

**Analyse pluriannuelle des mécanismes influençant la qualité de mesure par
covariance de turbulence de flux énergétiques d'un agroécosystème
dynamique : Cas d'une grande culture à Lonzée en Hesbaye**

Auteur : Boland, François

Promoteur(s) : De Cock, Nicolas; Heinesch, Bernard

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

Diplôme : Master en bioingénieur : sciences et technologies de l'environnement, à finalité spécialisée

Année académique : 2018-2019

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/8441>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

**ANALYSE PLURIANNUELLE DES MÉCANISMES
INFLUENÇANT LA QUALITÉ DE MESURE PAR
COVARIANCE DE TURBULENCE DE FLUX
ÉNERGÉTIQUES D'UN AGROÉCOSYSTÈME
DYNAMIQUE : CAS D'UNE GRANDE
CULTURE À LONZÉE EN HESBAYE**

FRANÇOIS BOLAND

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNEE ACADEMIQUE 2018-2019

CO-PROMOTEURS: NICOLAS DE COCK ET BERNARD HEINESCH

© 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 académique¹ de Gembloux Agro-Bio Tech.

Le présent document n'engage que son auteur.

¹ Dans ce cas, l'autorité académique est représentée par le(s) promoteur(s) membre du personnel(s) enseignant de GxABT.

**ANALYSE PLURIANNUELLE DES MÉCANISMES
INFLUENÇANT LA QUALITÉ DE MESURE PAR
COVARIANCE DE TURBULENCE DE FLUX
ÉNERGÉTIQUES D'UN AGROÉCOSYSTÈME
DYNAMIQUE : CAS D'UNE GRANDE
CULTURE À LONZÉE EN HESBAYE**

FRANÇOIS BOLAND

**TRAVAIL DE FIN D'ETUDES PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE
MASTER BIOINGENIEUR EN SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'ENVIRONNEMENT**

ANNEE ACADEMIQUE 2018-2019

CO-PROMOTEURS: NICOLAS DE COCK ET BERNARD HEINESCH

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier mes deux co-promoteurs pour leur encadrement, leur investissement personnel et leur passion. En particulier, je remercie Nicolas pour sa disponibilité, pour son aide précieuse dans la prise de recul et la réflexion approfondie des phénomènes étudiés. Je remercie également Bernard pour ses remises en question, pour poser les questions de fond judicieuses et pour les suggestions d'amélioration de la forme de ce document.

Je souhaite également remercier Anne De Ligne pour le temps qu'elle m'a consacré, pour me permettre d'atteindre mes objectifs et pour répondre à mes (nombreuses !) questions. Son aide passionnée a, je pense, grandement enrichi le contenu de ce mémoire !

Enfin, je suis très reconnaissant à ma famille, à ma belle-famille et à mon entourage pour leur soutien durant mes études. En particulier, je remercie mes parents d'avoir cru en moi et en mes capacités jusqu'au bout, malgré mes doutes. Merci beaucoup à mon papa et à mon frère pour leur relecture et leur soutien jusqu'à la dernière minute de ce travail.

RÉSUMÉ

La covariance de turbulence (CT) est une technique utilisée dans le monde entier pour mesurer les flux gazeux et énergétiques échangés à l'interface entre les écosystèmes et l'atmosphère. La qualité des flux mesurés peut être vérifiée grâce au principe de conservation de l'énergie. Le bilan énergétique stipule que la somme des flux de chaleur latente et sensible mesurés par CT est égale à la différence entre les flux de rayonnement net, d'énergie dans le sol et de taux de stockage dans le sol, la biomasse et l'air, qui sont mesurés par des systèmes indépendants de la CT. Si l'égalité est vérifiée, le bilan est dit « fermé » et la qualité des mesures par CT est validée. Cependant, la littérature indique une non-fermeture du bilan d'énergie généralisée dans le monde de l'ordre de 20 à 30%. Ce problème fait l'objet d'intenses recherches depuis plus de 30 ans pour en comprendre l'origine et en évaluer les conséquences sur la qualité des mesures de flux gazeux. Dans la continuité de ces recherches, ce travail est une analyse pluriannuelle des mécanismes influençant la qualité de mesure par CT de flux énergétiques d'une grande culture sur le site ICOS de Lonzée. Le bilan d'énergie est étudié à différentes échelles temporelles et spatiales pour mettre en évidence ces mécanismes. Les hypothèses qui ont été testées dessinent trois pistes principales : (1) la sous-estimation et/ou la négligence de certains flux du bilan ; (2) l'hétérogénéité locale des surfaces à différentes échelles et variations spatiales des flux d'énergie ; et (3) le fait que la période du calcul de la covariance de turbulence sur 30 minutes est parfois trop courte, entraînant une possible sous-estimation des flux de chaleur sensible et latente. Les résultats montrent que l'évaluation de certains flux mineurs permet d'améliorer le bilan de 7%. Les flux d'énergie dans le sol indiquent une variabilité spatiale des caractéristiques de sol et de flux à l'échelle de la parcelle qui suggère d'augmenter la représentativité et le nombre de capteurs au sein de la culture. Enfin, l'augmentation de la période du calcul de la CT jusqu'à 4 heures met en évidence une amélioration du bilan de 8% et, en particulier, la sous-estimation du flux de chaleur sensible pour une période de 30 minutes. Cependant, la fermeture n'est toujours pas atteinte et de nouvelles hypothèses sont formulées.

ABSTRACT

The Eddy covariance technique (EC) is used worldwide to monitor gas and energy flux emissions at the interface between ecosystems and the atmosphere. Flux measurement quality is assessed through the energy conservation principle and this is called the energy balance. It states that the sum of latent and sensible heat fluxes measured by EC is equal to the difference between net radiation flux, ground heat flux and rates of change of heat storage into the ground, the biomass, and the air, which are measured by independent systems of EC. If this equality is verified, the balance is said to be “closed” and EC measurements are assumed to be valid. However, many studies indicate a general lack of closure around the globe. For 30 years, this problem has been subjected to intense research for the last 30 years in order to understand the causes and to assess the consequences on gas flux measurement quality. Following this research, this master's thesis is a multi-year analysis of the drivers involved in the quality of energy fluxes measurement by EC over a cropland at the ICOS Lonzée site. The energy balance is evaluated at different time and space scales in order to highlight these drivers. The hypotheses that are tested follow three main leads: (1) the underestimation and/or the negligence of certain fluxes in the energy balance; (2) local surface heterogeneity at different scales and spatial variations of energy fluxes; (3) the fact that the flux measurements averaging period of 30 minutes is too short, causing a (possible) underestimation of latent and sensible heat fluxes. The results show that certain minor fluxes evaluation allows improving the energy balance closure by 7%. Energy fluxes through the ground indicate a spatial variability of soil characteristics and fluxes at the scale of the cropland that suggest increasing the representativeness and the number of sensors across the field. At last, the increase of the averaging period up to 4 hours for EC computation leads to improvements of the energy balance closure by 8% and suggest an underestimation of the sensible heat flux especially for a 30-minute period. However, the closure is not achieved and new hypotheses are stated.

LISTE DES ACRONYMES

BE	Bilan Energétique
CI	Conditions Instables
CLA	Couche Limite Atmosphérique
CLS	Couche Limite de Surface
CN	Conditions Neutres
CS	Conditions Stables
CT	Covariance de Turbulence
EBR	<i>Energy Balance Ratio</i>
OLS	<i>Ordinary Least Square</i>
o.o.	Ordonnée à l'origine
RB	Rapport de Bowen
RMA	<i>Reduced Major Axis</i>

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements.....	I
Résumé.....	II
Abstract.....	II
Liste des acronymes.....	III
Table des matières.....	IV
Table des figures.....	VI
1. Introduction générale.....	1
1.1. Contexte général.....	1
1.2. Lien entre la covariance de turbulence et bilan énergétique.....	2
1.3. Evaluation du bilan énergétique.....	3
1.3.1. Régression linéaire.....	3
1.3.2. EBR ou rapport du bilan énergétique.....	4
1.4. Non-fermeture généralisée du bilan énergétique.....	4
2. Fondements théoriques et état de l’art.....	6
2.1. Caractéristiques de la couche limite atmosphérique et de la turbulence.....	6
2.2. Covariance de turbulence et bilan énergétique.....	9
2.2.1. Cadre théorique de la covariance de turbulence.....	9
2.2.2. Calcul des flux non turbulents.....	12
2.2.3. Fréquence et fenêtre d’intégration de la moyenne des mesures de flux.....	13
2.2.4. Empreinte ou surface émettrice des flux mesurés.....	16
2.3. Etat de l’art des hypothèses de la non-fermeture du bilan énergétique.....	17
2.3.1. Erreurs de mesures.....	17
2.3.2. Négligence ou sous-estimation des termes de taux de stockage.....	19
2.3.3. Contributions non locales de flux turbulents dans le BE.....	20
3. Objectifs, hypothèses et méthodologie générale.....	25
4. Matériel et méthodes.....	27
4.1. Site et période d’étude.....	27
4.2. Systèmes de mesure et données de flux.....	27
4.2.1. Mesures pédoclimatiques.....	28
4.2.2. Mesures des flux turbulents (CT).....	29
4.2.3. Données de flux pour l’étude de la non-fermeture BE.....	29
4.3. Traitements des données de référence.....	29

4.3.1. Tri des données	30
4.3.2. Calcul de nouvelles variables	31
4.3.3. R_{net} , G , S_G et S_P	31
4.3.4. Empreinte des flux mesurés	32
4.3.5. Disponibilité après sélections successives des données	32
4.4. Création et traitements des données EddyPro	33
4.4.1. Paramétrage	33
4.4.2. Analyse statistique	34
4.4.3. Analyse et corrections spectacles	35
4.4.4. Traitements des données EddyPro	35
4.5. Outils de traitement des données	35
5. Résultats	36
5.1. Conditions météorologiques	36
5.2. Disponibilité des données pour évaluer le BE	36
5.2.1. R_{net} : disponibilité des mesures et comparaison des capteurs	37
5.2.2. G : comparaison des capteurs et disponibilité	39
5.2.3. H , LE et S_P : critère de qualité de flux et disponibilité	41
5.3. Observations générales sur les paramètres du bilan	44
5.4. Répartition des flux énergétiques et bilan énergétique général	44
5.5. Influence de la stabilité atmosphérique	50
5.6. Parts des termes de taux de stockage dans le bilan d'énergie	54
5.7. Influence de l'état de surface	58
5.8. Hétérogénéité de surface au sein de l'empreinte	60
5.9. Augmentation de la période du calcul de la covariance de turbulence	62
6. Discussion	66
6.1. Qualité des données pour l'analyse	66
6.2. Analyse des paramètres d'évaluation de la fermeture du bilan énergétique	66
6.3. Conditions et mécanismes d'amélioration du bilan	68
6.4. Perspectives	70
7. Conclusion	71
Bibliographie	73
Annexes	78

TABLE DES FIGURES

Figure 1 – Station de mesure de la covariance de turbulence installée à Lonzée	2
Figure 2 – Boîtes à moustache des pentes de la régression linéaire OLS et des EBR réalisées à partir des résultats de Wilson et al. (2002) sur 22 sites et 50 années-sites de mesures du bilan énergétique	5
Figure 3 – (a) Moyennes horaires de l'EBR et de l'énergie disponible et consommée sur 24h réalisées à partir des données des 22 sites et 50 années-sites. (b) Pentes de la régression OLS par deux mois d'incrément pour 19 années-sites complètes et la droite la moyenne (Wilson et al., 2002).....	5
Figure 4 – Illustration des déplacements turbulents pour une couche limite convective (Lee, 2018).	6
Figure 5 – Production/destruction de turbulence par : (a) flottabilité et (b) cisaillement (Lee, 2018)	7
Figure 6 – Transfert d'énergie entre l'énergie disponible et les différents pools d'énergie dans l'atmosphère (Lee, 2018). Pour les références des ordres de grandeur, se référer à Lee (2018).....	7
Figure 7 – Représentation schématique montrant la cascade de l'énergie cinétique. Δ_1 est le pas de la grille utilisée par le <i>Reynolds averaging model</i> et Δ_2 celui du <i>large-eddy simulation model</i> qui inspirent cette représentation (voir Lee, 2018)	8
Figure 8 – Profil de la production d'énergie cinétique turbulente par cisaillement et flottabilité pour une couche limite convective (Lee, 2018)	9
Figure 9 – Représentation schématique de la décomposition de Reynolds pour le scalaire ψ (Foken, 2008)	10
Figure 10 – Schéma du volume de contrôle sur terrain homogène (Leuning, 2004).....	11
Figure 11 – Représentation de l'hypothèse de Taylor de la « frozen turbulence » entre l'instant t et $t+\Delta t$ par rapport à un dispositif de mesure (réalisé d'après Stull, 1998)	13
Figure 12 – (a) Représentation du lien entre le signal mesuré et (b) de la décomposition en fréquence des tourbillons turbulents	14
Figure 13 – Illustration du choix de la fréquence d'échantillonnage et de la période d'observation du signal	14
Figure 14 – (A) Illustration du cospectre (Équation 26) et (B) de l'ogive correspondante dans un cas idéal pour déterminer la fréquence et la période idéales (d'après Sievers et al., 2015).....	15
Figure 15 – (a) Représentation du dispositif de mesure par CT et de l'émission de flux en vert d'un écosystème (analogie à la fumée de cheminées en amont du vent moyen en gris) (b) Illustration en 3D des contributions relatives des surfaces f (m^{-2}) en amont du vent dans le flux qui est mesuré, d'après l'illustration et le modèle de Kjlun et al. (2015).	16
Figure 16 – Mesures de concentration pour quatre cas de stabilité en fonction de la distance en amont de la direction principale de vent. Le pic de concentration est représenté par les traits verticaux (Kjlun et al., 2002).....	17
Figure 17 – Représentation de la hauteur de mesure et de l'échelle horizontale des composantes du bilan énergétique. Q_H , Q_E , Q_S^* , Q_G et ΔQ_s sont respectivement les flux de chaleurs sensibles, latentes, radiatives nets, du sol et du stockage du sol (Foken, 2008).....	18
Figure 18 – Distribution de fréquence des pentes de la régression entre les flux de chaleur latente et sensible ($H+LE$) et l'énergie disponible ($R_{net}-G$), dont l'ordonnée à l'origine a été forcée à zéro, pour les moyennes sur 30 min et 24h (base de données La Thuile).....	20

Figure 19 – Influence du logarithme de la période d'intégration de la moyenne (en minutes) des flux de chaleurs sensible et latente et du résidu du bilan énergétique (exprimés en Wm^{-2}) pour une culture de maïs pour toute la période LIFTASS-2003 (Mauder and Foken, 2006)	22
Figure 20 – Comparaison des mesures de flux de chaleur sensible entre les systèmes de covariance de turbulence, scintillomètre (<i>large aperture scintillometer</i> LAS, les données ont été corrigées pour la saturation ; Kohsiek et al., 2006) et LES modèle pour le 30 mai 2003 sur une parcelle agricole du projet LITFASS (Foken et al., 2006a)	22
Figure 21 – Schéma de la génération de circulations secondaires et de l'hypothèse de flux turbulents à différentes échelles basés sur de petits (s) et larges (l) tourbillons. $Q_{H,E}$ sont les flux de chaleurs latente et sensible, Q_s la radiation nette et Q_G les flux dans le sol (Foken, 2008)	23
Figure 22 – Cospectre et ogives correspondantes en fonction du logarithme de la fréquence, pour trois situations typiques d'observations. En rouge sont les flux turbulents et en bleu les basses fréquences non locales/le bruit/l'atténuation du signal (Sievers et al., 2015)	24
Figure 23 – Orthophoto de 2016 de la parcelle expérimentale et ses alentours, avec rose des vents (cf. Annexe 5). Source : Arcgis Online, Cécile Osy.	28
Figure 24 – Exemple d'une distribution normale, de moyenne μ et d'écart-type σ , surimposée à une distribution de fréquence par classe d'une variable quelconque. Les accolades montrent la probabilité qu'une mesure tombe dans l'une ou l'autre classe de valeurs. Les barres rouges désignent les valeurs à partir desquelles on décide d'exclure les valeurs extrêmes.....	30
Figure 25 – (a) Températures moyennes mensuelles de l'air et (b) sommes des précipitations mensuelles mesurées par la station ICOS de Lonzée entre 2015 et 2017. Au milieu des deux figures se trouvent les températures moyennes et les précipitations annuelles.	36
Figure 26 – Disponibilité temporelle (%) des mesures de R_{net} selon les radiomètres (CNR1 et CNR4), d'après la somme cumulée des demi-heures de données disponibles entre 2015 et 2017.....	37
Figure 27 – Relation entre les mesures de R_{net} des deux radiomètres CNR1 et CNR4. La droite y est la régression RMA entre les mesures des deux dispositifs.	38
Figure 28 – Relation entre les mesures des deux radiomètres CNR1 et CNR4 pour : SW (ondes courtes : visible) et LW (ondes longues : infrarouge), entrantes (in) et sortantes (out). La droite y est la régression RMA entre les mesures des deux dispositifs.	39
Figure 29 – Disponibilité temporelle (%) des mesures de G selon leur emplacement (G_0 au sein de la placette de CT, $G_{1,2}$ au sein de la culture) et les répétitions (2 répétitions a et b pour chaque emplacement) d'après la somme cumulée des demi-heures de données disponibles.	39
Figure 30 – Relation entre les répétitions (a et b) des mesures de flux de sol (G) réalisées au sein de la placette de la station de mesure (G_0) et au sein de la culture (G_1 et G_2). La droite y est la régression RMA entre les mesures des deux dispositifs.	40
Figure 31 – Relation entre les mesures de flux de sol (G) réalisées au sein de la placette de la station d'CT (G_0) et dans la culture (G_1 et G_2) seulement pour le capteur (a). La droite y est la régression RMA entre les mesures des deux dispositifs.	40
Figure 32 – Disponibilités temporelles des mesures de flux turbulents (H, LE et S_G) d'après la somme cumulée des demi-heures de données disponibles, avant et après sélection des flux de meilleure qualité d'après le test de Mauder and Foken (2004)	41
Figure 33 - Disponibilité horaire et saisonnière des mesures de flux turbulents (H et LE) selon le test de qualité des flux de Mauder and Foken (2004) : « Best » représente les meilleurs flux, « suitable » les flux moyens et « discarded » les flux à exclure.....	42

