thermique, dû aux différences de température, engendre les mouvements verticaux de l'air à l'échelle de la CLA. Une différence de température s'obtient lors d'une journée dégagée car la surface s'échauffe sous l'action du rayonnement solaire. La masse d'air en contact avec le sol s'échauffe et s'élève en raison de la poussée d'Archimède qui est plus importante pour l'air chaud ; la flottabilité du fluide étant plus importante.

Par contre, les mouvements horizontaux de l'air à l'échelle de la CLA sont déterminés principalement par les forces de frottement, les gradients de pression horizontaux et par l'effet de la rotation de la terre. Toutefois, lorsque nous nous situons à la surface de la terre, le gradient horizontal de pression et l'effet de la rotation de la terre deviennent négligeables par rapport aux forces de frottement. La couche caractérisée par ces conditions est appelée la couche limite de surface (CLS). La hauteur de cette couche varie en fonction de la vitesse du vent et la période de la journée. Elle correspond approximativement à 100 mètres pour un vent fort et durant la journée.

Une caractéristique de la CLA est que la turbulence y est le processus de transport le plus important. La turbulence est la réponse aux effets induits par la surface avec une échelle de temps d'une heure ou moins (Stull, 1988).

2.1.1 La turbulence

La turbulence peut être définie comme « l'agitation désordonnée d'un fluide en écoulement turbulent », (Larousse, 1996). La taille des tourbillons, leur localisation et leur orientation varient constamment. Les écoulements turbulents se caractérisent donc par une apparence très désordonnée, un comportement difficilement prévisible et l'existence de nombreuses échelles spatiales et temporelles. Nous pouvons considérer la turbulence comme étant une superposition de tourbillons de tailles différentes. La diffusion résultant de la turbulence est responsable de l'évaporation dans l'atmosphère ainsi que de la dispersion de polluants relâchés dans la CLS.

Deux processus peuvent créer de la turbulence : le cisaillement du vent et la flottabilité. Par contre, seul la viscosité cause sa dissipation. Le cisaillement est dû à la différence existant entre les vitesses du vent, qui est nulle à la surface, et, qui est égale au vent géostrophique au sommet de la CLA. La flottabilité résulte de l'action de la poussée d'Archimède sur l'air des basses couches de la CLA qui est échauffé par le rayonnement solaire. Par ailleurs, l'énergie cinétique du mouvement turbulent se dissipe continuellement par la viscosité, si bien que la turbulence ne peut être maintenue que si le fluide est continuellement approvisionné en énergie turbulente (Arya, 1988).

La dissipation de la turbulence se réalise selon un processus nommé « cascade de Kolmogorov » (Arya, 1988 ; Kaimal et Finnigan, 1994) : par collision, les gros tourbillons se divisent en tourbillons de tailles plus petites. Ce phénomène se répète identiquement pour toutes les tailles de tourbillons jusqu'à ce que les tourbillons deviennent suffisamment petits pour que la viscosité puisse convertir directement leur énergie cinétique en chaleur. L'énergie des gros tourbillons est ainsi transférée à des tourbillons de plus en plus petits jusqu'à sa dissipation finale. L'existence de cette cascade a des conséquences importantes sur la répartition en fréquences des signaux turbulents. Ceci sera développé à la section 2.3.

Une grande partie des turbulences de la CLA sont induites par les effets du sol, tel que la radiation du sol, le profil, l'hétérogénéité du terrain. La rugosité et l'hétérogénéité de la surface créent une contrainte tangentielle qui contribue également à la turbulence. Les obstacles comme les arbres et les bâtiments font dévier l'écoulement, entraînant des vagues de turbulence. De même un changement de type de terrain entraîne également une turbulence. Par exemple, un écoulement d'air quittant une pelouse pour arriver au dessus d'un lac en fin de journée subira la différence de radiation du terrain. Ces différents effets créant la turbulence sont quantifiés par la vitesse de friction u_* , [$m\ s^{-1}$]. Cette vitesse de friction représente la vitesse tangentielle d'un tourbillon circulaire.

$$u_* = \sqrt{|u'w'|} \quad (1)$$

où u' est la fluctuation par rapport à la moyenne de la vitesse du vent horizontal,

w' est la fluctuation par rapport à la moyenne de la vitesse du vent vertical.

Les fluctuations sont calculées en effectuant la décomposition de Reynolds, ($u = \bar{u} + u'$). Le premier terme de cette décomposition est la moyenne temporelle de la variable représentée par une barre horizontale. Le deuxième terme est la fluctuation représentée par l'exposant prime, qui est la différence entre la mesure instantanée et cette moyenne.

Une faible valeur de u_* signifie une turbulence peu développée et une grande valeur de u_* signifie une turbulence bien développée.

2.1.2 La stabilité

La température potentielle, θ , est celle qu'un gaz aurait si nous le comprimons de façon adiabatique du niveau de pression où la température est mesurée vers une pression de 1000 hPa.

Selon la forme du profil vertical de la température potentielle dans la CLS, nous pouvons définir trois classes de stabilité : la condition stable est caractérisée par un profil de la température croissant avec l'altitude, la condition neutre par un profil constant et la condition instable par un profil décroissant. Les conditions instables sont observées pendant la journée et sont d'autant plus instables que les journées sont ensoleillées. Ce sont ces conditions que nous rechercherons pour nos analyses de flux de vapeur d'eau car elles correspondent aux périodes où le flux turbulent est le plus important.

Les micrométéorologistes ont cherché à quantifier la stabilité de la CLS. Plusieurs approches, dont la théorie de la similarité de Monin et Obukhov, ont été développées, toutes basées sur le théorème Pi de Buckingham. Celui-ci énonce que si un problème est déterminé par N_v variables indépendantes et que ces variables sont exprimées en N_d dimensions physiques indépendantes, il est alors possible de déterminer le problème à partir de $(N_v - N_d)$ groupes Pi adimensionnels (Aubinet, 1999).

Les hypothèses simplificatrices pour utiliser la théorie de la similarité de Monin et Obukhov sont premièrement un flux homogène horizontalement et quasi stationnaire, et deuxièmement des flux turbulents de quantité de mouvement et de chaleur indépendants de la hauteur. Pour pouvoir appliquer cette théorie, nous devons donc être dans la CLS car dans le reste de l'atmosphère, les processus dépendent d'autres variables. Cette couche limite de surface doit également être horizontalement homogène.

Dans ces conditions, les caractéristiques de la couche limite ne dépendent que de quatre variables indépendantes : la vitesse de friction (u_*), le flux de chaleur sensible cinématique, $(H_0/\rho c_p)$, la variable de flottabilité (g/T_0) et la différence (z) entre la hauteur de mesure (h_m) et la hauteur de déplacement (d). Plus tard, pour ne pas alourdir le texte, nous nommerons z , « la hauteur de mesure ». L'influence de la rugosité de la surface, de la hauteur de la couche limite, et des vents géostrophiques sont pris en compte par la variable u_* .

Dans ces conditions, si nous voulons étudier l'évolution dans la CLS d'une cinquième variable, il est possible, par le théorème Pi de Buckingham, de constituer $(N_v - N_d)$ groupes Pi adimensionnels entre lesquels nous pouvons établir une relation universelle.

Un des groupes Pi choisi traditionnellement par la théorie de similarité de Monin-Obukhov est l'indice de stabilité de Monin-Obukhov, ζ [-], (Arya, 1988) :

$$\zeta = \frac{z}{L} \quad (2)$$

Où L [m], la longueur de Obukhov, est définie selon :

$$L = \frac{-u_*^3}{k \cdot \frac{g}{T_0} \cdot \frac{H_0}{\rho c_p}} \quad (3)$$

où u_* est la vitesse de friction, [m s^{-1}],

k est la constante de von Karman, [-],

g est l'accélération de la gravitation, [m s^{-2}],

T_0 est la température de l'air à la hauteur de mesure, [K],

H_0 est le flux de chaleur sensible à la hauteur de mesure, [W m^{-2}],

ρ est la densité de la masse de l'air, [kg m^{-3}],

c_p est la chaleur spécifique à une pression constante, [$\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$].

L'indice de stabilité de Monin-Obukhov, ζ , nous permet de quantifier l'importance relative de la turbulence d'origine dynamique et convective, c'est-à-dire respectivement par le cisaillement du vent et la flottabilité. Il est utilisé couramment comme indice pour caractériser la stabilité de l'atmosphère.

Si ce paramètre est négatif, l'atmosphère est instable ; la poussée d'Archimède prime et il existe un flux avec une turbulence importante (grands tourbillons). Si l'indice d'instabilité vaut zéro, nous sommes en situation neutre et lorsqu'il est positif, nous avons un état stable où le cisaillement du vent est favorisé (petits tourbillons). Plus ce paramètre a une valeur élevée (en valeur absolue), plus le caractère (in)stable de la CLS est affirmé.

2.2 La méthode de covariance de turbulences

Pour mesurer les densités de flux de traceurs échangés entre les écosystèmes et l'atmosphère, le procédé le plus direct et le plus utilisé est la covariance de turbulences. Cette méthode demande la mesure instantanée de la composante verticale de la vitesse du vent et de la concentration du scalaire étudié. En effet, nous allons montrer que la densité de flux turbulent peut être estimée comme la covariance de ces deux variables.

La théorie de la méthode de covariance de turbulences est basée sur l'équation de conservation de la masse (Aubinet et al., 2000 ; Massman et Lee, 2002 ; Baldocchi, 2003). Celle-ci s'écrit, dans un espace tridimensionnel :

$$\frac{\partial \rho_s}{\partial t} + u \frac{\partial \rho_s}{\partial x} + v \frac{\partial \rho_s}{\partial y} + w \frac{\partial \rho_s}{\partial z} = S + D \quad (4)$$

où :

- z représente la direction normale à la surface de l'écosystème
- ρ_s est la concentration du scalaire s par unité de volume,
- u , v et w sont les trois composantes de la vitesse du vent [m s^{-1}] dans l'espace x , y , z .
- D est le flux par diffusion moléculaire, [$\text{mmol m}^{-3} \text{s}^{-1}$].
- S est le taux de production ou d'absorption du scalaire, la dimension pour le taux de production de la vapeur d'eau étant [$\text{mmol m}^{-3} \text{s}^{-1}$].

En appliquant à (4) la décomposition de Reynolds ($u = \bar{u} + u'$) sur u , v , w et ρ et en moyennant temporellement tous les termes obtenus, nous obtenons (Aubinet et al., 2000):

$$\frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{\rho}_s}{\partial z} + \frac{\overline{u' \cdot \rho'_s}}{\partial x} + \frac{\overline{v' \cdot \rho'_s}}{\partial y} + \frac{\overline{w' \cdot \rho'_s}}{\partial z} = \bar{S} + \bar{D} \quad (5)$$

L'introduction de plusieurs hypothèses supplémentaires va permettre de simplifier l'équation :

- Nous orientons le système de référence de façon à ce que $\bar{v} = 0$.
- Nous négligeons la diffusion moléculaire par rapport aux autres processus.
- Nous considérons que la situation est stationnaire.
- Nous supposons qu'il existe une homogénéité horizontale.

Dans ces conditions, après intégration selon la verticale, nous pouvons écrire :

$$\int_0^{h_m} S dz = \overline{w' \rho'_s} \quad (6)$$

Cette démarche suggère que le flux émis ou absorbé par l'écosystème est égal à la covariance de la composante verticale de la vitesse du vent et de la concentration du scalaire étudié à la hauteur h_m . Cette covariance est mesurée par le dispositif de covariance de turbulences. Dans le cas de vapeur d'eau, la densité du flux turbulent, F_h [mmol m⁻² s⁻¹], est directement déduite de la covariance selon :

$$F_h = \frac{P_a}{R \cdot T_{son}} \cdot \overline{w' \cdot h'} \quad (7)$$

où P_a est la pression atmosphérique [kg m⁻¹ s⁻²],

R est la constante de gaz qui vaut 8,314 J K⁻¹ mol⁻¹,

h est la concentration de la vapeur d'eau dans l'air [mmol mol⁻¹],

T_{son} est la température sonique [K], calculée à partir de la vitesse de déplacement du son dans l'air.

2.3 Analyse spectrale des signaux turbulents

2.3.1 Représentation

Nous cherchons à comprendre l'impact instrumental sur les tourbillons de différentes tailles du flux turbulent. Pour analyser l'effet instrumental, nous devons isoler ces tourbillons selon leurs différentes échelles de temps. La représentation spectrale nous permet d'effectuer cette analyse. Elle associe à chaque échelle de temps la quantité d'énergie cinétique respective. La représentation dans un domaine fréquentiel permet de mieux faire apparaître la structure de la turbulence atmosphérique (Kaimal et Finnigan, 1994).

2.3.2 Théorie de l'analyse spectrale

L'analyse spectrale est un outil mathématique qui permet d'étudier l'évolution du processus en fonction de la fréquence à laquelle ils se reproduisent. Celle-ci est basée sur les transformées de Fourier.

La transformée de Fourier est un opérateur mathématique qui permet d'exprimer dans un domaine fréquentiel un signal défini dans un domaine temporel. L'information relative du signal est contenue aussi bien dans une fonction A que dans sa transformée de Fourier TF_A . Cette information est simplement décrite dans un espace différent. De manière générale, la transformée de Fourier TF_A d'une fonction A s'écrit :

$$TF_A(f) = \int_{-\infty}^{\infty} A(t) e^{-i2\pi ft} dt \quad (8)$$

où f est la fréquence,

Le carré de la transformée de Fourier permet d'obtenir le spectre de variance ou d'énergie :

$$G_A = |TF_A|^2 = TF_A^* \cdot TF_A \quad (9)$$

où TF_A^* est le complexe conjugué de TF_A .

Le spectre d'énergie décrit la répartition de la variance en fonction de la fréquence. L'intégrale du spectre d'énergie sur toutes les fréquences est égale à la variance de la variable.

$$\sigma_A^2 = \int_0^{\infty} G_A(f) df \quad (10)$$

Nous pouvons également construire le spectre de la covariance de deux signaux. Celui-ci se nomme le spectre croisé ('Cross spectrum' en anglais) et est défini comme le résultat du produit de deux transformées de Fourier. L'une des transformées de Fourier est la conjuguée d'une des deux variables.

$$G_{AB} = TF_A^* \cdot TF_B \quad (11)$$

Le spectre croisé décrit la répartition de la covariance des deux variables en fonction de la fréquence. La partie réelle du spectre croisé s'appelle le co-spectre (C). La partie imaginaire est le spectre de quadrature (Q).

$$G_{AB} = C_{AB} - iQ_{AB} \quad (12)$$

L'intégrale du co-spectre sur toutes les fréquences est égale à la covariance des deux signaux (donc, à un facteur de proportionnalité près, la densité de flux turbulent) :

$$\text{cov}(A, B) = \int_0^{\infty} C_{AB}(f) df \quad (13)$$

L'analyse spectrale des flux turbulents s'effectuera en calculant leurs co-spectres.

2.3.3 Co-spectres turbulents

La répartition en fréquence du flux d'un scalaire peut donc être décrite par la densité co-spectrale, C_{ws} , où w désigne la composante verticale de la vitesse du vent et s désigne la concentration de scalaire. La covariance est donc donnée par (Stull, 1988 ; Kaimal et Finnigan, 1994) :

$$\overline{w' s'} = \int_0^{\infty} C_{ws}(f) df \quad (14)$$

Par ailleurs, le fait que la turbulence atmosphérique soit structurée implique que les co-spectres des signaux atmosphériques ont, dans la CLS, un caractère prédictible. Effectivement, le processus de cascade de Kolmogorov détermine la forme des spectres et co-spectres à haute fréquence. Une série d'études semi-empiriques développées dans les années 70 sur base d'expériences menées dans l'état du Kansas (USA) ont permis de décrire la forme idéale que devaient avoir les spectres et co-spectres dans la CLS. Sur base des mesures, Kaimal et al., 1972, ont proposé des modèles de densités co-spectrales qui sont différents selon les conditions de stabilité. Les densités co-spectrales associées aux flux de chaleur sensible ($w\theta$) sont représentées, pour différentes conditions de stabilité, à la Figure 1.

Si nous émettons l'hypothèse de similarité spectrale (c'est-à-dire que la répartition spectrale du signal est identique pour tous les gaz), ces co-spectres théoriques peuvent également être d'application pour la vapeur d'eau.

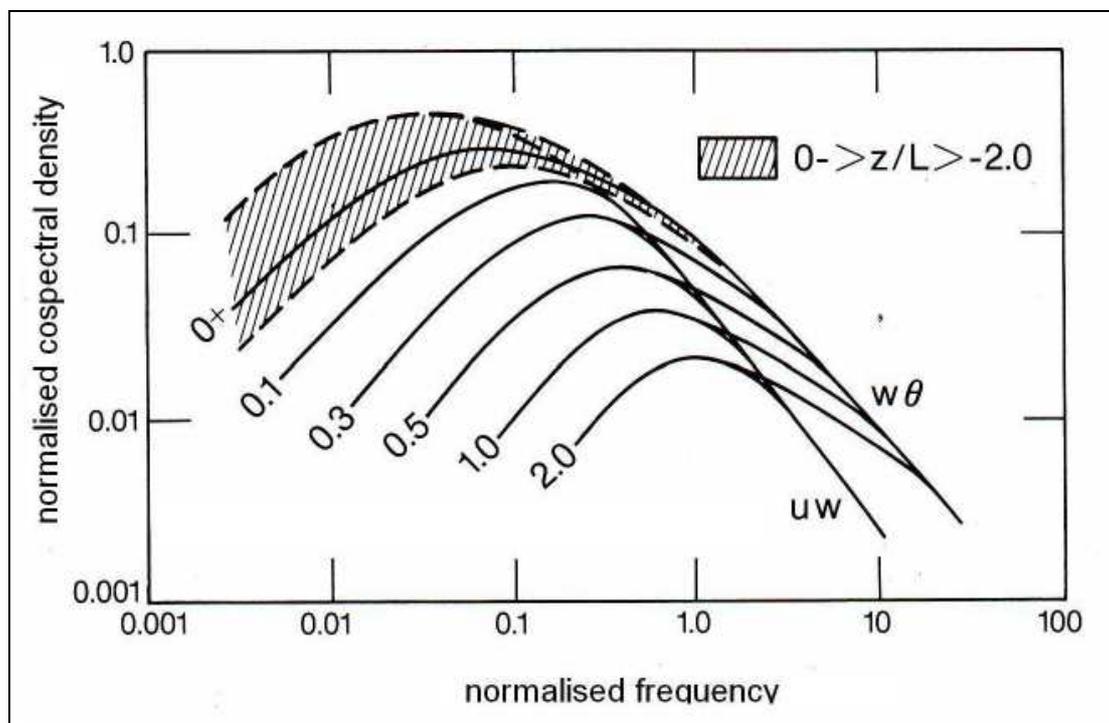


Figure 1 : Densité co-spectrale théorique, Kaimal et Finnigan (1994)

L'équation de Kaimal nous permet de construire un co-spectre normalisé en fonction d'une fréquence normalisée.

L'équation proposée par Kaimal et Finnigan, 1994, pour décrire la densité co-spectrale est donnée par :

$$\frac{f C_{ws}(f)}{(\overline{w'\theta'})_0} = \begin{cases} 11 \cdot n / (1 + 13,3 \cdot n)^{7/4} & n \leq 1,0 \\ 4 \cdot n / (1 + 3,8 \cdot n)^{7/3} & n \geq 1,0 \end{cases} \quad (15)$$

avec $n = fz / \bar{u}$

θ' est la fluctuation de la température potentielle de l'air [K]

Le co-spectre est normalisé de manière à ce que son intégrale de 0 à l'infini soit égale à un.

Pour ce faire, nous divisons le co-spectre par la covariance, $(\overline{w'\theta'})_0$, l'indice 0 représente l'état de référence qui est la hauteur de mesure.

La normalisation de la densité co-spectrale permet de comparer les co-spectres de différents scalaires, tandis que la normalisation des fréquences permet la comparaison de co-spectres de différents sites (z différents) et de périodes différentes (\bar{u} différents). Dans notre étude, nous ne normaliserons que la densité co-spectrale de nos co-spectres. Les fréquences n'ont pas

besoin d'être normalisées étant donné que nous comparons des co-spectres calculés sur le même site et pour des périodes semblables.

Plus tard, nous nous référerons à ce co-spectre comme au co-spectre théorique ou au co-spectre de Kaimal.

Il est à noter que le co-spectre théorique en conditions instables n'est pas clairement défini dans les basses fréquences. En effet, dans ce domaine les flux peuvent aussi résulter de processus qui ne font plus seulement intervenir la turbulence mais également des phénomènes de méso-échelle. Le domaine du méso-échelle se définit sur une bande spectrale de $3 \cdot 10^{-3}$ à $3 \cdot 10^{-5}$ Hz d'ordre de grandeur, soit de 6 minutes à 10 heures. Dans cette bande spectrale interviennent l'hétérogénéité du terrain, sa topographie voire des fluctuations des conditions météorologiques (passages nuageux, variations de la vitesse du vent, par exemple). La zone grisée de la Figure 1 décrit la zone d'incertitude due à ces processus.

2.3.4 Convolution et fonction de transfert

Lors de sa transmission ou de son enregistrement par un appareil de mesure, un signal est nécessairement altéré. Outre les effets de limitation de la durée de mesure de l'échantillonnage, le signal est aussi inévitablement brouillé par le dispositif de mesure, (Aubinet, 1984). Ce dernier effet est décrit par la convolution du signal par une fonction d'appareil :

$$y(t) = x(t) * h(t) \tag{16}$$

- où
- $x(t)$ la fonction du signal
 - $h(t)$ est la fonction d'appareil
 - $*$ représente l'opération de convolution, définie comme :

$$y(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\nu) \cdot h(t - \nu) d\nu \tag{17}$$

Ce produit intervient fréquemment lorsqu'on veut transformer une fonction x (par exemple, un signal arrivant sur un appareil de mesure) en la lissant par la fonction h (par exemple celle de l'appareil). Le produit de convolution revient alors pour chaque point t à calculer la valeur de la fonction du signal $x(\nu)$ multipliée par la fonction $h(t - \nu)$, et à intégrer sur ν ce produit. Cette intégrale représente le point de convolution correspondant à t . La convolution d'un signal interprète donc les contributions au signal de cette fonction d'appareil h .

Max et Lacoume, 1996, démontrent que la transformée de Fourier d'un produit de convolution de deux fonctions est égale au produit simple des transformées de Fourier de chaque fonction.

$$TF(x(t) * h(t)) = TF(x(t)) \cdot TF(h(t)) \quad (18)$$

En conséquence, le co-spectre d'un signal mesuré par le dispositif peut être considéré comme égal au produit du co-spectre du signal réel et de la transformée de Fourier de la fonction d'appareil. Cette dernière transformée sera décrite comme la **fonction de transfert** du système de mesure. Ce résultat va nous permettre d'analyser l'impact d'un système de covariance de turbulences sur les co-spectres des signaux atmosphériques : en effet, une comparaison entre le co-spectre du signal mesuré et un co-spectre idéal (soit le co-spectre de Kaimal, soit un co-spectre non affecté par la fonction d'appareil) permettra de calculer la fonction de transfert caractérisant le dispositif de mesure. Cette approche sera développée par la suite pour analyser l'impact du système sur les mesures.

La fonction de transfert modélise un filtre passe-bas (FT_{HF}). Cette fonction égale à 1 pour les basses fréquences (pas d'atténuation) et décroît suivant une sigmoïde jusqu'à atteindre 0 pour les hautes fréquences (le système élimine complètement le signal). La fonction de transfert est caractérisée par sa fréquence de coupure 'cut-off' en anglais, (f_{co}). Cette fréquence de coupure est la fréquence pour laquelle la fonction de transfert est égale à $2^{-1/2}$, Aubinet et al., 2001.

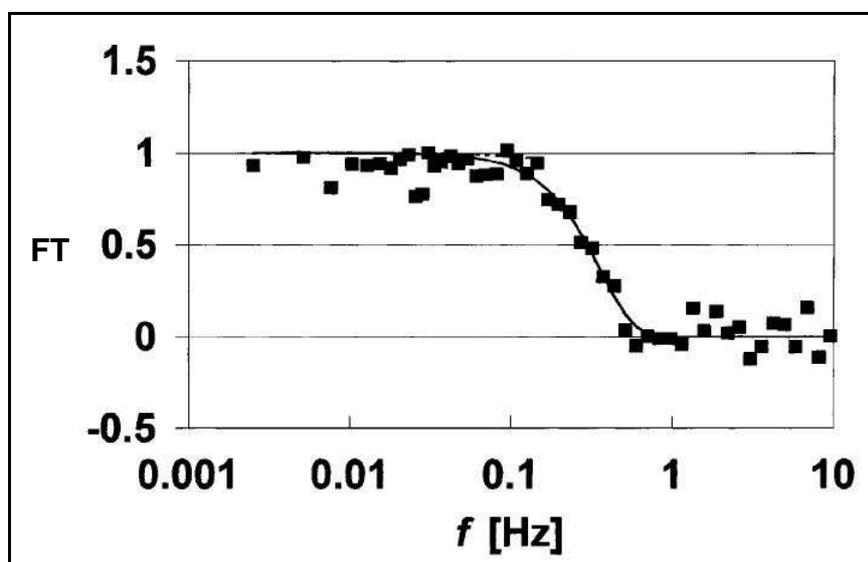


Figure 2 : Fonctions de transfert du système de covariance de turbulences pour le flux de CO2 (FT). Carrés : Fonction de transfert expérimentale. En trait plein : Fonction de transfert ajustée sur la fonction de transfert expérimentale (carrés)

Nous montrerons plus loin (voir section 3.3.2) comment, à partir de la connaissance de la fréquence de coupure, un facteur de correction sur les flux peut être calculé pour prendre en compte l'impact instrumental de la mesure.

3 Position du problème

3.1 Description du système de mesure à chambre fermée

Le système de covariance de turbulence est composé d'un anémomètre sonique tridimensionnel (numéro 1 sur la Figure 3) et d'un analyseur de gaz à infrarouge (numéro 2). Afin d'estimer le flux de vapeur d'eau à l'interface entre l'écosystème et l'atmosphère, ces appareils doivent mesurer respectivement la composante verticale de la vitesse du vent et la concentration de la vapeur d'eau à cet interface. L'anémomètre et la prise d'air pour l'analyseur sont donc placés au sommet d'une tour de 40 mètres surplombant la forêt.