Figure 34 – Disponibilité temporelle et simultanée des mesures de flux, d’après la somme cumulée des demi-heures de données disponibles, avant et après sélection des flux de meilleure qualité d’après le test de Mauder and Foken (2004).....	43
Figure 35 – Disponibilité horaire et simultanée des mesures de flux majeurs (R_{net} -G et H+LE meilleures qualités), d’après la somme cumulée des demi-heures de données disponibles.	43
Figure 36 – Distribution de fréquence relative des flux pour H, LE, R_{net} , G et le résidu R_{net} -G-(H+LE), exprimée comme la proportion des demi-heures de données disponibles.	45
Figure 37 – Répartition moyenne horaire des flux énergétiques principaux entre 2015 et 2017, du résidu et de l’EBR (+ intervalle de confiance). Le résidu horaire = R_{net} -G-H-(LE+L)	45
Figure 38 – Répartition moyenne horaire des flux énergétiques selon les années et les saisons.....	47
Figure 39 – (a) Régression RMA entre R_{net} -G et H+LE entre 2015 et 2017 et proportion des data par classes de 25 Wm^{-2} et (b) idem sur les centres d’inertie des classes de 25 Wm^{-2}	48
Figure 40 – Variabilité interannuelle des paramètres des régressions RMA et EBR pour 2015, 2016 et 2017 comparées à l’ensemble des données sur 2015-2017.....	49
Figure 41 – Variabilité saisonnière des paramètres des régressions RMA et EBR pour les années 2015- 2017	49
Figure 42 – Variabilité mensuelle des paramètres des régressions RMA et EBR pour les années 2015-17.....	50
Figure 43 – Variabilité des paramètres des régressions RMA et EBR sur 2015-17 d’après les trois classes de stabilité atmosphérique.....	51
Figure 44 – Représentation relative des trois classes de stabilité atmosphérique : (a) stable, (b) neutre et (c) instable sur les points de la régression à la Figure 39.....	51
Figure 45 – Proportion horaire et saisonnière des demi-heures de flux disponibles d’après les conditions de stabilité atmosphérique (stable, neutre, instable) pour 2015-17, comparée avec le nombre de flux éliminé d’après le critère de qualité de Mauder et Foken (2004) pour H et LE (cf. Figure 33).....	52
Figure 46 – Hystérèse de la relation entre R_{net} -G et H+LE pour 2015-17 représenté par l’EBR horaire	53
Figure 47 – Relations entre (a) H, (b) u^* et (c) ξ avec l’EBR à la demi-heure et la moyenne tronquée (1%) par classe	54
Figure 48 – (a) Flux moyens horaires correspondant aux taux de stockage $S_G+S_P+S_{LE}+S_H=S_{TOT}$ et (b) pourcentage moyen horaire que S_{TOT} représente par rapport à R_{net}	55
Figure 49 - Répartition moyenne horaire des flux énergétiques pour 2016 avec et sans le terme S des taux de stockage d’énergie	56
Figure 50 – Hystérèse de la relation entre R_{net} -G et H+LE pour 2016 représenté par l’EBR horaire avec et sans les termes de taux de stockage S.....	56
Figure 51 – Paramètres des régressions RMA et EBR sur 2016 avec l’ajout des termes des taux de stockages	57
Figure 52 – Amélioration mensuelle de la pente de la régression RMA lorsque les termes de taux de stockage sont inclus dans le bilan	57
Figure 53 – Évolution mensuelle et annuelle des paramètres de régression RMA entre H+LE et R_{net} -G et de l’EBR. Les périodes de culture sont également représentées en arrière-plan.	58

Figure 54 – Paramètres des régressions RMA et EBR sur 2015-17 selon 3 classes de rapport de Bowen et pour des demi-heures de jour ($10 < h < 18$), en conditions instables et en excluant l'hiver.....	59
Figure 55 - Relation entre le rapport de Bowen (RB) et l'EBR à la demi-heure (EBR_{30}) et la moyenne tronquée (1%) par classe de RB de jour ($10 < h < 18$), en conditions instables et en excluant l'hiver. 60	60
Figure 56 – Paramètres des régressions RMA et EBR sur 2015-17 selon les quartiles de la distance des surfaces émettrices du pic de concentration mesuré par CT (modèle du <i>footprint</i> de Kjlun et al., 2015), pour les conditions atmosphériques neutres et instables, entre 10h et 18h, excluant l'hiver. 61	61
Figure 57 – Roses des vents avec fréquence d'occurrence des directions de vent (par 30°) et, en leur sein, non pas la distribution de vitesse, mais du EBR à la demi-heure. Sont également représentés pour chaque classe de direction de vent les paramètres du BE. En (a) sont reprises les conditions atmosphériques instables et en (b) neutres.....	62
Figure 58 – Comparaisons des valeurs de H et LE entre l'ensemble de données de référence et celui obtenu par EddyPro pour les mêmes demi-heures.....	63
Figure 59 – Paramètres des régressions RMA et EBR sur 2015 sur les données EddyPro en fonction de la période du calcul de la moyenne	63
Figure 60 – Evolutions de la distribution des flux de H et LE représentées par leur moyenne tronquée (1%) et intervalle de confiance, ainsi que leur proportion en fonction de la période de calcul de la covariance de turbulence.....	64

1. INTRODUCTION GÉNÉRALE

1.1. Contexte général

L'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre (CO_2 , CH_4 , N_2O , etc.) observée depuis quelques décennies résulte du déséquilibre entre les taux des émissions (anthropiques et naturelles) et les taux d'absorption de la biosphère et des océans. Elle accroît la proportion du rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre qui est capturé dans l'atmosphère. Une conséquence directe est le réchauffement global de l'atmosphère et de la surface de la Terre ainsi qu'un dérèglement climatique.

Les changements climatiques résultants rassemblent et inquiètent les citoyens, décideurs politiques, scientifiques et acteurs de la société soucieux de l'avenir de la planète et de ses habitants, d'aujourd'hui et demain. L'observation et la compréhension progressive de la nature, des écosystèmes et également du développement de notre société, par le passé et en ce moment même, sont au cœur de cette prise de conscience. Elles nourrissent les prévisions, les débats et les décisions pour le monde en devenir.

Les scientifiques qui étudient les interactions entre les écosystèmes et l'atmosphère s'intéressent depuis quelque temps aux rôles que jouent les écosystèmes dans l'émission et/ou le stockage des gaz à effet de serre. Ces rôles sont éventuellement amenés à évoluer et leur importance est susceptible de changer à cause du réchauffement climatique. La nécessité de mesurer les flux de carbone, d'eau et d'énergie à la surface de la terre grandissant, diverses méthodes de mesures ont vu le jour, présentant leurs avantages et inconvénients, notamment en termes de résolutions spatiale et temporelle. Elles permettent l'étude des leviers environnementaux, biologiques et climatologiques qui contrôlent les échanges nets de surface (gazeux et énergétiques) entre le sol, la végétation et l'atmosphère (Baldocchi et al., 2001).

Une méthode particulièrement intéressante est la covariance de turbulence (CT) ou en anglais *eddy covariance* (Baldocchi et al., 1988 ; Foken et Wichura, 1996 ; Aubinet et al., 1999). Il s'agit d'une technique de mesure directe, continue et à haute fréquence des paramètres de la covariance de turbulence. Peu invasive, elle permet de mesurer les échanges de flux au sein d'un écosystème sur de longues périodes et de recouvrir de plus ou moins larges surfaces (jusqu'à plusieurs milliers de mètres carrés). Certes, elle présente certains inconvénients, mais qui sont largement compensés par ses avantages (Baldocchi et al., 2001). Ceci explique pourquoi depuis une vingtaine d'années la covariance de turbulence est devenue une méthode standardisée (Aubinet et al, 2012) assez répandue, donnant naissance au réseau mondial de mesure FLUXNET.

Ce réseau recense aujourd'hui plus de 800 sites de mesure actifs et historiques à travers le monde². On les retrouve sur chaque continent, dispersés dans la plupart des climats et biomes terrestres. Le but ultime de ce réseau de recherches est de fournir les informations nécessaires à la validation des modèles de productivité primaire nette, d'évaporation et d'absorption d'énergie.

² <https://fluxnet.fluxdata.org/>

Des erreurs de mesure auraient des répercussions importantes sur les résultats de simulations issus de modélisations à plus grandes échelles. Le développement de méthodes de vérification de la fiabilité des mesures est donc indispensable. Mais il n'existe pas de méthode alternative et indépendante pour estimer les échanges aux échelles temporelles et spatiales discutées. Il est donc nécessaire de développer des critères de qualité des mesures. L'une de ces méthodes consiste à contrôler la fermeture du bilan énergétique qui consiste à vérifier que les flux énergétiques entrants équivalent les flux sortants (loi de conservation de l'énergie). Certains de ces flux étant estimés par CT, un bilan fermé serait un indicateur de bonne qualité des mesures par CT. Cette méthode est donc devenue une procédure courante qui est recommandée pour tester la validité des flux mesurés par CT. Cependant, un problème suscite l'inquiétude générale au sein de la communauté micrométéorologique. En effet, le bilan observé au sein du réseau FLUXNET est en général non fermé (Wilson et al., 2002), c'est-à-dire que l'énergie qui rentre dans les écosystèmes n'équivaut pas l'énergie sortante. Cette énigme a fait l'objet de nombreuses études et ce mémoire s'inscrit dans la continuité de ces recherches.

1.2. Lien entre la covariance de turbulence et bilan énergétique

Le dispositif de CT est constitué essentiellement d'un anémomètre et d'un analyseur de gaz. Ils mesurent simultanément les composantes de la vitesse du vent et la concentration de scalaires d'intérêt dans l'air (p. ex. : la vapeur d'eau ou le CO₂). De nombreux capteurs météorologiques complémentaires accompagnent généralement la station (Figure 1).



Figure 1 – Station de mesure de la covariance de turbulence installée à Lonzée

Une des méthodes indépendantes qui permet la validation des mesures de flux réalisées par CT est l'analyse du bilan énergétique (BE). Selon le premier principe de la thermodynamique, l'énergie est toujours conservée et implique qu'entre un écosystème et l'atmosphère les échanges d'énergies sensible (H) et latente (LE) soient égaux à l'énergie disponible :

$$H + LE = R_{net} - G - S \text{ (W m}^{-2}\text{)} \quad \text{Équation 1}$$

où R_{net} est l'échange d'énergie radiative nette, G l'échange d'énergie avec le sol, S le taux de stockage qui regroupe plusieurs sources/puits d'énergie mineurs (explicités aux chap. 2.2.1 et 2.2.2). Ces échanges d'énergie sont des flux en W m^{-2} . Le groupement des termes dans ce bilan énergétique n'est pas anodin. Les termes du membre de gauche ont en commun et leurs mécanismes de transfert et leur technique de mesure (CT), indépendante des techniques de mesure des termes du membre de droite. Si l'égalité n'est pas vérifiée, on parle alors de non-fermeture du bilan. Dans ce cas, et si une grande

confiance est accordée à l'évaluation de l'énergie disponible, alors la qualité des mesures des flux turbulents d'énergie pourrait être remise en cause, ainsi que la validité des flux de gaz (autres que celui de la vapeur d'eau).

L'analyse du BE est devenue procédure courante, non seulement pour tester la qualité des mesures de flux, mais aussi pour l'interprétation des flux de gaz à effet de serre (Aubinet et al, 2012). En effet, les mécanismes de transfert des flux dans l'atmosphère, mesurés par CT, sont similaires qu'ils soient liés à l'énergie, à l'eau ou aux gaz à effet de serre et malgré leurs différences en termes de sources (production) et de puits (stockage). De plus, le calcul de l'ensemble des flux scalaires est fondé sur les mêmes hypothèses et conditions (Wilson et al., 2002).

L'étude du bilan énergétique peut occasionner un résidu traduisant une non-fermeture du bilan énergétique :

$$\text{Résidu} = (R_{net} - G - S) - (H + LE) \text{ (} Wm^{-2} \text{)} \quad \text{Équation 2}$$

Le résidu peut avoir plusieurs origines. Soit R_{net} , G et/ou S sont mal évalués, soit H et/ou LE sont sous ou surestimés par la covariance de turbulence. Le cas idéal pour évaluer la CT est de disposer de mesures de R_{net} , G et S fiables, comme référence.

1.3. Evaluation du bilan énergétique

Deux méthodes principales sont utilisées dans la littérature pour évaluer le bilan énergétique et vont être explicitées dans le sous-chapitre suivant. Elles consistent à : (1) calculer les coefficients de la régression linéaire entre H+LE et R_{net} -G-S pour un ensemble demi-heures et (2) calculer le rapport entre les deux termes, pour chaque demi-heure ou sur de plus longues périodes. On appelle ce rapport l'EBR de l'anglais *energy budget ratio* dont l'acronyme sera conservé par la suite.

1.3.1. Régression linéaire

Pour rappel brièvement, la régression linéaire (méthode des moindres carrés ordinaires) entre une variable explicative x (= R_{net} -G-S) et une variable à expliquer y (=H+LE) s'écrit :

$$y = m x + p + r \quad \text{Équation 3}$$

où m est la pente et p l'ordonnée à l'origine (l'o.o. par la suite) de la droite qui minimise la somme r des résidus r_i , c'est-à-dire les écarts entre les points (x_i, y_i) et la droite. Cela signifie que la droite passe par le point moyen du nuage de points (x_i, y_i) . On appelle cette régression en anglais *ordinary least square* ou OLS dont l'acronyme sera utilisé pour la comparaison avec la littérature. Le R^2 , coefficient de détermination, traduit la part relative de la variabilité totale de la variable à expliquer qui est expliquée par la variable explicative (de 0 à 100%), en d'autres mots, l'intimité de la relation entre les deux variables.

La régression linéaire est un modèle ou une estimation des paramètres de la relation entre les flux d'énergie turbulente et d'énergie disponible d'un échantillon (un certain nombre) de demi-heures de flux. Ces paramètres estimés présentent donc une certaine erreur par rapport à la « vraie » relation qui est inconnue. Le calcul des intervalles de confiance d'après la probabilité de contenir les valeurs

des paramètres à estimer permet de témoigner de la marge d'erreur autour de ces paramètres. Pour plus d'information sur les régressions et statistiques, consulter l'ouvrage de référence de Dagnelie (2013) intitulé *Statistique descriptive et bases de l'inférence statistique*.

La fermeture est associée à une droite de pente de 1 et d'ordonnée à l'origine de 0. Wilson et al. (2002) argumentent que cette méthode n'est pas adéquate dans la mesure où la variable explicative, c'est-à-dire l'énergie disponible, n'est pas indemne d'erreur aléatoire et donc n'est pas une variable indépendante (Meek et al., 1998). Il est donc plutôt recommandé d'utiliser la régression à axe majeur réduit (en anglais *reduced major axis*, RMA ci-après) dont le principe est de calculer les coefficients par la moyenne géométrique des coefficients obtenus par les régressions linéaires (moindre carré) en inversant les variables expliquées et explicatives. Pour plus de détails sur les statistiques de la régression RMA et sur le calcul des intervalles de confiance des paramètres, consulter Sokal et Rohlf (1995), Ricker (1973), Jolicoeur et Mossimann (1968) et McArdie (1988).

1.3.2. EBR ou rapport du bilan énergétique

La deuxième méthode est l'EBR, de l'anglais *Energy Balance Ratio*, et se calcule comme le rapport de la somme des flux turbulents sur la somme de l'énergie disponible pour une certaine période (demi-heures, heures, jours, mois, années) :

$$EBR = \frac{\sum_{i=1}^n (H + LE)_i}{\sum_{i=1}^n (R_{net} - G - S)_i} \quad \text{Équation 4}$$

qui est aussi la moyenne des $(H + LE)_i$ sur la moyenne des $(R_{net} - G - S)_i$. Son avantage réside dans la possibilité d'établir le bilan avec un seul indicateur sur une demi-heure ou sur de plus grandes périodes en moyennant l'erreur aléatoire des flux à la demi-heure (voir Aubinet et al., 2012). Du fait du rapport, l'EBR est sensible aux faibles valeurs au dénominateur, en particulier dans le cas de l'EBR à la demi-heure ($n=1$) ou quand le nombre n est petit.

1.4. Non-fermeture généralisée du bilan énergétique

Wilson et al. (2002) ont étudié la fermeture du bilan énergétique pour 22 sites et 50 années-sites de mesures à travers réseau FLUXNET (Figure 2). Leurs résultats ont montré qu'en moyenne la pente de la régression linéaire (OLS) entre $R_{net}-G-S$ et $H+LE$ est d'environ 0,8 et il en va de même pour le rapport de l'EBR annuel moyen entre années-sites. Des résultats similaires ont été obtenus par Leuning et al. (2012) sur 594 années-sites de la base de données La Thuile (<https://fluxnet.fluxdata.org/data/la-thuille-dataset/>). Les résultats d'une expérimentation spécialement dédiée à l'étude de la non-fermeture du bilan (EBEX-2000) étudiée par Kohsiek et al. (2007), Mauder et al. (2007) et Oncley et al. (2007) témoignent du même constat. Malgré les précautions prises lors de la mise en œuvre de cette expérience et du traitement des données au regard de la littérature, un déficit de 10-15 % fut malgré tout obtenu.

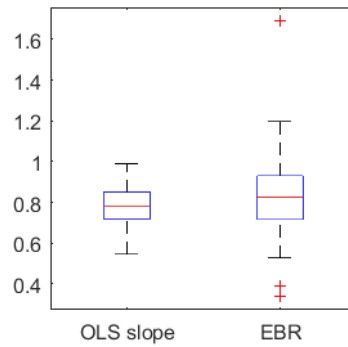


Figure 2 – Boîtes à moustache des pentes de la régression linéaire OLS et des EBR réalisées à partir des résultats de Wilson et al. (2002) sur 22 sites et 50 années-sites de mesures du bilan énergétique

La pente de la régression OLS et l'EBR annuel sur toutes les données des 50 années-sites de Wilson et al. (2002) ne sont pas nécessairement corrélés comme on peut le voir à l'Annexe 1.

Pour donner des ordres de grandeur et illustrer la problématique du bilan sur différentes échelles temporelles, la Figure 3 montre, d'une part, l'évolution typique des flux énergétiques et de l'EBR au cours d'une journée moyenne (50 années-sites) et, d'autre part, les pentes de la régression OLS par deux mois d'incrément (19 années-sites complètes) investiguées par Wilson et al. (2002).

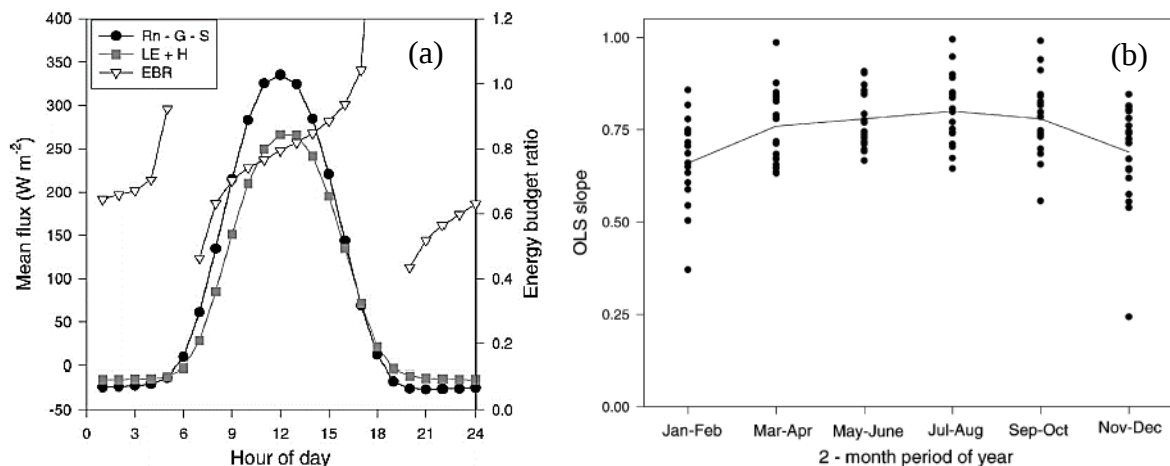


Figure 3 – (a) Moyennes horaires de l'EBR et de l'énergie disponible et consommée sur 24h réalisées à partir des données des 22 sites et 50 années-sites. (b) Pentes de la régression OLS par deux mois d'incrément pour 19 années-sites complètes et la droite la moyenne (Wilson et al., 2002)

C'est en journée et les mois les plus chauds qu'ont lieu les flux les plus importants et que la fermeture est la meilleure. La Figure 3(a) permet également d'observer l'influence des faibles valeurs au dénominateur de l'EBR sur ce paramètre le matin et le soir où la courbe suit une double asymptote verticale.