L'analyseur de gaz est placé sur un étage inférieur et réceptionne l'air pompé à hauteur de l'anémomètre par l'intermédiaire d'un tube d'échantillonnage (3). De cette façon, les deux capteurs tendent à analyser le même échantillon d'air. Pour éviter l'encrassement de l'analyseur de gaz à infrarouge, deux filtres sont placés, l'un à l'entrée du tube d'échantillonnage (4a), l'autre à l'entrée de l'analyseur de gaz (4b).

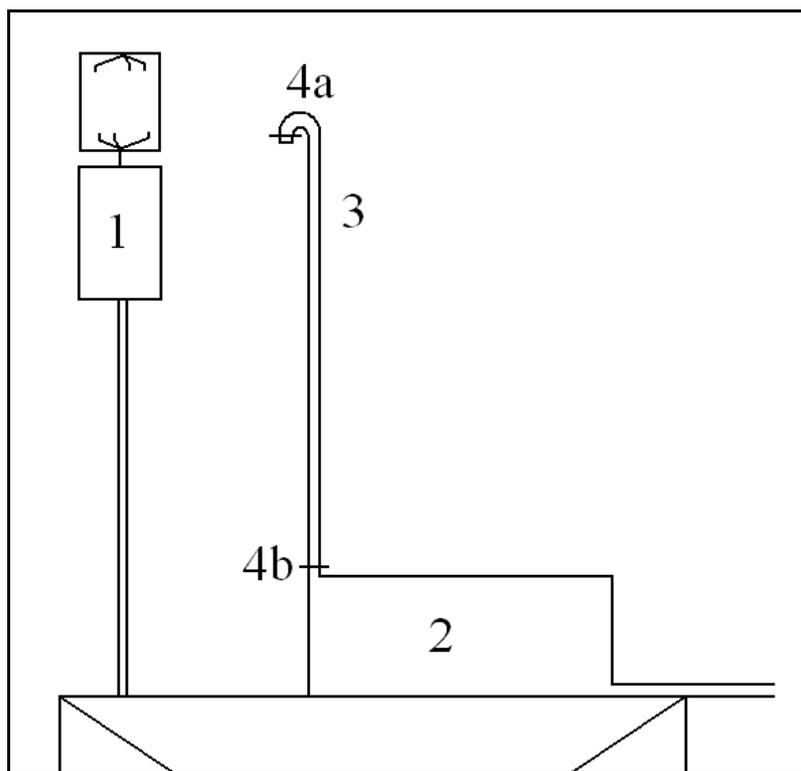


Figure 3 : Schéma du dispositif des appareils de mesures, 1) l'anémomètre sonique tridimensionnel, 2) l'analyseur de gaz à infrarouge, 3) le tube d'échantillonnage, 4) les deux filtres

3.2 Atténuation des fluctuations

Dans les mesures effectuées par le système de covariance de turbulences, nous observons un amortissement du contenu spectral du signal. Ce différent filtrage engendre une perte d'information qui se traduit par une sous-estimation du flux turbulent. Le filtrage des hautes fréquences provient d'une incapacité du système à traiter les fluctuations des tourbillons de petites tailles.

Différentes raisons en sont à l'origine :

- Le temps de réponse fini des deux appareils, l'anémomètre sonique et l'analyseur de gaz à infrarouge, (Moore, 1986).
- La fréquence d'échantillonnage limitée des appareils et leur différence : l'anémomètre enregistre les mesures avec une fréquence de 20,8 Hz et l'analyseur de gaz avec une fréquence de 10 Hz, (Moore, 1986).
- La taille de la zone de mesure : la longueur du chemin optique dans l'analyseur infrarouge et la longueur du chemin acoustique dans l'anémomètre limitent la mesure à certaines fréquences, les appareils ne pouvant pas tenir compte des tourbillons plus petits que cette distance, (Moore, 1986).
- La différence d'emplacement entre l'anémomètre sonique et l'extrémité du tube d'entrée : l'air devrait idéalement être prélevé dans le volume de mesure de l'anémomètre mais ceci entraînerait une perturbation dans les mesures de vent suite à un appel d'air. Pour cette raison, le prélèvement est effectué à côté de l'anémomètre, (Moore, 1986).
- L'atténuation des fluctuations de concentrations de vapeur d'eau suite aux frottements du fluide aux contacts de la paroi interne du tube d'échantillonnage et aux frottements des différentes couches du fluide entre elles, dû à sa viscosité (Leuning et Moncrieff, 1990 ; Leuning et King, 1992 ; Leuning et Judd, 1996).

Vu les progrès techniques, les trois premières causes de filtrage sont devenues négligeables, les deux dernières (les frottements d'air dans le tube et la séparation des appareils) restant celles qui ont l'impact le plus important (Aubinet et al., 2000).

Notons que ces deux derniers effets affectent uniquement la mesure de la concentration du scalaire effectué par l'analyseur mais pas la mesure de la vitesse du vent. En conséquence, les co-spectres associés aux flux de CO₂ et de vapeur d'eau seront plus affectés que les co-spectres associés au flux de chaleur sensible. Ces effets sont couramment observés dans les mesures de tours à flux.

La Figure 4 illustre l'évolution des densités co-spectrales, en fonction de la fréquence, calculées par Aubinet et al., 2001, pour la chaleur sensible, le CO₂ et la chaleur latente sur le site forestier de Vielsalm, objet de notre étude.

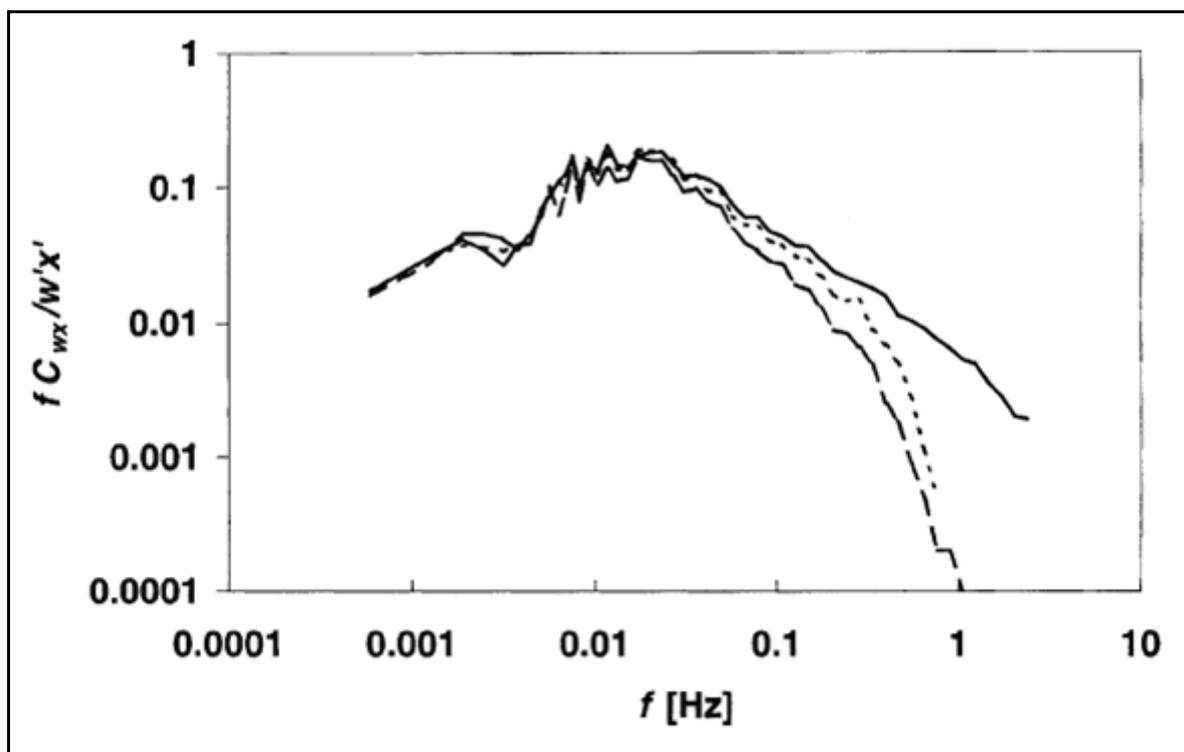


Figure 4 : Evolution des densités co-spectrale expérimentales de la chaleur sensible en trait plein, du CO₂ en trait pointillé et de la chaleur latente en trait discontinu, Aubinet et al., 2001

Nous observons effectivement une atténuation du signal aux hautes fréquences pour les densités co-spectrales du CO₂ et de la chaleur latente comparées à celles de la chaleur sensible. Cette atténuation est plus importante pour la chaleur latente que pour le flux de CO₂.

L'atténuation des fluctuations de concentrations dans le tube d'échantillonnage peut s'expliquer de la manière suivante. Dans le tube d'échantillonnage, l'écoulement est sous régime laminaire. La valeur du nombre de Reynolds est de l'ordre de 2000 [-] pour le dispositif du site de Vielsalm, (Aubinet et al., 2000). Etant donné que le tube est de section circulaire, avec un rayon constant et que nous avons un écoulement stationnaire et uniforme, le fluide est dans les conditions d'un écoulement de Poiseuille. Sous l'effet de la viscosité, les couches de fluide en écoulement se frottent les unes sur les autres et aux surfaces solides qu'elles rencontrent. En conséquence, à une échelle macroscopique, un profil latéral de vitesse d'écoulement apparaît dans le tube, la vitesse étant nulle au contact de la paroi du tube d'échantillonnage et maximum au centre. Ce profil radial des vitesses est une parabole dont l'axe est confondu avec l'axe du tuyau et dont le sommet pointe vers l'avant. La parabole s'aplatit avec une viscosité croissante, (Aubinet, 2003). L'inégalité de ces vitesses sur une section du tube a pour effet de mélanger des particules de gaz échantillonnées à des instants différents et donc d'amortir les fluctuations temporelles de concentrations. En termes de fréquences, ce sont les fluctuations de hautes fréquences qui sont réduites, voir annulées. Il s'agit donc d'un filtre passe-bas.

La fonction de transfert résultant de cette atténuation a déjà été étudiée de manière détaillée dans le cas des flux de CO₂ entre autre par Leuning et Judd, 1996, Moncrieff et al., 1997, Aubinet et al., 2000, Aubinet et al., 2001, Eugster et Senn, 1995. Ces auteurs ont proposé des procédures permettant de corriger les flux afin de tenir compte de ces effets. Toutefois peu d'études détaillées ont été consacrées à l'atténuation des fluctuations de vapeur d'eau. Pourtant, celle-ci est différente de celle affectant le CO₂.

Leuning et Judd, 1996, ont notamment montré que l'atténuation de la densité co-spectrale de la chaleur latente est bien plus importante pour des tubes vieux et sales que pour des tubes neufs et propres. Effectivement la rugosité de l'intérieur du tube peut accentuer les frottements.

De plus, la vapeur d'eau est un traceur actif, c'est-à-dire que celle-ci réagit lors de son transport. Lorsque le tube est encrassé, il existe alors un phénomène d'adsorption et de désorption d'eau par les poussières sur la surface du tube au passage de l'air humide. De plus, il existe deux filtres situés un à l'entrée du tube d'échantillonnage et l'autre à l'entrée de l'analyseur. Ceux-ci s'encrassent également et leur présence accentue probablement le phénomène d'adsorption et de désorption.

Ceci peut expliquer une atténuation du flux plus importante pour un fluide contenant de la vapeur d'eau. Effectivement, dans le tube, la concentration de la vapeur d'eau essaierait d'atteindre l'équilibre avec la concentration de la vapeur d'eau adsorbée à la surface de la paroi du tuyau. Le taux d'adsorption dépend essentiellement de l'humidité relative et se déroule plus rapidement que la désorption qui, elle, dépend principalement de la température. Cet équilibre est déterminé par la différence entre le taux d'adsorption et de désorption provenant de la surface du tuyau. Proche de la saturation, l'adsorption devient importante par rapport à la désorption.

Dans le cas de la vapeur d'eau, l'atténuation supplémentaire dépendrait donc des conditions environnementales.

Il s'avère assez complexe de trouver une formule générale pour cette atténuation car elle devrait tenir compte notamment :

- De la théorie cinétique des gaz,
- Des changements de phase : évaporation et condensation sur la surface interne d'un tube contaminé par des aérosols atmosphériques,
- Des effets de la dynamique de la couche limite de la paroi interne.

Beaucoup de ces phénomènes ne sont pas assez connus pour permettre de quantifier les atténuations (Massman et Ibrom, submitted).

3.3 Etat de la question

Plusieurs scientifiques se sont penchés sur ce phénomène d'atténuation des fluctuations dans l'objectif de corriger cet effet sur les flux de CO₂. Cette atténuation peut être modélisée par la fonction de transfert d'un filtre passe-bas.

Vu la relation (18) établie plus haut, la densité du flux turbulent mesurée ($\overline{w's'}$) peut être décrite comme l'intégrale sur l'ensemble des fréquences du produit de la densité co-spectrale réelle du signal et de la fonction de transfert, $FT(f)$, qui traduit les réductions des fluctuations de hautes fréquences (Aubinet et al., 2000). Ceci nous mène à l'équation suivante :

$$\overline{w's'_{meas}} = \int_0^{\infty} FT(f) C_{ws}(f) df \quad (19)$$

Moore, 1986 est le premier à s'investir dans la description théorique de la fonction de transfert du système de covariance de turbulences pour les flux de quantité de mouvement et chaleur sensible. Leuning et Moncrieff, 1990, Leuning et King, 1992 et Leuning et Judd, 1996, s'intéressent aux mesures de flux de scalaire. Ils ont travaillé avec le système de mesures utilisant un analyseur de gaz à infrarouge à chambre fermée. Une étude complète de la fonction de transfert du système de covariance de turbulences en chambre fermée a été accomplie par Moncrieff et al., 1997.

D'après cette théorie, la fonction de transfert est le produit d'une fonction de transfert filtre passe-bas ($FT_{HF}(f)$) et d'une fonction de transfert passe-haut ($FT_{LF}(f)$), non abordée dans ce travail.

3.3.1 Fonction de transfert

La fonction de transfert peut être déterminée de deux façons : de façon théorique à partir des caractéristiques techniques du système de pompage et de façon expérimentale en partant des co-spectres mesurés.

L'approche théorique est basée sur les lois de la mécanique des fluides (Moore, 1986 ; Leuning et Moncrieff, 1990 ; Leuning et King, 1992 ; Leuning et Judd, 1996 ; Massman, 1991 ; Moncrieff et al., 1997). Toutefois, Aubinet et al., 2001, ont montré que les valeurs de fréquences de coupure obtenues en utilisant cette approche étaient surestimées ce qui induit une sous-estimation de la correction à apporter. Une explication serait que cette approche théorique ne prend pas en compte l'effet négatif et non négligeable des filtres. Pour cette raison, dans notre étude, nous exploiterons uniquement l'approche expérimentale.

Nous retiendrons de l'approche théorique qu'elle permet de conclure que la fonction de transfert dépend essentiellement des caractéristiques du système telles que les dimensions du

tube de prélèvement, les filtres à l'entrée du tube et de l'analyseur, la distance séparant l'anémomètre sonique et l'embouchure du tube de prélèvement, et la hauteur de mesure, z .

L'approche expérimentale, elle, repose sur deux hypothèses :

- les processus de transport turbulents de chaleur sensible et de vapeur d'eau sont identiques. Seule la valeur de la diffusivité diffère d'un processus à l'autre. En conséquence, les densités co-spectrales doivent être identiques à un facteur d'échelle près.
- La réduction de densité co-spectrale dans les hautes fréquences est principalement due aux frottements d'air dans le tube d'entrée et à la séparation de l'embouchure de ce tube et l'anémomètre. Néanmoins, comme la chaleur sensible est mesurée uniquement à partir de la vitesse du vent et de la température sonique, les co-spectres de chaleur sensible ne sont pas affectés par ces deux problèmes.

Dans ces conditions, nous pouvons considérer la densité co-spectrale de la chaleur sensible comme idéale et l'utiliser comme référence pour caractériser l'atténuation des densités co-spectrales des flux de CO₂ ou de vapeur d'eau. Toutefois, les différentes densités co-spectrales étant de dimensions différentes, elles doivent tout d'abord être normalisées pour pouvoir être comparées.

La fonction de transfert peut donc être estimée comme le rapport des deux densités co-spectrales normalisées :

$$FT_{HF}^{exp}(f) = \frac{N_T C_{ws}(f)}{N_s C_{wT}(f)} \quad (20)$$

où N_T et N_s sont les facteurs de normalisation.

Ces facteurs de normalisations N_T et N_s devraient correspondre aux valeurs de covariances (respectivement $\overline{w'T'}$ ou $\overline{w's'}$). Cependant, les covariances mesurées sont plus faibles que les covariances réelles car elles sont elles-mêmes affectées par la réduction des hautes fréquences. L'utilisation des covariances induit donc une marge d'erreur. Pour l'éviter, nous préférons calculer les facteurs de normalisation selon :

$$\frac{N_T}{N_s} = \frac{\int_0^{f_0} C_{wT}(f) df}{\int_0^{f_0} C_{ws}(f) df} \quad (21)$$

où la fréquence limite f_0 est suffisamment élevée pour que le nombre de points utilisés pour estimer les intégrales soit suffisant et que l'incertitude sur les facteurs de normalisation soit faible, suffisamment pour que la réduction des hautes fréquences soit négligeable.

Pour pouvoir caractériser la fonction de transfert et l'exploiter ultérieurement, elle va être ajustée, par régression non linéaire, sur les mesures obtenues. Dans le cas des flux de CO₂, Aubinet et al., 2001, ont proposé d'utiliser une équation Gaussienne donnée par :

$$FT(f) = \exp\left[-0,347\left(\frac{f}{f_{co}}\right)^2\right] \quad (22)$$

où le seul paramètre ajustable est la fréquence de coupure f_{co} [Hz].

Par ailleurs, Eugster et Senn, 1995, ont proposé d'ajuster une courbe Lorentzienne, par analogie avec un filtre passe-bas construit au moyen d'une résistance unitaire et d'une bobine de self-induction :

$$FT(f) = \frac{1}{1 + 4\pi^2 f^2 L_{self}^2} \quad (23)$$

Dans ces conditions, le seul paramètre ajustable est l'inductance du circuit, L_{self} [Hz⁻¹].

Les résultats obtenus par ces deux dernières équations seront comparés.

Cette fréquence de coupure ou inductance ne doit pas être calculée à chaque instant. Puisque la fonction de transfert ne dépend que du dispositif de mesure (du moins pour les flux de CO₂), la fréquence de coupure pourrait se calculer qu'une fois pour le site. Cependant, le vieillissement du dispositif intervient sur la fonction de transfert. Les filtres et le tube s'encrassent au fil du temps et la pompe du système vieillit progressivement. Les filtres sont normalement changés toutes les deux semaines. Nous analyserons ce vieillissement sur notre site en étudiant l'évolution temporelle de la fréquence de coupure.

Néanmoins, des recherches ultérieures ont montrés que la fréquence de coupure pour les flux de vapeur d'eau ne dépend pas que du dispositif de mesure mais aussi de l'humidité de l'air (détaillé à la section 3.3.3).

3.3.2 Facteur de correction

Cette atténuation des fluctuations hautes fréquences, si elle n'est pas corrigée, amène une sous-estimation du flux d'évapotranspiration qui peut être conséquente. Ce flux peut ainsi être sous-estimé jusqu'à 10 pourcents pour de nouveaux tubes et jusqu'à plus de 20 pourcents pour des tubes âgés (Su et al., 2004).

Il est donc important d'apporter un facteur de correction aux mesures prises afin de pouvoir estimer le flux d'évapotranspiration réel. Il se définit par le rapport de la densité co-spectrale du flux idéal (15) et de la densité co-spectrale du flux mesuré (19) (Moore, 1986) :

$$FC = \frac{\int_0^{\infty} C_{ws}(f)df}{\int_0^{\infty} FT(f)C_{ws}(f)df} \quad (24)$$

La densité co-spectrale du flux idéal est déterminée par l'équation de Kaimal et celle du flux mesuré est modélisée par l'équation de Kaimal multipliée par la fonction de transfert. Cette méthode permet de déterminer un facteur de correction sans avoir besoin de mesurer les densités co-spectrales. Le facteur de correction est fonction de la hauteur de mesure (propre au site), de la vitesse du vent et de la fréquence de coupure.

La vitesse du vent ainsi que la hauteur de mesure influencent le facteur de correction par l'intermédiaire du co-spectre (la fonction de transfert, elle, est indépendante de ces deux variables). En effet, une augmentation de la vitesse du vent et/ou une réduction de la hauteur de mesure déplacent le co-spectre vers des fréquences plus hautes. La partie du co-spectre qui subit une atténuation est alors plus importante, exigeant un facteur de correction plus grand.

La fréquence de coupure caractérise la fonction de transfert qui modélise l'atténuation du signal à rectifier. Une atténuation plus importante (une faible fréquence de coupure) requiert un facteur de correction plus grand.

Aubinet et al., 2001, présente ces relations pour une hauteur de mesure fixée dans la Figure 5 suivante :

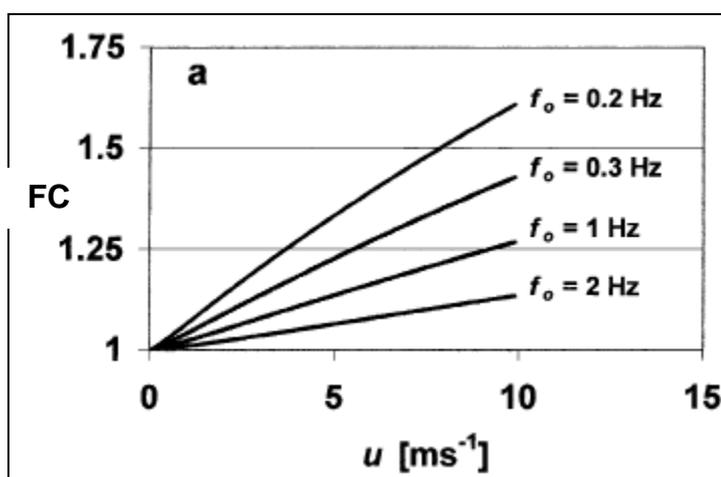


Figure 5 : Evolution du facteur de correction en fonction de la vitesse du vent pour différentes valeurs de fréquence de coupure, Aubinet et al., 2001.

3.3.3 Flux de vapeur d'eau

Beaucoup moins de scientifiques ont étudié les flux de vapeur d'eau. Très souvent, la vapeur d'eau a été étudiée avec les mêmes démarches que pour les flux de CO₂, sans s'y attarder particulièrement.

Des études récentes sont revenues sur des mesures de traceurs actifs comme la vapeur d'eau et ont montré que la fonction de transfert dépend des conditions atmosphériques.

En effet, Clement, 2004, a observé une différence de valeur entre les fréquences de coupure pour les flux de CO₂ et de vapeur d'eau. Effectivement, les fréquences de coupure des flux de vapeur d'eau sont plus faibles. Clement, 2004, a montré une corrélation entre la fréquence de coupure pour la vapeur d'eau et l'humidité de l'air.

Ibrom et al., 2007, a continué cette étude et a montré que la fréquence de coupure du flux de vapeur d'eau décroît fortement (i.e. l'amortissement instrumental des fluctuations hautes fréquences augmente) avec une humidité relative croissante. Il en a établi une relation en précisant qu'elle était spécifique à son site et à son dispositif.

Mammarella et al., comm. pers., a étudié récemment l'influence de l'encrassement du tube. Un tube encrassé entraîne une atténuation plus importante dans les hautes fréquences pour les mesures de flux. Cette atténuation est d'autant plus marquée que l'air est humide. Par contre, il n'existe pas d'atténuations pour les flux de CO₂ par rapport à l'encrassement du tube. Cette étude a été effectuée sur un site dont le dispositif ne contient pas de filtre à l'extrémité du tube d'échantillonnage. Le tube est donc très vite encrassé. L'impact de l'encrassement est, de ce fait, important à tenir en compte pour le site en question.

Ces trois études ont utilisé pour fonction de transfert une équation Lorentzienne tout comme Eugster et Senn, 1995.

3.4 Objectif du travail

La majorité des recherches résumées jusqu'à ce point ont été effectuées avec l'objectif principal d'étudier le flux de CO₂. Le flux de vapeur d'eau a été très peu étudié jusqu'à présent. Nous devons donc nous interroger sur l'adaptation de la théorie dans le cas de la vapeur d'eau.

Les équations (22) et (23) proposées pour la fonction de transfert du flux de CO₂ sont remises en cause. Ces fonctions de transfert ont, en effet, été construites pour analyser les atténuations du co-spectre en hautes fréquences des flux de CO₂. Nous allons analyser si elles sont adéquates pour le flux de vapeur d'eau et si ce n'est pas le cas, tenter de les adapter.

De plus, si, pour les flux de CO₂, la fréquence de coupure dépend principalement des caractéristiques du système, pour la vapeur d'eau, nous allons montrer qu'elle dépend également de l'humidité de l'air (Clement, 2004, Ibrom et al., 2007). En effet, plus l'air est humide, plus les processus d'adsorption-désorption sur les parois des filtres et du tube de prélèvement seraient importants (Massman et Ibrom, submitted). Nous allons également tenter d'étudier l'impact de l'encrassement des filtres et du tube d'échantillonnage.

Notre objectif est donc dans ce travail d'analyser le comportement de la fonction de transfert pour la vapeur d'eau afin de pouvoir modéliser un facteur de correction. La finalité étant de mettre au point une procédure de calcul adaptée pour l'estimation de ces flux sur le site de Vielsalm.

4 Matériel et méthodes

4.1 Description du site

Les mesures utilisées pour cette étude ont été enregistrées depuis le mois de septembre 1996 sur le site de Vielsalm. Ce site se situe en Belgique dans le nord de la province de Luxembourg (50°18 N, 6°00 E). L'altitude est de 450 m. Le terrain présente une légère pente de 3 % dans la direction Nord-Ouest.

La forêt ardennaise est caractérisée par un climat tempéré océanique. La température annuelle moyenne est de 7°C avec des valeurs extrêmes variant aux alentours de 30°C et -10°C. Les précipitations annuelles s'élèvent à 1000 millimètres.

Le sol a entre 100 et 150 cm de profondeur. Il rentre dans la catégorie des sols peu évolués, zonaux et bruns acides (AbwC), typiques de la forêt ardennaise. Ce sol est classé dans les « Cambisols dystriques ».