Depuis de nombreuses années, ce problème fait l'objet de recherches intensives pour expliquer le déséquilibre, le corriger et comprendre les implications sur l'interprétation des mesures de flux (Wilson et al., 2002 ; Foken, 2008 ; Leuning et al., 2012), notamment vis-à-vis des simulations par modélisation (p. ex. : Twine et al., 2000 ; Jia et al., 2012). Les raisons de la non-fermeture du bilan sont en général attribuées : aux erreurs de mesure, à la négligence de certains termes de (dé)stockages (S dans Équation 1) et à la négligence de contributions non locales de flux turbulents, caractérisées notamment par des fréquences de tourbillons plus basses (> 30 min). Ces raisons seront détaillées par

la suite aux sous-chapitres de 2.3, car il est nécessaire d'opérer quelques rappels préalables sur des notions qui seront utilisées tout au long de la problématique de ce travail

2. FONDEMENTS THÉORIQUES ET ÉTAT DE L'ART

Cette deuxième partie comprend dans un premier temps des rappels théoriques sur la couche limite atmosphérique et la turbulence des écoulements d'air en son sein (2.1). Ensuite, les fondements théoriques sous-jacents à la covariance de turbulence sont établis (2.2). Enfin, une fois les fondements théoriques établis, la problématique de la non-fermeture du bilan énergétique est mise en évidence à la lumière de la littérature et des hypothèses qui ont été formulées pour l'expliquer.

2.1. Caractéristiques de la couche limite atmosphérique et de la turbulence

Dans ce premier sous-chapitre, l'environnement du dispositif de mesures des flux nécessite d'être décrit pour mieux comprendre le contexte de mesure et son influence sur la CT (d'après le livre de Lee, 2018). L'atmosphère peut être vue comme un ensemble de sous-couches avec des caractéristiques qui leur sont propres. La couche de l'atmosphère qui nous intéresse est celle qui est en contact avec la surface de la Terre. Elle est appelée couche limite atmosphérique (CLA). Les propriétés des écoulements d'air y sont directement influencées par les caractéristiques de surface. Elle s'élève jusqu'à quelques centaines de mètres d'altitude (Figure 4).

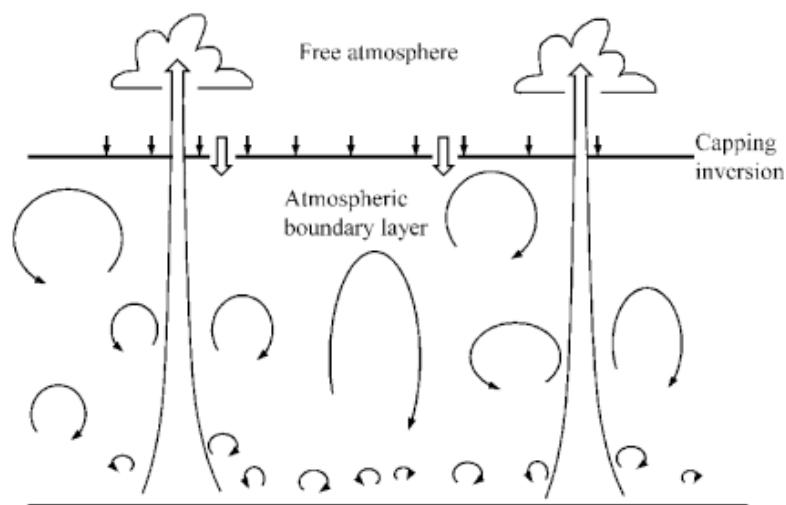


Figure 4 – Illustration des déplacements turbulents pour une couche limite convective (Lee, 2018)

Une caractéristique importante de cette couche est la nature turbulente des écoulements d'air en son sein. La turbulence désigne l'état d'un fluide en mouvement dont les caractéristiques en un point (vitesse, température, etc.) varient de manière aléatoire. Un flux turbulent peut être vu comme un ensemble désordonné et imprédictible de tourbillons d'échelles spatiale et temporelle différentes (Figure 4). Les phénomènes de turbulence sont générés par cisaillement et/ou par la poussée d'Archimède entre des masses d'air, respectivement, de vitesses de déplacement et/ou de densités différentes (Figure 5).

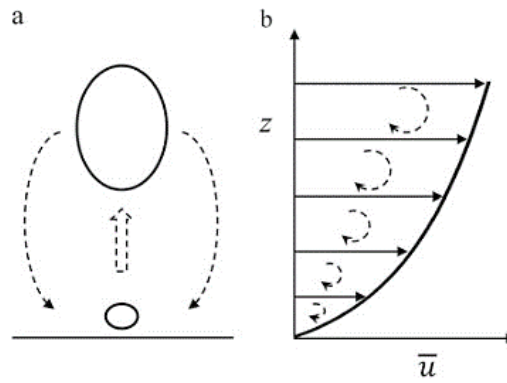


Figure 5 – Production/destruction de turbulence par : (a) flottabilité et (b) cisaillement (Lee, 2018)

L'énergie disponible dans l'atmosphère, provenant du soleil, se répartit entre 4 pools énergétiques (Figure 6) : interne (essentiellement), potentielle et deux pools mécaniques. L'énergie potentielle découle d'une distribution inhomogène de l'énergie solaire, créant des gradients de pression horizontaux et de l'instabilité statique. Ces gradients génèrent le mouvement des masses d'air (énergie cinétique/mécanique), dont on distingue un courant moyen et une agitation turbulente. À la Figure 6, on y réfère respectivement par l'énergie cinétique moyenne (en anglais *mean kinetic energy*, MKE ci-après) et l'énergie cinétique turbulente (en anglais *turbulent kinetic energy*, TKE ci-après). Cette dernière est une mesure de l'intensité turbulente et elle ne représente qu'une faible fraction de l'énergie disponible. Pourtant, ce pool rend la couche limite atmosphérique particulière par rapport au reste de l'atmosphère.

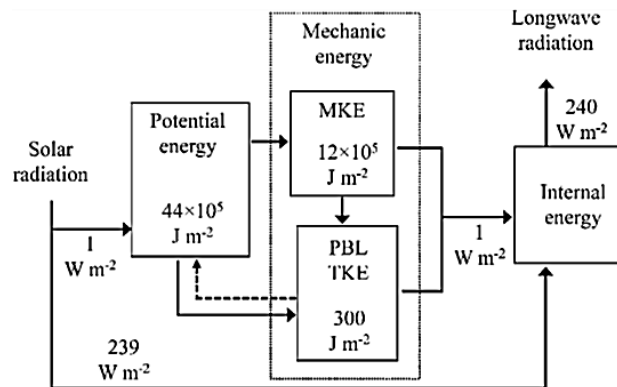


Figure 6 – Transfert d'énergie entre l'énergie disponible et les différents pools d'énergie dans l'atmosphère (Lee, 2018). Pour les références des ordres de grandeur, se référer à Lee (2018)

Les mouvements moyens et turbulents se distinguent par des échelles de temps et d'espaces considérées distinctes et qui ne se chevauchent pas. En d'autres mots, on peut visualiser les écoulements d'air dans la CLA comme une superposition d'un ensemble de tourbillons (Figure 5b) de tailles et de vitesses de rotation différentes. Ces caractéristiques traduisent la fréquence à laquelle on observe ces phénomènes tourbillonnaires. Si on mesure l'énergie de ces tourbillons d'après leur taille et vitesse, on obtient une distribution de l'énergie en fréquence qui présente une séparation spectrale (Figure 7).

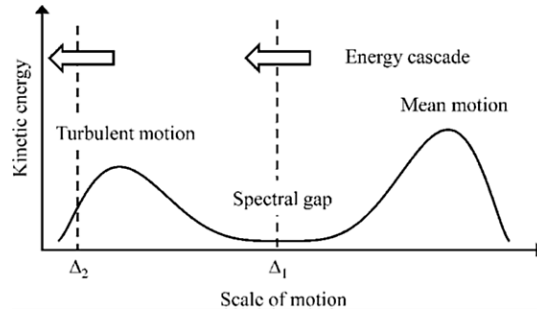


Figure 7 – Représentation schématique montrant la cascade de l'énergie cinétique. Δ_1 est le pas de la grille utilisée par le *Reynolds averaging model* et Δ_2 celui du *large-eddy simulation model* qui inspirent cette représentation (voir Lee, 2018)

La turbulence dissipe l'énergie du mouvement moyen et suit un processus représenté par la théorie de la cascade énergétique de Komolgorov. Les tourbillons de grandes tailles, issus du mouvement moyen, se divisent en tourbillons de plus petites tailles jusqu'à ce que la viscosité domine les autres processus et dissipe l'énergie des petits tourbillons sous forme de chaleur (énergie interne, Figure 6).

Comme on a pu le voir à la Figure 6, le soleil est la source principale d'énergie dans le système atmosphérique. On peut donc s'attendre à d'importantes variations d'énergie et de sa répartition au sein des quatre pools susmentionnés en fonction de la période de la journée et de la saison. Un concept qui permet de caractériser la proportion entre la production et la destruction de la turbulence est la stabilité. D'après la Figure 6, la production d'énergie turbulente a deux origines (pools MKE et énergie potentielle), mais les échanges avec le pool d'énergie potentielle sont réversibles. La stabilité décrit le rapport entre les contributions des deux origines de la turbulence.

Plus spécifiquement, la stabilité de l'atmosphère caractérise la tendance d'une masse d'air à se déplacer verticalement sous l'impulsion d'une perturbation. En considérant ce processus comme adiabatique (qui n'échange pas de chaleur), la température de cette masse d'air (T_{ma}) évolue avec l'altitude et son volume se dilate ou se comprime. Selon la variation de température de l'air (T_a) environnant avec l'altitude, trois situations peuvent se présenter : soit la masse d'air continue de monter en condition instable ($T_{ma} > T_a$), soit elle se stabilise en condition neutre ($T_{ma} = T_a$), soit elle redescend en condition stable ($T_{ma} < T_a$). En d'autres mots, en condition instable, la turbulence augmente. En revanche, si l'atmosphère est stable, l'énergie turbulente n'est pas favorisée et est reconvertie en énergie potentielle.

Cette caractéristique de stabilité peut être calculée d'après le paramètre ξ (-) de la théorie de de Monin-Obukhov :

$$\xi = \frac{z}{L} \quad \text{Équation 5}$$

où z est l'altitude (m) et L la longueur d'Obukhov (m) :

$$L = - \frac{u_*^3}{\kappa \left(\frac{g}{\bar{\theta}} \right) \overline{w' \theta'}} \quad \text{Équation 6}$$

où u_* est la vitesse de friction (ms^{-1}), κ la constante de von Karman ($= 0,4$), g l'accélération gravitationnelle ($9,81 \text{ ms}^{-2}$), $\bar{\theta}$ la température potentielle moyenne de l'air (K) et $\overline{w' \theta'}$ la covariance de la composante verticale fluctuante de la vitesse de vent w' (ms^{-1}) et de la température potentielle

fluctuante de l'air θ' . On trouve dans le paramètre de stabilité ξ le rapport entre les effets de flottabilité (lié à θ) et du cisaillement (lié à u_*) entre les masses d'air à la hauteur z (Figure 8). La vitesse de friction représente $\sqrt{\frac{\tau}{\rho}}$ où τ est la contrainte de cisaillement (Nm^{-2}) divisée par la masse volumique ρ (kgm^{-3}). Cette théorie montre que, pour une surface horizontale et homogène, la turbulence est contrôlée par quatre variables : z , u_* , $\overline{w'\theta'}$ et $\frac{g}{\theta}$.

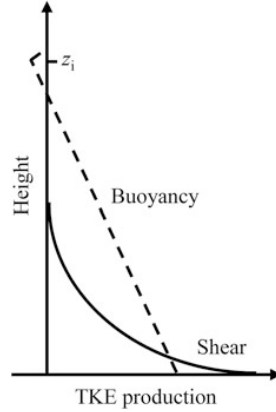


Figure 8 – Profil de la production d'énergie cinétique turbulente par cisaillement et flottabilité pour une couche limite convective (Lee, 2018)

D'après la Figure 8, la TKE est inversement proportionnelle à la hauteur. L'espace des quelques mètres au-dessus de la surface du sol est appelé couche limite de surface (CLS). Cette couche est la plus influencée par la nature de la surface et il s'y produit la plupart des phénomènes micrométéorologiques et des échanges entre les écosystèmes et l'atmosphère. La turbulence est ici majoritairement responsable de la diffusion turbulente des caractéristiques de l'écoulement et des gaz émis à la surface. C'est dans cette couche qu'ont lieu les mesures de flux par CT entre l'atmosphère et les écosystèmes.

2.2. Covariance de turbulence et bilan énergétique

Avant de discuter de la problématique de la non-fermeture du bilan énergétique au regard de la littérature, il est nécessaire de présenter les fondements théoriques qui mènent à la covariance de turbulence, qui est mesurée par le dispositif, et qui permet d'obtenir les flux turbulents $H + LE$ de l'Équation 5. Les hypothèses qui soutiennent la validité de cette méthode vont également être exposées. Ensuite, les formules qui permettent d'obtenir R_{net} , G , S sont données. Il est important de noter que celles-ci ne sont pas issues de la covariance turbulence.

La théorie sur la covariance de turbulence et le bilan énergétique exposée dans ce chapitre est principalement inspirée de (Leuning, 2004 ; Aubinet et al., 2012).

2.2.1. Cadre théorique de la covariance de turbulence

La covariance de turbulence, pour un système de mesure unique, découle de l'équation générale de conservation d'une quantité ψ (scalaire ou vectorielle) pour un volume d'air infinitésimal qui s'écrit :

$$F_\psi = \frac{\partial \rho_a \psi}{\partial t} + \vec{\nabla}(\vec{u} \rho_a \psi) + K_\psi \Delta(\rho_a \psi) \quad \text{Équation 7}$$

où F_ψ le flux d'émission ou d'absorption du scalaire ψ , ρ_d est la densité de l'air sec, $\vec{\nabla}$ et Δ représentent les opérateurs divergence $\left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z}\right)$ et laplacien $\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2}, \frac{\partial^2}{\partial y^2}, \frac{\partial^2}{\partial z^2}\right)$, $\vec{u}$ le vecteur vitesse de vent et K_ψ le facteur de diffusion moléculaire de ψ (Aubinet et al, 2012). Cette équation signifie que l'émission/absorption F_ψ de ψ d'un volume infinitésimal peut résulter de trois termes, respectivement : du taux de transformation de ψ , des échanges convectifs avec l'extérieure du volume et par diffusion moléculaire de ψ .

Si ψ vaut 1, l'Équation 7 devient l'équation de continuité, si ψ représente enthalpie de l'air, la relation revient à l'équation de conservation de l'enthalpie, si ψ est le rapport de mélange d'un composant atmosphérique (H_2O , CO_2 , CH_4 , etc.), il s'agit de l'équation de conservation d'un scalaire et, enfin, si ψ symbolise une composante de la vitesse de vent, l'Équation 7 constitue l'équation de conservation de la quantité de mouvement. Pour plus de détails, voir Aubinet et al. (2012).

L'effet de la turbulence sur les caractéristiques temporelles d'un écoulement décrite par Reynolds suit la décomposition suivante :

$$\psi = \bar{\psi} + \psi' \quad \text{Équation 8}$$

qui est représenté à la Figure 9.

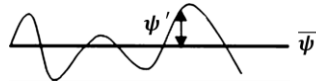


Figure 9 – Représentation schématique de la décomposition de Reynolds pour le scalaire ψ (Foken, 2008)

Il s'agit des composantes moyenne et fluctuante du signal du scalaire ψ où :

$$\bar{\psi} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \psi(t) dt \quad \text{Équation 9}$$

Ceci implique l'hypothèse d'ergodicité et la condition que les fluctuations soient stationnaires durant la période d'intégration. Pour plus de détails, se référer à Kaimal et Finnigan (1994).

D'après Leuning (2004), l'Équation 7 peut être réécrite, en remplaçant ψ par χ_s , qui est le rapport du mélange d'un composant atmosphérique dans l'air, et d'après la décomposition de Reynolds, comme suit :

$$\bar{F}_s = \bar{\rho}_d \frac{\partial \bar{\chi}_s}{\partial t} + \bar{\rho}_d \bar{u} \vec{\nabla}(\bar{\chi}_s) + \vec{\nabla} \left[\overline{\rho_d u' \chi_s'} \right] \quad \text{Équation 10}$$

On peut remarquer qu'il n'y figure plus le terme de diffusion, dont les flux sont considérés comme négligeables vis-à-vis de la nature des autres flux. Cette équation peut être ensuite intégrée pour un volume de contrôle représentatif de la parcelle de surface A (L x L) dans lequel les échanges de flux avec l'atmosphère sont mesurés à la hauteur h :

$$\bar{F}_s = \frac{1}{A} \int_0^h \int_0^L \int_0^L \left[\begin{array}{l} \overline{\rho_a \frac{\partial \chi_s}{\partial t}} \quad (I) \\ + \overline{\rho_a u \frac{\partial \chi_s}{\partial x}} + \overline{\rho_a v \frac{\partial \chi_s}{\partial y}} + \overline{\rho_a w \frac{\partial \chi_s}{\partial z}} \quad (II) \\ + \frac{\partial \overline{\rho_a u' \chi_s'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{\rho_a v' \chi_s'}}{\partial y} \quad (III) \\ + \frac{\partial \overline{\rho_a w' \chi_s'}}{\partial z} \quad (IV) \end{array} \right] dx dy dz \quad \text{Équation 11}$$

Les quantités u , v et w sont les composantes de la vitesse du vent dans les directions orthogonales x , y et z du volume de contrôle $VC = A \times h$ (Figure 10). Cette équation de flux de production et de stockage signifie que le composant atmosphérique peut être soit stocké dans le volume de contrôle (I), soit transporté par advection (II) ou par turbulence (III et IV).