La composition actuelle du site reprend principalement 2 espèces :

- des Douglas (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco), avec une hauteur maximale de 35,2 mètres et 49 pieds par hectare
- des hêtres (*Fagus sylvatica* L.), avec une hauteur maximale de 27 mètres et 145 pieds par hectare.

Ces deux espèces représentent plus de 80 % de la surface de l'écosystème mixte. Le reste est constitué d'un mélange plus vaste d'espèces :

- des sapins pectinés (*Abies alba* Miller),
- des épicéas communs (*Picea abies* (L.) Karst.),
- des pins sylvestres (*Pinus sylvestris* L.),
- et des chênes pédonculés (*Quercus robur* L.)

Le site est détaillé plus amplement par Laitat et al., 2000.

Les deux principales espèces forment deux zones distinctes. Les conifères sont localisés sur la partie nord-est par rapport à la tour de mesure (Figure 6). Le sous-bois est très éparpillé sous les conifères et inexistant sous les hêtres.

Les mesures de covariance de turbulences sont réalisées sur le site depuis 12 ans. Celles-ci ont fait l'objet de dizaines de publications (Aubinet et al., 2001, 2002, 2005, Valentini et al., 2000, Ciais et al., 2005, etc...). Les données sont utilisées par de nombreuses équipes internationales.

Contenant des sous-peuplements homogènes de feuillus et de résineux, le site offre notamment le potentiel d'étudier l'efficacité d'utilisation de l'eau en fonction de l'espèce. Ceci répond à l'objectif du projet de recherche de l'unité de « Forêts » de l'Université

Catholique de Louvain avec lequel nous collaborons, étant de viser à quantifier l'effet « espèce » sur la réponse hydrique d'un peuplement mixte de hêtre-douglas-épicéa (Vincke, comm. pers.).



Figure 6 : Photographie aérienne de 1 km x 1 km de l'écosystème du site de Vielsalm. Les conifères apparaissent en gris foncé et les arbres feuillus en gris clair. La croix blanche indique la localisation de la tour de mesure.

4.2 Dispositif de mesure

Une tour a été placée au centre de cette forêt mixte pour y installer à son sommet le système de mesure de covariance de turbulences à une hauteur de 40 mètres. Le système est installé dans la CLS (± 100 mètres). Cette appartenance à la CLS est une condition requise citée à la section 2.1.2 car dans cette couche les flux turbulents répondent à l'hypothèse d'être indépendants de la hauteur, Aubinet et al., 2001.

Le système de covariance de turbulences mesure les flux de CO₂, de chaleur sensible et de chaleur latente échangés entre l'écosystème et l'atmosphère. Ce système est constitué de :

- un anémomètre sonique tridimensionnel (Model SOLENT 1012R2, Gill Instruments, Lymington, UK) (voir Figure 7). Celui-ci mesure les trois composantes de la vitesse du vent ainsi que la température sonique (Coppin et Taylor, 1983). La fréquence de ces mesures est de 20,8 Hz. Les fluctuations de la température sont calculées à partir des mesures de la vitesse du son.



Figure 7 : Anémomètre sonique tri-dimensionnel,

-
- un analyseur de gaz à infrarouge (IRGA) (Model LI-6262, LI-COR Inc., Lincoln, NE, USA). Celui-ci mesure les concentrations de l'air en vapeur d'eau avec une fréquence de mesure de 10 Hz. L'air au-dessus de la canopée est pompé au travers d'un tube et est dirigé vers l'analyseur. Le tube a une longueur de 8 mètres et un diamètre de 4 millimètres.
 - une pompe (KNF NO22 AN18, Village Neuf, France), installée en aval de l'analyseur. Celle-ci provoque un flux de 8 l min^{-1} .
 - un tube en Teflon reliant les deux senseurs. Le Téflon contient un coefficient de friction très bas qui permet de diminuer les frottements entre le fluide et les parois du tube.
 - deux filtres (GELMAN ACRO 50, porosité de $1 \mu\text{m}$) qui permettent d'éviter l'encrassement de la chambre d'échantillonnage de l'analyseur. Le premier est placé à l'entrée du tube permettant ainsi de limiter aussi l'encrassement du tube. Le deuxième filtre est placé juste avant la chambre d'échantillonnage de l'analyseur. Le premier filtre est remplacé environ toutes les deux semaines, le deuxième l'est tous les ans.

Les deux senseurs sont synchronisés et commandés par un ordinateur. Les données brutes ainsi récoltées sont regroupées par fichiers d'une demi-heure et archivées pour permettre leur traitement ultérieur.

Outre le système de mesure de covariance de turbulences, il existe également une station de mesures météorologiques. Ce système comporte une série de capteurs permettant d'enregistrer les rayonnements, les températures de l'air et du sol, les humidités de l'air et du sol, la pression atmosphérique, les précipitations et autres. De cette façon, il est possible de décrire le plus précisément les conditions météorologiques au-dessus et dans l'écosystème. Nous localisons à la Figure 8 les différents appareils de mesures et nous les listons au Tableau 1.

Le pyranomètre permet de mesurer le rayonnement global qui correspond à l'énergie solaire totale arrivant à la surface terrestre [W m^{-2}]. Le pyrromètre mesure le rayonnement net qui est défini comme étant la quantité d'énergie radiative disponible à la surface de la terre et pouvant être transformée en d'autres formes d'énergie par les divers mécanismes physiques ou biologiques de la surface [W m^{-2}]. Le capteur de rayonnement photosynthétiquement actif mesure la densité de flux de photons photosynthétiques (PPFD, « Photosynthetic Photon Flux Density ») dont les longueurs d'ondes s'étendent de 400 nm à 700 nm, utilisés par les plantes pour la photosynthèse. La PPFD est exprimé en [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$].

Le psychromètre est composé de deux thermomètres identiques placés côte à côte, l'un deux ayant son réservoir entouré d'une mousseline humide. Le fonctionnement du psychromètre est basé sur le fait que l'évaporation est un phénomène qui nécessite de la chaleur, il est endothermique. Le dispositif permet la détermination des températures sèches T et d'autre

part humide T' correspondant à la température d'eau s'évaporant ; l'évaporation de l'eau du réservoir humide provoque un refroidissement, mesuré par la différence $T - T'$. En effet lorsqu'une particule d'eau passe de la phase liquide à la phase vapeur, la quantité de chaleur latente nécessaire pour effectuer cette transformation est prélevée du milieu ambiant de sorte que ce milieu environnant proche se refroidit. Le refroidissement indique l'activité de l'évaporation de l'eau.

Ce type de psychromètre a été utilisé sur le site de Vielsalm les premières années. Il a été par la suite remplacé par un psychromètre RHT2 qui est un capteur électronique.

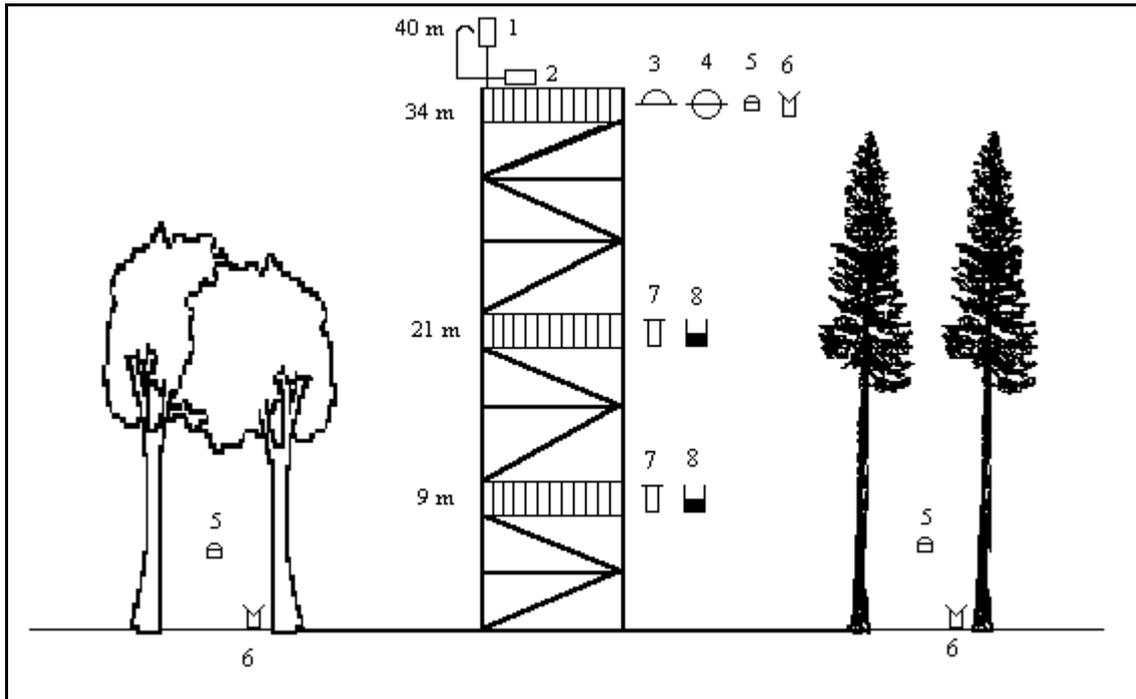


Figure 8 : Ensemble du dispositif expérimental du site de Vielsalm. Les numéros des capteurs sont référencés dans le Tableau 1

Tableau 1 : Liste des différentes grandeurs météorologiques mesurées et des instruments utilisés.

	<i>Grandeurs mesurées</i>	<i>Capteurs</i>	<i>Références</i>
1	Trois composantes de la vitesse du vent	Anémomètre sonique	Solent 1012R2, Gill Instr. Lymington (UK)
2	Concentration en vapeur d'eau	Analyseur de gaz à infrarouge	6262, LI-COR, Lincoln (NE, USA)
3	Rayonnement global	Pyranomètre	CM5, Kipp and Zonen, Delft (NL)
4	Rayonnement net	Pyrradiomètre	8111, Schenck Wien (A)
5	Rayonnement photosynthétiquement actif	Cellules photo-réceptrices	SD101Q, Delta-T, Cambridge (UK)
6	Précipitation	Collecteur + auget basculant	Unité de Physique, FUSAGx, Gembloux (B)
7	Température de l'air	Résistance platine	PT 1000, Hy-Cal Eng., El Monte (USA)
8	Humidité de l'air	Psychromètre	Unité de physique, FUSAGx, Gembloux (B) RHT2, Delta-T, Cambridge (UK)

4.3 Logiciels

Nous avons utilisé l'ensemble de logiciels « EDDY Software » (Kolle O., Rebmann C., Max-Planck-Institute for Biogeochemistry, Jena, Germany). Celui-ci est constitué de plusieurs logiciels de traitements de données, dont notamment EDDYSPEC, EDDYCORR et EDDYFLUX, décrit par Kolle et Rebmann, 2007.

EDDYSPEC permet de calculer les densités co-spectrales. Les co-spectres sont calculés sur une bande de fréquences qui reprend les fréquences entre 0,001 et 10 Hz. Cette bande recouvre les échelles de turbulence les plus importantes. Les fréquences sous 0,01 Hz contiennent une variabilité due à l'influence de la méso-échelle, à un échantillonnage inadéquat et à la variabilité naturelle. Les fréquences supérieures à 10 Hz contiennent une erreur de mesure trop grande puisque que la valeur de la densité co-spectrale devient très petite (Su et al., 2004).

Le programme d'EDDYSPEC permet la sélection de certaines options dans le calcul des densités co-spectrales :

- Le programme d'EDDYSPEC permet la sélection du type de normalisation. Nous avons choisi d'effectuer une normalisation de façon à ce que l'aire totale sous la courbe de la densité co-spectrale soit égale à la covariance. Nous avons ensuite normalisé les co-spectres par nous même afin d'être certain du procédé utilisé.
- Nous utiliserons l'option « dynamic smooth » d'EDDYSPEC. Cette fonction établit un lissage sur les données.
- Pour faciliter la représentation sur un axe x logarithmique, l'option « logarithmic equidistance frequency » est pratique. Elle effectue une moyenne des valeurs de densité co-spectrales sur un intervalle de fréquence. Cet intervalle est calculé de façon à ce que les moyennes résultantes soient équidistantes sur une échelle logarithmique. Nous pouvons choisir le nombre de moyennes que nous désirons par décade. Nous en prenons 20.

Il existe également d'autres logiciels dans EDDY Software que nous n'avons pas directement utilisés pour ce travail mais qui ont servi au préalable pour calculer certaines données indispensables.

4.3.1 Test de qualité

Le logiciel de traitement de données EDDYFLUX calcule les flux et applique certains contrôles de qualité. En effet, les fichiers de données brutes peuvent contenir des erreurs instrumentales, des erreurs dues au transfert des données ou des erreurs dues à la stagnation

d'eau sur les capteurs de l'anémomètre sonique (Aubinet et al, 2000). Afin d'éviter ces erreurs, la qualité des données doit être vérifiée pour s'assurer qu'elles ne contiennent pas de valeurs anormales ou de discontinuité. Le logiciel détecte les pics et les sauts brutaux lorsque les mesures atteignent des valeurs irréelles ou lorsque l'écart entre deux valeurs successives est trop important. Le logiciel indique le nombre de valeurs qu'il considère comme étant des pics et les remplace par des valeurs interpolées linéairement.

4.3.2 Le temps de décalage

La mesure de la composante verticale de la vitesse du vent à un temps donné ne correspond pas à la mesure de la concentration de la vapeur d'eau pour ce même temps. Effectivement, il existe un décalage temporel entre les deux mesures correspondant au temps nécessaire à l'échantillon d'air pour traverser le tube d'échantillonnage. Nous appelons cette différence de temps : le temps de décalage (*'time lag'* en anglais). Ce temps de décalage dépend d'abord des caractéristiques du dispositif d'échantillonnage d'air (longueur du tuyau, pompe, diamètre intérieur, filtres) qui sont stables au cours du temps pour autant que l'on ne modifie pas ce dispositif. Néanmoins, il a été montré (Clement, 2004 ; Rebmann, comm. pers.) que, pour la vapeur d'eau, le temps de décalage est aussi fortement influencé par l'humidité relative de l'air suite au phénomène d'adsorption-désorption sur les parois du tuyau. En pratique, il est suggéré de rechercher pour chaque demi-heure le temps de décalage qui maximise la corrélation entre les deux séries temporelles w et h (Aubinet et al., 2000). Nous représentons à la Figure 9 l'évolution du temps de décalage ainsi obtenu en fonction du déficit de pression de vapeur (VPD, décrit à la section 5.2.1), ce déficit représente l'humidité de l'air. Un VPD nul caractérise un air saturé et une grande valeur de VPD caractérise un air sec.

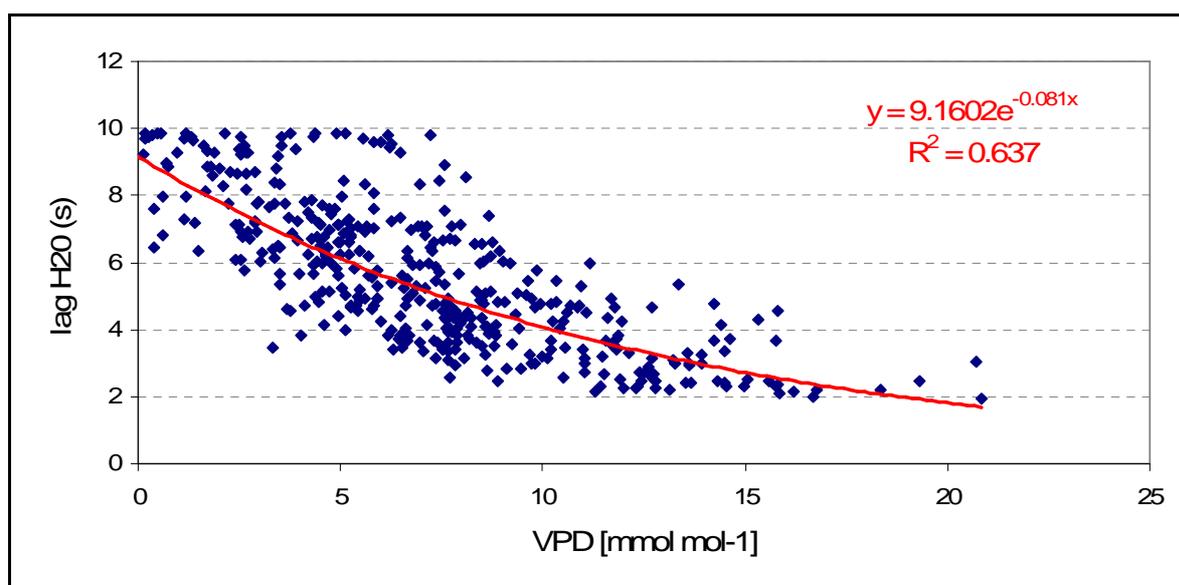


Figure 9 : Evolution du temps de décalage en fonction du VPD

Ceci reflète qu'un échantillon d'air sec traverse plus rapidement le tube du dispositif qu'un échantillon d'air humide. Effectivement l'échantillon humide subit des frottements plus importants et rencontre plus d'interactions avec les parois lors de son passage dans le tube.

Le logiciel EDDYCORR calcule ce temps de décalage entre les mesures de la composante verticale de la vitesse du vent et de la concentration de vapeur d'eau (voir 3.1) en utilisant la méthode du maximum de corrélation entre les deux séries temporelles. Cette information est mise à disposition d'EDDYSPEC pour synchroniser à nouveau les séries temporelles avant le calcul des co-spectres (Kolle et Rebmann, 2007).

4.4 Méthode - Traitement des données

La méthode de l'étude consiste à se mettre dans les meilleures conditions pour caractériser l'effet du dispositif de mesure et observer les impacts des facteurs atmosphériques sur ce dernier. Lorsque l'atténuation du flux est maîtrisée, nous pouvons alors mettre au point un calcul du facteur de correction que nous pouvons appliquer sur toutes les données.

Une sélection drastique de données est nécessaire pour la réalisation de l'analyse spectrale. En effet, comme nous l'avons déjà présenté aux sections 2.1.2 et 2.2, les hypothèses de conditions de stationnarité et d'instabilité doivent être respectées. Par ces hypothèses, la méthode de covariance de turbulences est applicable et les flux sont importants donc plus facile à analyser.

Pour pouvoir analyser les atténuations de fluctuations de flux de vapeur d'eau, nous avons comparé les densités co-spectrales de la chaleur latente aux densités co-spectrales de la chaleur sensible considérées comme idéales, c'est-à-dire non atténuées.

Afin de permettre cette comparaison, les deux densités co-spectrales ont dû être normalisées. Après normalisation, la fonction de transfert a été calculée comme le rapport des densités co-spectrales de la vapeur d'eau et de la chaleur sensible.

Pour chaque période sélectionnée, nous avons donc calculé la fonction de transfert expérimentale, notée « **F_{Te}** ». Nous avons ensuite ajusté sur chacune de celles-ci plusieurs équations de régression plausibles ; ces équations testées sur la F_{Te} sont nommées les fonctions de transfert théoriques, notées « **F_{Tth}** ». Le résultat de cette ajustement de la F_{Tth} sur la F_{Te} est la fonction de transfert ajustée, notée « **F_{Ta}** ». Ceci nous a permis d'obtenir pour chaque période et pour chaque type d'équation des F_{Tth}, une valeur de la fréquence de coupure. Les évolutions de la fréquence de coupure en fonction des variables climatiques et du vieillissement du dispositif ont ensuite été étudiées.

Une comparaison a enfin été effectuée pour déterminer quel type d'équation F_{Tth} décrivait le mieux la fonction de transfert du filtre.

Tout ce travail a été effectué au moyen d'un code algorithmique que nous avons construit sur Matlab R2007a. Un ordinogramme de ce code est détaillé en Annexe 1.

4.4.1 Sélection des données

4.4.1.1 Présentation des données

Afin de pouvoir réaliser une analyse spectrale satisfaisante, une sélection importante des données est nécessaire. Les critères généraux de sélection sont les suivants :

- La série de donnée doit être stationnaire (voir section 2.2);
- La fonction de transfert doit se construire à partir de données prises sur un laps de temps suffisamment long pour inclure les turbulences de basses fréquences afin de réduire les incertitudes sur la partie des basses fréquences du co-spectre. Un laps de temps trop long augmente cependant les risques de non-stationnarité ;
- Les flux doivent être importants afin que les co-spectres soient suffisamment bien définis.

Les mesures instantanées prises par la méthode de covariance de turbulence ont été groupées par demi-heures dans des fichiers. Pour chaque demi-heure, nous possédions, également, les valeurs des flux calculés, les résultats au test de stationnarité, le temps de décalage, et les données météorologiques. Ces mesures ont été obtenues dans le cadre d'autres études et vont nous être utiles pour établir une sélection des données qui optimisent l'analyse spectrale.

4.4.1.2 Sélection « PPFD »

Pour rencontrer ces conditions, nous avons utilisé les critères suivants :

- Le test de stationnarité doit être rencontré. Ce test va automatiquement éliminer une majorité des périodes stables qui présentent souvent une turbulence intermittente.
- Nous effectuons l'analyse spectrale sur des fichiers d'une demi-heure. Ensuite, pour limiter l'incertitude dans les parties basses fréquences, six co-spectres consécutifs sont moyennés. Cette méthode a donné de meilleurs résultats que la solution préconisée par Aubinet et al., 2000, d'effectuer l'analyse spectrale sur six fichiers préalablement compilés.
- Pour sélectionner les périodes à flux importants, nous ne gardons d'abord que les périodes présentant un flux d'évapotranspiration supérieur à $1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$,
- Ensuite, nous favorisons l'ensoleillement. Les périodes de six demi-heures consécutives sont prises entre 10h30 et 13h30 et l'ensoleillement est analysé. La régularité de l'évolution du PPFD au cours de la journée a été reprise comme critère. Un exemple d'application de ce critère est donné à la Figure 10 : une journée comme le 29 juillet 2004 peut être reprise dans notre sélection alors que les journées comme les 28, 30 et 31 juillet 2004 ne le peuvent pas. Malgré un fort taux d'ensoleillement,

l'irrégularité du rayonnement peut être cause de fluctuations à basses fréquences. Cette sélection de la régularité de l'évolution du PPFD est nommée « parfait ». Nous avons effectué une deuxième sélection du PPFD qui est plus tolérante vis-à-vis de l'irrégularité de celui-ci. Cette deuxième sélection du PPFD plus souple est nommée « correct » et accepte les journées présentant un PPFD comme celui du 28 juillet 2004. La détection des journées ensoleillées reste plus facile et plus rigoureuse avec le PPFD qu'avec d'autres paramètres d'ensoleillement comme l'indice de clarté par exemple. Ce premier type de sélection est donc nommé « PPFD ».

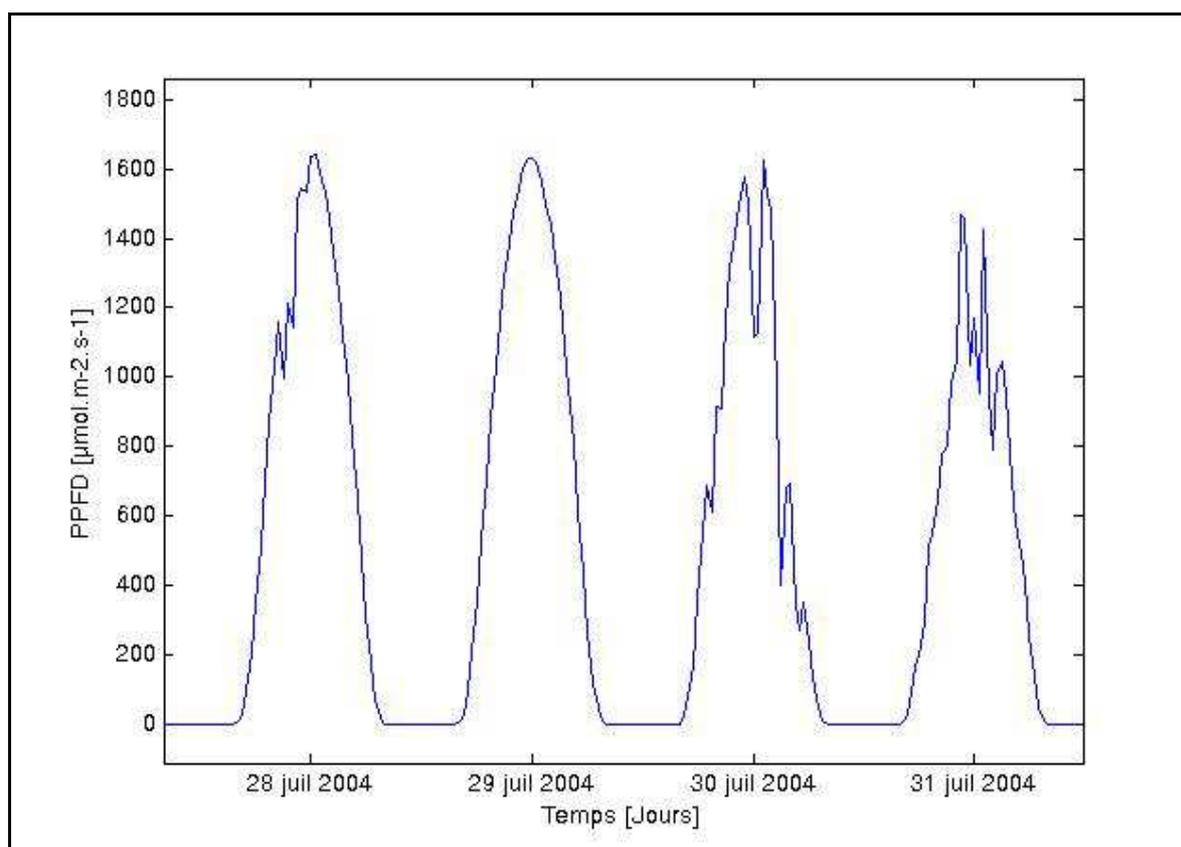


Figure 10 : PPFD du 28 au 31 juillet 2004

- Nous écartons les données présentant des pics dus au système de mesure même si ces mesures ont été supprimées et interpolées par le logiciel de traitement (voir 4.3).
- Bien sûr, nous devons avoir à notre disposition les données météorologiques essentielles pour l'analyse des données (temps de décalage, humidité de l'air, température, ...).

Ensuite, les FTe sont analysées visuellement une à une, pour s'assurer qu'il n'existe pas d'analyse spectrale incohérente, c'est-à-dire s'il existe des FTe contenant des amas de valeurs inférieures à 0 ou supérieures à 1. Il y a moins de 10% des journées restantes qui sont supprimés par cette sélection visuelle finale.