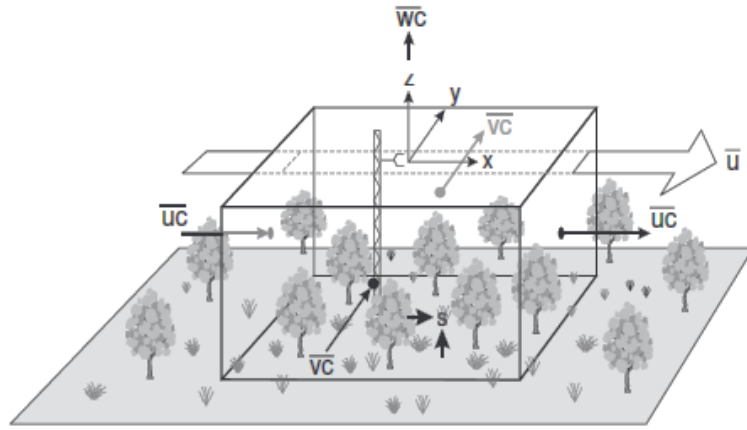


Figure 10 – Schéma du volume de contrôle sur terrain homogène (Leuning, 2004)

Cette équation fait l'objet de davantage de simplifications, fondées sur diverses hypothèses qui sont largement discutées par Finnigan et al. (2003) et qui ne seront pas toutes exposées ici. Dans le cas de l'équation de conservation de la quantité de mouvement, $S_{u,v,w}$ représente les forces qui s'appliquent sur le volume. Il s'agit des forces de trainée, de pression, de Coriolis, de viscosité ou de flottabilité. Les premières sont considérées comme négligeables pour une surface plate et homogène horizontalement dans la couche limite au-dessus de la rugosité. Seule la quantité de mouvement verticale est considérée.

D'autres simplifications consistent notamment, en choisissant le système de coordonnées qui annule $\bar{u}$ et $\bar{v}$, à considérer la couche d'air horizontale où se situe le système de mesure comme homogène (gradients horizontaux nuls) et stationnaire (dérivées temporelles nulles), et les flux mesurés comme représentatifs du volume de contrôle. Ceci implique que le système de mesure soit installé sur un terrain plat et homogène. L'équation devient alors (Leuning, 2004) :

$$\bar{F}_s = \overline{\rho_a w' \chi_s'}|_h + \int_0^h \overline{\rho_a \frac{\partial \chi_s}{\partial t}} dz \quad \text{Équation 12}$$

où $\overline{w' \chi_s'}$ est la covariance de turbulence. Le flux du scalaire s a donc deux origines, respectivement : un échange avec l'extérieur à la hauteur de mesure h et la production/l'absorption du scalaire par une source/un puit entre le bas et le haut du volume de contrôle. Ce dernier terme peut être également appelé taux de stockage de s entre le sol et la hauteur de mesure.

Les flux turbulents de chaleur sensible et de chaleur latente moyens s'écrivent comme suit :

$$\bar{H} = \bar{\rho}_a c_p \overline{w'T_a'}|_h \quad \text{Équation 13}$$

$$\overline{LE} = \lambda M_w \overline{C_a w' \chi_w'}|_h \quad \text{Équation 14}$$

où ρ_a est la densité de l'air (kg m^{-3}), c_p la chaleur spécifique de l'air à pression constante ($\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$), T_a la température de l'air (K), λ la chaleur latente de l'eau (J kg^{-1}), M_w la masse molaire de l'eau (kg mol^{-1}), C_a la concentration de l'air sec (mol m^{-3}) et χ_w la fraction humide de l'air (mol mol^{-1}).

Les flux mineurs associé au taux de stockage S dans l'Équation 1, qui sera davantage développé au point suivant, comporte notamment un flux lié à la CT. Il s'agit du flux radiatif ou d'énergie solaire utilisée par la photosynthèse ou de chaleur libérée par la respiration de la biomasse. L'équation générale qui traduit ce processus s'écrit :



En considérant que le flux de CO_2 mesuré par la station de CT est capté ou issu de l'écosystème étudié, on peut établir le lien suivant :

$$\overline{S_p} = -\alpha_p \overline{F_{\text{CO}_2}} \quad \text{Équation 16}$$

où le taux de stockage est estimé d'après la multiplication d'une constante $\alpha_p = 0,469 \text{ J } \mu\text{mol}^{-1}$ (Blanken et al., 1997) par le flux de CO_2 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) mesure par CT. Cette constance traduit l'énergie nécessaire ou libérée par l'équation générale de la photosynthèse en fonction du CO_2 .

2.2.2. Calcul des flux non turbulents

Pour en revenir à notre équation du bilan énergétique (Équation 1), les calculs des flux R_{net} , G et les autres termes de S vont être explicités dans cette partie d'après Leuning et al. (2012) et Eshonkulov et al. (2019a,b).

Le flux de rayonnement net est obtenu à partir d'un radiomètre et de la relation suivante :

$$R_{\text{net}} = SW_{\text{in}} + LW_{\text{in}} - SW_{\text{out}} - LW_{\text{out}} \quad \text{Équation 17}$$

où SW et LW sont les flux de rayonnement d'ondes courtes et longues entrants (in) et sortants (out). Ensuite, le flux de chaleur dans le sol G est directement mesuré à z_m de profondeur et le taux de stockage d'énergie dans le sol S_G entre la surface et z_m est donné par :

$$S_G = \int_{z_m}^0 C_s \frac{dT_s}{dz} dz \quad \text{Équation 18}$$

où C_s la capacité thermique volumique du sol ($\text{J m}^{-3} \text{K}^{-1}$) qui est fonction de l'humidité du sol. Selon de Vries (1963), C_s est obtenu par :

$$C_s = (\theta + 0,46 (1 - \phi - X_0) + 0,60 X_0) c_w \quad \text{Équation 19}$$

où θ est le contenu volumique en eau du sol (m^3m^{-3}), X_0 la fraction volumétrique du sol en carbone organique (m^3m^{-3}) et c_w la capacité thermique volumique de l'eau ($4190 \cdot 10^3 \text{ J m}^{-3} \text{ K}^{-1}$). La porosité du sol (m^3m^{-3}) est obtenue à partir de densité apparente du sol ρ_s (kg m^{-3}) et de la densité de la fraction solide du sol ρ_m (kg m^{-3}) comme suit :

$$\phi = 1 - \frac{\rho_s}{\rho_m} \quad \text{Équation 20}$$

Enfin, les autres termes de taux de stockage de chaleur dans le volume de contrôle, qui étaient regroupés sous la lettre S dans l'Équation 1, sont : S_H et S_{LE} associés respectivement aux changements de température et de pression de vapeur de l'air et S_c lié aux changements de température de la culture. Ces taux de stockages sont obtenus comme suit :

$$S_H = \int_0^h \rho_a c_p \frac{dT_a}{dt} dz \quad \text{Équation 21}$$

$$S_{LE} = \int_0^h \lambda M_w C_d \frac{d\chi_w}{dt} dz \quad \text{Équation 22}$$

dont les variables sont déjà définies pour H et LE (Équation 13 et Équation 14) ;

$$S_c = \int_0^h ((m_{bf} - m_{bs}) c_w + m_{bs} c_{bs}) \frac{dT_b}{dt} dz \quad \text{Équation 23}$$

où m_{bf} est la masse de la matière fraîche, qui vient d'être récoltée, et m_{bs} la masse de la matière sèche de la biomasse au-dessus du sol (kg), $m_{bf} - m_{bs}$ donne la masse d'eau m_w (kg) au sein de la biomasse, c_{bs} et c_w les chaleurs spécifiques de la biomasse et de l'eau ($\text{J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) et T_b la température représentative de la biomasse (K).

2.2.3. Fréquence et fenêtre d'intégration de la moyenne des mesures de flux

On a vu à l'Équation 12 que la covariance de turbulence est une moyenne temporelle du produit de deux variables fluctuantes, dont la composante de vitesse verticale de vent. Dans cette partie, nous allons nous intéresser au choix de la période de la moyenne calculée (d'après Aubinet et al., 2012).

Tout écoulement turbulent peut être vu comme la superposition de différentes tailles de tourbillons (Aubinet et al., 2012). D'après l'hypothèse de Taylor (*frozen turbulence*, 1938), ces tourbillons ne changent pas significativement de tailles pour un observateur/dispositif de mesure statique lorsqu'ils sont transportés par le vent moyen (Figure 11).

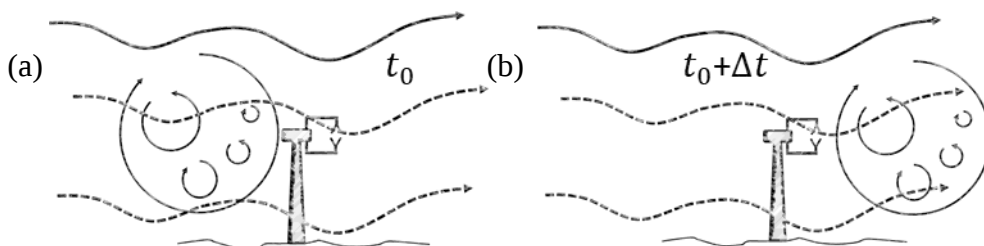


Figure 11 – Représentation de l'hypothèse de Taylor de la « frozen turbulence » entre l'instant t et $t+\Delta t$ par rapport à un dispositif de mesure (réalisé d'après Stull, 1998)

Comme nous l'avons vu, ces tourbillons turbulents sont responsables de la dispersion de scalaires dans l'atmosphère, et donc des flux que l'on mesure. Chaque taille de tourbillon transporte une partie du scalaire et, si l'on veut mesurer le flux total, il est important de capter l'ensemble des tourbillons. Pour un observateur ou un dispositif de mesure, les tourbillons s'apparentent à une superposition de signaux sinusoïdaux (Figure 12).

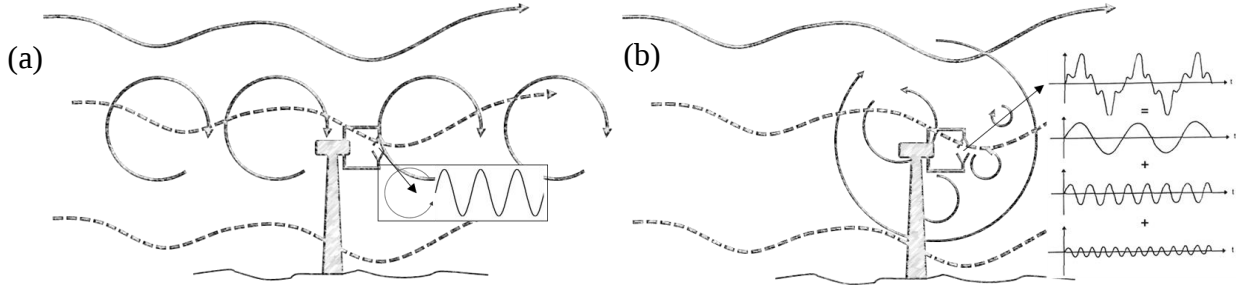


Figure 12 – (a) Représentation du lien entre le signal mesuré et (b) de la décomposition en fréquence des tourbillons turbulents

Pour cela, deux paramètres importants nécessitent d'être fixé : la fréquence d'échantillonnage/mesure f_e et la période d'observation du signal T . Ils permettent de capturer l'ensemble du spectre du signal turbulent (Figure 13) et couvrent le signal de plus basse fréquence ($1/T$) et de plus haute fréquence (f_e).

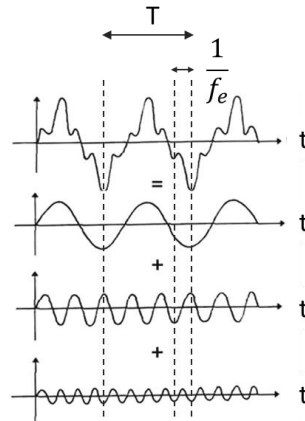


Figure 13 – Illustration du choix de la fréquence d'échantillonnage et de la période d'observation du signal

En théorie, l'analyse spectrale permet de décomposer un signal temporel χ_s (rapport de mélange d'un composant atmosphérique dans l'air) en fonction des contributions en fréquentielle par la transformée de Fourier :

$$TF_s(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} \chi_s(t) e^{-i\omega t} dt \quad \text{Équation 24}$$

où ω représente la pulsation, soit $\omega = 2\pi f$ où f est la fréquence du signal.

En élevant au carré la transformée de Fourier, on obtient le spectre de puissance ou densité spectrale C_{ss} du signal χ_s et la densité cospectrale C_{sw} de deux signaux w (composante verticale de la vitesse du vent) et χ_s :

$$C_{ss}(f) = TF_s \cdot TF_s^* \quad \text{Équation 25}$$

$$C_{ws}(f) = TF_w \cdot TF_s^* \quad \text{Équation 26}$$

où TF_s^* est le complexe conjugué de TF_s . L'Équation 26 traduit l'importance ou « force » relative des différents tourbillons dans le transport des scalaires ou l'énergie qu'ils transportent. L'intégrale de $C_{ss}(f)$ et de $C_{ws}(f)$ sur l'ensemble du (co)spectre permet d'obtenir la (co)variance du/des signal/aux :

$$\int_0^{+\infty} C_{ss}(f) df = \sigma_s^2 \quad \text{Équation 27}$$

$$\int_0^{+\infty} C_{ws}(f) df = \overline{w' \chi_s'} \quad \text{Équation 28}$$

Le cospectre donne la force ou l'énergie totale de l'ensemble des tourbillons turbulents. Ces développements sont utilisés notamment pour écarter des estimations de flux erronées en lien, par exemple, avec l'influence du système de mesure placé dans l'écoulement, l'oscillation de la tour, l'effet de forçage de la topographie, etc. Le filtrage de ces perturbations consiste à comparer le cospectre observé aux cospectres théoriques de turbulence (Sievers et al., 2015 ; Kaimal et al., 1972 ; Moore, 1986 ; Novick et al., 2014).

Dans la pratique, pour déterminer la fréquence d'échantillonnage et la période d'observation, une analyse de « l'ogive » (courbe de densité cospectrale cumulée) est effectuée (Desjardins et al., 1989 ; Oncley et al., 1996 ; Foken et al., 2006 ; Lee et al., 2004) par :

$$Og_{ws}(f_0) = \int_{\infty}^{f_0} C_{ws}(f) df \quad \text{Équation 29}$$

Sievers et al. (2015) propose une illustration du cas idéal (Figure 14) pour déterminer la fréquence T_2 et la période à moyenner T_1 .

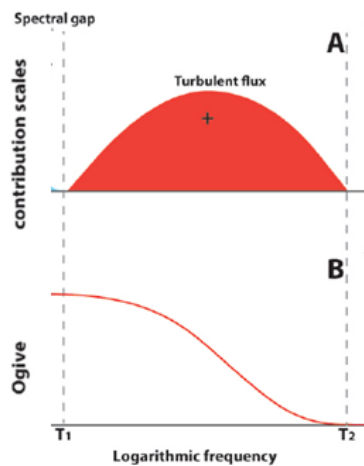


Figure 14 – (A) Illustration du cospectre (Équation 26) et (B) de l'ogive correspondante dans un cas idéal pour déterminer la fréquence et la période idéales (d'après Sievers et al., 2015)

Lorsqu'on intègre le cospectre, l'ogive augmente à partir de T_2 et converge vers une asymptote à partir de T_1 . C'est-à-dire que pour obtenir toute « l'énergie » du signal, il n'est pas nécessaire de mesurer à plus haute fréquence que $1/T_2$ et d'observer le signal plus longtemps que T_1 . On retrouve

communément dans la littérature une période d'intégration T_1 de 30 minutes et une fréquence d'échantillonnage $1/T_2$ de 10 ou 20 Hz qui est liée aux limites du système de mesure. Dans la pratique, l'Équation 5 du bilan nécessite donc également moyenner de R_{net}, G, S sur la même période de 30 minutes.

2.2.4. Empreinte ou surface émettrice des flux mesurés

La covariance de turbulence mesure à une certaine hauteur des flux qui proviennent des échanges avec l'écosystème en amont de la direction principale du vent. L'empreinte (en anglais *footprint*) des flux caractérise la forme, la distance et la contribution des surfaces émettrices dont on mesure le flux à un moment donné, selon les conditions atmosphériques et les caractéristiques des surfaces (Figure 15). On peut se représenter l'empreinte comme une analogie de l'observation en un point fixe de la dispersion de différents colorants déversés en amont d'un cours d'eau. La couleur et l'intensité de la couleur observée dépendront de la distance par rapport à l'observateur, de la distance par rapport aux berges où les colorants ont été déversés et du type d'écoulement du cours d'eau (turbulent ou laminaire).

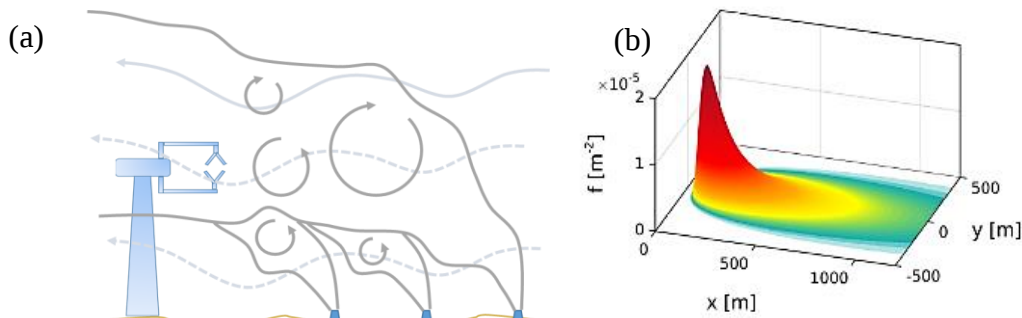


Figure 15 – (a) Représentation du dispositif de mesure par CT et de l'émission de flux en vert d'un écosystème (analogie à la fumée de cheminées en amont du vent moyen en gris) (b) Illustration en 3D des contributions relatives des surfaces f (m^2) en amont du vent dans le flux qui est mesuré, d'après l'illustration et le modèle de Kjlun et al. (2015).

Le calcul de l'empreinte du flux permet notamment d'interpréter les mesures de flux (critère qualité, Aubinet et al., 2012). Idéalement, le dispositif de CT devrait être placé sur un terrain plat et homogène (hypothèses qui mènent à l'Équation 12) et donc les limites de ce terrain doivent en principe englober l'empreinte des surfaces émettrices des flux mesurés.

La définition fondamentale de la fonction de l'empreinte est donnée ici brièvement, car elle sera calculée dans ce cadre pour répondre à un des objectifs de ce travail. Elle est obtenue à partir de l'intégrale de l'équation de la diffusion (Wilson et Swaters, 1991 ; Pasquill et Smith, 1983) et, d'après Kjlun et al. (2015), s'écrit de la manière suivante. Si on définit système de coordonnées de l'empreinte locale où le dispositif de mesure est placé au-dessus de l'origine (0;0) et si l'axe x indique la direction amont du vent, on peut écrire :

$$F_c(0,0,z_m) = \int_{\mathcal{R}} Q_c(x,y) f(x,y) dx dy \quad \text{Équation 30}$$

où F_c est le flux turbulent mesuré à la hauteur z_m , Q_c la source ou le puit du flux du scalaire considéré, f l'empreinte du flux et $\mathcal{R}$ le domaine d'intégration. Le calcul de la dérivation et l'évaluation des

paramètres de l’empreinte est basé sur un type de modèle de dispersion Lagrangien et stochastique de particules. Pour plus de détails sur les fondements dont est issu le calcul de l’empreinte, se référer à Kjlun et al. (2002, 2004 et 2015).

Notons pour la suite que certains paramètres sont utilisés pour calculer l’empreinte. La hauteur de mesure z_m est dynamique, car elle dépend notamment de la hauteur de culture. La relation qui permet à chaque demi-heure d’obtenir z_m s’écrit :

$$z_m = z_{CT} - 0,67 z_c \quad \text{Équation 31}$$

où z_{CT} est la hauteur où est mesurée la covariance de turbulence (m) et z_c la hauteur de la culture (m). Le terme $0,67 z_c = d$ est appelé hauteur du plan de vitesse nulle ou hauteur où on peut considérer la vitesse de vent nulle suite à la présence d’obstacle sur le sol. Elle est souvent approximée par 2/3 ou 67% de la hauteur des obstacles.

D’autres paramètres influencent le modèle, comme la vitesse de vent, la hauteur de couche limite atmosphérique, la longueur d’Obukhov et la vitesse de friction (cf. 2.1). Le dernier paramètre est la longueur de rugosité de surface z_0 (m) qui décrit l’irrégularité moyenne de la surface et intervient également dans la loi logarithmique de vitesse de vent au-dessus du sol. De la même manière que pour d , la rugosité peut être approximée à 10% de la hauteur des éléments de surface.

Il est bon de montrer pour la suite l’effet de la stabilité atmosphérique sur le profil de l’empreinte (Figure 16).

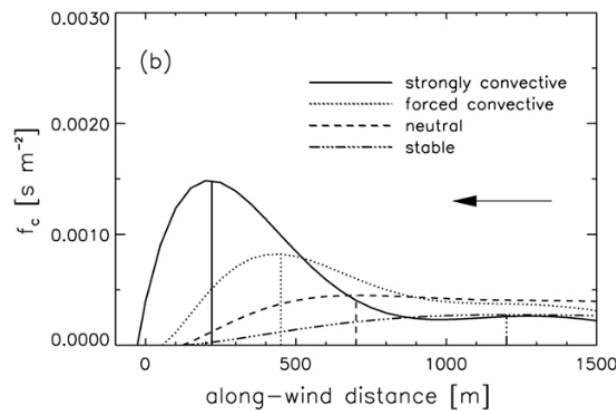


Figure 16 – Mesures de concentration pour quatre cas de stabilité en fonction de la distance en amont de la direction principale de vent. Le pic de concentration est représenté par les traits verticaux (Kljun et al., 2002).

Comme remarqué ci-avant, plus les conditions sont stables moins il y a de turbulence et de mélange des couches d’air. Ainsi, un gaz émis à la surface du sol peut dériver sur quelques centaines de mètres avant d’atteindre la hauteur de mesure de CT.

2.3. Etat de l’art des hypothèses de la non-fermeture du bilan énergétique

2.3.1. Erreurs de mesures

D’après Aubinet et al. (2012), l’erreur de mesure désigne l’écart entre la valeur mesurée et la vraie valeur. L’erreur est à distinguer de l’incertitude qui représente une gamme de valeurs limites au sein

desquelles la valeur mesurée a une certaine probabilité de tomber. L'incertitude peut être également décrite par la fonction de densité de probabilité de la distribution de l'erreur.

De manière générale, deux types d'erreur peuvent survenir : une erreur systématique et/ou une erreur aléatoire. La première se réfère à une sur ou sous-estimation constante qui peut être évaluée et corrigée. A contrario, l'erreur aléatoire est stochastique (qui se produit au hasard) et donc imprévisible. De par son caractère aléatoire, elle ne peut donc pas être corrigée.

Dans ce contexte, l'erreur aléatoire survient :

- (1) du caractère stochastique de la turbulence, de la fréquence de mesure et de la période moyennée (T_1 et T_2), et de l'incertitude dans le calcul de la covariance (Équation 12) pour les flux turbulents ;
- (2) des erreurs aléatoires des instruments de mesure sur la mesure des paramètres environnementaux pour tous les flux, turbulents ou non ;
- (3) et de l'incertitude liée aux changements de direction du vent et de sa vitesse qui modifie la couverture de l'empreinte de flux et la représentativité des surfaces de l'écosystème étudié par CT. Cette erreur ne concerne de nouveau que les flux turbulents. Pour plus d'informations sur les erreurs de mesure, se référer à Aubinet et al. (2012).

Les différents systèmes de mesures des flux d'énergie présentent de grandes différences en termes de distance, de taille, d'hétérogénéité des surfaces émettrices et d'erreurs de mesure. Ces différences ont été illustrées en chiffres et visuellement par Foken (1998b et 2008). Le résidu du bilan énergétique (Équation 2) est de l'ordre de $50\text{--}300 \text{ Wm}^{-2}$ et pourrait s'apparenter aux erreurs de mesures (Tableau 1).

Tableau 1 – Ordres de grandeur des flux énergétiques et échelles horizontales et hauteurs des mesures associées (Foken, 1998b)

Component	Error (%)	Energy (W/m^2)	Horizontal scale (m)	Height (m)
Latent heat flux	5–20	20–50	100	2–10
Sensible heat flux	5–20	10–30	100	2–10
Net radiation	5–20	20–100	10	1–2
Ground heat flux	20–50	20–50	0.1	–0.02 to –0.1
Storage term without storage	20–50	20–50	0.1–1	–0.02 to –0.1

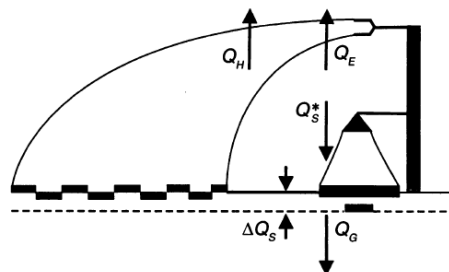


Figure 17 – Représentation de la hauteur de mesure et de l'échelle horizontale des composantes du bilan énergétique. Q_H , Q_E , Q_s^* , Q_G et ΔQ_s sont respectivement les flux de chaleurs sensibles, latentes, radiatives nets, du sol et du stockage du sol (Foken, 2008)

L'amélioration des capteurs ainsi que des méthodes de correction et l'application de critère de qualité plus rigoureux ont considérablement amélioré la qualité des mesures (e.g. Mauder and Foken 2006; Foken et al., 2010). Les résultats de nombreuses expérimentations et modélisations montrent

aujourd'hui que les erreurs de mesures des composantes du bilan et les termes de stockages ne peuvent expliquer la non-fermeture du bilan et n'ont pas d'influence sur le résidu à condition que les mesures soient réalisées avec soin. (e.g. Foken, 2008 ; Leuning et al., 2012 ; Aubinet et al., 2012). On retrouve dans la littérature de nombreux ouvrages de référence sur l'instrumentation et le traitement des données pour réaliser de bonnes mesures par CT (Kaimal et Finnigan, 1994 ; Lee et al., 2005 ; Aubinet et al., 2012).

Il y a peu de raisons de croire que le flux radiatif net soit systématiquement surestimé par l'ensemble de la communauté scientifique. Il existe des différences entre les différents radiomètres sur le marché, mais Kohsiek et al. (2007), pour ne citer qu'eux, ont comparé les performances de plusieurs radiomètres de différents constructeurs lors des expérimentations EBEX-2000 et ont conclu que l'erreur maximale sur le flux radiatif était 25 Wm^{-2} (5 %) pendant la journée et 10 Wm^{-2} la nuit.

2.3.2. Négligence ou sous-estimation des termes de taux de stockage

La mesure du flux de sol est réalisée le plus communément à l'aide d'un fluxmètre, qui ressemble à une assiette (en anglais *heat flux plate*). Il est enterré à quelques centimètres de la surface du sol pour éviter de confondre les échanges énergétiques entre le sol et l'air et l'énergie utilisée par de l'eau pour s'évaporer au niveau du front d'évaporation quelques millimètres sous la surface (Buchan, 1989). Ochsner et al. (2007) témoignent d'une contribution du flux de chaleur du sol entre 1-10 % de la radiation nette pour les cultures.

Un lien fut établi entre l'hétérogénéité de la couverture du sol, et donc l'exposition au soleil de la terre, et la non-fermeture du bilan par Foken (1998). Le stockage d'énergie dans le sol au-dessus du fluxmètre fut considéré comme une des principales raisons du problème (Culf et al., 2004)). Il est possible de le mesurer correctement selon deux méthodes : par *combination method* (Fuchs et Tanner, 1968) ou par analyse harmonique (van Wijk et de Vries, 1963). Heusinkveld et al. (2004) parlent de $10\text{-}200 \text{ Wm}^{-2}$ lorsque ce stock est omis dans les cas de sols nus ou à couverture végétale éparse.

Leuning et al. (2012) mentionnent qu'il est parfois difficile de réaliser de bonnes mesures de sol lorsque la capacité thermique du sol varie avec la profondeur à cause de la variation de la teneur en eau du sol et/ou à cause de grandes variabilités spatiale et temporelle des flux à travers la parcelle expérimentale. Ils préconisent d'ailleurs l'utilisation de multiples points de mesure afin d'établir le flux moyen de la parcelle.

Plus récemment, on observe un intérêt croissant pour l'évaluation des stocks mineurs d'énergie (e.g. : Meyers et Hollinger, 2004 ; Jacob et al., 2008 ; Yuan et al., 2014 ; Masseroni et al., 2014 ; Xu et al., 2017 ; Eshonkulov et al., 2019a), à savoir l'énergie stockée dans le système sol-plante-atmosphère, qui ont longtemps été omis parce qu'ils sont compliqués à mesurer ou considérés comme négligeables. Ces auteurs montrent que leurs évaluations améliorent en partie la fermeture du bilan.

Une autre approche réalisée par Leuning et al. (2012) est de regarder si la fermeture du bilan n'est pas améliorée en réalisant la moyenne des flux énergétiques sur 24h (minuit à minuit). En effet, la non-fermeture du bilan horaire est notamment associée à la sous-estimation des termes de stockage (sol, air, biomasse). D'après l'hypothèse que sur une période de 24h, l'énergie stockée le matin dans

le sol, l'air et la biomasse est relâchée localement dans l'après-midi, ces flux journaliers se compenseraient. Ils ont testé leur hypothèse sur différents cas d'études et ont obtenu des résultats plus ou moins probants. De manière plus générale, ils ont analysé 948 années-sites de la base de données La Thuile et les résultats montrent un déplacement de la distribution de fréquences des pentes de régression vers la droite, davantage centrée sur 1 (Figure 18).

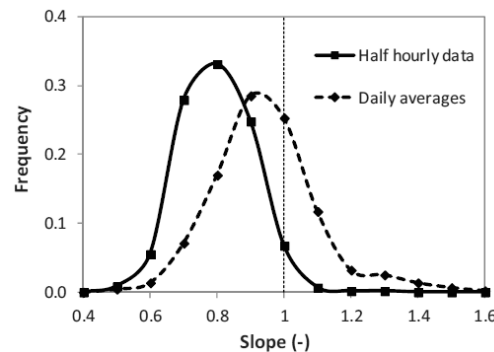


Figure 18 – Distribution de fréquence des pentes de la régression entre les flux de chaleur latente et sensible (H+LE) et l'énergie disponible (R_{net-G}), dont l'ordonnée à l'origine a été forcée à zéro, pour les moyennes sur 30 min et 24h (base de données La Thuile)

Il reste maintenant à expliquer l'étalement de la distribution de fréquence ou les raisons pour lesquelles $H + LE$ sous/surestime l'énergie disponible à l'échelle journalière.

Eshonkulov et al. (2019a) confirment une amélioration maximale du bilan de 83 à 89 % pour un champ de froment en période de croissance (entre avril et juillet) en incluant les stocks mineurs. Ils ont observé que les stocks moyens journaliers les plus faibles sont les changements d'enthalpie et d'humidité de l'air (entre $-1,8$ et $1,9 \text{ Wm}^{-2}$) et que les stocks associés à la biomasse et au changement d'enthalpie de la canopée atteignent respectivement entre $8,7$ et $28,4 \text{ Wm}^{-2}$ et $-8,8$ et $9,5 \text{ Wm}^{-2}$. Concernant le stockage moyen journalier d'énergie dans le sol, au-dessus du fluxmètre, leurs résultats indiquent des variations proches de 0 Wm^{-2} , comme on pourrait s'y attendre, avec des minimas et maximas autour de -80 et 110 Wm^{-2} . Ils rapportent également une très grande variabilité spatiale de ce stock entre les mesures réalisées au niveau de la station de CT et celles prises au sein de la zone d'émission des flux turbulents (« footprint ») aux alentours de midi avec une différence maximale d'environ 60 Wm^{-2} .

Ces chiffres corroborent les flux de stockage obtenus par Jacob et al. (2008) pour une prairie aux Pays-Bas et de Masseroni et al. (2014) pour une culture de maïs en Italie. Ils confirment également l'observation selon Leuning et al. (2012) que le stockage d'énergie par la colonne d'air sous la hauteur de mesure, associé à la température et à l'humidité de l'air, peut être négligé pour les prairies et les cultures.

2.3.3. Contributions non locales de flux turbulents dans le BE

Plusieurs sources de contribution non locales de flux turbulents sont évoquées pour expliquer la non-fermeture du BE. Elles ne seraient pas mesurées par la CT d'après les hypothèses qui mènent à l'Équation 12 ou de par le choix de la période de la moyenne calculée qui serait trop courte. Les origines des contributions non locales qui sont évoquées seraient en lien avec (1) l'hétérogénéité

macroscopique des surfaces (>>>empreinte) et l'advection (termes III et IV, Équation 11) et (2) aux transports d'énergie par de plus larges tourbillons, de fréquence >30 minutes.

2.3.3.1. Advection

L'advection est proposée comme cause de la non-fermeture du bilan par Oncley et al. (2007). L'homogénéité horizontale et verticale de la couche de surface sous le système de CT, hypothèses entre l'Équation 11 et l'Équation 12, n'est pas toujours vérifiée, car le site et les conditions idéales n'existent pas. Même dans le cas où la surface d'étude est assez large d'après les standards micrométéorologiques pour la CT, elle peut malgré tout être influencée par des phénomènes météorologiques et environnementaux à plus grande échelle, qui dépassent largement l'empreinte des émissions de flux mesurés (« footprint ») (Lee, 2018).

Mauder et al. (2007a) ont étudiés les images satellites de l'environnement sur 20 x 20 km² pour quatre site d'expérimentations sur la fermeture du bilan (EBEX-2000 Oncley et al, 2007 ; LIFTASS-2003 Beyrich et Mengelkamp, 2006 ; NIMEX-1 Mauder et al., 2007 ; Heusinkveld et al., 2004) dans des environnements contrastés. Ils montrent que la fermeture est atteinte préférentiellement lorsque les surfaces sont homogènes à une échelle beaucoup plus grande que celle de la zone étudiée par le système de mesure au sol.

L'origine de ces flux horizontaux et verticaux peut être attribuée à la présence de paysages hétérogènes ou à une topographie complexe où apparaissent des zones de convergence/divergence et de recirculations de flux (Katul et al. 2006 ; Foken, 2008 ; Harman et Finnigan, 2010). Oncley et al. (2007) ont montré dans l'expérimentation EBEX-2000 que l'advection horizontale peut atteindre jusqu'à 30 Wm⁻², montrant qu'une part de la non-fermeture est due à un effet non local.

Leuning et al. (2012) discutent dans leur article que, d'après la Figure 18, si seulement 8% des sites présentent une pente >1 pour une moyenne sur 30 min, alors les flux advectifs devraient être essentiellement négatifs pour tous les sites afin d'expliquer la non-fermeture du bilan. Or, ces flux peuvent être autant négatifs que positifs selon le signe du gradient du scalaire des termes II dans l'Équation 11. Ils ont également investigué les gradients de température et d'humidité qui seraient nécessaires afin combler le déficit énergétique par les flux horizontaux et verticaux advectifs. Ils indiquent qu'il faudrait en général des gradients surréalistes pour arriver à combler un déficit de l'ordre de 50-100 Wm⁻². En revanche, si on regarde la distribution de fréquence des pentes pour les moyennes de 24h, on peut effectivement émettre l'hypothèse que l'advection est responsable d'im/exportations d'énergies dans le volume de contrôle. Pour cette période, la distribution de la pente s'étend de part et d'autre de la pente idéale et le déficit est alors de l'ordre de 20-30 Wm⁻². Dans ces conditions, les gradients advectifs pourraient expliquer le reste du déficit.

2.3.3.2. Flux de basse fréquence

Une autre hypothèse associe le problème de la non-fermeture du BE à une contribution non négligeable de flux turbulents à plus basse fréquence, supérieure à 30 minutes (Finnigan et al., 2003 ; Mauder and Foken, 2006 ; Foken et al., 2006). En effet, l'augmentation de la période d'intégration jusqu'à 24h fermerait le bilan énergétique, principalement grâce à l'augmentation du flux de chaleur sensible (Figure 19).

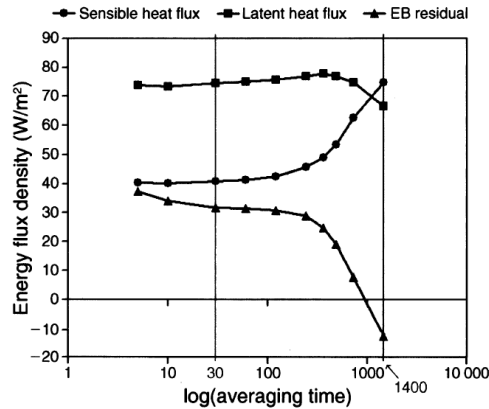


Figure 19 – Influence du logarithme de la période d'intégration de la moyenne (en minutes) des flux de chaleurs sensible et latente et du résidu du bilan énergétique (exprimés en Wm^{-2}) pour une culture de maïs pour toute la période LIFTASS-2003 (Mauder and Foken, 2006)

La covariance de turbulence sur 30 minutes échouerait à capter les plus larges tourbillons de plus basses fréquences (>30 minutes), voir Annexe 2. Foken et al (2006b) ont montré que la période de 30 minutes convient dans environ 85% des cas pour mesurer l'ensemble des flux turbulents et que, dans environ 4-5% des cas, elle ne suffit pas. En revanche, l'augmentation de la période d'intégration de la moyenne jusqu'à 24h rend plus difficile la vérification de la condition de stationnarité. L'utilisation de scintillomètres (Meijninger et al., 2002 et 2006), qui mesurent des flux en réalisant une moyenne spatiale, et non temporelle, basée sur les relations de similarité d'Obukhov (1960), montre des flux de chaleurs sensible et latente estimés 20-50 Wm^{-2} plus importants que dans le cadre de la covariance de turbulence, avec un résidu compensé jusqu'à environ 100 Wm^{-2} maximum. L'utilisation des scintillomètres présente l'inconvénient que les mesures ne sont disponibles que pour de très courtes périodes.