Nous observons que suite à cette sélection, les données sont fortement filtrées. Etant donné que nous travaillons sur trois heures centrées sur midi pour chaque journée, nous obtenons un co-spectre par jour. Il nous reste pour l'étude un certain nombre de co-spectres affiché par années dans le Tableau 2 :

Tableau 2 : Statistiques des journées sélectionnées

Année	Sélection « PPFD parfait »	Sélection « PPFD correct »
1997	7	13
1998	5	9
1999	1	5
2000	4	6
2001	5	7
2002	6	7
2003	4	9
2004	5	7
2005	7	12
2006	3	7
2007	6	9
Total	53	91

Nous retenons pour la sélection « PPFD parfait » 53 co-spectres sur 4140 journées de mesures, soit approximativement 5 journées par an. Pour la sélection « correct » nous gardons 91 co-spectres, soit plus ou moins 8 jours par an.

Cette sélection de données est donc assez drastique et ce pour plusieurs raisons :

- Nous désirions une rigueur dans la sélection pour primer le côté qualitatif du quantitatif de l'étude.
- Nous voulons objectiver la sélection au maximum. Nous devons supprimer au mieux les périodes sous mauvais climat qui nous empêchent d'obtenir des co-spectres analysables. Néanmoins, la sélection sur le PPFD ne nous empêche pas de faire intervenir toute une série de variabilités de facteurs atmosphériques comme la vitesse du vent, la température, l'humidité de l'air ...

De cette façon, nous avons pu construire un modèle sur des journées idéales présentant des co-spectres convenables au calcul du facteur de correction. Ensuite, nous avons répandu le modèle sur les journées ne présentant pas de co-spectres adéquats afin de pouvoir tout de même calculer un facteur de correction pour ces journées moins favorables.

La sélection « PPFD » pourrait sembler trop rigoureuse mais elle est avantageuse dans la qualité des journées restantes et par sa facilité de sélection visuelle.

4.4.1.3 Sélection « Seuil »

Pour effectuer certaines analyses, nous avons trié les données sur base d'une sélection semblable à celles effectuées par les précédents scientifiques (Ibrom et al., 2007 et Mammarella et al., comm. pers.). Elle consiste à accepter toutes les demi-heures avec des flux de chaleur sensible, de chaleur latente et de CO₂, supérieurs à certaines valeurs. Nous prenons ici comme seuils les mêmes valeurs que Mammarella et al., comm. pers., c'est-à-dire un seuil de 25 W m⁻² pour les flux de chaleur sensible et latente et un seuil de 2 μmol m⁻² s⁻¹ pour le flux de CO₂. Evidemment, les critères comme une détection de pics et un test de stationnarité négatif sont toujours valables pour cette sélection. Nous nommons cette deuxième sélection, la sélection « Seuil ».

L'inconvénient de cette sélection est l'étape de l'analyse visuelle qui est beaucoup plus conséquente. Pour six mois d'analyse, nous avons aux alentours de 4500 périodes pour lesquelles il faut vérifier la cohérence de la FTe. Nous avons finalement fait cette inspection algorithmiquement en sélectionnant les périodes avec une somme des carrés des écarts (SCE) faible entre la FTe et la FTa. Enormément de demi-heures sont supprimées, plus ou moins 60%. Hélas, cette sélection algorithmique n'est pas contrôlée pour vérifier la procédure du tri des FTe. Cependant, l'analyse effectuée principalement par cette sélection n'est qu'anecdotique dans l'ensemble de l'étude.

4.4.2 Normalisation des co-spectres

Pour pouvoir comparer les co-spectres expérimentaux de la chaleur sensible et de la chaleur latente, il est indispensable de normaliser ces deux co-spectres, comme expliqué à la section 3.3.1, « Fonction de transfert ». Ce facteur de normalisation devrait être logiquement la covariance réelle pour ramener l'aire des co-spectres à une valeur de 1 et de cette façon être comparable l'un à l'autre. Néanmoins, étant donné que la covariance mesurée subit une atténuation dans les hautes fréquences différentes selon le traceur, nous avons décidé de normaliser les co-spectres par une covariance tronquée.

Le facteur de normalisation est donc calculé en prenant l'intégrale de la densité co-spectrale de 0 jusqu'à une fréquence limite au-delà de laquelle le signal est atténué. Nous avons pris par défaut une fréquence limite valant 0,01 Hz. Celle-ci est beaucoup plus petite que celle dans le cas du CO₂ car les frottements sont plus importants pour la vapeur d'eau. L'atténuation du co-spectre est donc plus importante et est également présente pour des fréquences plus basses. Nous avons nommé cette intégrale de 0 à 0,01 Hz, la covariance tronquée, l'intégrale entière aurait donné la covariance réelle.

Pour pouvoir comparer les co-spectres expérimentaux avec les co-spectres théoriques découlant de l'équation de Kaimal, ces derniers doivent également être normalisés de la même façon. En utilisant la même notion de covariance tronquée, les co-spectres théoriques normalisés peuvent se calculer par :

$$\frac{C_{ws}(f)}{w'T'_{tronquée}} = \begin{cases} \frac{(11 \cdot n / (1 + 13,3 \cdot n)^{7/4}) \cdot w'T'}{f \cdot w'T'_{tronquée}} & n \leq 1,0 \\ \frac{(4 \cdot n / (1 + 3,8 \cdot n)^{7/3}) \cdot w'T'}{f \cdot w'T'_{tronquée}} & n \geq 1,0 \end{cases} \quad (25)$$

Nous avons remplacé dans l'équation de Kaimal, la température potentielle par la température de l'air mesurée. Nous ne tenons donc pas compte du gradient adiabatique sec. Celui-ci a une valeur d'un degré pour cent mètres d'altitude. Ceci dit, notre dispositif n'est positionné qu'à 40 mètres, cette hauteur reste fixe et nous travaillons avec des fluctuations de température. Pour ces raisons, cette approximation n'induirait pas d'erreur significative par la suite.

4.4.3 La fonction de transfert théorique (FTth)

Plusieurs équations FTth sont plausibles pour ajuster une FTa sur les FTe. Nous en avons choisi quatre qui sont représentées graphiquement à la Figure 11.

- a) La Figure 11 a) représente l'équation (22) proposée par Aubinet et al., 2000, qui est couramment utilisée pour simuler les fonctions de transfert pour les flux de CO₂. Cette fonction étant, dans un premier temps, utilisée comme référence, elle est reproduite en trait continu sur les 3 autres graphes de la Figure 11, afin de permettre une comparaison avec les équations suivantes.
- b) La Figure 11 b) représente l'équation (23) proposée par Eugster et Senn, 1995. Celle-ci est également répandue et est notamment utilisée par le logiciel Eddysoft.

Toutefois, la comparaison avec les FTe pour la vapeur d'eau montrera qu'aucune de ces deux fonctions n'est adaptée car elles présentent une pente trop élevée. C'est pourquoi, nous avons cherché à ajuster d'autres équations FTth décrivant mieux la fonction de transfert de la vapeur d'eau. Sur base de la forme des fonctions que nous avons pu observer, nous avons choisi deux nouvelles FTth qui nous paraissaient plausibles.

- c) La première solution consiste à choisir une équation similaire à l'équation (22) mais avec une pente réduite. Ceci est obtenu en modifiant l'exposant x de l'équation (22), l'équation devient donc :

$$FT(f) = \exp \left[-0,347 \left(\frac{f}{f_{co}} \right)^x \right] \quad (26)$$

Cette fonction est caractérisée par deux paramètres : f_{co} , la fréquence de coupure et x l'exposant. L'équation est représentée à la Figure 11 c) en trait discontinu.

d) Une autre solution, qui nous a paru plausible à l'examen de nombreuses FTe consistait à imaginer une fonction avec un palier. Nous avons dès lors choisi d'ajuster la fonction suivante :

$$\alpha \cdot \exp\left(-0,347 \cdot \left(\frac{f}{f_{co1}}\right)^2\right) + (1 - \alpha) \cdot \exp\left(-0,347 \cdot \left(\frac{f}{f_{co2}}\right)^2\right) \quad (27)$$

Cette fonction est caractérisée par trois variables : f_{co1} , la fréquence de coupure de la sigmoïde située dans les basses fréquences, f_{co2} , la fréquence de coupure de la sigmoïde située dans les hautes fréquences et α , la proportion de la distance entre la valeur 1 de la fonction de transfert et le palier de la fonction. L'équation est représentée à la Figure 11 d) en trait discontinu. Nous n'avons pas encore d'explication physique certaine à cette fonction de transfert, elle traduirait probablement deux phénomènes d'atténuation, l'une étant due aux frottements et la deuxième étant peut-être due au phénomène d'adsorption-désorption de la vapeur d'eau.

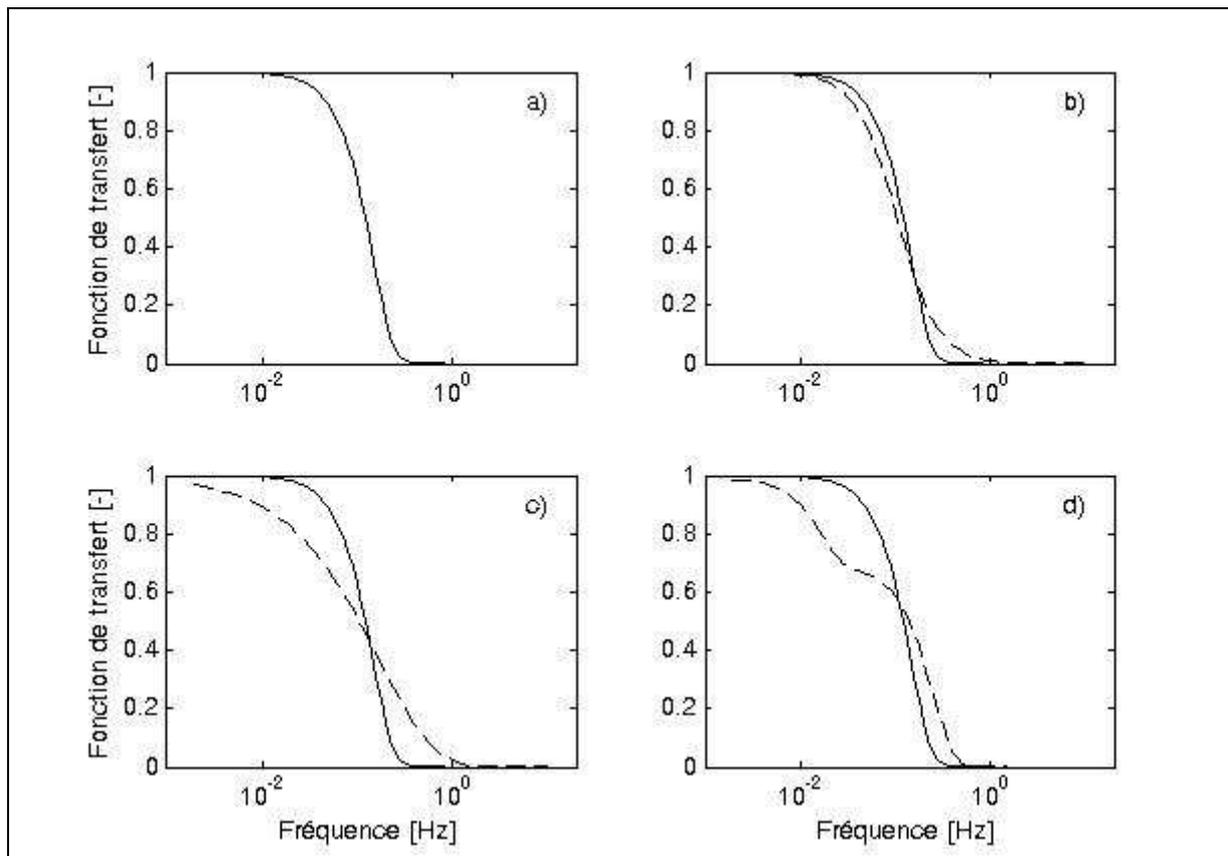


Figure 11 : Représentation des différentes équations de fonction de transfert ; en trait plein pour les quatre graphiques : équation (22), Aubinet et al., 2000, b) en trait discontinu, équation (23), Eugster et Senn, 1995, c) et d) équations (26) et (27), proposées dans ce travail.

4.4.3.1 Les fonctions de transfert théorique à plusieurs variables

Les équations (22) et (23) n'ont qu'un paramètre, l'équation (26) en a deux, et la quatrième équation (27) en a trois. Ces équations ne peuvent pas être comparées telles quelles.

Certains de ces paramètres ont été fixés afin de pouvoir étudier et comparer les FTth au même degré de liberté. De cette façon, les FTth peuvent être étudiées correctement.

Pour fixer la valeur d'un paramètre, nous l'avons tout d'abord introduit comme paramètre à ajuster dans la FTth. La valeur de ce paramètre a donc été ajustée sur chaque FTe. Nous avons effectué ensuite une moyenne des différentes valeurs obtenues pour ce paramètre sur l'ensemble des journées ensoleillées sélectionnées de la sélection « PPFd parfait ».

Le choix des paramètres qui seront fixés sera décrit dans la section 5.2.3 «Fonctions de transfert à plusieurs variables».

Pour connaître la valeur optimisée d'un paramètre, nous avons utilisé le logiciel Matlab. Celui-ci optimise ce paramètre pour que la SCE entre la FTe et la FTa soit minimale.

La méthode d'optimisation pour trouver la régression adéquate est basée sur la méthode « interior-reflective » de Newton (voir l'aide de Matlab « lsqnonlin »).

5 Résultats et discussion

5.1 Le co-spectre

Nous représentons à la Figure 12, un exemple typique d'évolution de densités co-spectrales en fonction de la fréquence. La densité co-spectrale de la chaleur sensible est représentée par une ligne continue, celle de la chaleur latente par une ligne pointillée et la densité co-spectrale théorique obtenue par l'équation de Kaimal, (25), par une ligne discontinue. Les trois co-spectres sont normalisés par leur covariance tronquée à 0,01 Hz.

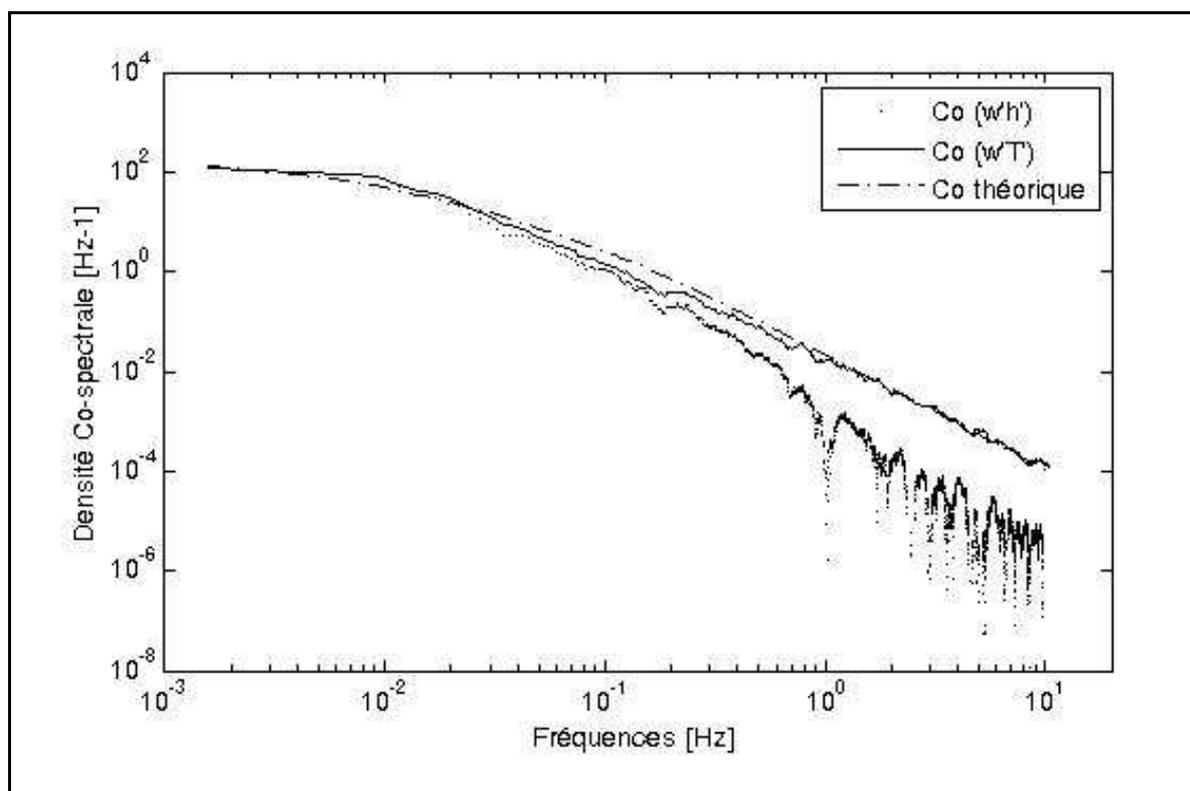


Figure 12 : Evolutions en fonction de la fréquence des densités co-spectrales obtenues le 20 juin 2005.
Légende : Trait discontinu : théorique, Points : densité co-spectrale expérimentale de la vapeur d'eau,
Trait continu : densité co-spectrale expérimentale de la chaleur sensible.

Nous observons, tout d'abord, que le co-spectre de la chaleur sensible correspond bien au co-spectre théorique. Toutefois, pour chaque journée présélectionnée, il existe tout de même systématiquement une faible différence entre ces deux co-spectres pour des valeurs de fréquence autour de 0,1 Hz. Cette différence est à relativiser étant donné que l'incertitude portant sur le co-spectre théorique de Kaimal débute à une fréquence de 1 Hz et s'amplifie avec les fréquences décroissantes, (voir Figure 1). Cette différence entre le co-spectre de la chaleur sensible et le co-spectre théorique s'expliquerait pour différentes raisons, tel que la topographie du site, les caractéristiques du terrain, la durée des mesures limitées à 30 minutes, et peut-être d'autres raisons inconnues jusqu'à présent. Amiro (1990) observe

également que la densité co-spectrale de flux mesurés au-dessus d'une forêt possède cette sous-estimation typique.

Le spectre de Kaimal a été obtenu sur base d'expériences effectuées au Kansas, sur un site plat et sans végétation (donc avec une rugosité de surface réduite) or nous étudions les co-spectres des flux turbulents au-dessus d'une canopée. L'hétérogénéité, la rugosité et la topographie du terrain ne sont pas semblables dans les deux cas. Ceci pourrait expliquer les faibles différences observées ici entre les deux co-spectres. Ces effets d'hétérogénéité, de rugosité et de topographie du terrain se réduiraient avec une tour de mesure plus haute.

Signalons cependant que la fonction de transfert est calculée en comparant les co-spectres de chaleur sensible et de chaleur latente, affectés de manière identiques par les caractéristiques du terrain et de la végétation. Elle n'est donc pas affectée par les différences relevées plus haut entre les co-spectres théoriques et expérimentaux. C'est pourquoi il est préférable de calculer la fonction de transfert sur base du co-spectre de la chaleur sensible plutôt que sur base du co-spectre théorique de Kaimal.

Pour ces raisons d'approximation en basses fréquences et de conditions expérimentales différentes, il est préférable de calculer la fonction de transfert sur base du co-spectre de la chaleur sensible plutôt que sur base du co-spectre théorique de Kaimal.

Cette figure fait également apparaître clairement l'atténuation de la densité co-spectrale de la chaleur latente dans les hautes fréquences. Cette atténuation débute en moyenne vers une fréquence de 0,015 Hz et croît avec la fréquence. Le rapport de ces deux co-spectres permet d'étudier la fonction de transfert.

5.2 Analyse de la fonction de transfert

L'impact potentiel de plusieurs facteurs atmosphériques sur la fonction de transfert a été analysé. Nous avons ainsi testé l'existence d'une relation entre les paramètres des FTa et la vitesse du vent, la température, l'humidité relative (HR), le déficit de pression de vapeur (VPD), la température de rosée, la vitesse de friction ainsi que le PPFD. Une relation se dessine uniquement avec les facteurs représentant l'humidité de l'air, c'est-à-dire pour le HR, le VPD et la température de rosée. Ce résultat est conforme à ce qui a été présenté précédemment, c'est-à-dire que la fonction de transfert ne dépend que du dispositif de mesure et pas des conditions météorologiques, à l'exception de l'humidité de l'air dans le cas des flux de la vapeur d'eau.

5.2.1 Facteurs de l'humidité de l'air

Le VPD, le déficit de pression de vapeur (Vapour Pressure Deficit), est la différence entre la tension de vapeur saturante et la tension de vapeur de l'air, c'est-à-dire la différence entre l'humidité maximale que peut contenir l'air et l'humidité contenue dans l'air. Le VPD indique de cette façon si l'air est à proximité de la condensation.

$$VPD = e_s - e \quad (28)$$

Avec e , la pression de vapeur [Pa], qui est mesurée par un capteur sur le site.

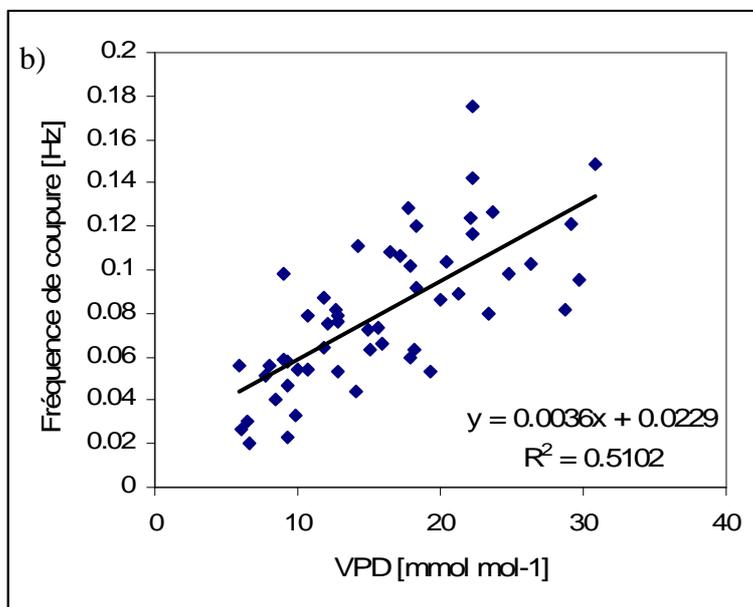
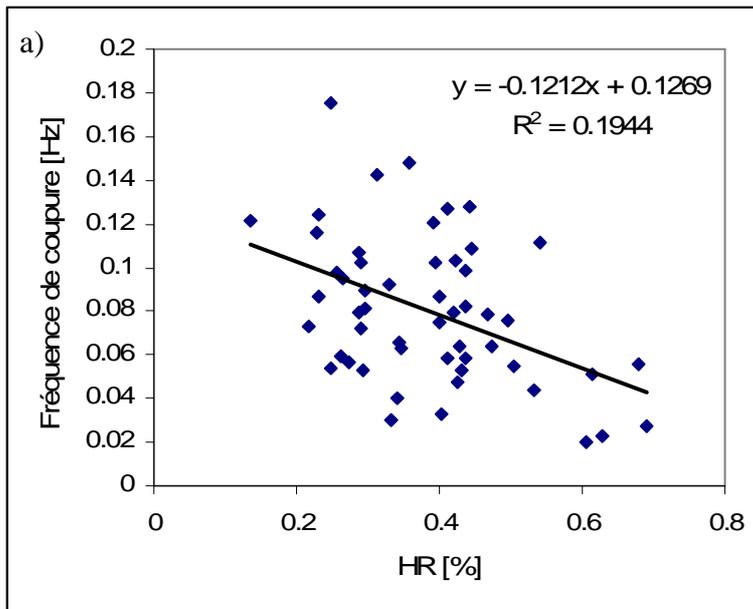
e_s , la pression de vapeur saturante [Pa], qui dépend essentiellement de la température de l'air selon la fonction suivante, (Aubinet, 1999) :

$$e_s(T_a) = 613,65 \cdot \exp\left\{17,502 \cdot \frac{T_a - 273,16}{T_a - 32,19}\right\} \quad (29)$$

Avec T_a , la température de l'air, [K]

Dans ce travail, nous exprimerons le VPD dans les mêmes unités que la fraction molaire [mmol mol^{-1}] en divisant les pressions de vapeur par la pression atmosphérique.

Les trois variables, le HR, le VPD et la température de rosée, représentent toutes les trois l'humidité de l'air. Sur la Figure 13, nous avons représenté l'évolution de la fréquence de coupure selon ces trois variables. Les fréquences de coupure de ces trois graphiques ont été calculées avec l'équation à pente réduite (26) avec pour unique paramètre la fréquence de coupure (méthode expliquée à la section suivante).



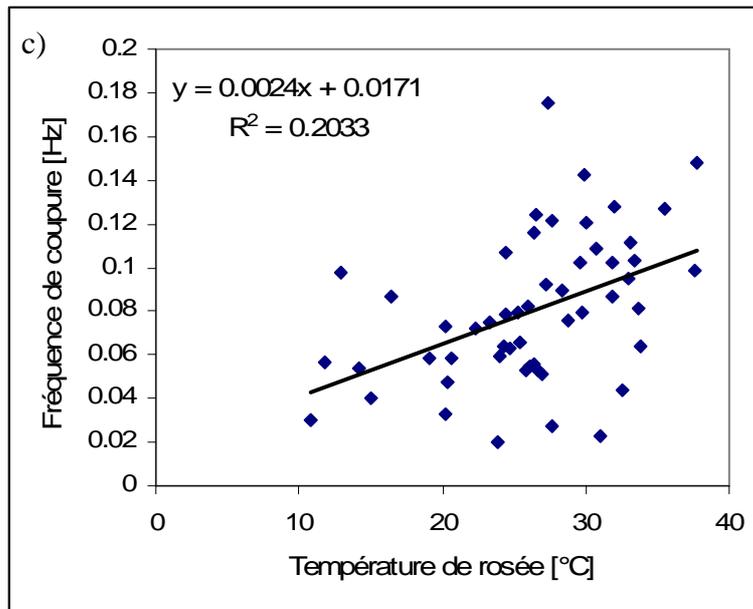


Figure 13 : Evolution de la fréquence de coupure calculée sur base de l'équation (26) à un paramètre en fonction a) de l'humidité relative, b) du VPD, c) de la température de rosée

Une régression linéaire nous permet de comparer l'évolution de la fréquence de coupure selon les trois facteurs atmosphériques. Le coefficient de détermination nous montre que le VPD dessine la meilleure régression avec la fréquence de coupure. Nous continuerons donc à analyser l'humidité de l'air sur base du VPD.