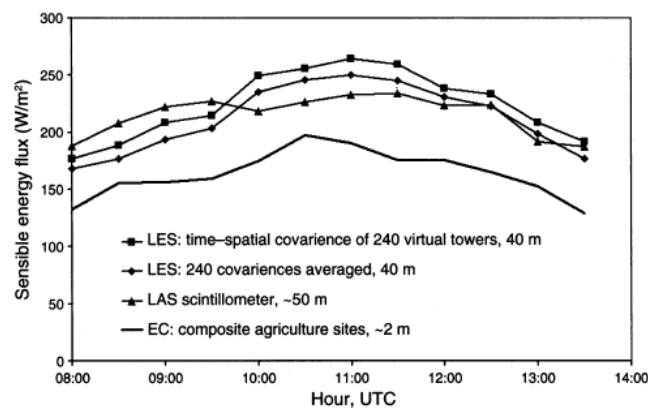


Figure 20 – Comparaison des mesures de flux de chaleur sensible entre les systèmes de covariance de turbulence, scintillomètre (*large aperture scintillometer* LAS, les données ont été corrigées pour la saturation ; Kohsiek et al., 2006) et LES modèle pour le 30 mai 2003 sur une parcelle agricole du projet LITFASS (Foken et al., 2006a)

Utilisant la méthode *Large Eddy Simulation*³ (LES), Kanda et al. (2004) montre également l'importance de circulations tourbillonnaires de mésoéchelle⁴. Les résultats de Foken et al. (2006a)

³ *Large Eddy Simulation* fait référence à un modèle de turbulence qui résout les équations de Navier-Stokes et l'équation de l'énergie cinétique turbulente (TKE). Il est utilisé pour étudier notamment les phénomènes atmosphériques turbulents par Kanda et al. (2004).

⁴ La mésoéchelle désigne en météorologie une échelle intermédiaire entre l'échelle synoptique (MKE) et la micro-échelle (TKE, voir Figure 7), qui caractérisent des phénomènes de durée et d'étendue différentes. Dans le cas de la mésoéchelle,

confirment de grandes différences entre les flux estimés par covariance de turbulence, scintillomètre et LES (Figure 20).

Pour Foken (2008), ces observations mènent à l'hypothèse de l'existence de flux de surfaces, mesurables par covariance de turbulence, et de flux à plus basses fréquences non disponibles par CT ou faisant partie de l'advection (Figure 21), comme probablement mesuré par Oncley et al. (2007).

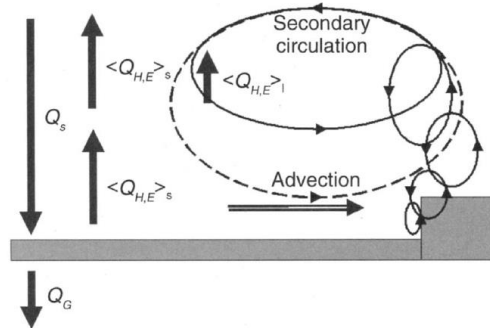


Figure 21 – Schéma de la génération de circulations secondaires et de l'hypothèse de flux turbulents à différentes échelles basés sur de petits (s) et larges (l) tourbillons. $Q_{H,E}$ sont les flux de chaleurs latente et sensible, Q_s la radiation nette et Q_G les flux dans le sol (Foken, 2008)

Comme seuls les flux des petits tourbillons peuvent être mesurés, il fut proposé par le passé d'attribuer le résidu du bilan aux flux de chaleur sensible et latente en fonction du rapport de Bowen⁵ (Lee, 1998 ; Twine et al., 2000). D'après la Figure 21, il faudrait alors que le rapport de Bowen soit équivalent entre les petits et larges tourbillons pour opérer cette correction (Foken, 2008). Ruppert et al. (2006) montre que ce n'est pas le cas tous le temps et pour tous les scalaires. L'attribution du résidu reste donc une solution en suspens.

Steinfeld et al. (2007) ont montré cependant que les structures à basses fréquences ne suffisent pas expliquer le résidu du bilan. Leur force dépend de la hauteur de mesure, de la vitesse de vent horizontal et de la stabilité atmosphérique. En augmentant la résolution de leur modélisation LES par rapport à celle de Kanda et al. (2004), les auteurs ont pu descendre leur hauteur de mesure virtuelle à 20 m, hauteur plus proche des dispositifs les plus courants de mesure par CT. Leur résultat indique que les contributions basses fréquences représentent une part du résidu du bilan d'un ordre de grandeur plus petit que le résidu observé.

Sievers et al. (2015) discutent dans leur étude du débat qui existe cependant sur l'inclusion ou non des flux non-locaux de basses fréquences pour fermer le bilan énergétique. En effet, dans le cas des recherches qui ont pour but d'étudier des flux qui sont liés à des processus biogéochimiques locaux et d'établir des relations de causalité pour paramétrer des modèles numériques de plus grande échelle, l'inclusion des basses fréquences à peu de sens.

Ces auteurs démontrent ensuite qu'il ne suffit pas nécessairement d'ajuster la période de la moyenne pour capter l'ensemble du cospectre (cf. Figure 14) du flux turbulent mesuré par CT lorsque 30

les phénomènes s'étendent de quelques kilomètres à plusieurs centaines. À la Figure 7, elle correspond à l'échelle où le trou spectral est observé.

⁵ Rapport entre le flux de chaleur sensible et le flux de chaleur latente.

minutes n'est pas suffisant. Pour l'illustrer, ces auteurs expliquent qu'entre la théorie et la pratique, l'existence d'une interruption spectrale (Figure 7) entre (a) les basses fréquences, liées au forçage topographique ou à des phénomènes météorologiques non locaux de grande échelle (Malhi et al., 2004), et (b) les plus hautes fréquences (flux locaux) n'est pas claire (Lee et al., 2004).

Ces auteurs illustrent et expliquent trois situations générales qui peuvent se présenter. Elles sont reprises à la Figure 22 (attention aux échelles logarithmiques des axes). Le premier cas à gauche montre un cas idéal avec une séparation nette entre les différentes contributions. Ce cas permet facilement de déterminer T_1 et T_2 (Figure 14). La deuxième situation au centre illustre un cas plus typique où les deux contributions spectrales se chevauchent et où un compromis pour la valeur de T_1 doit être choisi. L'erreur sur le flux est soit considérée négligeable ou testée. Enfin, le cas de droite affiche une forte influence des basses fréquences par rapport à la turbulence et ce genre de situation est généralement écarté. Dans ce cas, l'ajustement de T_1 ne permet pas de séparer correctement les deux contributions et d'évaluer le flux. Ce genre de cas se produit notamment dans des conditions de faibles flux.

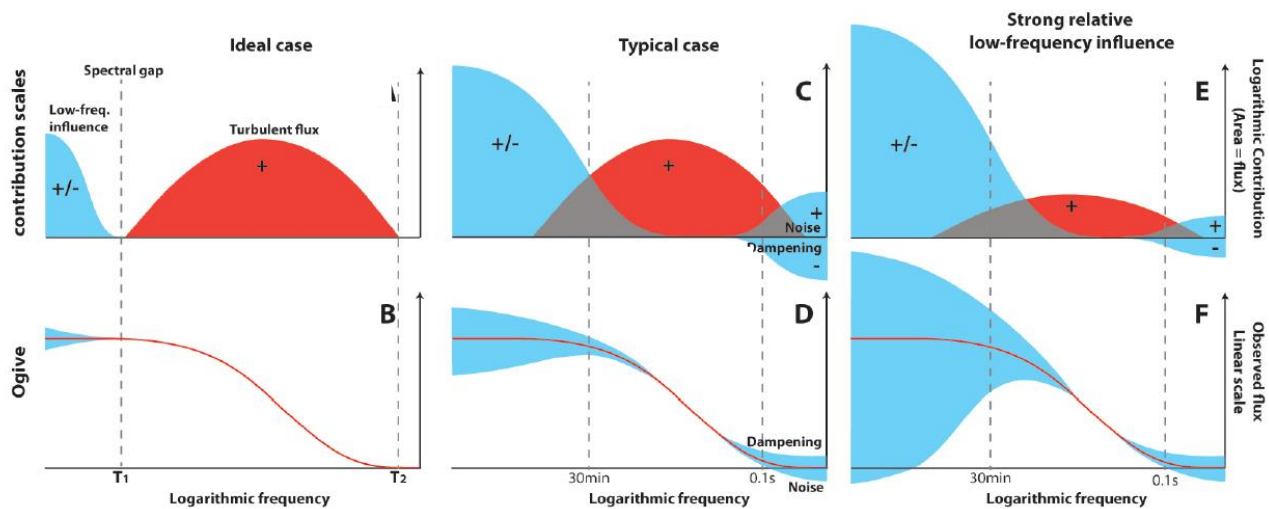


Figure 22 – Cospectre et ogives correspondantes en fonction du logarithme de la fréquence, pour trois situations typiques d'observations. En rouge sont les flux turbulents et en bleu les basses fréquences non locales/le bruit/l'atténuation du signal (Sievers et al., 2015)

Sievers et al. (2015) proposent l'utilisation de la méthode d'optimisation de l'ogive pour séparer la contribution des flux locaux des flux non locaux et trouver T_1 et T_2 . Cette technique ne fait pas de supposition sur la période T_1 et l'existence d'une séparation spectrale de ces contributions. Pour des flux importants ($|H| > 40 \text{ Wm}^{-2}$ et $|LE| > 20 \text{ Wm}^{-2}$), ils montrent que les flux estimés par la méthode conventionnelle et les flux obtenus par optimisation de l'ogive présentent des différences relatives moyennes entre 5 et 20%. En revanche, pour de plus faibles flux de H et LE , ces différences augmentent et sont de l'ordre de 10-20% pour $-0,2 < zL^{-1} < 0,2$ et de 20-1000% pour $|zL^{-1}| > 0,2$, démontrant l'inconvénient de la méthode conventionnelle à séparer les deux contributions spectrales avec une moyenne constante de 30 minutes.

3. OBJECTIFS, HYPOTHÈSES ET MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE

Ce travail a pour objectif de contribuer à l'étude des mécanismes qui expliqueraient la non-fermeture du bilan énergétique observé globalement dans la littérature (cf. 2.3). A cette fin, une analyse pluriannuelle de la qualité de mesure par covariance de turbulence des flux énergétiques est réalisée sur le site de la station ICOS de Lonzée, situé en Hesbaye. Ce site offre les avantages, d'une part, d'une grande culture représentative d'un agroécosystème typique de la région et, d'autre part, de conditions environnementales dynamiques. Par dynamique, il est entendu des modifications de l'environnement à une échelle de temps plus courte que dans le cas des écosystèmes forestiers où, par exemple, les caractéristiques de sol, de biomasse, de hauteur de canopée, etc. évoluent peu d'une année à l'autre. D'après l'hypothèse que des conditions environnementales contrastées permettront de mieux mettre en évidence des situations où le bilan énergétique s'améliore, il sera plus aisé d'identifier les mécanismes qui gouvernent la qualité des mesures.

La station de Lonzée comprend des mesures de covariance de turbulence et de nombreux capteurs de paramètres environnementaux. Les méthodes et les appareils de mesure évoluent constamment, conformément aux directives ICOS, et pour améliorer la qualité des relevés effectués par la station. La première étape de ce travail consiste à sélectionner un ensemble de données (ou une période) à étudier pour lequel les caractéristiques de la station restent semblables. Cet ensemble doit être un compromis entre le plus grand nombre de données possible, la représentativité des flux d'intérêt pour l'évaluation du bilan énergétique et la faisabilité de l'analyse.

Ensuite, la qualité des données sélectionnées est abordée, notamment pour vérifier le respect des conditions d'application de la théorie sur la covariance de turbulence et écarter les données aberrantes. L'attention sera portée sur les quantités et la temporalité des exclusions de données qui modifient la représentativité/distribution des données de flux car l'analyse du bilan énergétique implique des paramètres qui font intervenir les propriétés de la moyenne. Dans le cas où plusieurs répétitions de capteurs sont disponibles pour un même flux, les capteurs de meilleure qualité ou les plus représentatifs du système sont favorisés. Dans le cas où il y en a plusieurs pour juger de la variabilité, celle-ci est analysée. C'est notamment le cas du flux de sol G. La littérature (notamment Wilson et al., 2002 ; Masseroni et al., 2014 ; Eshonkulov et al., 2019a) indique qu'un seul point de mesure n'est pas suffisamment représentatif des surfaces dont la covariance de turbulence mesure les flux. Ainsi, l'hypothèse selon laquelle G expliquerait une part dans la non-fermeture du bilan est examinée.

La distribution temporelle et les ordres de grandeur des valeurs de flux sont évalués à différentes échelles de temps afin de donner au lecteur une vision globale des flux et de lui permettre de les comparer aux données présentes dans la littérature. De la même manière, le bilan énergétique est établi d'après les méthodes courantes proposées par la littérature afin de situer la fermeture énergétique du site par rapport à celle qui est communément rapportée dans d'autres études. Une attention particulière est portée sur l'analyse des paramètres d'évaluation du bilan énergétique (régression RMA et EBR), sur leur signification et sur leurs différences (avantages et inconvénients). Dans la mesure du possible, leurs intervalles de confiance sont évalués et l'interprétation des indicateurs du bilan est raccrochée à la physique des phénomènes étudiés. De nombreuses études se contentent de décrire le paramètre de pente uniquement, sans porter plus d'intérêt à l'ordonnée à

l'origine et à l'EBR. L'hypothèse selon laquelle cette manière de procéder pourrait mener à de fausses interprétations est également testée.

Les hypothèses qui vont être examinées dans ce travail pour expliquer la non-fermeture du bilan énergétique sont :

(1) La sous-estimation ou la négligence de certains termes du bilan. Les flux qui correspondent à des taux de stockage d'énergie sont, si possible, tous quantifiés et leur rôle dans la fermeture du bilan est évalué. L'étude du bilan vis-à-vis du rapport de Bowen (H/LE) permettrait de mettre en évidence la sous-estimation du flux turbulent H .

(2) L'hétérogénéité locale de l'environnement de mesure et un problème d'échelle lié à la représentativité des flux qui sont mesurés pour des surfaces de localisations et de tailles différentes (Tableau 1 et Figure 17). Ce problème concernerait à priori les flux d'énergie dans le sol (G et S_G). Dans cette optique, le bilan énergétique est étudié en fonction de la direction du vent et donc d'empreintes de flux turbulents différentes dans l'espace. Si les surfaces sont homogènes et échangent les mêmes flux (hypothèses pour l'application de la covariance de turbulent), le bilan devrait être identique dans toutes les directions de vent.

(3) La contribution non négligeable de flux turbulents de basses fréquences (> 30 minutes) dans le bilan qui ne seraient pas mesurés par la CT. Cette contribution concernerait principalement le flux H . Pour vérifier cette hypothèse, la covariance de turbulence nécessite d'être calculée sur des séries temporelles de mesures plus longues de 1, 2, 4, 8 et 24h.

4. MATÉRIEL ET MÉTHODES

4.1. Site et période d'étude

Le site expérimental est une très ancienne parcelle agricole de 12 ha située au sein du *Lonzée Terrestrial Observatory* (station ICOS⁶ de niveau 2), dans la commune de Gembloux au cœur de la Belgique (50°33'5.71"N, 4°44'46.07"E, altitude : 167 m). Elle est cultivée depuis plus de 80 années et appartient à un agriculteur du village. Selon le référentiel de la FAO, la parcelle présente un Luvisol, caractérisé par 20% d'argile, 7,5% de sable et 72,5% de limon. L'agriculteur pratique une rotation de quatre ans : froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.), betterave sucrière (*Beta vulgaris* L.), froment d'hiver (*Triticum aestivum* L.) et pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.). La région est principalement agricole et présente de faibles pentes. La direction principale du vent est SO. Le climat est tempéré, avec une température moyenne de 9,8°C et des précipitations moyennes de 833,7 mm (Gembloux, entre 1981 et 2010, source : IRM). Pour plus d'information sur les statistiques climatiques et sur le site, se référer respectivement aux annexes 3, 4, 5 et 6 à Moureaux et al. (2006), à Buysse et al. (2017) et à Lognoul et al. (2019).

Cette étude couvre la période continue qui s'étend d'octobre 2014 à décembre 2017 et ce pour des raisons de disponibilité (voir 4.3.5) et de continuité suffisante des données pour l'ensemble des flux d'intérêt pour l'analyse du bilan énergétique. Cette période présente également l'avantage de contenir deux périodes de culture de froment d'hiver (Tableau 2).

Tableau 2 – (a) Périodes et types de cultures durant la période d'étude, entre octobre 2014 et décembre 2017 et (b) dates de semis et de récolte

(a)

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
2014	////////////////////											
2015	Winter wheat								Mustard			
2016	Bare soil			Sugar beet								
2017	Winter wheat								Mustard			

(b)

	Sowing	Harvest
Winter wheat	15-10-2014	02-08-2015
Mustard	26-08-2015	10-12-2015
Sugar beet	12-04-2016	27-10-2016
Winter wheat	29-10-2016	30-07-2017
Mustard	07-09-2017	09-12-2017

Les cultures en place durant la période d'étude sont le froment d'hiver d'octobre 2014 à juillet 2015, puis la betterave sucrière d'avril à octobre 2016 et de nouveau le froment d'hiver de novembre 2016 à juillet 2017. Deux cultures intercalaires de moutarde ont également été cultivées entre août et décembre 2015 puis de septembre et décembre 2017. Pour plus d'informations sur les opérations culturales réalisées sur cette période, consulter l'Annexe 7.

4.2. Systèmes de mesure et données de flux

Les flux et les variables météorologiques sont mesurés d'après les protocoles ICOS depuis 2014. Dans cette partie, seule une description générale des capteurs est présentée. Pour plus d'informations

⁶ ICOS pour *Intergrated Carbon Observation System*. Il s'agit d'un large réseau de recherche européen de stations de monitoring standardisé, intégré et à long terme des gaz à effet de serre (GES) pour l'étude du cycle du carbone et des GES. Voir : <http://www.icos-belgium.be>

sur les dispositifs de mesure installés à la station de Lonzée, se référer à De Ligne and Manise (2016). Pour éviter la confusion, la surface où sont installés la plupart des dispositifs de mesures est appelée ci-après « placette », à distinguer de la parcelle de culture appelée « parcelle » qui également dotée de quelques capteurs. Ensuite sont présentés les deux ensembles de données de flux qui sont utilisés pour l'étude de la non-fermeture du BE.

4.2.1. Mesures pédoclimatiques

La station de mesure des conditions météorologiques est située approximativement au centre de la parcelle (Figure 23). Le rayonnement est capté par deux pyrromètres (CNR1 et CNR4, Kipp and Zonen, Delft, NL) installés sur un mât de 2,8 m au sein de la placette qui permet aux radiomètres de dépasser au-dessus de la culture. La densité de flux de photon photosynthétique est mesurée par des cellules photoréceptrices (PAR Quantum sensor SKP 215, Skye Instruments Limited, Llandrindod Wells, UK). Les précipitations sont récoltées à l'aide d'un pluviomètre à balance (TRw S415, MPS system s.r.o., Bratislava, SK). La température et l'humidité de l'air sont respectivement mesurées par une thermistance et un hygromètre (RHT2nl, Delta-T Devices Ltd, Cambridge, UK). La mesure de la pression atmosphérique est réalisée par un baromètre (PTB110/CS106, Campbell Scientific, Logan, UT, US). Enfin, un capteur de température infrarouge (IR 120, Campbell Scientific, Logan, UT, US) relève la température de surface/de canopée, selon que le sol est cultivé ou non.