Ces mêmes relations pour les fréquences de coupure et les variables des autres FTth, ont également été analysées. Le résultat est similaire et donc non représenté dans ce document.

5.2.2 Fonction de transfert selon le VPD

Nous présentons en Figure 14, les fonctions de transfert obtenues par moyennes des FTe de la sélection « PPFd parfait » dans cinq classes de VPD : entre 5 et 10, entre 10 et 15, entre 15 et 20, entre 20 et 25 et entre 25 et 30 mmol mol⁻¹.

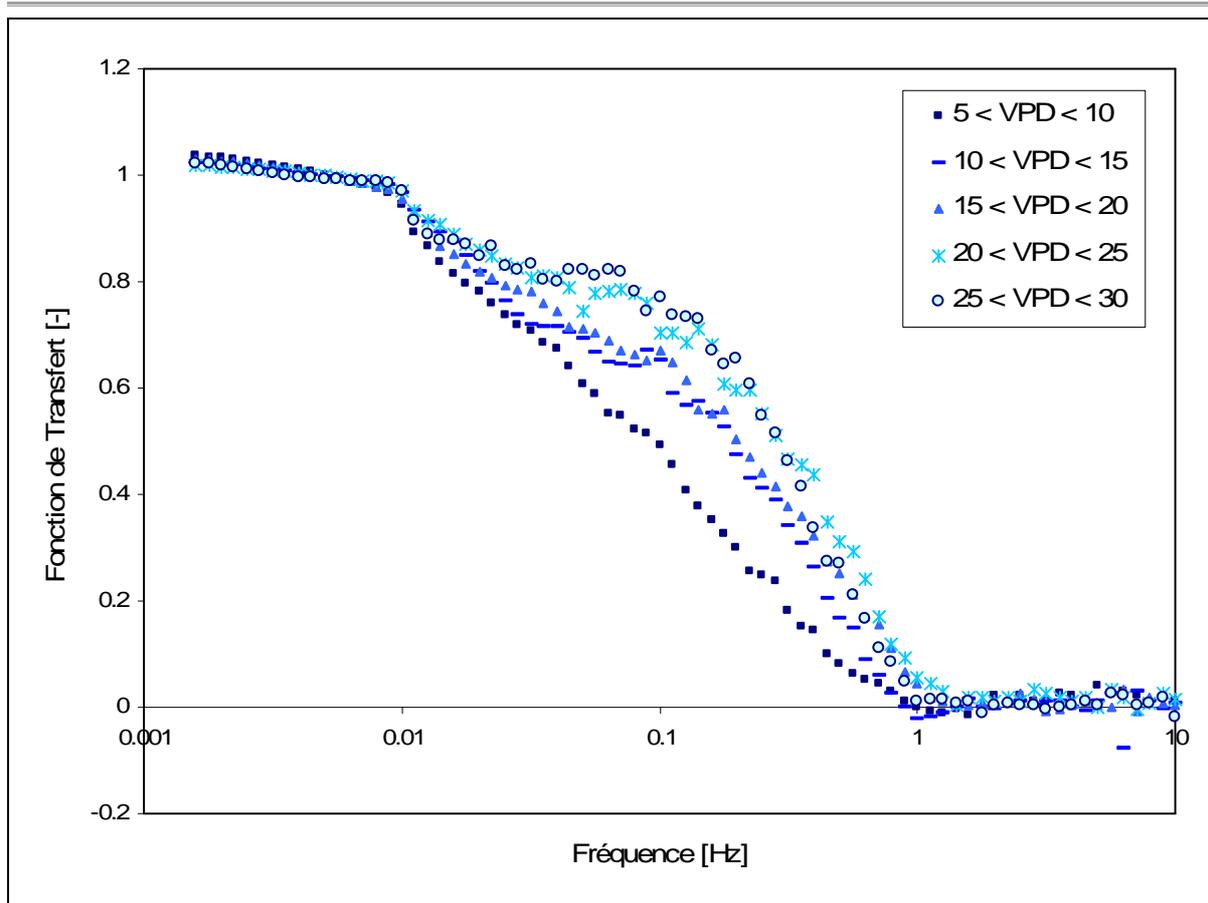


Figure 14 : Fonctions de transfert expérimentales regroupées par classe de VPD

Il apparaît bien une dépendance de la fonction de transfert au VPD. Nous observons en particulier que les FTe obtenues sous un VPD supérieur à 10 mmol mol^{-1} semblent être caractérisées par un palier intermédiaire dont la hauteur croît avec le VPD. De même, la fréquence de coupure est également croissante avec le VPD. Ceci était prévisible puisque les journées à VPD élevés étaient des journées sèches. Il y a dans ce cas moins de vapeur d'eau dans l'air. Le phénomène adsorption-désorption est diminué et l'atténuation de la densité co-spectrale est donc moindre, ce qui se traduit par une fréquence de coupure plus élevée déplaçant le filtre passe-bas vers les hautes fréquences.

Les intervalles de confiance ont été calculés pour des moyennes de dix fonctions de transfert. Ces valeurs d'intervalles sont plus importantes pour la partie de la fonction de transfert située aux alentours de 0,1 Hz. Cependant, ils restent assez faibles que pour avoir des courbes significativement différentes. Nous pouvons donc en conclure que l'évolution de la hauteur du palier et de la fréquence de coupure avec le VPD est significative.

Pour savoir si cet aspect de la fonction de transfert ne serait pas propre au site, nous avons reproduit la même analyse sur le site de culture de Lonzée. Ce site est équipé depuis 2004 d'un dispositif de mesure similaire à Vielsalm mais sur un champ de culture avec une rotation de quatre ans (betteraves, blés, pommes de terre, blés). Ce site a débuté en 2004. Les Figure 15 a), b), c) représentent les FTe et FTa (selon l'équation (26)) pour trois journées avec un PPFd parfait. Les trois journées sélectionnées présentent toutes un palier similaire à

celui observé pour Vielsalm. Cet aspect n'est donc pas uniquement propre au site de Vielsalm, ce qui renforce l'utilité de l'insertion de la quatrième FTth (27) modélisant ce palier. Les fonctions de transfert de Loncée ne seront pas analysées plus en détail dans ce travail. Elles ont été calculées dans le simple but de tester l'existence de ce palier de FTe sur un autre site que celui de notre étude. Cette observation du palier est innovante, aucune littérature à notre connaissance ne mentionne ce résultat.

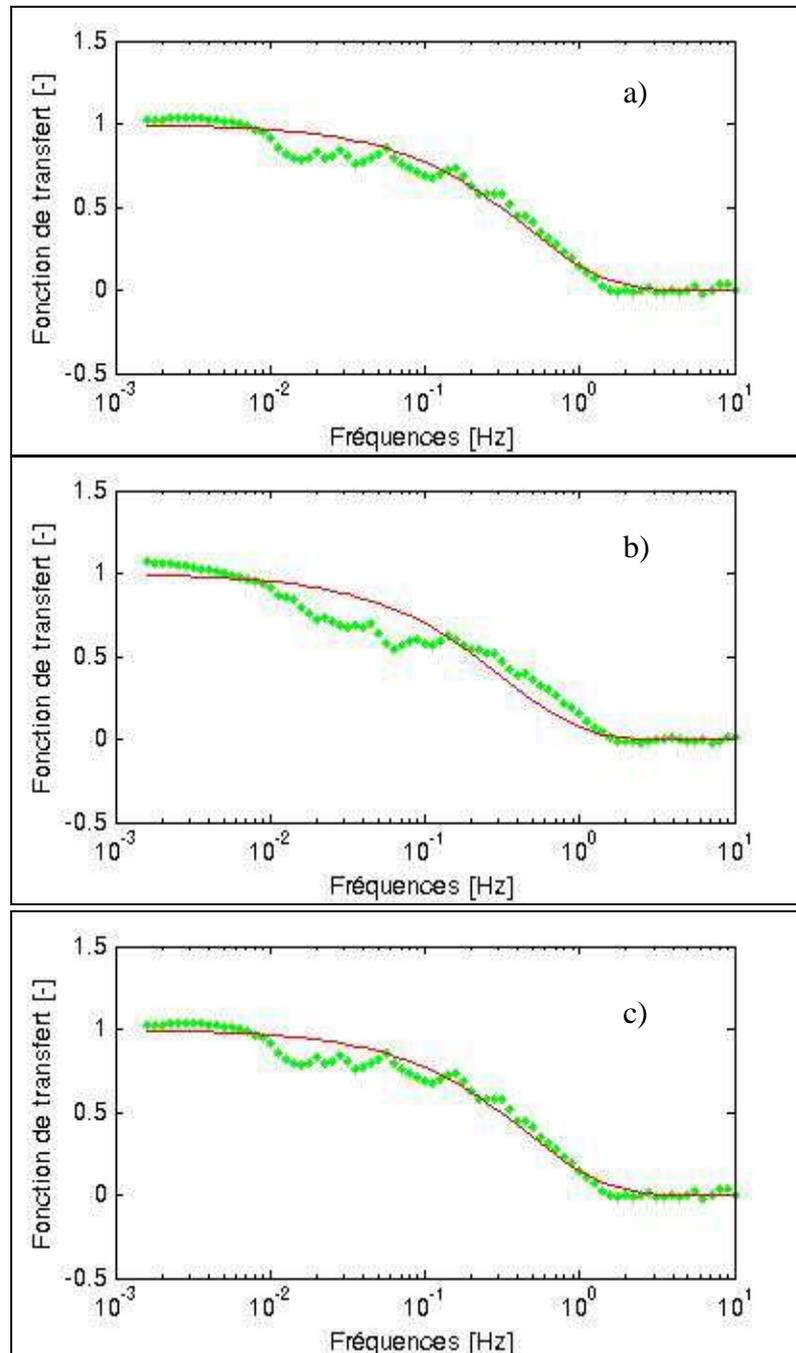


Figure 15 : Fonction de transfert de la chaleur latente expérimentale (ligne pointillée) et ajustée par l'équation (26) (ligne continue) sur le site de Loncée pour les journées a) 30 août 2005, b) 12 octobre 2005 et c) 13 octobre 2005.

5.2.3 Fonctions de transfert à plusieurs variables

Afin d'étudier plus en détail la dépendance de la fonction de transfert au VPD, nous voulons d'abord identifier quelle FTth est la plus qualifiée pour représenter la FTe.

Une représentation graphique des FTe et FTa moyennées sur l'ensemble des journées sélectionnées est donnée à la Figure 16 pour la sélection « PPFd parfait » sur le site de Vielsalm, et ce pour chacune des quatre équations de FTth. Sur cette figure, nous présentons pour les quatre équations FTth, la FTa en trait continu et la FTe en trait pointillé.

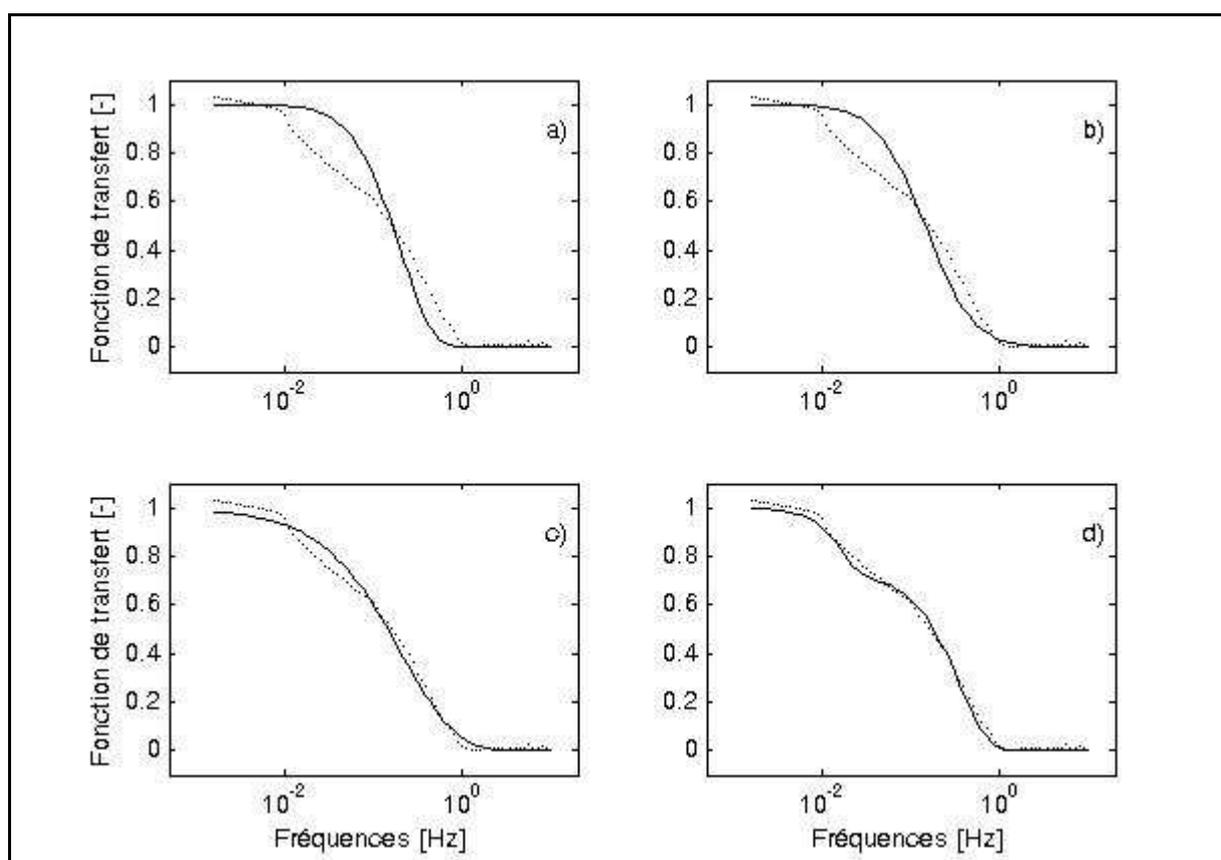


Figure 16 : Les quatre équations des fonctions de transfert ajustées (traits pleins) comparées aux fonctions de transfert expérimentales moyennées (traits pointillés), a) équation (22), Aubinet et al., 2000, b) équation (23), Eugster et Senn, 1995, c) équation (26), d) équation (27). La FTe est moyennée pour l'ensemble des journées avec PPFd parfait.

Sur base de la Figure 16, il semble évident que les FTth à pente adoucie (26) et à palier (27) sont plus adaptées pour l'ajustement sur la FTe.

Nous voudrions poursuivre la comparaison de façon plus approfondie et modéliser la dépendance des paramètres au VPD. Pour rendre cette comparaison possible, il est souhaitable de ramener toutes les FTth au même nombre de paramètres. Nous allons donc d'abord chercher dans les deux sous-sections suivantes à ramener les équations à pente réduite (26) et à palier (27) à un seul paramètre.

5.2.3.1 Equation à pente réduite (26)

Il est facile pour l'équation à pente réduite (26) de revenir à un paramètre car l'exposant x n'est pas dépendant du VPD. La Figure 17 montre l'évolution de ce paramètre x calculée pour la FTth (26) en fonction du VPD. Il existe une faible tendance que nous estimons comme négligeable.

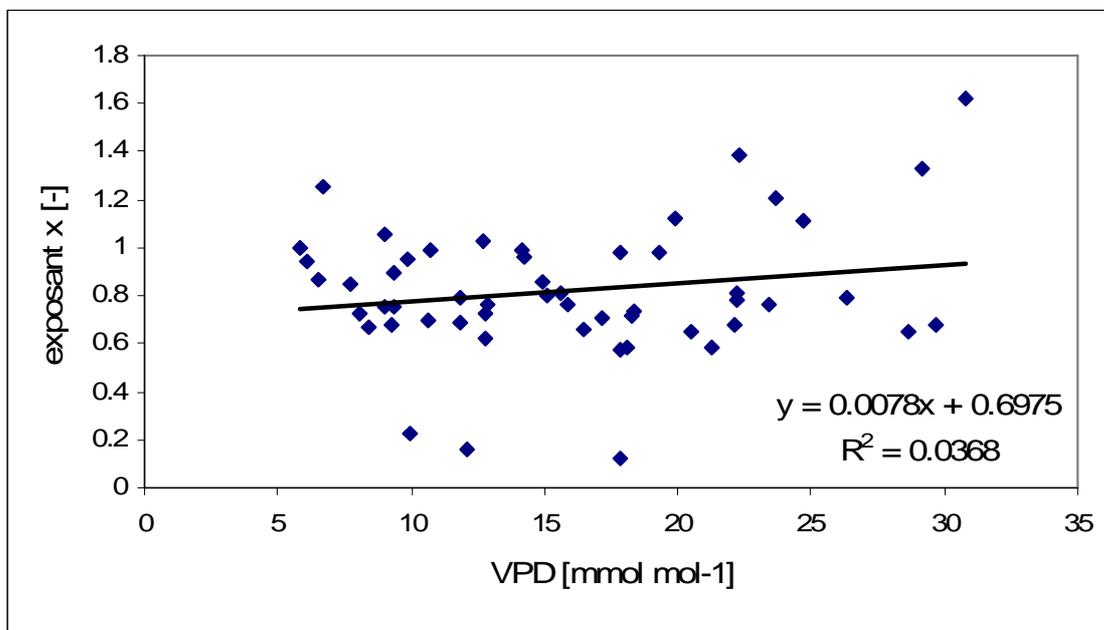


Figure 17 : Evolution du paramètre x de l'équation (26) en fonction du VPD

Nous décidons donc de fixer ce paramètre x . Pour cela, nous effectuons une moyenne des valeurs x calculées pour chaque journée présélectionnée. Nous obtenons une valeur de x valant **0,8597 [-]**. Nous travaillons dès lors sur un ajustement à un degré de liberté.

5.2.3.2 Equation à palier (27)

Les valeurs de f_{col} calculées par l'équation à palier (27) avec trois paramètres, sont également indépendantes du VPD, (Figure 18). La moyenne du paramètre f_{col} vaut dans cette situation **0,01586 Hz**. Nous fixons donc ce paramètre et nous nous rabattons sur une équation à palier (27), ne contenant plus que deux paramètres.

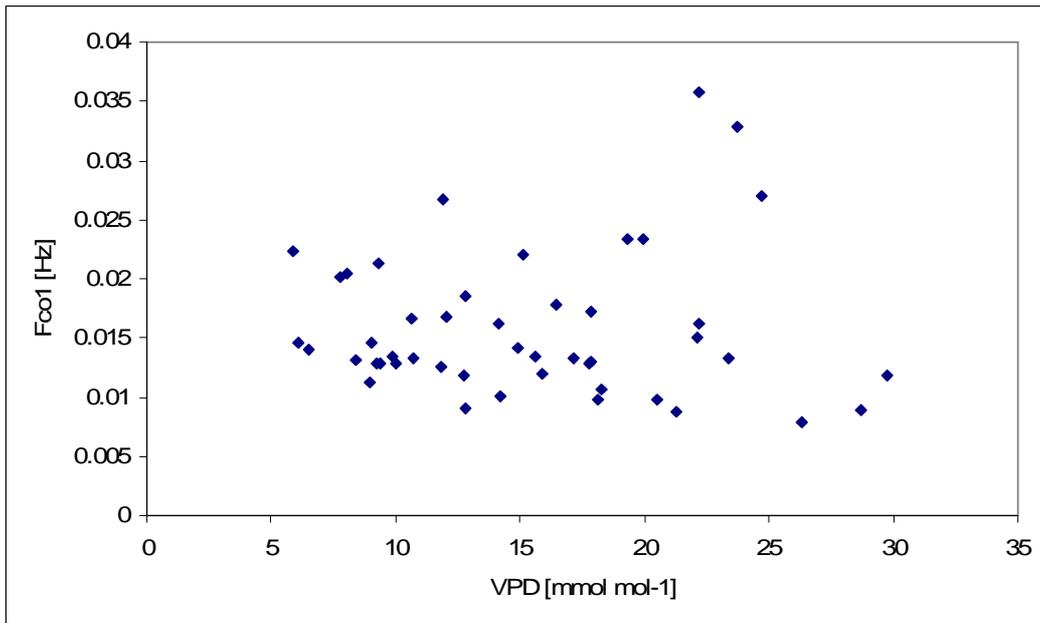


Figure 18 : Evolution de f_{co1} en fonction du VPD pour l'équation à palier (27) contenant trois paramètres, f_{co1} , f_{co2} et α

Les deux paramètres restants, f_{co2} et α recalculés avec le f_{co1} fixé sont tous les deux dépendants du VPD, comme montrés aux Figure 19 et Figure 20.

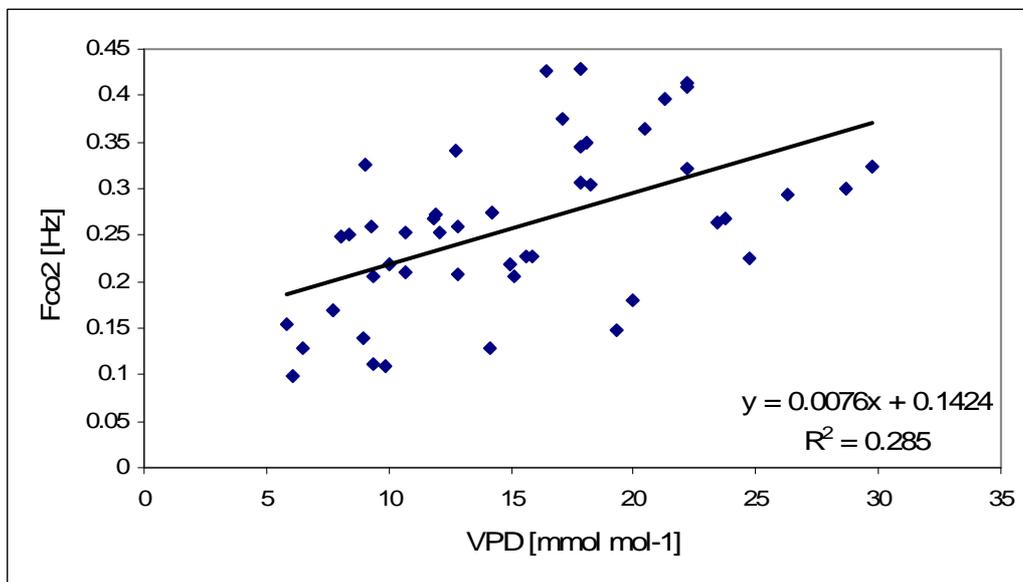


Figure 19 : Evolution de f_{co2} en fonction du VPD pour l'équation à palier (27) contenant comme paramètres, f_{co2} et α

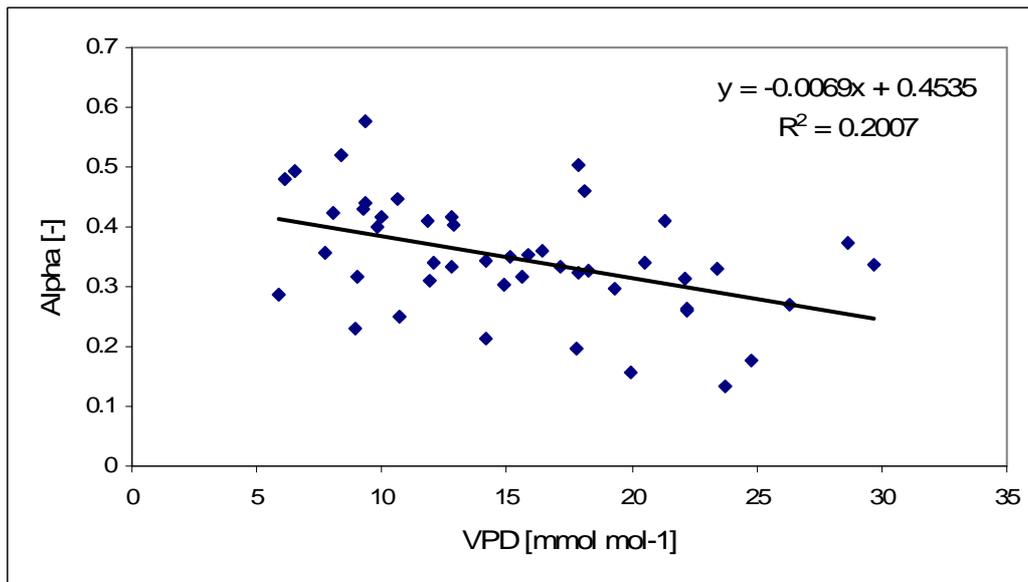


Figure 20 : Evolution de α en fonction du VPD pour l'équation à palier (27) contenant comme paramètres, f_{co2} et α

Néanmoins, il n'existe pas de relation entre f_{co2} et α ; nous pouvons le constater à la Figure 21 :

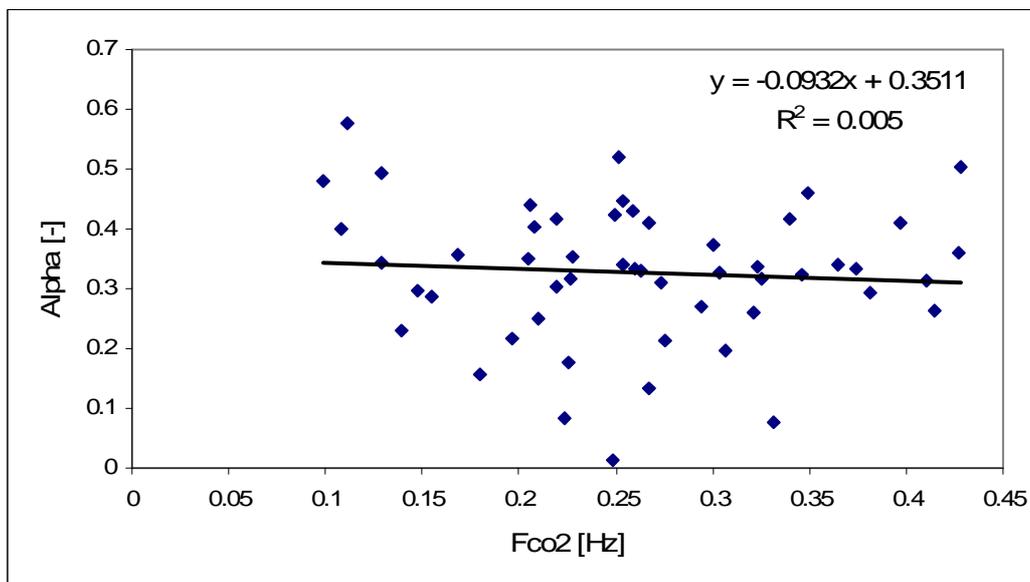


Figure 21 : Evolution de α en fonction de f_{co2} , tous les deux calculés pour l'équation à palier (27) contenant deux variables

Cette indépendance des deux paramètres montre qu'ils sont tous les deux nécessaires à la construction de la FTa en fonction du VPD. Cependant, nous voulons comparer les FTth sur le même pied d'égalité, nous ramenons donc les FTth à un paramètre. Ceci nous permet également d'étudier les deux paramètres indépendamment. Nous calculons une moyenne de ces deux paramètres, f_{co2} et α . Ces moyennes sont calculées à partir des valeurs ajustées et valent respectivement **0,2597 Hz** et **0,3470 [-]**. Nous nommerons l'équation (27) avec

f_{co_2} paramétré et α fixe : « (27) var f_{co_2} » et l'équation (27) avec α paramétré et f_{co_2} fixe : « (27) var α ».