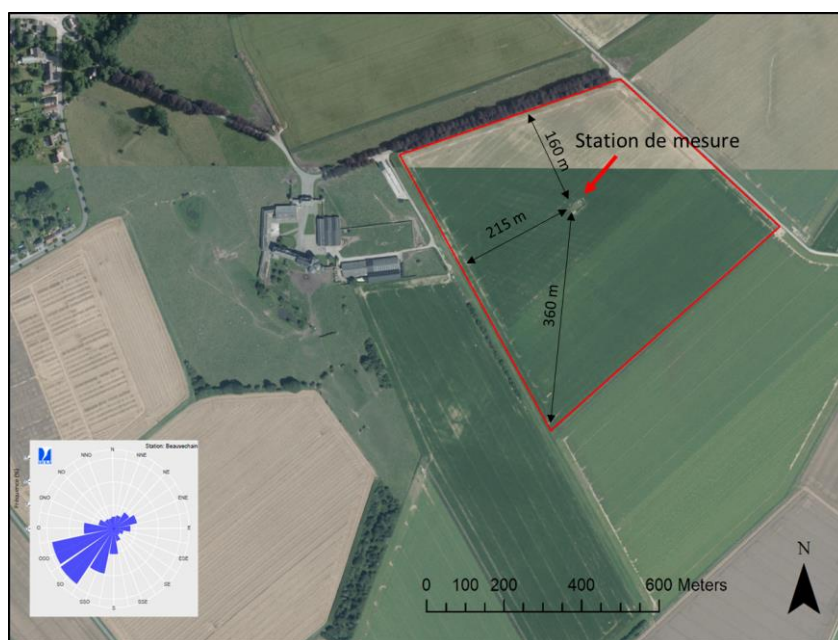


Figure 23 – Orthophoto de 2016 de la parcelle expérimentale et ses alentours, avec rose des vents (cf. Annexe 5).
Source : Arcgis Online, Cécile Osy.⁷

Les conditions pédologiques sont également monitorées autour de la station météorologique et au sein de la culture. En 2014, la température du sol est mesurée par thermomètre à résistance électrique (PT 107, Campbell Scientific, Logan, UT, US) à -0,01, -0,05, -0,15, -0,25 et -0,45 m de la surface du sol. De même, la mesure humidité du sol est opérée par sonde réflectométrique de la teneur en eau du sol aux profondeurs -0,05, -0,15, -0,25 et -0,45 m. À partir de 2015, les mesures de température

⁷ La ligne horizontale dans le haut de la photo témoigne l'assemblage de deux orthophotos qui ont été prise à deux dates différentes.

et d'humidité du sol sont effectuées par capteur de température au silicium, à bandes interdites (« band-gap »), et par capteur à capacitance (EnviroSCAN Probe, Sentek Sensor Technologies, Stepney, SA, AU) aux mêmes profondeurs. La mesure des flux de chaleur dans le sol est opérée à l'aide d'une plaque ou « assiette » auto calibrée de mesure de flux (HFP01SC, Hukseflux Thermal Sensors B.V., Delft, NL) enterrée à -0,05 m de la surface du sol.

Jusqu'en 2016, les mesures météorologiques sont effectuées toutes les 10 secondes et les mesures pédologiques toutes les 2 minutes 30 secondes. Elles sont ensuite moyennées sur 30 minutes. À partir de 2017, elles passent respectivement à 20 secondes et à 1 minute, toujours moyennées sur la même période.

4.2.2. Mesures des flux turbulents (CT)

La station de mesure des flux turbulents est également située au centre de la parcelle (Figure 23) au sein de la placette. Les flux de chaleur latente, de chaleur sensible et de CO₂ sont calculés par la technique de covariance de turbulence (Aubinet et al., 2012) à la fréquence de 20 Hz. Elle combine les mesures de concentration en gaz de l'air par un analyseur de gaz à infrarouge (LI-7200, LI-COR, Lincoln, NE, US) et de vitesse de vent par un anémomètre sonique 3D (Solent Research HS-50, Gill Instruments, Lymington, UK). Ces deux appareils sont montés sur un mât et réalisent les mesures à 2,8 m (depuis 2014 → 09/02/2017), à 2,1 m (→ 01/06/2017), 2,4 m (→ 19/09/2017) et 2,1 m (pour la fin 2017) de la surface du sol, avec une séparation de 19,7 cm (séparation de : 18,9 cm vers l'est et 6,8 cm vers le sud, pas de séparation verticale).

4.2.3. Données de flux pour l'étude de la non-fermeture BE

Deux ensembles de données sont utilisés pour réaliser cette étude sur le site de Lonzée. Le premier provient du département BIOSE de Gembloux Agro-Bio Tech. Il s'agit des données officielles qui sont notamment partagées à la base de données européenne European Fluxes Database Cluster (EFDC), dont l'initiative consiste à : (1) améliorer la standardisation et l'intégration de différentes bases de données provenant de projets de recherches européens sur les gaz à effet de serre (ICOS) et (2) à favoriser les collaborations de recherche. Ces données sont disponibles sur le site de FLUXNET (<https://fluxnet.fluxdata.org/>). Cet ensemble est dénommé « données de référence » par la suite (4.3).

Le deuxième ensemble doit être créé pour l'étude des effets de l'augmentation de la période d'intégration des flux sur le bilan énergétique. En effet, les données standards sont des flux issus du calcul de la covariance de turbulence à la demi-heure. Il est donc nécessaire de recalculer la covariance de turbulence pour de plus longues périodes d'intégration et la description de l'outil informatique utilisé est présentée au paragraphe 4.4 ci-dessous. Cet ensemble est dénommé « données EddyPro » par la suite d'après le nom du logiciel utilisé pour le créer.

4.3. Traitements des données de référence

L'ensemble de données de référence reprend les flux moyens par demi-heure issus de la CT, ainsi que les mesures pédoclimatiques, qui ont été obtenues par la station ICOS de Lonzée. Ces données sont prêtes à l'emploi pour la recherche et leur production fait l'objet d'une procédure courante (d'après les recommandations d'ICOS) au sein du département. Les flux à la demi-heure ont été

calculés et soumis à un ensemble de tests statistiques et de vérifications visuelles de leur validité. Ces opérations sont effectuées par l'ingénieure de recherche, Anne De Ligne, qui est responsable de l'acquisition, du traitement et de la diffusion de ces mesures. C'est ce premier ensemble de mesures qui est exploité pour répondre à la majorité des objectifs d'évaluation du bilan énergétique et de ses leviers, hormis l'étude de l'augmentation de la période d'intégration des flux. Pour consulter la description détaillée des variables présentes dans cet ensemble de données et les raccrocher aux instruments de mesure installés à la station des mesures de Lonzée, se référer à De Ligne and Manise (2016).

Les sous-chapitres suivants décrivent les opérations de tri, de calcul de nouvelles variables et de sélection qui mènent à la création de l'ensemble de données utilisé pour l'analyse de la fermeture énergétique. Malgré la qualité des données de référence, un certain nombre de tris sur les données sont laissés libres à l'utilisateur d'après les objectifs de ses recherches. Certaines variables nécessitent d'être créées à partir des données disponibles pour répondre à certains objectifs de cette étude. Ensuite sont abordées les notions de disponibilité à la demi-heure des variables prises séparées et puis combinées. En effet, toutes les demi-heures de mesure ne permettent pas d'étudier le bilan énergétique et ne sont donc pas sélectionnées.

4.3.1. Tri des données

Un premier tri visuel est opéré sur les valeurs de chaque variable d'intérêt d'après la distribution de fréquence afin d'éliminer les valeurs aux extrémités de la distribution, peu probables, ou d'éventuelles données aberrantes. Pour exemple, la Figure 24 illustre en rouge les limites fixées arbitrairement par un opérateur qui décide de ne pas faire confiance aux valeurs au-delà de ces extrémités.

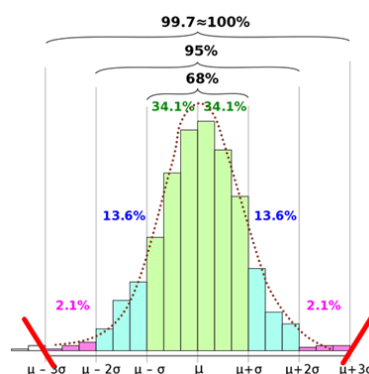


Figure 24 – Exemple d'une distribution normale, de moyenne μ et d'écart-type σ , surimposée à une distribution de fréquence par classe d'une variable quelconque. Les accolades montrent la probabilité qu'une mesure tombe dans l'une ou l'autre classe de valeurs. Les barres rouges désignent les valeurs à partir desquelles on décide d'exclure les valeurs extrêmes.

Ensuite, les mesures des flux turbulents (H et LE) sont accompagnées d'une appréciation de la qualité des mesures d'après les tests de Mauder et Foken (2004) qui vérifient les conditions de stationnarité et de développement de la turbulence pour la demi-heure considérée. La validation de ces conditions est nécessaire pour vérifier les hypothèses émises pour appliquer la covariance de turbulence (2.2.1). Ces tests attribuent aux demi-heures de mesure un niveau de qualité : bonne, moyenne et médiocre. Cette dernière implique que la demi-heure doit être écartée des analyses. Comme les deux paramètres d'évaluation du bilan (1.3.1 et 1.3.2) ne nécessitent pas des périodes continues de données pour

étudier le bilan énergétique, uniquement les demi-heures de flux dont on a le plus confiance sont conservées.

4.3.2. Calcul de nouvelles variables

Pour étudier le bilan énergétique, les paragraphes suivants s'intéressent au calcul des nouvelles variables d'intérêt qui ne sont pas présentes dans l'ensemble des données officielles ou qui nécessitent un traitement supplémentaire. Sont concernés tout d'abord R_{net} , G , S_G et S_P puis les variables impliquées dans le calcul de l'empreinte des flux. Ces variables sont créées à partir des données officielles et disponibles à la demande sur le site de Lonzée, par exemple les mesures sur les paramètres du sol et les caractéristiques des cultures de la période d'étude. Les flux H , LE , S_H et S_{LE} sont quant à eux déjà donnés et S_c ne peut être obtenu. En effet, le flux de stockage dans la culture implique des prélèvements de biomasse pour calculer aux différents stades de la culture la matière humide et sèche pour connaître la teneur eau et en matière sèche de la culture (Équation 23). Cependant la biomasse fraîche (humide) n'est pas pesée avant d'être séchée.

4.3.3. R_{net} , G , S_G et S_P

Les variables R_{net} , G et S_G disposent de plusieurs capteurs redondants et donc de répétitions de mesures à la demi-heure. Pour calculer le bilan énergétique, un choix doit être opéré pour choisir la ou les mesures qui va ou vont intervenir dans l'Équation 1. La méthodologie suit trois principes pour choisir les données. Le premier principe qui a été choisi est de favoriser les mesures du meilleur appareil de mesure lorsqu'il y a plusieurs modèles. C'est le cas pour la mesure du rayonnement où les mesures réalisées par la CNR4 sont privilégiées à celles de la CNR1. Dans le cas d'une demi-heure où la mesure de la CNR4 est indisponible, celle de la CNR1 est reprise.

Le second principe consiste à donner la priorité aux mesures qui sont réalisées au sein de la culture (*in situ*) plutôt qu'aux mesures effectuées au sein de la placette où sont effectuées les mesures météorologiques et de CT. Les flux concernés sont ici les termes G et S_G . Bien que située au centre de la culture, les conditions de la placette ne sont à priori pas toujours aussi représentatives de la parcelle agricole étudiée. Par exemple, elle n'est pas cultivée et ne suit pas toujours les opérations culturales de la parcelle. Néanmoins, les mesures effectuées au sein de la placette sont importantes lorsqu'aucune mesure *in situ* n'est disponible, notamment lorsque les capteurs *in situ* sont retirés du sol pour permettre à l'agriculteur de travailler le sol.

Enfin, le dernier principe concerne les mesures redondantes. Lorsqu'il y en a plusieurs *in situ* ou au sein de la placette, elles sont respectivement moyennées. Le choix de la moyenne des mesures *in situ* ou de la moyenne des mesures effectuées sur la placette suit le deuxième principe. Dans le cas de G , il y a trois emplacements de mesures qui comportent chacun deux capteurs. Au total, quatre capteurs sont situés au sein de la culture et 2 capteurs au sein de la placette. Pour ce qui est de S_G , où interviennent la température T_s et le contenu en eau du sol θ (Équation 18 et Équation 19), les mesures sont prises aux mêmes endroits que G , à 1 cm et 5 cm de profondeur dans sol. Ces deux paramètres présentent trois capteurs à chaque profondeur au sein de la placette. Dans la culture, les deux endroits disposent de deux capteurs aux deux profondeurs.

Le calcul de S_G fait intervenir d'autres paramètres considérés constants : la densité apparente ρ_s , la porosité ϕ et la fraction volumique en carbone organique X_0 du sol. Une campagne d'échantillonnage sur la parcelle de Lonzée en 2017 ont rapporté, pour les profondeurs 1 et 5 cm, respectivement, des ρ_s moyennes de 1,19 et 1,23 g cm⁻³, des ϕ moyennes de 0,551 et 0,536 (cm³cm⁻³) et une X_0 moyenne de 0,0102 (cm³cm⁻³).

Enfin, S_p doit être également calculé et ne nécessite qu'un seul paramètre, le flux de CO₂. Celui-ci est aussi mesuré par le dispositif de CT (cf. Équation 16) et n'est pas concerné par des mesures redondantes.

4.3.4. Empreinte des flux mesurés

La fonction de Kjlun et al. (2015), disponible sur Matlab, permet d'obtenir différentes sorties liées à l'évaluation de l'empreinte de flux. Pour la calculer, certaines entrées ou paramètres cités au chapitre 2.2.4. sont nécessaires. On dispose des composantes turbulentes de vitesse de vent (u' , v' , w') et $\bar{u}$, de la vitesse de friction u^* et de la longueur L d'Obukhov. En revanche, la hauteur de culture z_c doit être évaluée pour calculer la hauteur de mesure z_m et la rugosité de surface z_0 lorsque la culture est présente.

Des mesures de hauteur de culture ont été réalisées durant chaque période de végétation et sont reprises dans le tableau suivant (Tableau 3).

Tableau 3 – Dates de mesures et hauteurs des cultures (2015-17)

2015				2016		2017			
Winter wheat		Mustard		Sugar beet		Winter wheat		Mustard	
Date	z_c (cm)	Date	z_c (cm)	Date	z_c (cm)	Date	z_c (cm)	Date	z_c (cm)
15-10-2014	0	26-08-2015	0	12-04-2016	0	29-10-2016	0	07-09-2017	0
14-04-2015	15	23-09-2015	10	08-06-2016	15	10-04-2017	20	05-10-2017	6.5
28-04-2015	33	29-10-2015	42	29-06-2016	37	24-04-2017	27	26-10-2017	25
11-05-2015	48	12-11-2015	65	20-07-2016	48	15-05-2017	45	14-11-2017	37
26-05-2015	73	10-12-2015	65	10-08-2016	52	29-05-2017	62	09-12-2017	42
09-06-2015	85			14-09-2016	51	06-06-2017	79		
23-06-2015	97			05-10-2016	49	13-06-2017	80		
14-07-2015	97			24-10-2016	46	26-06-2017	83		
31-07-2015	93			27-10-2016	46	29-06-2017	84		
02-08-2015	93					07-07-2017	84		
						13-07-2017	84		
						18-07-2017	79		
						30-07-2017	79		

Pour bénéficier de mesures continues à la demi-heure de la hauteur de culture, une approximation est réalisée par interpolation linéaire entre les dates et les mesures de références (Tableau 3).

Enfin, la hauteur de couche limite atmosphérique h_{CLA} , elle peut être grossièrement approximée par 1500 m le jour et 300 m la nuit (Dumortier et al., 2019) pour notre site. D'après ces auteurs, cette approximation est suffisante, car le modèle d'empreinte est très faiblement impacté par ce paramètre.

4.3.5. Disponibilité après sélections successives des données

La « disponibilité des données » fait référence au nombre de données (demi-heures) disponibles pour évaluer le BE par rapport au nombre total théorique de mesures ou de demi-heures au sein de la période d'étude. La disponibilité est évaluée de manière à identifier plus finement les périodes qui seront effectivement étudiées pour l'évaluation du BE. Elle permet également de se rendre compte

des proportions de mesures qui sont écartées par chaque étape de sélection et de la proportion finale des données utilisées dans l'étude du BE.

Comme on l'a vu précédemment, l'indisponibilité des données peut être liée à l'absence, à des erreurs ou à des conditions non favorables de mesure. La disponibilité peut être appréhendée sur l'ensemble des données, mais également au cours du temps. En effet, certains capteurs ont été ajoutés en cours d'expérimentation et d'autres, placés dans la culture, nécessitent d'être retirés lors de certaines opérations culturales, principalement pour le travail du sol.

Dans un premier temps, il est intéressant de constater la disponibilité de chaque flux séparément, mais également, ensuite, de la disponibilité combinée de l'ensemble des flux. En effet, l'évaluation du bilan nécessite de disposer à la demi-heure d'une mesure pour chaque flux de l'Équation 5. Les mesures de flux de R_{net} et G , qui sont issues, respectivement, deux capteurs différents et de plusieurs capteurs redondants, vont être comparées pour témoigner de leur correspondance et de leur variabilité. Le terme S_G qui est également obtenu à partir de plusieurs mesures de T_s et θ n'est pas détaillé pour ce qui est de comparer les différences de mesures entre les répétitions.

4.4. Création et traitements des données EddyPro

La méthode et l'outil informatique qui permettent d'obtenir les données pour l'étude de l'augmentation de la période d'intégration des flux de 30 à 60, 120, 240, 480 et 1440 minutes font l'objet des sous-chapitres suivants. À cette fin, il est nécessaire de repartir des données brutes, générées à haute fréquence (20 Hz), afin de calculer la covariance sur ces plus longues périodes. Ces données brutes sont les mêmes que celles qui ont permis de générer le premier ensemble mentionné ci-avant. Dans le cadre de cette partie, seulement la période d'octobre 2014 à décembre 2015 est traitée. Celle-ci recouvre au moins une année complète, ainsi que l'ensemble de la culture de blé d'hiver (cf. Tableau 2).

Les calculs des flux turbulents moyens sur chaque période ont été réalisés à l'aide du logiciel EddyPro®, versions 6.2.1 et 7.0.4 (LI-COR Environmental, LI-COR, Lincoln, NE, USA) en utilisant le paramétrage prédéfini par Pierre Dumortier et Anne De Ligne du département BIOSE de Gembloux Agro-Bio Tech. Celui-ci a été employé comme tel et la définition des paramètres ne sera pas justifiée dans le cadre de ce travail. L'objectif de l'utilisation d'EddyPro est d'étudier l'impact de l'augmentation de la période de la moyenne calculée sur les flux turbulents et le bilan énergétique. Les résultats sur le bilan énergétique sont comparés entre eux et ne sont pas étudiés en tant que tels.