La FTth à deux paramètres f_{co_2} et α , nommée « (27) var αf_{co_2} » sera analysée après la comparaison des FTth à un paramètre.

Précisons que pour calculer ces valeurs moyennes de paramètres, nous avons supprimé quelques valeurs d'ajustement (quelques jours) considérées comme non réalistes. Nous nous permettons de retirer ces journées uniquement pour calculer les valeurs des paramètres.

5.2.4 Comparaison des fonctions de transfert ajustées

Après avoir réduit le nombre de paramètres à l'unité pour toutes les FTth, nous pouvons comparer la qualité de l'ajustement pour ces cinq équations. Pour chaque journée sélectionnée, la SCE entre la FTe et la FTa est calculée. Les SCE sont ensuite sommées sur l'ensemble des journées sélectionnées. Les résultats sont donnés pour les cinq FTth au Tableau 3.

Tableau 3 : Sommes des carrés des écarts des FTa et des FTe pour la sélection « PPFd parfait » pour les cinq FTth

FTth	(22)	(23)	(26)	(27) var f_{co_2}	(27) var α
Σ SCE [-]	68,9	45,9	20,5	20,1	18,7

Il apparaît clairement que les équations (26) et (27) construites pour les flux de vapeur d'eau modélisent plus fidèlement la fonction de transfert que les équations (22) et (23). Ceci confirme la conclusion déjà obtenue visuellement à la Figure 16. Par contre, cette analyse ne montre pas de qualité d'ajustement sensiblement différente entre les équations (26) et (27), (test statistique à la section suivante). Nous considérerons qu'elles présentent des ajustements de qualité équivalente.

La somme des SCE de l'équation de FTth (27) var αf_{co_2} est de 11,1 [-] donc plus faible que les précédentes mais cette valeur est plus faible en raison du plus grand nombre de degrés de liberté dans l'ajustement (deux degrés de liberté au lieu d'un). L'équation n'est donc pas comparable aux Σ SCE des autres FTth. Nous tentons d'abord de comparer les équations (26) et (27) sur un pied d'égalité, c'est-à-dire avec seulement un paramètre.

Nous avons également effectué la même démarche pour une sélection de journée moins rigoureuse (sélection « PPFd correct »), acceptant donc des journées avec une courbe de PPFd qui est légèrement irrégulière. Les résultats de cette sélection montrent des relations semblables à celles de la sélection « PPFd parfait » mais avec une plus grande variabilité. Nous avons fait de même avec la sélection « Seuil » qui montre des résultats avec une

variabilité encore plus importante. Nous avons donc mis de côté les analyses avec ces deux sélections élargies.

5.2.4.1 Tests statistiques

Nous comparons ces sommes de SCE du Tableau 3, en analysant non plus la somme mais la moyenne des SCE pour l'ensemble des journées sélectionnées.

L'hypothèse de l'égalité des cinq moyennes est rejetée par le test d'analyse de la variance à deux paramètres (AV2) croisée mixte. Par contre, si cette même analyse est effectuée pour les moyennes des trois dernières FTth, l'hypothèse d'égalité des moyennes est acceptée. Ces analyses se font par le test F de SNEDECOR (Dagnelie, 1991).

La méthode Gupta est également effectuée sur les cinq FTth et confirme l'égalité des moyennes pour les FTth (26), (27) var f_{co2} , (27) var α .

Nous avons effectué ces tests grâce au logiciel Minitab 15.

5.2.5 Fonctions de transfert modélisées

Nous avons construit jusqu'à présent les FTa sur base de la fréquence de coupure calculée par optimisation pour chacune des journées. Néanmoins, nous voulons modéliser entièrement la FTe et pouvoir la construire sur base d'une relation entre le VPD et le paramètre de la FTth (fréquence de coupure, inductance ou α).

Tout d'abord, nous devons établir cette relation. Elle va permettre de déterminer le paramètre de la FTth à partir du VPD. Ce paramètre sera par la suite injecté dans les FTth afin de créer des fonctions de transfert modélisées, notées « FTm ».

5.2.5.1 Relation linéaire

Nous avons établi deux types de régression, linéaire et non linéaire. Nous commençons par une régression du type linéaire suivant l'équation suivante :

$$f_{co} = a \cdot VPD + b \tag{30}$$

Les valeurs des paramètres de cette équation diffèrent pour les cinq équations de FTth. L'équation vaut respectivement pour les équations (22), (23), (26) et (27) var f_{co2} et (27) var α :

$$f_{co} = 0,006743 \cdot VPD + 0,03557$$

$$L_{self} = -0,06972 \cdot VPD + 2,297$$

$$f_{co} = 0,003606 \cdot VPD + 0,0229$$

$$f_{co2} = 0,0103 \cdot VPD + 0,1007$$

$$\alpha = -0,0153 \cdot VPD + 0,5939$$

Pour la FTth à palier (27) avec deux paramètres variables, les relations sont :

$$f_{co2} = 0,0076 \cdot VPD + 0,1424$$

$$\alpha = -0,0069 \cdot VPD + 0,4535$$

Nous représentons à la Figure 22, la relation linéaire entre la fréquence de coupure et le VPD uniquement pour les FTm modélisées par les équations (26) et (27) var f_{co2} :

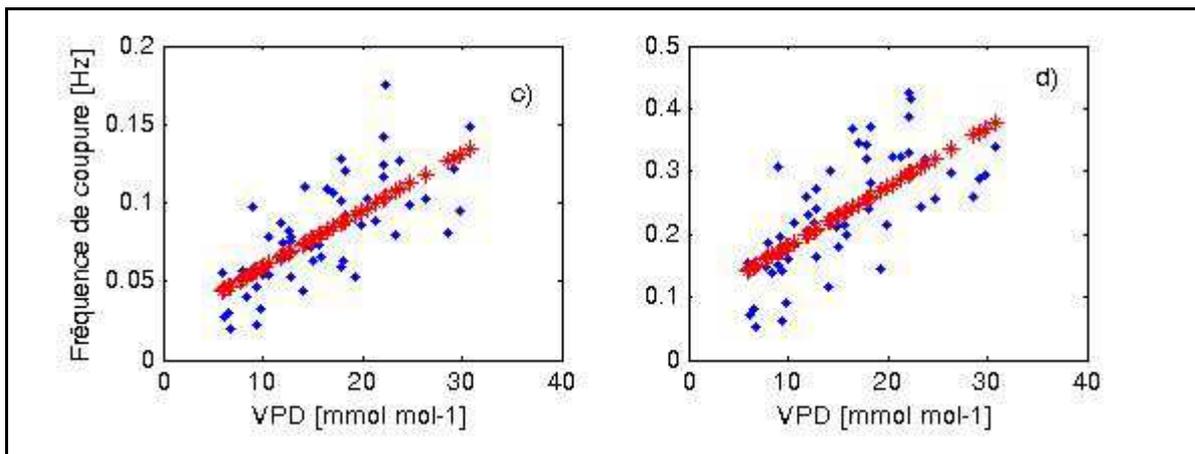


Figure 22 : Régression linéaire de la fréquence de coupure et du déficit de pression de vapeur pour deux équations étudiées, c) équation (26), d) équation (27) var f_{co2} , avec les fréquences de coupure en points et les valeurs de la régression en étoiles.

5.2.5.2 Relation non linéaire

Nous remarquons que les nuages de points de la Figure 22 pour la relation paramètre-VPD ont une tendance à exiger une régression non linéaire avec une légère courbure. De plus, nous nous attendons à ce que la fréquence de coupure tende vers une valeur fixe pour un VPD croissant. Effectivement, un VPD élevé caractérise un échantillon d'air sec ; lorsqu'il y a une réduction du contenu en vapeur d'eau, le phénomène d'adsorption-désorption se minimise. La fréquence de coupure devrait donc tendre vers une valeur fixe (f_{max}) semblable

à celle calculée pour un gaz passif. Pour une valeur de VPD nulle caractérisant un air saturé, la fréquence de coupure vaut la valeur (f_{min}). Cette valeur est théoriquement faible et positive.

Nous envisageons donc de travailler avec une courbe de régression suivant l'équation suivante qui tient compte de ces tendances aux VPD extrêmes :

$$f_{co} = f_{min} + (f_{max} - f_{min}) \cdot \left(1 - \frac{1}{\exp(a \cdot VPD)} \right) \quad (31)$$

Cette relation diffère pour les équations de FTth. Les équations (23) et (27) var α ne seront pas reprises ici car elles exigent une autre fonction pour la relation entre le VPD et respectivement l'inductance et α . Les paramètres valent respectivement pour les équations (22), (26) et (27) var f_{co2} .

$$f_{co} = (-0.05453) + (0,25 - (-0.05453)) \cdot \left(1 - \frac{1}{\exp(0,07229 \cdot VPD)} \right)$$

$$f_{co} = (-0.02109) + (0,1407 - (-0.02109)) \cdot \left(1 - \frac{1}{\exp(0,06772 \cdot VPD)} \right)$$

$$f_{co2} = (-0.1736) + (0,3403 - (-0.1736)) \cdot \left(1 - \frac{1}{\exp(0,1172 \cdot VPD)} \right)$$

Nous représentons à la Figure 23 la relation entre la fréquence de coupure et le VPD uniquement pour les FTm modélisées par les équations (26) et (27) var f_{co2} :

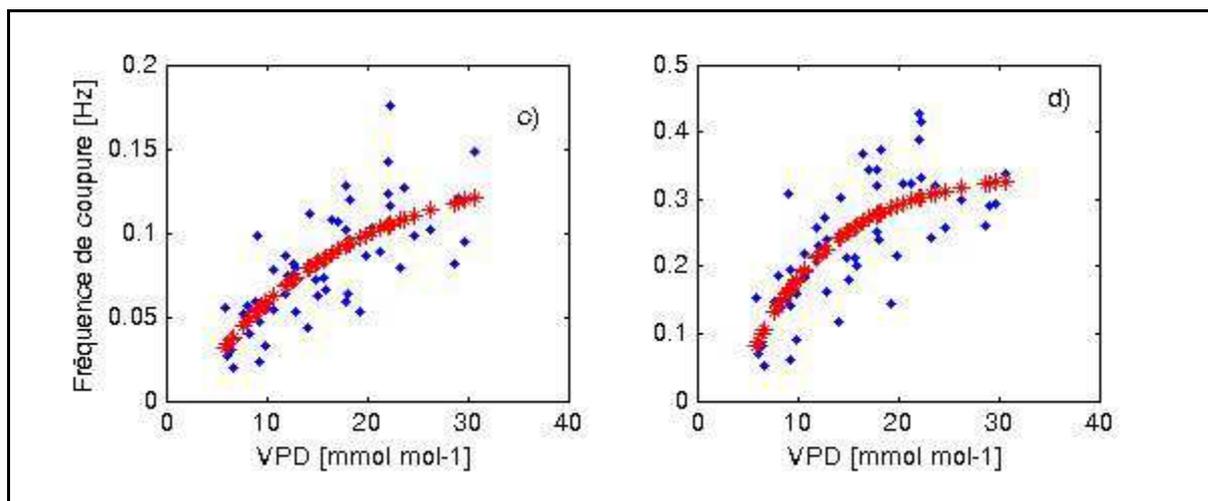


Figure 23 : Régression exponentielle pour la relation entre la fréquence de coupure et le déficit de pression de vapeur pour deux équations étudiées, c) équation (26), d) équation (27) var f_{co2} , avec les fréquences de coupure en points et les valeurs de la régression en étoiles.

Nous pouvons remarquer que les valeurs de f_{min} sont négatives, ce qui n'a pas de sens physiquement. Il aurait fallu plus de journées à faible VPD dans la sélection pour ajuster une régression plus correcte sur les fréquences de coupure de cette catégorie de VPD. Cependant, ces journées sont rares car les faibles VPD représentent des échantillons d'air saturé en vapeur d'eau. Il est moins fréquent de trouver des journées humides et ensoleillées en même temps.

5.2.5.3 Analyse des fonctions de transfert modélisées

Les comparaisons des différentes modélisations sur base des paramètres décrivant la FT (fréquences de coupure, l'inductance pour l'équation (23) et α pour l'équation (27) var α) sont rendues problématiques par la nature différente de ces paramètres.

C'est pourquoi, nous allons analyser les cinq équations étudiées en comparant les FTm modélisées par ces régressions linéaires et non linéaires. Nous pouvons dès lors analyser les cinq équations de FTth et les distinguer l'une de l'autre sur base de la somme des SCE de la FTe et la FTm.

Pour chacune des journées, nous effectuons la somme des carrés des écarts entre la FTe et la FTm. Nous sommes par la suite l'ensemble de ces sommes des carrés des écarts par type d'équations de FTth. Nous obtenons comme résultats les valeurs affichées au Tableau 4 :

Tableau 4 : Sommes des carrés des écarts des FTm pour les cinq FTth

FTth	(22)	(23)	(26)	(27) var f_{co2}	(27) var α
SCE Reg. linéaire [-]	84,3	72,1	30,9	31,3	29,3
SCE Reg. non lin. [-]	82,4	/	29,5	29,7	/

Par les tests F de SNEDECOR et GUPTA, nous remarquons qu'il existe également une égalité des moyennes construites par régression linéaire pour les trois dernières FTth. Pour des VPD variant de 5 à 30 mmol mol⁻¹, la FTth (27) var α représente le plus correctement les FTe (Σ SCE le plus faible avec 29,3), suivi de l'équation de la FTth (26), puis de la FTth (27) var f_{co2} .

L'observation des sommes de SCE décrit que les ajustements obtenus par les FTm non linéaires sont légèrement plus satisfaisants que ceux obtenus par les FTm linéaires. Ils sont donc plus représentatifs de la FTe. Cependant, la différence des sommes de SCE entre les deux méthodes est non significative. Etant donné qu'une catégorie de VPD (0 - 5 mmol mol⁻¹) ne saurait pas être calculée par la régression non linéaire, nous favorisons la régression linéaire, d'autant plus que certains paramètres (l'inductance et α) ne sont pas modélisés par cette régression exponentielle.

Cette analyse nous permet de favoriser, parmi les trois meilleures FTth à un paramètre, la FTth (27) var α . Cependant, nous avons mis de côté la FTth (27) var αf_{co2} à deux paramètres. Maintenant que nous avons comparé les FTth à un paramètre et que nous avons retenu l'équation (27), nous pouvons l'améliorer en y insérant la modélisation des deux paramètres.

Tableau 5 : Somme des carrés des écarts de la FTm pour FTth (27) var αf_{co2}

FTth	(27)var αf_{co2}
SCE Reg. Linéaire [-]	28,50

Nous déduisons par la somme des SCE que cette dernière FTth modélise au mieux la FT en fonction du VPD. Cependant, l'introduction d'un deuxième paramètre n'apporte qu'une légère amélioration. En ayant étudié les paramètres α et f_{co2} individuellement, nous avons pu conclure que l'effet de α est plus conséquent comparé à celui de f_{co2} .

5.2.6 Conclusion du choix de la FTth

En résumé, l'étude des différents facteurs atmosphériques nous mène à travailler sur le VPD pour représenter l'humidité de l'air. Il existe bien une dépendance de la fonction de transfert avec le VPD ; nous observons un déplacement de la fonction de transfert vers les hautes fréquences accompagné d'une courbure qui se forme pour les journées sèches. Ce comportement de la fonction de transfert nous a mené à non seulement modifier la fonction de transfert (22) initiale (qui donne l'équation (26)) mais aussi à concevoir une nouvelle équation modélisant cette courbure observée (l'équation (27)). Ces équations contiennent différents paramètres ; nous les avons ramené à des équations à un paramètre afin de pouvoir les comparer entre elles. Ces paramètres ont été mis en relation avec le VPD pour modéliser intégralement la fonction de transfert. Ces fonctions de transfert ont alors été analysées sur base de la somme des carrés des écarts (SCE) entre la fonction de transfert expérimentale (FTE) et la fonction de transfert modélisée (FTm).

En conclusion, à l'issue de cette analyse qui avait pour but de choisir l'expression de la FTth la plus appropriée pour représenter la FTE et sa dépendance au VPD, nous constatons que

- les FTth (26), (27) var f_{co2} et (27) var α se comportent mieux que les FTth « classiques », (23) et (24).
- La régression linéaire entre le paramètre de la FTth et le VPD est plus robuste que la régression non-linéaire.
- L'analyse statistique ne permet pas de dégager de manière nette la meilleure de ces trois nouvelles FTth. La FTth (27) var α reste préférable. Etant donné que dans l'équation (27) les paramètres α et f_{co2} se complètent, nous améliorons la FTth (27) var α en y insérant le paramètre f_{co2} .

Nous concluons donc que le meilleur outil pour calculer le facteur de correction est la FTth (27) var αf_{co2} .

5.3 Evolution temporelle de la fonction de transfert

Nous avons établi jusqu'à présent une relation entre la fréquence de coupure et le VPD. Cependant, derrière cette influence du VPD, d'autres phénomènes pourraient également avoir une influence sur la fréquence de coupure, tels que l'encrassement des filtres ou du tube qui est proportionnel à leur âge. Nous allons donc étudier l'origine des résidus de la relation f_{co} -VPD. Pour effacer la dépendance de la fréquence de coupure au VPD, nous calculons une fréquence de coupure que nous ramenons à un VPD standard. La valeur de ce VPD standard est de 15 mmol mol^{-1} .

5.3.1 L'encrassement des filtres

Nous connaissons les dates de changement du filtre à l'entrée du tuyau. Nous pouvons donc connaître l'âge du filtre pour chaque journée sélectionnée. La Figure 24 donne l'évolution de la fréquence de coupure pour un VPD standardisé en fonction de l'âge du filtre. Ces fréquences de coupure sont calculées pour la FTth à pente réduite (26), étant donné que l'équation (27) est définie par deux paramètres, et que chacun d'eux caractérise la FT sur une gamme de fréquences différente. La FTth (26) n'a pas été retenue comme idéale mais le test statistique ne la rejette pas en soi. La fréquence de coupure de cette FTth caractérise à elle seule la FT sur toute la bande spectrale ; elle est donc plus facile à utiliser pour d'autres analyses comme celle de l'encrassement.

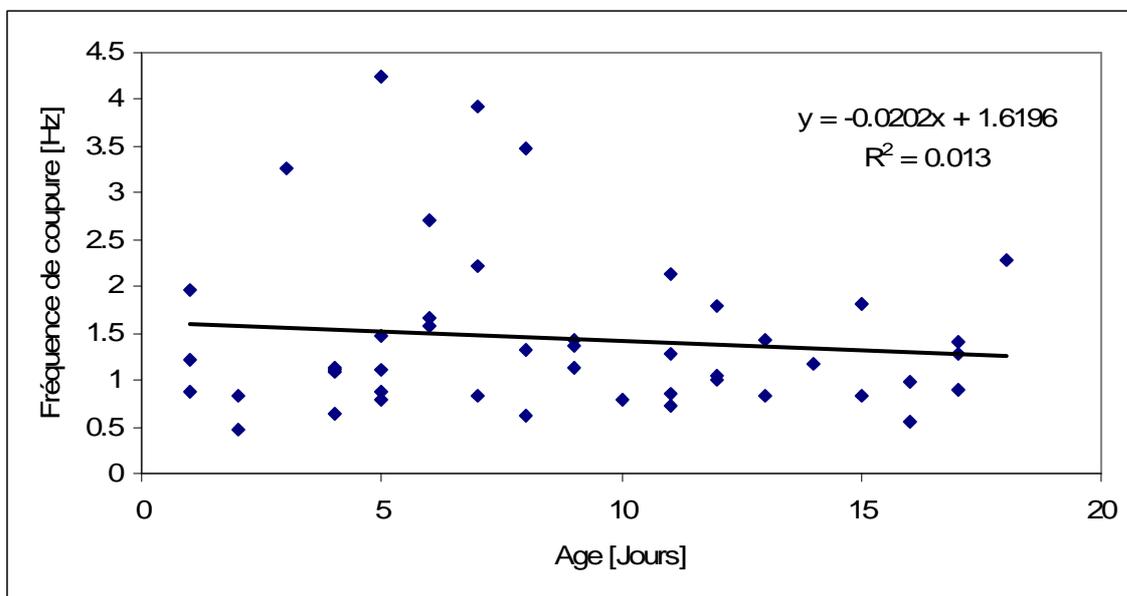


Figure 24 : Evolution de la fréquence de coupure ramenée à un VPD standardisé, calculée pour l'équation à pente réduite (26) en fonction de l'âge des filtres

Une légère tendance à la réduction de la fréquence de coupure avec l'âge du filtre semble apparaître. Cette tendance serait cohérente qualitativement avec la théorie détaillée à la section 3.2, «

Atténuation des fluctuations ». Une augmentation d'encrassement devrait entraîner une augmentation de frottements et donc également une augmentation de l'atténuation du signal de densité co-spectrale aux hautes fréquences. Ceci se traduirait par une fréquence de coupure plus petite.

Néanmoins, vu les faibles valeurs du coefficient de détermination et de la pente de la droite, nous devons conclure qu'il n'existe pas de relation entre la fréquence de coupure et l'âge du filtre pour cette tranche d'âge. La raison en est sans doute que le filtre est la plupart du temps changé suffisamment tôt que pour éviter un encrassement marqué.

5.3.2 L'encrassement du tube

Nous tentons également d'analyser un éventuel impact du vieillissement du tube. Le dispositif possède le même tube depuis douze ans. Celui-ci a déjà réceptionné des écoulements d'eau suite à des problèmes techniques. A l'exception de ces écoulements non désirés, le tube n'a jamais été nettoyé.

Afin de pouvoir effectuée la même analyse que celle d'une autre recherche (Mammarella et al., comm. pers.), nous avons dans cette sous-section travaillé avec la sélection « Seuil » décrite précédemment (voir section 4.4.1.3). Effectivement, notre sélection « PPFD Parfait » ne retient pas assez de données pour pouvoir effectuer cette analyse. Nous l'avons appliquée à deux années seulement en raison du caractère non automatique de cette sélection de données engendrant un travail conséquent.

Nous comparons la première année de données complètes avec la dernière année, c'est-à-dire, 1997 et 2007 que nous analysons par le temps de réponse. Celui-ci se calcule comme ci-dessous :

$$\tau = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{co}} \quad (32)$$

La Figure 25 représente la relation entre le temps de réponse et le VPD pour les flux de vapeur d'eau des années 1997 et 2007.

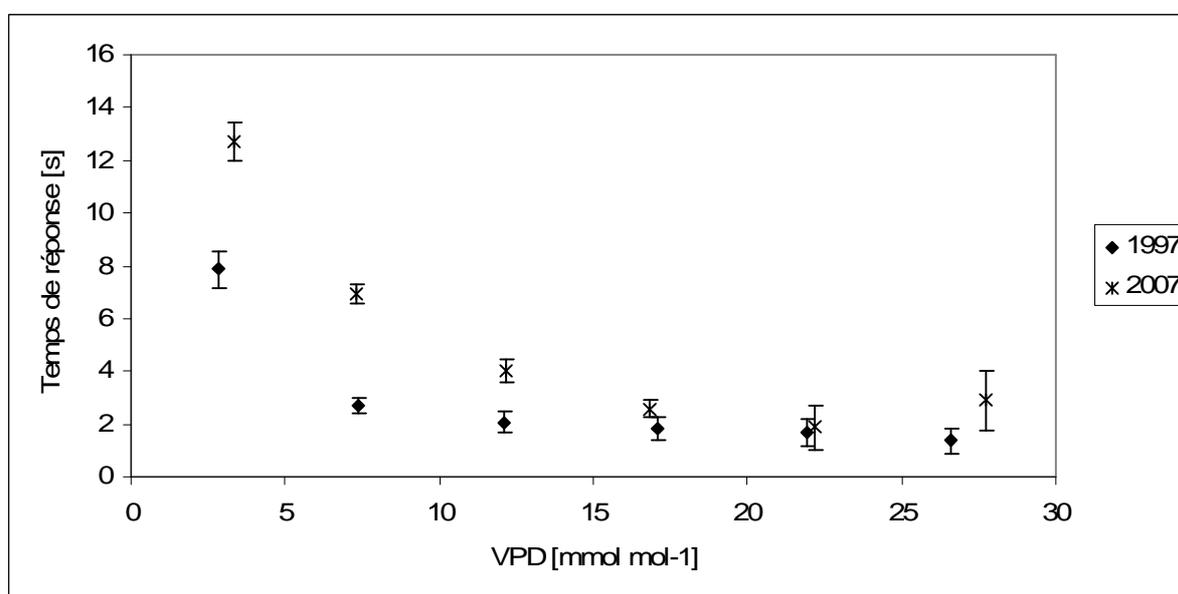


Figure 25 : Evolution du temps de réponse en fonction du VPD pour les années 1997 et 2007 et leurs intervalles de confiance à 95% de la moyenne.

Nous remarquons pour les deux années une augmentation du temps de réponse (i.e. une diminution de la fréquence de coupure) pour des VPD décroissants. Ceci signifie que les phénomènes d'adsorption-désorption sur les parois du tuyau jouent un rôle, même pour le

tube plus propre. Il faut noter que, les mesures ayant débutées en été 1996, le tube présente déjà au minimum 5 mois d'utilisation pour l'année 1997 ce qui peut expliquer un encrassement partiel des parois du tube. De plus, les temps de réponse sont systématiquement plus importants pour un tube plus âgé que pour un tube neuf. Ceci est cohérent avec l'idée d'un encrassement graduel du tube avec les années.

Mammarella et al., comm. pers., ont effectué récemment une étude concernant l'impact de l'âge du tube sur l'atténuation du flux de vapeur d'eau dans les hautes fréquences. Ils ont mis en évidence qu'il existait un encrassement très rapide de leur tube d'échantillonnage. Cet encrassement atténue fortement le flux de vapeur d'eau pour les échantillons d'air chargés en vapeur d'eau. Nos résultats confirment qualitativement cet effet. Cependant, contrairement à notre situation, l'étude de Mammarella et al., comm. pers., se porte sur un dispositif de mesure ne contenant pas de filtre à l'entrée du tube mais uniquement à la sortie de celui-ci. En conséquence, leur tube s'encrasse très rapidement. Ceci expliquerait l'atténuation plus importante pour leur dispositif de mesure.

Nous aurions dû idéalement effectuer les analyses précédentes de fonction de transfert par année afin de limiter la variabilité de l'encrassement du tube. Néanmoins, une analyse plus fine de l'encrassement du tube se heurte au faible nombre de journées disponibles pour l'analyse spectrale après application de la sélection « PPFD parfait » (53 sur 11 ans). Pour cette raison, il est difficile d'étudier cet effet année après année pour la sélection « PPFD parfait ».

En conclusion, si un impact du vieillissement des filtres n'a pas pu être détecté, nous avons des indices permettant de penser qu'un impact du vieillissement du tuyau existe. Cette analyse devrait être reproduite pour les douze années de mesure afin d'affiner cette conclusion concernant l'impact de l'encrassement du tube sur l'atténuation du flux. Toutefois, pour notre site, l'encrassement du tube ne devrait pas être si conséquent puisque nous avons un filtre régulièrement changé.

5.4 Calcul du facteur de correction (FC)

Le facteur de correction se calcule comme défini à l'équation (24). Nous y intégrons l'équation de la FTth ainsi que la relation entre le paramètre de la FTth et le VPD. Les valeurs du VPD et de la vitesse du vent sont donc les seules variables du facteur de correction.

Le Tableau 6 affiche les moyennes des facteurs de correction pour nos 53 journées répondant à la sélection « PPFd parfait ». Les fréquences de coupures introduites dans le FC ont été calculées selon la relation linéaire paramètre-VPD établie à la sélection 5.2.5.1.

Tableau 6 : Facteurs de correction selon les six FTth

FTth	(22)	(23)	(26)	(27) var f_{co2}	(27) var α	(27) var αf_{co2}
FC [-]	1,186	1,249	1,299	1,337	1,344	1,334
Intervalle de conf. (à 95%) [-]	0,023	0,032	0,026	0,020	0,032	0,025

Nous observons premièrement une nette différence entre le facteur de correction basée sur l'équation (22) et les deux équations théoriques apportées dans ce travail.

N'oublions pas que l'équation (22) a été conçue pour les flux de CO₂ ; elle a été utilisée sans adaptation depuis le début des analyses des flux de vapeur d'eau. Une majorité d'autres sites ont également utilisés cette FTth. Il en est de même pour l'équation (23). Les quelques études récentes concentrées sur les flux de vapeur d'eau ont préféré utiliser l'équation (23).

Nous observons que les FTth à pente réduite (26) et à palier (27) donnent un facteur de correction plus élevé, soit respectivement, 30 et 33% du flux sont ajoutés. De plus, la FTth (27) var αf_{co2} représente plus correctement la FTe (Σ SCE faible). Cette nouvelle équation de fonction de transfert nous permet d'ajouter 0,158 [-] au FC basé sur la FTth (22) et 0,95 [-] au FC basé sur la FTth (23). Ces apports sont importants.

Les moyennes de FC que nous comparons restent tout de même à relativiser. Le FC dépend de trois variables : la hauteur de mesure, la vitesse du vent et le VPD. Il s'agit de moyennes de 53 journées possédant différentes valeurs de VPD et ce uniquement sur certaines gammes, les journées à VPD extrêmes n'étant pas reprises. De plus, le facteur de correction dépend également de la vitesse du vent. Un vent plus fort augmentera le facteur de correction et cette vitesse de vent est aussi variable pour les 53 journées. Par contre, la hauteur de mesure est fixe puisqu'il s'agit d'un seul site. Nous nous permettons de faire cette première comparaison au Tableau 6 car il s'agit des 53 mêmes journées possédant donc les mêmes variabilités de VPD et vitesse de vent. Cette comparaison grossière permet d'avoir une idée générale du comportement du FC pour les différentes FTth.

Afin de comparer correctement les FC en fonction des FTth, nous nous penchons sur une analyse théorique à la section suivante.

5.4.1 Evolution du facteur en fonction du VPD

Pour analyser le FC des différentes FTth sur toute la gamme de VPD, nous analysons le FC en fixant la vitesse du vent à 2 m s^{-1} . Nous calculons le FC en insérant différentes valeurs de VPD. Nous connaissons de cette façon l'évolution du FC pour toutes les valeurs de VPD.

Nous représentons à la Figure 26 cette évolution pour les six FTth. Le VPD est intégré dans le modèle par une régression linéaire.

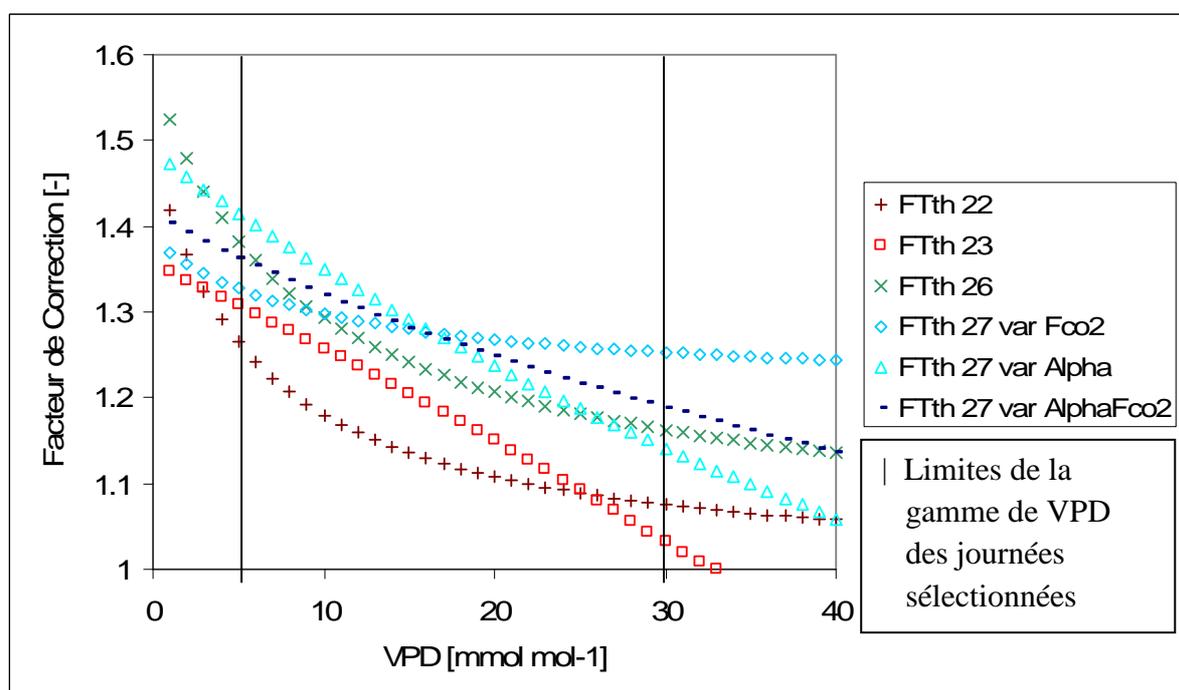


Figure 26 : Evolution du facteur de correction en fonction du VPD pour les six différentes fonctions de transfert théoriques (FTth)

La première observation de la Figure 26 est la dépendance du FC par rapport au VPD. Le facteur de correction augmente fortement avec l'humidité de l'air et ce pour toutes les modélisations de la FT.

Nous observons également que, sur toute la gamme de VPD, le facteur de correction des équations (26) et (27) est supérieur à celui des équations (22) et (23). Ceci n'est pas surprenant puisque les moyennes des FC pour ces deux équations (26) et (27) sont largement supérieures dans le Tableau 6.

Nous remarquons sur cette dernière figure que l'évolution du FC pour la FTth (27) var f_{co2} reste anormalement stable pour les différents VPD. Ceci signifie que le FC serait fortement

surestimé pour les journées sèches et sous-estimé pour les journées humides. Effectivement, nous pouvons comprendre que si α et f_{co1} sont fixés, seule f_{co2} varie et fait varier la FT uniquement dans les hautes fréquences, limitant la dépendance du FC au VPD. Par contre, α a un impact sur une plus grande gamme de fréquences que f_{co2} . La variabilité de α a donc plus d'impact sur le FC que celle de f_{co2} . Néanmoins, l'évolution du FC est cette fois très étalée et atteint des valeurs de FC anormalement faibles pour les VPD élevés, contrairement à la FTth (27) var f_{co2} .

Nous observons à la Figure 26 que le FC découlant de la FTth (27) var αf_{co2} tient compte des effets des deux paramètres α et f_{co2} . Cette discussion apporte donc un argument supplémentaire pour le choix de FTth (27) var αf_{co2} comme meilleure fonction de transfert.

Etant donné que la SCE ne reflète l'ajustement que des VPD les plus représentés dans nos 53 journées de la sélection « PPFd parfait », nous ne pouvons pas vraiment être certains que la modélisation du facteur de correction construite par (27) var αf_{co2} est vraiment correcte pour les VPD extrêmes. Effectivement, nous travaillons sur des journées contenant un VPD maximum de 30 mmol mol⁻¹ et minimum de 5 mmol mol⁻¹.

- Nous devrions analyser cette étude sur des journées ensoleillées contenant des VPD plus élevés, ce qui n'a pas pu être trouvé dans notre cas. Il existe de telles journées lors de la sécheresse de 2003 mais notre dispositif de Vielsalm a rencontré d'autres problèmes lors de cette période.
- Quant aux VPD faibles, il est assez rare de trouver des journées humides et ensoleillées. Il est donc plus complexe de vérifier la modélisation du FC pour la gamme de VPD entre 0 et 5 mmol mol⁻¹. Toutefois, les journées appartenant à cette gamme ont majoritairement des flux de vapeur d'eau assez faibles. Les corrections absolues apportées à ces flux de vapeur d'eau sont en conséquence faibles comparées à celles apportées aux flux des autres gammes de VPD.

5.4.2 Evolution du facteur de correction en fonction du vent

Nous représentons dans la Figure 27, l'évolution du facteur de correction construit sur le modèle de la FTth à palier (27) var αf_{co2} en fonction de la vitesse du vent et ce pour cinq catégories de VPD.

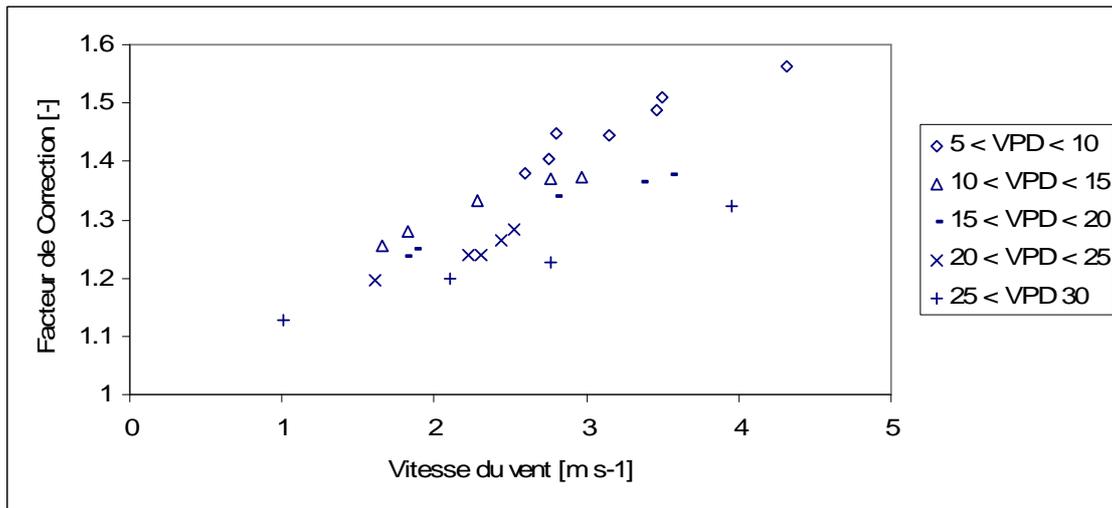


Figure 27 : Evolution du facteur de correction en fonction de la vitesse du vent pour les différentes catégories de VPD, construite pour la FTth (27) var αf_{co2} .

Nous observons une relation presque linéaire qui diffère pour chaque catégorie de VPD. Ceci est en accord avec la théorie vue au chapitre 3.3.2 (voir Figure 5), qui montre une relation quasi-linéaire entre le FC et la vitesse du vent. La pente de cette relation diminue pour des VPD croissants. Ceci est logique puisque la fréquence de coupure augmente avec le VPD ; si la fréquence de coupure augmente, le facteur de correction décroît.

5.5 Analyse du facteur de correction

Nous désirons comparer les moyennes des FC modélisés du Tableau 6 aux FC que nous pouvons calculer sur base des mesures. Ceci signifie que nous déterminons des FC expérimentaux calculés par le rapport des intégrales des densités co-spectrales mesurées de la chaleur sensible et de la chaleur latente. Nous obtenons une moyenne des FC expérimentaux pour les journées sélectionnées de 1,233 [-], avec un intervalle de confiance de 0,032 [-] à 95 % de la moyenne.

En comparant cette valeur aux FC modélisés du Tableau 6, nous remarquons une surestimation importante des FC modélisés. Nous estimons qu'il existe un problème dans la détermination du FC. Afin de cerner si cette différence est engendrée par la modélisation de la FT ou par le co-spectre de référence, nous calculons un FC semi-empirique. Ce FC semi-empirique est déterminé par l'équation suivante. Nous remplaçons la densité co-spectrale théorique de Kaimal par la densité co-spectrale expérimentale de la chaleur sensible. Nous conservons dans la détermination du FC notre modélisation de la fonction de transfert :

$$FC_{\text{exp}} = \frac{\int_0^{\infty} C_{wT,\text{exp}}(f) df}{\int_0^{\infty} FT(f) C_{wT,\text{exp}}(f) df}$$

De cette façon, nous pouvons discerner si la surestimation du FC provient de notre modélisation de la fonction de transfert ou si elle provient du co-spectre de Kaimal. Les moyennes de ces FC semi-empiriques pour quelques FTth sont données au Tableau 7.

Pour sélectionner parmi les différentes modélisations du facteur de correction celle qui reproduit le mieux les FC expérimentaux, nous utilisons à nouveau la somme des carrés des erreurs (SCE). La SCE minimum indique la modélisation la plus réaliste.

Tableau 7 : Moyennes des facteurs de correction calculés sur base du co-spectre de la chaleur sensible et de la modélisation de la FT.

<i>FT</i> _{th}	(22)	(23)	(27) var αf_{co2}
FC semi-empiriques [-]	1,093	1,131	1,229
Intervalle de conf. (à 95%) [-]	0,012	0,019	0,021
SCE [-]	1,45	0,85	0,28
FC modélisés par Kaimal [-] (Tableau 6)	1,186	1,249	1,334
Intervalle de conf. (à 95%) [-]	0,023	0,032	0,025
SCE [-]	0,54	0,51	22,98

Nous observons que le FC semi-empirique calculé avec la modélisation de la fonction de transfert retenue ((27) var αf_{co2}) tend vers la valeur du FC expérimental. La faible SCE de ce FC semi-empirique (0,28) laisse supposer que la fonction de transfert est bien modélisée et que la surestimation des FC modélisés (Tableau 6) provient du co-spectre de référence de Kaimal.

Au Tableau 7, tant pour les FC semi-empiriques que pour les FC modélisés par Kaimal, nous remarquons que le FC basé sur la FT_{th} (27) var αf_{co2} est augmenté de 12,5 % par rapport aux FC basés sur l'équation (22) et de 7,5 % par rapport à ceux de l'équation (23). Cette nouvelle équation de la FT améliore donc les FC d'une moyenne de 10 % par rapport aux équations « classiques ». Ces pourcentages restent approximatifs mais montrent l'importance d'utiliser une équation de FT adéquate aux flux de vapeur d'eau.

Cette remise en question de la validité du co-spectre théorique pour Vielsalm, si elle n'a pas d'impact sur la fonction de transfert qui est obtenue en comparant des co-spectres expérimentaux, affecte cependant le calcul du FC. Effectivement, nous soulignons une différence assez conséquente entre les FC calculés avec le co-spectre de Kaimal et avec un co-spectre de chaleur sensible semi-empirique. En passant d'une méthode à l'autre, nous réduisons le FC en moyenne de 9 %.

Cette analyse remet en question l'équation de Kaimal. A la section 5.1 (« Le co-spectre »), nous avons déjà évoqué des écarts entre les co-spectres expérimentaux de la chaleur sensible et le co-spectre théorique de Kaimal. En effet, pour les journées sélectionnées sur notre site, la densité co-spectrale expérimentale de la chaleur sensible est constamment plus faible que la densité co-spectrale théorique pour les fréquences aux alentours de 0,1 Hz. La non idéalité du site en terme de topographie et de couvert végétal permet sans doute d'expliquer cette différence. Ce problème a été relevé par Amiro, 1990. Il retrouve cette différence pour les densités co-spectrales des flux mesurés au-dessus d'une canopée. Cette erreur de densité co-

spectrale théorique surestime le FC. Il existe peut-être d'autres raisons qui mènent à cette surestimation. La modélisation de ce co-spectre de référence demande une étude approfondie. Nous nous contentons dans ce travail d'étudier les conséquences du changement de la modélisation de la fonction de transfert. Nous en profitons également pour souligner l'importance d'une prochaine étude sur le co-spectre de référence.

Il est de même intéressant d'observer les valeurs des FC avant et après les apports de ce travail, c'est-à-dire avant et après avoir modélisé la fonction de transfert et avoir remis en question le co-spectre de référence en remplaçant le co-spectre de Kaimal par le co-spectre expérimental.

Tableau 8 : Comparaison des moyennes des facteurs de correction déterminés précédemment

<i>FTth – Co-spectre de référence</i>	(22) - Kaimal	(23) - Kaimal	(27) $\text{var } \alpha f_{co_2}$ - Co-spectre de chaleur sensible expérimental
FC [-]	1,186	1,249	1,229
Intervalle de conf. (à 95%) [-]	0,023	0,032	0,021
SCE [-]	0,54	0,51	0,28

L'ancienne méthode (Kaimal) basée sur les équations (22) et (23) donne respectivement des moyennes de FC de 1,186 [-] et de 1,249 [-]. Notre nouvelle méthode (équation (27) $\text{var } \alpha f_{co_2}$ et le co-spectre de chaleur sensible) augmente de 3,6 % les FC de l'ancienne méthode intégrant l'équation (22) et réduit ceux de l'ancienne méthode obtenus avec l'équation (23) de 1,6 %. Cependant, dans cette comparaison, nous n'avons pas tenu compte du fait que l'ancienne méthode n'intègre pas la relation entre la fréquence de coupure et le VPD.

En réalité, jusqu'à présent deux problèmes se superposaient, le premier sous-estimant le FC (fonction de transfert inadéquate à la vapeur d'eau), le deuxième le surestimant (co-spectre de Kaimal non adapté). Leurs effets s'estompaient l'un l'autre. Nous avons résolu le premier problème, en effet, la fonction de transfert (27) $\text{var } \alpha f_{co_2}$ est à présent adaptée aux flux de vapeur d'eau. Nous pouvons dès lors mettre le doigt sur l'erreur induite par le co-spectre théorique inadéquat. Ce problème exige une étude sur les adaptations des co-spectres de Kaimal afin de pouvoir modéliser correctement ces facteurs de correction.

5.6 Impact sur le bilan énergétique

Le test de fermeture du bilan énergétique est utilisé pour évaluer la qualité des mesures de flux de chaleur latente et sensible. Ce test se construit sur le principe de la conservation de l'énergie dans le système, quel que soit le type d'écosystème. La fermeture du bilan énergétique demande que la somme des flux estimés de chaleur latente (LE) et de chaleur sensible (H), toutes deux mesurées par la méthode de covariance de turbulences, soit équivalente à la somme de toutes les autres sources et puits d'énergie, Wilson et al., 2002.

$$LE + H = R_n - G - S - Q \quad (33)$$

Avec R_n , la radiation nette,

G , le flux de chaleur du substrat du sol,

S , le stockage de chaleur sensible et latente dans l'air et le stockage de chaleur dans la biomasse,

Q , la somme de toutes les sources et puits d'énergie autres que R_n , G et S .

Généralement, Q est négligeable, l'essentiel des sources et puits étant répertorié dans les autres termes. Un déséquilibre entre le membre de gauche et de droite indiquerait une mesure inadéquate d'un ou de plusieurs des termes.

La compilation des mesures d'un grand nombre de sites a montré qu'il existe un déséquilibre quasi systématique dans la balance énergétique pour les systèmes de mesure utilisant la technique de covariance de turbulences pour l'estimation de LE et H . En effet, dans la majorité des cas, la somme $LE + H$ est inférieure à l'énergie disponible (membre de droite). Ce problème représente un défi majeur pour la communauté de scientifiques utilisant les mesures de tours à flux. Les explications sont probablement multiples mais l'augmentation du FC des flux de vapeur d'eau participerait à une amélioration de la fermeture du bilan énergétique.

L'approche théorique du co-spectre de référence permet de déterminer le FC sans pour autant devoir mesurer le co-spectre de la chaleur sensible. Le FC peut alors être déterminé pour toutes les périodes de mauvais climat. Il est donc utile d'étudier le co-spectre de référence afin d'établir une approche théorique plus appropriée permettant le calcul du FC sur une période continue.

Etant donné que nous n'avons pas encore étudié cette approche théorique, nous utiliserons le bilan énergétique dans ce travail dans le but de connaître l'impact de la modélisation de la fonction de transfert retenue, FT_{th} (27) var αf_{co2} . Pour cela, nous calculons le pourcentage de fermeture du bilan. Ce pourcentage correspond à la pente de la régression linéaire pour la relation entre la somme des chaleurs latente et sensible et le R_n . S et G ont des valeurs faibles pour le site de Vielsalm et ont été négligés dans cette analyse.

Nous illustrons à la Figure 28, le bilan énergétique pour les flux corrigés ou non par la FTth (27) var αf_{co2} . Nous travaillons sur le mois de juillet 2005.

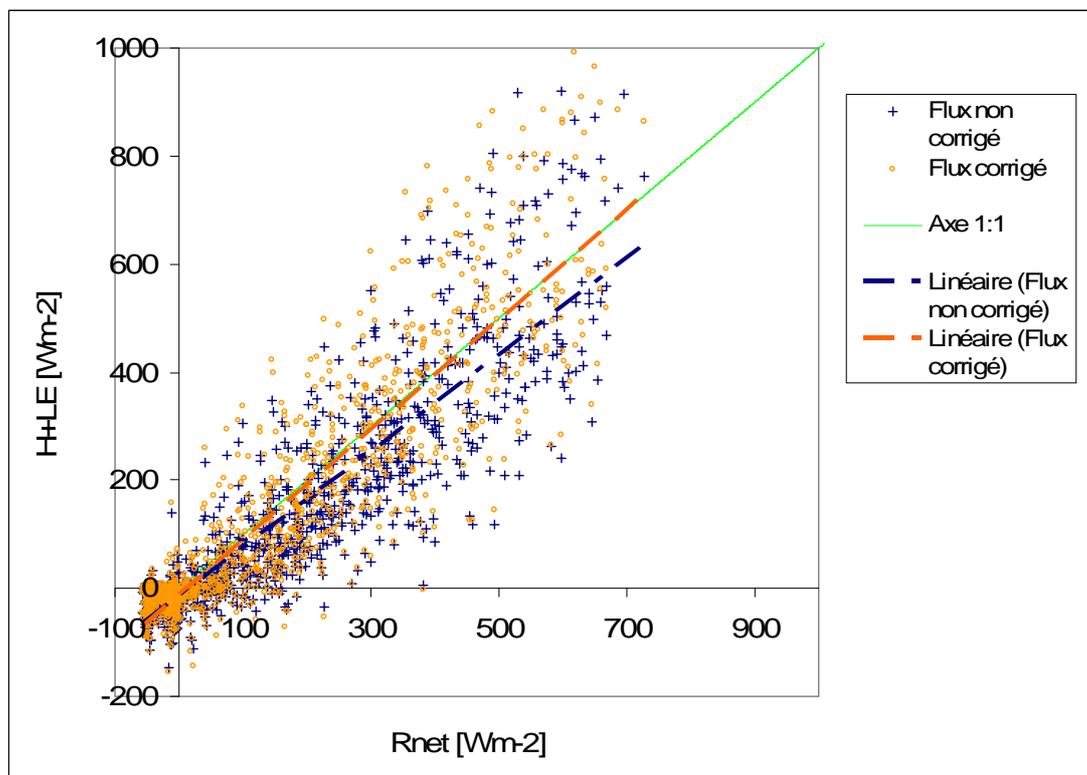


Figure 28 : Fermeture du bilan énergétique des flux non corrigés et corrigés par le modèle FTth (27) var αf_{co2} .

Le taux de fermeture pour les flux non corrigés est de 89,4%. Le modèle utilisant le co-spectre de Kaimal et la FTth (22) a une fermeture du bilan énergétique de 96,3 % et 98,6 % pour la FTth (23). Nous ne nous fions pas aux valeurs absolues de la fermeture énergétique car les autres mesures utilisées pourraient contenir des erreurs, nous nous intéressons à l'évolution de cette fermeture pour les différents processus de détermination du FC.

La modélisation de la fonction de transfert retenue apporte un pourcentage de fermeture du bilan de 101,2 %, soit une augmentation de 5 % par rapport à la fermeture utilisant la FTth (22). Nous remarquons qu'une augmentation des FC contribue à une amélioration de la fermeture énergétique. Toutefois, cette valeur absolue est surestimée. Rappelons-nous que nous avons observé une surestimation des FC de 9 % pour l'utilisation du co-spectre de Kaimal. En réduisant les FC de 9 %, nous pouvons connaître approximativement la fermeture que posséderait un modèle comprenant un co-spectre de référence adapté. Cette fermeture du bilan énergétique s'élève à 97 %.

Encore une fois, nous observons que les deux erreurs de détermination du FC se camouflaient l'une l'autre. En effet, notre pourcentage de fermeture de 97 % considérant les améliorations de ce travail (fonction de transfert et co-spectre de référence) se situe entre les pourcentages de 96,3 et de 98,6 %, calculés avant les améliorations. L'étude du co-spectre de référence permettrait de confirmer cette valeur de fermeture du bilan énergétique.

6 Perspectives

Lors de la réalisation de ce travail, certains résultats ont suscité des interrogations supplémentaires qui mériteraient une étude approfondie.

Parallèlement à ce travail, nous avons calculé les fréquences de coupure pour les flux de CO₂ obtenues pour les mêmes journées sélectionnées. Une observation nous interpelle. Malgré notre sélection soigneuse sur les journées ensoleillées dans le but d'obtenir des co-spectres associés à des flux importants, nous observons une grande variabilité dans les fréquences de coupure des fonctions de transfert du CO₂. La fréquence de coupure pour le CO₂ varie de 0,05 à 0,9 Hz. Cependant, le CO₂ est un traceur passif et la fréquence de coupure ne devrait théoriquement varier que selon le dispositif de mesure. Nous nous attendions à obtenir des fréquences de coupure présentant une dispersion beaucoup plus faible pour ces journées. Ceci sous-entendrait qu'il existe d'autres facteurs que le dispositif de mesure qui influence la fonction de transfert du CO₂. Ce problème requiert une étude spécifique de ce domaine.

Nos journées sélectionnées ne présentent pas de VPD extrêmes. Afin de valider le modèle pour ces gammes de VPD, il serait intéressant d'étudier le modèle sur un autre site présentant des journées ensoleillées avec des VPD extrêmes. Avec des périodes à VPD faible, une étude approfondie pourrait également être réalisée sur la régression non linéaire de la fréquence de coupure et du VPD.

Il serait intéressant d'analyser le co-spectre de référence utilisé dans la détermination du facteur de correction. Le co-spectre de Kaimal entraîne une surestimation importante au facteur de correction qui n'apparaît pas lorsque nous utilisons le co-spectre de référence expérimentale de chaleur sensible. Cette surestimation est importante et devrait être étudiée.

Nous devrions aussi intégrer le co-spectre de référence étudié dans l'étude des flux de CO₂. Pour ces flux, la fonction de transfert classique n'est pas remise en cause mais le calcul du FC serait également affecté par une erreur dans le co-spectre de référence. Cependant dans le cas du flux de CO₂, il n'existe pas deux problèmes se camouflant l'un l'autre, la fonction de transfert étant adéquate. Les facteurs de correction du flux de CO₂ calculés jusqu'à présent sont sûrement surestimés par le co-spectre de Kaimal.

Conclusions

Le but premier de ce travail était de vérifier si les procédures de calcul du facteur de correction établies pour les flux de CO₂ sont aussi d'application pour ceux de la vapeur d'eau. Après un tri drastique des données nécessaires pour rencontrer les conditions imposées par l'analyse spectrale, nous avons pu observer la fonction de transfert expérimentale typique de la vapeur d'eau. Celle-ci diffère de celle du CO₂. En effet, elle présente un palier pour les fréquences aux alentours de 0,1 Hz. Nous avons donc modélisé cette fonction de transfert de la chaleur latente en adaptant les équations utilisées pour les flux de CO₂.

Nous avons également observé que les fonctions de transfert expérimentales de la vapeur d'eau présentent une dépendance au VPD. Effectivement, l'atténuation du flux par le dispositif de mesure est plus importante pour les journées humides que pour les journées sèches. Ce comportement est spécifique à un traceur actif et s'explique par des phénomènes d'adsorption-désorption de la vapeur d'eau avec les parois du tube d'échantillonnage, phénomène qui s'accroît avec l'encrassement du tube et le contenu en vapeur d'eau dans l'échantillon. Cet effet se traduit par une fréquence de coupure caractérisant la fonction de transfert plus petite pour ces journées humides mais également par une hauteur du palier plus basse ou nulle. La dépendance de la fonction de transfert au VPD a également été modélisée.

Plusieurs modélisations de la fonction de transfert pour la vapeur d'eau et de sa dépendance au VPD ont été testées. Ces différentes modélisations présentent des performances proches. Nous avons convenu sur base de la somme des carrés des écarts entre le modèle et les mesures que la meilleure modélisation est effectuée par l'équation nommée « (27) var αf_{co_2} » dans le travail. Celle-ci considère la fréquence de coupure ainsi que ce palier. En utilisant la fonction de transfert que nous avons développée pour les flux de chaleur latente, nous observons un facteur de correction plus important qu'avec les équations « classiques ». Ce modèle augmente de 10 % la moyenne des facteurs de correction pour nos journées ensoleillées sélectionnées.

Il est impossible de valider directement les flux de vapeur d'eau ainsi calculés puisqu'il n'existe pas de technique alternative performante à l'échelle spatio-temporelle de la covariance de turbulences. Cependant, nous avons montré que ce pourcentage de correction supplémentaire pour les flux de vapeur d'eau permet d'améliorer sensiblement la fermeture du bilan énergétique du site de Vielsalm, ce qui constitue un test indirect de qualité des flux obtenus.

Les facteurs de correction obtenus sont dépendants du VPD. Les journées humides possèdent un facteur de correction plus important que les journées sèches, étant donné que l'humidité accentue l'atténuation du flux.

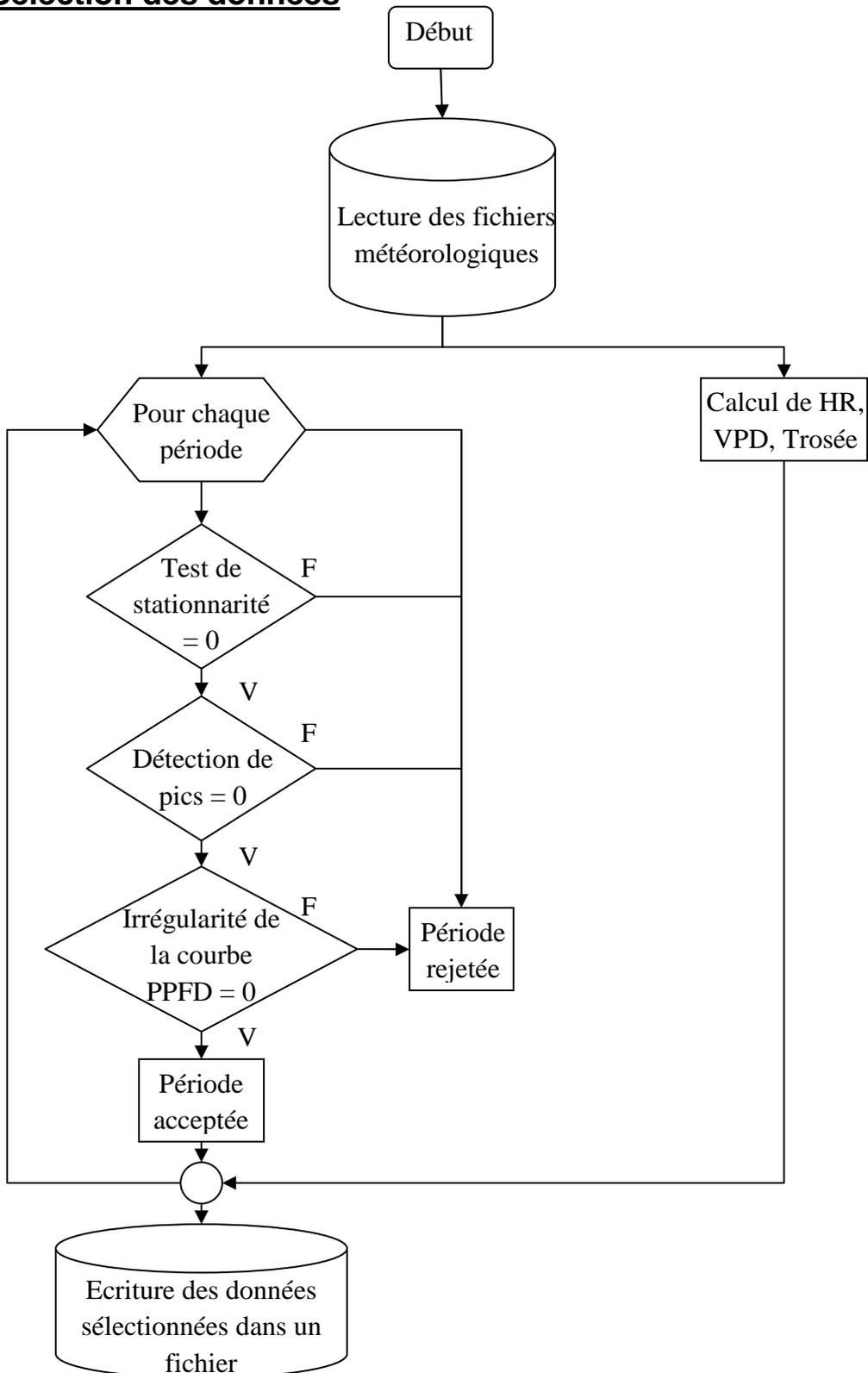
Nous avons également remarqué que tous les facteurs de correction étaient surestimés suite à l'utilisation de l'équation de Kaimal comme co-spectre de référence dans le calcul du facteur de correction. Pour nos journées sélectionnées, nous remplaçons cette équation de Kaimal par les co-spectres expérimentaux de chaleur sensible afin d'estimer la surestimation. Le co-spectre de référence expérimental réduit le facteur de correction en moyenne de 9 % pour toutes les différentes modélisations de fonction de transfert. Cette observation fait appel à une étude supplémentaire sur la modélisation du co-spectre de référence. Celle-ci permettrait de confirmer les valeurs absolues des facteurs de correction.

En considérant l'amélioration du modèle de la fonction de transfert et le remplacement du co-spectre de référence par un co-spectre expérimental, les facteurs de correction résultants ne sont finalement que légèrement modifiés par rapport aux procédures initiales. Effectivement, les erreurs avaient des conséquences opposées l'une à l'autre et donc se camouflaient mutuellement. La moyenne de ces facteurs de correction des journées sélectionnées est supérieure de 3,6 % et inférieure de 1,6 % par rapport aux moyennes déterminées par les équations de fonctions de transfert respectives de Aubinet et al., 2000 et Eugster et Senn, 1995, tout en utilisant le co-spectre de Kaimal.

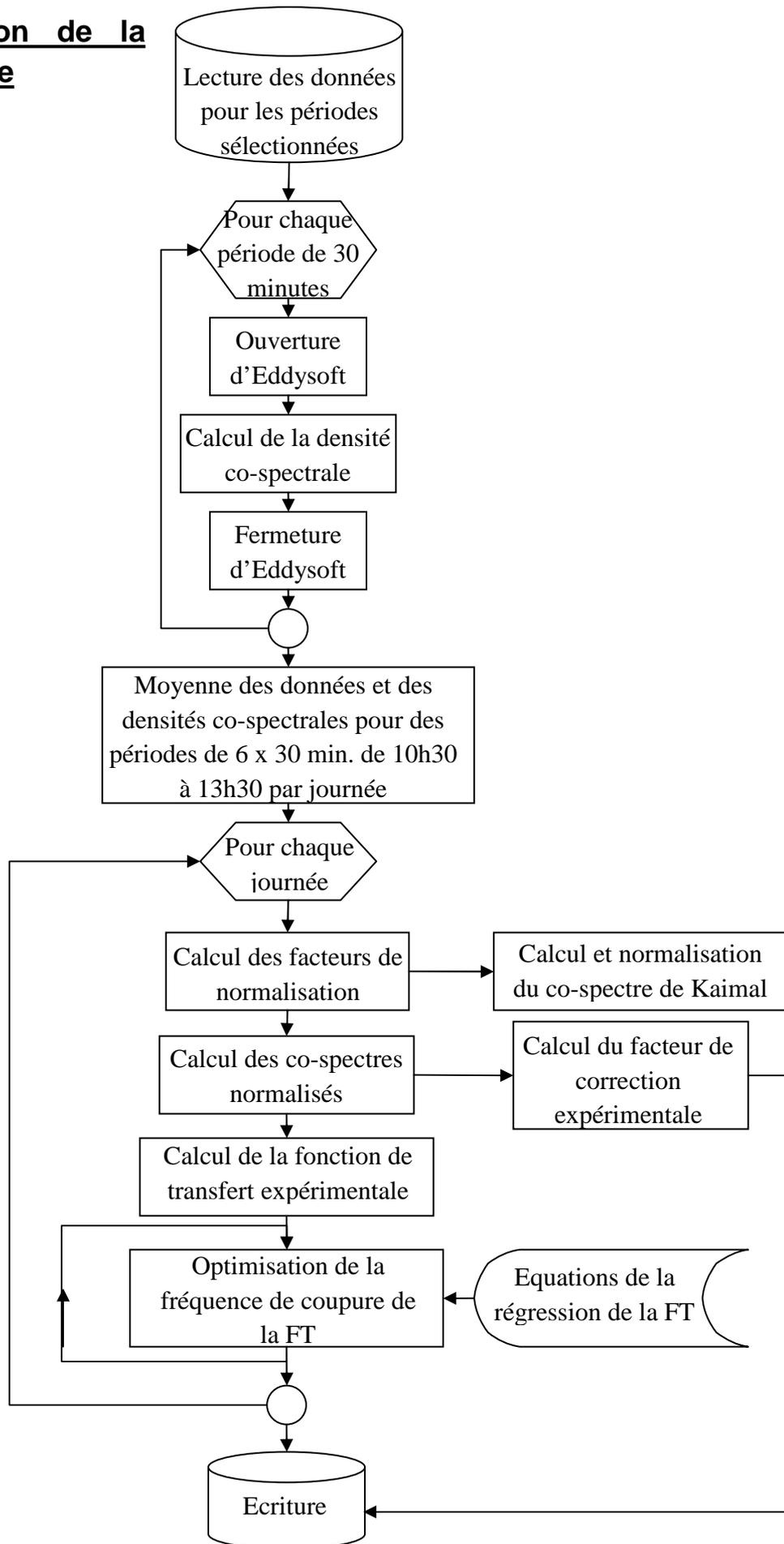
Les améliorations des corrections spectrales des flux de vapeur d'eau apportées dans ce travail seront utilisées pour l'étude de l'efficacité d'utilisation de l'eau prévue à Vielsalm. L'étape suivante sera d'appliquer un modèle pour discriminer les espèces sources. Ces deux modèles combinés permettront d'obtenir les flux de vapeur d'eau valides par espèce à l'échelle d'un peuplement.

7 Annexe : Ordinogramme des opérations principales

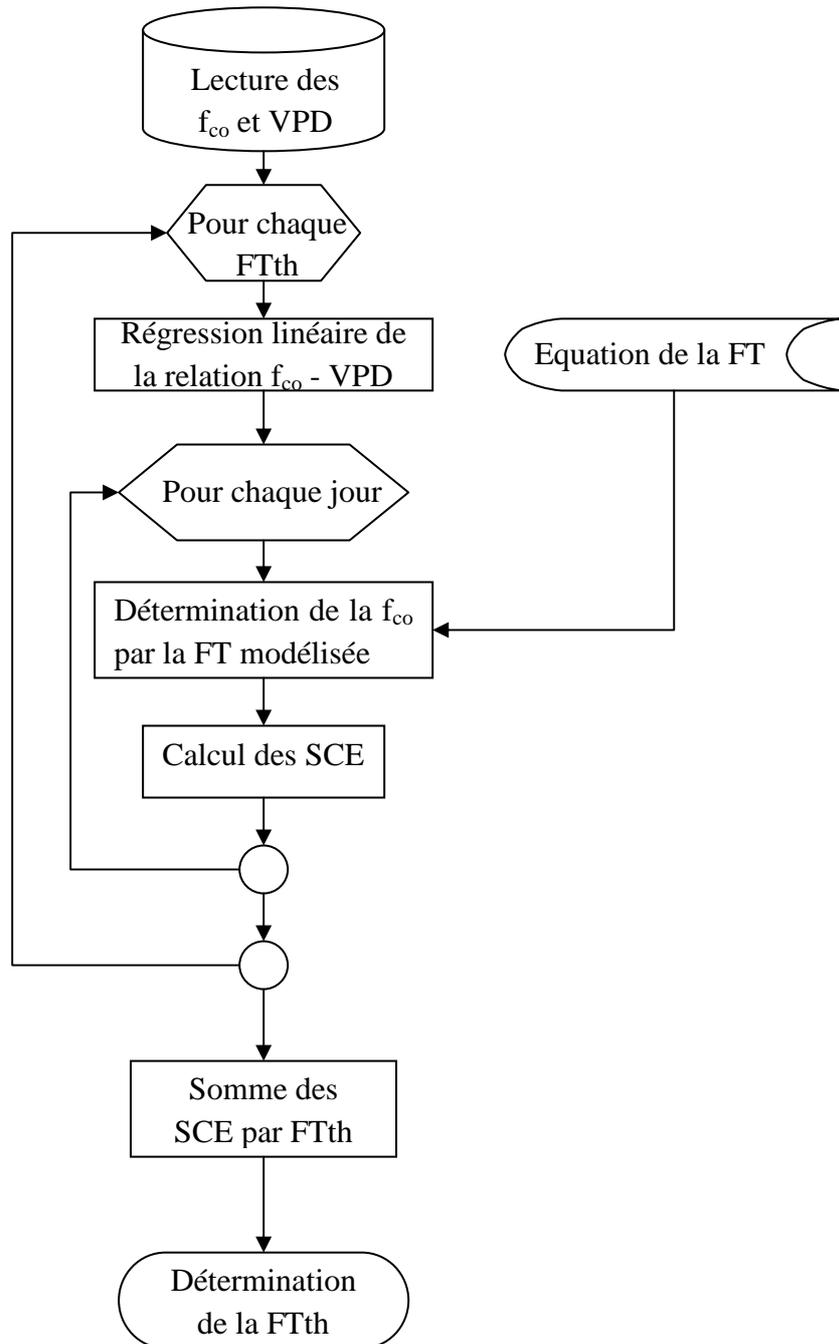
Sélection des données



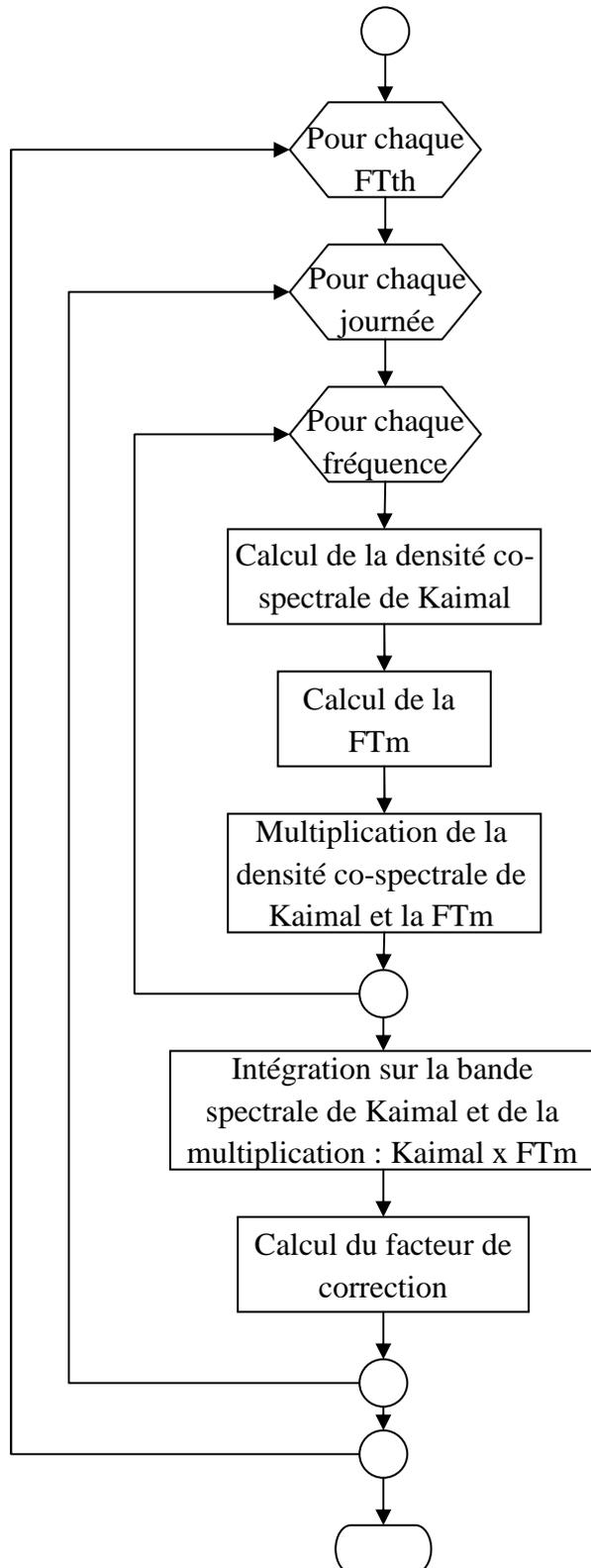
Détermination de la fréquence de coupure, f_{co}



Détermination de la FTth



Détermination du facteur de correction



Références

- Arya, S. P. (1988). Introduction to micrometeorology. San Diego, Academic Press. Inc.
- Aubinet, M. (1984). Généralisations et applications du banc de Fourier au prétraitement optique. Faculté des Sciences. Liège, Université de Liège.
- Aubinet, M. (1999). Physique de l'environnement. Notes de cours, FUSAGX.
- Aubinet, M. (2003). Physique Générale. Notes de cours, FUSAGX.
- Aubinet, M., B. Chermanne, et al. (2001). "Long term carbon dioxide exchange above a mixed forest in the Belgian Ardennes." Agricultural and Forest Meteorology **108**(4): 293-315.
- Aubinet, M., A. Grelle, et al. (2000). Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: The EUROFLUX methodology. Advances in Ecological Research, Vol 30. **30**: 113-175.
- Baldocchi, D. D. (2003). "Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future." Global Change Biology **9**(4): 479-492.
- Ciais, P., M. Reichstein, et al. (2005). "Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003." Nature **437**(7058): 529-533.
- Clement, R. (2004). Mass and energy exchange of a plantation forest in Scotland using micrometeorological methods. Thesis of Philosophy. Scotland, UK, University of Edinburgh: 565 p.
- Coppin, P. A. and Taylor (1983). "A three-component sonic anemometer/thermometer system for general micrometeorological research." Boundary-Layer Meteorology **27**.
- Dagnelie, P. (1991). Théorie et Méthodes Statistiques. Gembloux, Belgium, Presses Agronomiques de Gembloux.
- Eugster, W. and W. Senn (1995). "A Cospectral Correction Model for Measurement of Turbulent No₂ Flux." Boundary-Layer Meteorology **74**(4): 321-340.
- GIEC (2007). Bilan 2007 des changements climatiques. Contribution des Groupes de travail I, II et III au quatrième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Genève, Suisse, [Équipe de rédaction principale, Pachauri, R.K. et Reisinger, A. (publié sous la direction de~)]. GIEC: 103p.
- Ibrom, A., E. Dellwik, et al. (2007). "Strong low-pass filtering effects on water vapour flux measurements with closed-path eddy correlation systems." Agricultural and Forest Meteorology **147**(3-4): 140-156.
- Kaimal, J. C. and J. J. Finnigan (1994). Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement. Oxford, Oxford University Press.

Kaimal, J. C., J. C. Wyngaard, et al. (1972). "Spectral characteristics of surface layer turbulence." Q. J. R. Meteorol. Soc. **98**: 563–589.

Kolle, O. and C. Rebmann (2007). Eddysoft by meteotools, Documentation of Eddy Covariance Software: 89p.

Laitat, E., B. Chermanne, et al. (2000). "Biomass, carbon and nitrogen allocation in open top chambers under ambient and elevated CO₂ and in a mixed forest stand. A tentative approach for scaling up from the experiments of Vielsalm." Forest Ecosystem Modelling, Upscaling and Remote Sensing: pp. 33–60.

Larousse (1996). Le petit Larousse, Grand format.

Leuning, R. and M. J. Judd (1996). "The relative merits of open- and closed-path analysers for measurement of eddy fluxes." Global Change Biology **2**(3): 241-253.

Leuning, R. and K. M. King (1992). "Comparison of Eddy-Covariance Measurements of Co₂ Fluxes by Open-Path and Closed-Path Co₂ Analyzers." Boundary-Layer Meteorology **59**(3): 297-311.

Leuning, R. and J. Moncrieff (1990). "Eddy-Covariance Co₂ Flux Measurements Using Open-Path and Closed-Path Co₂ Analyzers - Corrections for Analyzer Water-Vapor Sensitivity and Damping of Fluctuations in Air Sampling Tubes." Boundary-Layer Meteorology **53**(1-2): 63-76.

Mammarella, I., S. Launiainen, et al. (comm. pers.). Relative humidity effect on the high frequency attenuation of water vapour flux measured by a closed-path eddy covariance system.

Massman, W. J. (1991). "The Attenuation of Concentration Fluctuations in Turbulent-Flow through a Tube." Journal of Geophysical Research-Atmospheres **96**(D8): 15269-15273.

Massman, W. J. and A. Ibrom (submitted). "Attenuation of concentration fluctuations of water vapor other trace gases in turbulent tube flow." Atmospheric Chemistry and Physics.

Massman, W. J. and X. Lee (2002). "Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges." Agricultural and Forest Meteorology **113**(1-4): 121-144.

Max, J. and J. L. Lacoume (1996). Méthodes et techniques de traitement du signal. Paris.

Moncrieff, J. B., J. M. Massheder, et al. (1997). "A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide." Journal of Hydrology **189**(1-4): 589-611.

Moore, C. J. (1986). "Frequency response corrections for eddy correlation systems." Boundary-Layer Meteorol. **37**: 17-35.

Stull, R. B. (1988). An introduction to Boundary Meteorology. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers.

Su, H. B., H. P. Schmid, et al. (2004). "Spectral characteristics and correction of long-term eddy-covariance measurements over two mixed hardwood forests in non-flat terrain." Boundary-Layer Meteorology **110**(2): 213-253.

Valentini, R., G. Matteucci, et al. (2000). "Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests." Nature **404**(6780): 861-865.

Wilson, K., A. Goldstein, et al. (2002). "Energy balance closure at FLUXNET sites." Agricultural and Forest Meteorology **113**(1-4): 223-243.