4.4.1. Paramétrage

Dans cette partie, le paramétrage d'EddyPro est détaillé comme une recette de cuisine pour information et sans justification. La méthode employée pour moyenner les flux turbulents est « moyenne par bloc ». Une double rotation des axes de l'anémomètre est opérée pour corriger leur inclinaison (Wilczak et al., 2001). Concernant un décalage temporel possible entre les mesures de l'anémomètre et l'analyseur de gaz, la méthode « détection automatique d'un décalage » est choisie, car elle est recommandée pour les flux de vapeur d'eau. Les fluctuations de densité des gaz sont compensées par la méthode appelée WPL (Webb et al., 1980). La qualité des flux (sensible, latent,

quantité de mouvement et gaz) a été déterminée d'après les tests de Mauder et Foken (2004) qui vérifient les conditions de stationnarité et de développement de conditions turbulentes pour l'application de la méthode de CT. Le résultat combiné de ces tests donne 0 pour les mesures de meilleure qualité, 1 et 2 pour les mesures de qualité moyenne et médiocre (à écarter).

4.4.2. Analyse statistique

Neuf tests statistiques sont réalisés par EddyPro sur les séries temporelles afin de vérifier leurs qualités statistiques avant de calculer la covariance. Ils sont principalement issus de la publication de Vickers et Mahrt (1997), excepté le test qui compte et teste les pics (Mauder, 2013). Pour chaque test, EddyPro indique si la série temporelle passe ou échoue pour permettre à l'utilisateur d'exclure ces périodes de flux des données finales. L'ensemble de paramètres définis pour chaque test est repris dans le tableau ci-dessous (Tableau 4). Le test sur l'angle d'attaque n'est pas effectué.

Tableau 4 – Tests statistiques réalisés par EddyPro

Statistical tests		
Spike count/removal	Accepted spikes : 1 [%] Maximum number of consecutive outliers: 3 Replace spikes with linear interpolation: Yes Plausibility ranges: • W: 5.0 [σ] • H₂O: 3.5 [σ] • All other variables: 3.5 [σ]	
Amplitude resolution	Range of variation: 7.0 [σ] Number of bins: 100 Accepted empty bins: 70 [%]	
Drop-outs	Percentile defining extreme bins: 10 Accepted central drop-outs: 10.0 [σ] Accepted extreme drop-outs: 6.0 [%]	
Absolute limites	Minimum • U: -30.0 [m/s] • W: -5.0 [m/s] • Ts: -40.0 [°C] • H₂O: 0.0 [mmol/mol]	Maximum • U: 30.0 [m/s] • W: 5.0 [m/s] • Ts: 50.0 [°C] • H₂O: 40.0 [mmol/mol]
Skewness and kurtosis	Hard-flag threshold • Skewness lower limit: -2.0 • Skewness upper limit: 2.0 • Kurtosis lower limit: 1.0 • Kurtosis upper limit: 8.0	Soft-flag threshold • Skewness lower limit: -1.0 • Skewness upper limit: 1.0 • Kurtosis lower limit: 2.0 • Kurtosis upper limit: 5.0
Discontinuities	Hard-flag threshold • U: 4.0 • W: 2.0 • Ts: 4.0 • H₂O: 3.26 • Variances: 3.0	Soft-flag threshold • U: 2.7 • W: 1.3 • Ts: 2.7 • H₂O: 2.20 • Variances: 2.0
Time lags	Accepted covariance difference (hard-flag) : 20 [%]	

	Accepted covariance difference (soft-flag) : 10 [%] Nominal H ₂ O time-lag : 0.0 [s]
Angle of attack	NA
Steadiness of horizontal wind	Accepted wind relative instationarity : 0.5

Pour plus d'informations sur ces tests statistiques et pour visualiser l'impact des corrections sur les flux turbulents, voir Masseroni et al. (2014).

4.4.3. Analyse et corrections spectacles

Cette partie concerne la compensation des flux sous-estimés grâce à une correction spectrale. Ces sous-estimations peuvent être liées à une période d'intégration trop courte pour capter les plus grands tourbillons (fréquence > 30 minutes) et aux limitations du système de mesures (20 Hz) qui ne permet pas d'échantillonner l'ensemble des plus petits tourbillons. Ces deux caractéristiques font respectivement l'effet d'un filtre passe-haut et l'effet d'un filtre passe-bas sur les fréquences du signal turbulent.

La première étape consiste à calculer les cospectres de référence (Moncrieff et al., 1997), qui représentent le vrai contenu spectral des flux investigués dans le cas où ils seraient mesurés par un système parfait. Ensuite, les propriétés des filtres passe-bas et passe-haut sont estimées à partir de la fréquence de mesure du système et de la méthode choisie pour calculer la moyenne. La méthode de correction des effets du filtre passe-bas choisie est celle de Moncrieff et al. (2004). Concernant la rectification des conséquences du filtre passe-haut, les méthodes de Fratini et al. (2012) et Horst et Lenschow (2009) sont employées. Pour plus de détails sur le paramétrage employé pour la correction spectrale, se référer à l'Annexe 8.

4.4.4. Traitements des données EddyPro

Les périodes de flux sont d'abord triées d'après les résultats obtenus aux 8 tests statistiques sélectionnés. Ensuite, les données sont traitées de la même manière que pour les données de références. Les autres flux non turbulents (pédoclimatologiques) sont quant à eux tirés des données de références et moyennés sur les périodes 60, 120, 240, 480 et 1440 minutes correspondantes.

4.5. Outils de traitement des données

Tous les traitements des données jusqu'à la création des figures présentées dans les résultats sont issus de l'environnement Matlab 2017b (The MathWorks, Inc., Natick, Massachusetts, United States). Certaines fonctions disponibles pour Matlab sont utilisées pour calculer les régressions RMA (Trujillo-Ortiz et Hernandez-Walls., 2010) et l'empreinte des flux (Kjllun et al., 2015⁸), et pour réaliser les roses des vents⁹.

⁸ Lien vers le téléchargement du modèle sur Matlab : <http://footprint.kjllun.net/>

⁹ Voir : https://nl.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/17748-wind_rose

5. RÉSULTATS

5.1. Conditions météorologiques

Les mesures de la température et de précipitations réalisées par la station ICOS sont synthétisées à la Figure 25.

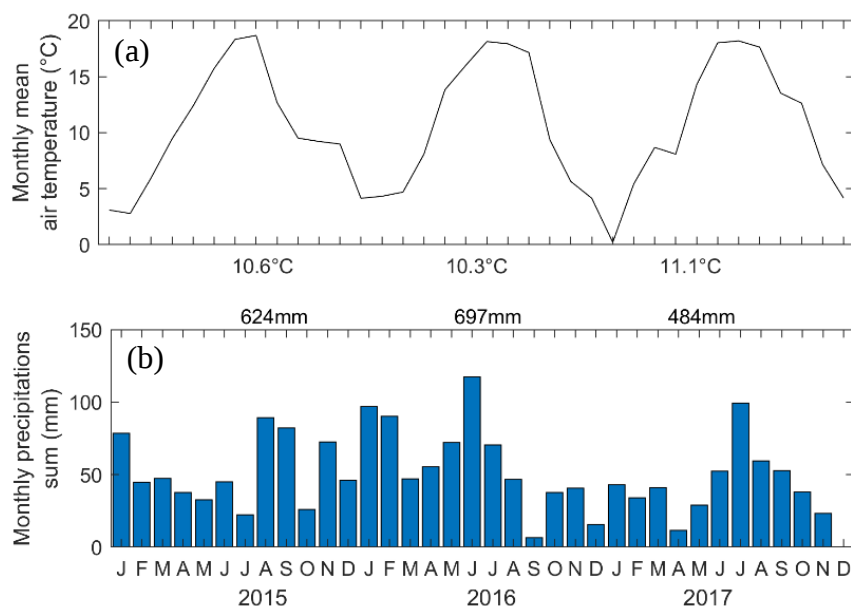


Figure 25 – (a) Températures moyennes mensuelles de l'air et (b) sommes des précipitations mensuelles mesurées par la station ICOS de Lonzée entre 2015 et 2017. Au milieu des deux figures se trouvent les températures moyennes et les précipitations annuelles.

Les températures moyennes correspondent aux références pour la commune de Gembloux (Annexe 4 et Annexe 9). En revanche, les précipitations mesurées sont inférieures à la moyenne de référence pour les trois années (833 mm). Il est important de noter que la moitié des mesures du mois de novembre 2017 et la totalité des mesures du mois de décembre 2017 sont indisponibles. Cela ne semble pas expliquer le peu de précipitations observées pour l'année 2017.

5.2. Disponibilité des données pour évaluer le BE

Le résultat de la sélection des demi-heures données d'après leur disponibilité est décrit pas à pas pour que le lecteur puisse identifier finement comment des trois années de mesures (2015 à 2017), c'est-à-dire en théorie 3 années x 365 jours/année x 48 demi-heures/jour = 52 560 demi-heures, seules 23 283 demi-heures (environ 45% des données originales) sont exploitées pour l'étude du bilan énergétique.

Pour mieux se rendre compte de la disponibilité temporelle des données selon les variables, la somme cumulée des demi-heures de mesures disponibles (en ordonnée) au cours du temps est mise en graphique dans les sous-chapitres suivants pour chaque variable séparément. Ensuite, la disponibilité simultanée de toutes les variables à la demi-heure est exposée, car c'est elle qui détermine le nombre de demi-heures exploitées pour l'étude du bilan énergétique.

L'interprétation de la somme cumulée dans le temps est la suivante. Dans trois années (2015-2017), il y a 52 608 demi-heures (maximum de l'abscisse). La droite de pente 1 joint l'origine (0;0) au point

(52 608, 100% des demi-heures). Elle sert de référence pour observer la proportion de mesures disponibles au cours du temps, c'est-à-dire la somme cumulée du nombre de demi-heures de données disponibles divisée par le temps (en nombre de demi-heures). Quand la somme cumulée présente une pente proche de 1, cela signifie que toutes les demi-heures de mesures de la période observée sont disponibles. Si la courbe de la somme cumulée effectue un certain palier, c'est vraisemblablement qu'aucune mesure n'est disponible à cette période. Cela peut être dû, par exemple, à une intervention d'un technicien sur le capteur ou à un retour chez le fabricant pour une recalibration. Dans le cas où la pente de la courbe est inférieure à 1, il est plus probable que ce soit lié à des demi-heures plus ou moins fréquentes où la mesure est erronée et écartée par les tests statistiques effectués sur les séries temporelles (cf. 4.3). Enfin, l'extrémité à droite de la courbe de la somme cumulée donne la proportion finale des données disponibles sur les 3 ans.

Pour mieux se rendre compte de la temporalité, les périodes de culture sont également représentées (cf. Tableau 2). Cela permet éventuellement d'établir un lien entre l'indisponibilité des mesures et les opérations culturales (cf. Annexe 7), notamment lorsque les capteurs sont déplacés pour permettre le travail de la terre entre les différentes cultures.

5.2.1. R_{net} : disponibilité des mesures et comparaison des capteurs

Pour rappel, R_{net} se calcule selon Équation 17 et les radiomètres CNR1 et CNR4 se situent dans la placette de mesure de CT et dépassent au-dessus de la culture. Les disponibilités des mesures des deux capteurs sont reprises à la Figure 26 ci-dessous.

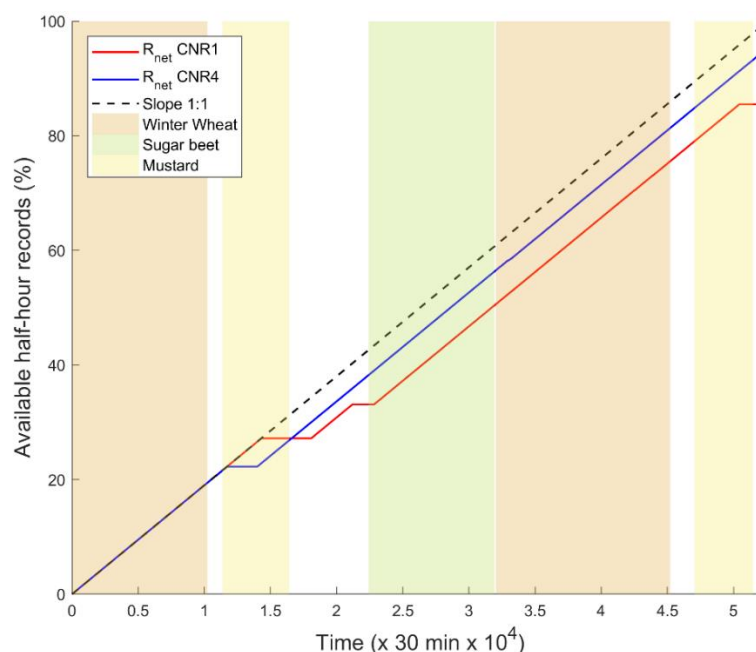


Figure 26 – Disponibilité temporelle (%) des mesures de R_{net} selon les radiomètres (CNR1 et CNR4), d'après la somme cumulée des demi-heures de données disponibles entre 2015 et 2017.

Les courbes des sommes cumulées des mesures de R_{net} suivent une pente 1. Entre la fin 2015 et 2016, les deux capteurs montrent des périodes d'indisponibilité, ainsi que fin 2017 pour la CNR1. Dans l'ensemble, les deux dispositifs ont mesuré R_{net} plus de 80% du temps et la disponibilité des mesures n'a ici pas de lien avec les opérations culturales.

La figure suivante (Figure 27) montre la correspondance des mesures de R_{net} entre la CNR1 et CNR4 pour chaque demi-heure. Lorsque les deux capteurs mesurent le même flux lors d'une même demi-heure, alors le point se situe sur la droite de pente 1. Une régression RMA est effectuée sur l'ensemble des points pour témoigner de la correspondance des deux dispositifs de mesure en général. Les critères démontrant une bonne correspondance sont une pente et un R^2 proche de 1, ainsi qu'une ordonnée à l'origine proche de 0.

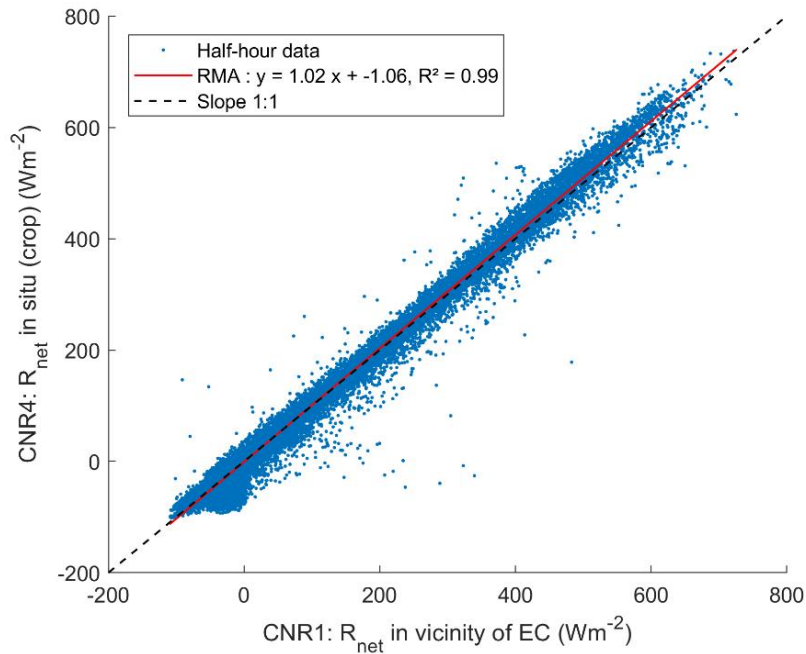


Figure 27 – Relation entre les mesures de R_{net} des deux radiomètres CNR1 et CNR4. La droite y est la régression RMA entre les mesures des deux dispositifs.

On constate que la correspondance est bonne dans l'ensemble. La dispersion des points à la droite est inférieure à 30 Wm^{-2} , ce qui est faible proportionnellement à l'ordre de grandeur de R_{net} (sauf autour de 0). Cependant, un certain nombre de points s'éloignent de la droite 1:1 et une certaine discordance est visible autour de l'origine (0;0). Pour observer plus finement ces différences, la Figure 28 présente les correspondances entre les composantes de R_{net} (Équation 17).

Seul le rayonnement infrarouge rentrant (LW_{in}) montre d'importantes discordances, jusqu'à 100 Wm^{-2} , tout en gardant un R^2 important lié au nombre de points proches de la droite 1:1. Ces demi-heures discordantes sont principalement situées sous la droite 1:1. Notons que les valeurs de rayonnement IR rentrant et sortant se situent constamment entre 200 et 500 Wm^{-2} . En conclusion, la mesure R_{net} est globalement fiable et présente peu de variabilité, excepté dans l'infrarouge rentrant.

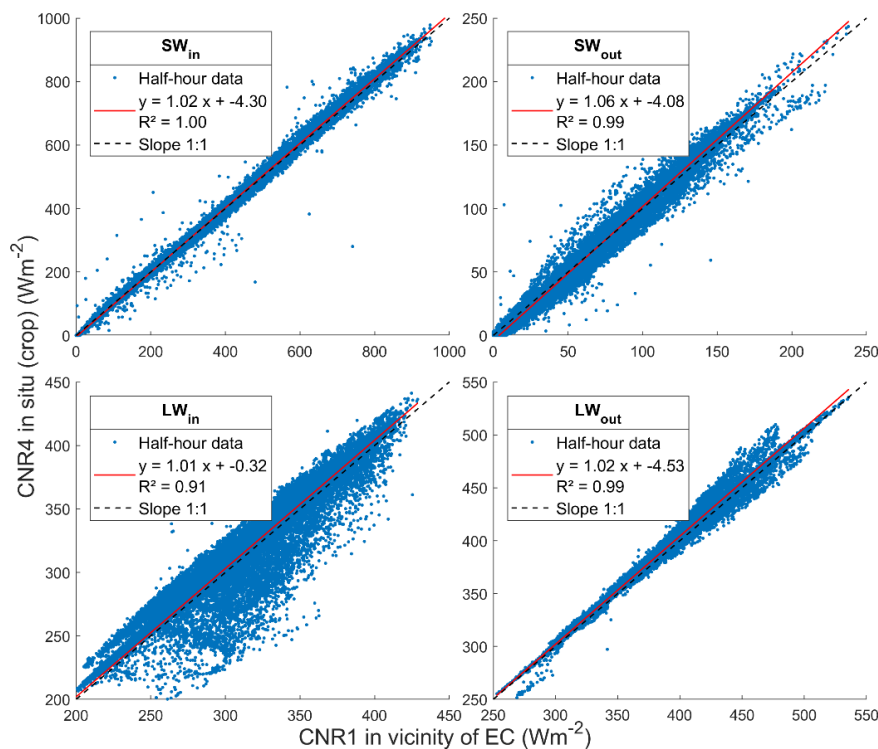


Figure 28 – Relation entre les mesures des deux radiomètres CNR1 et CNR4 pour : SW (ondes courtes : visible) et LW (ondes longues : infrarouge), rentrantes (in) et sortantes (out). La droite y est la régression RMA entre les mesures des deux dispositifs.

5.2.2. G : comparaison des capteurs et disponibilité

Début 2015, il n'y avait qu'un seul capteur de mesure du flux G. Entre 2015 et 2017, 5 capteurs ont été ajoutés pour disposer de deux répétitions de capteurs de G à trois endroits différents : sur la placette de CT et à deux endroits sous la culture en place. La disponibilité de ces mesures est représentée à la Figure 29.

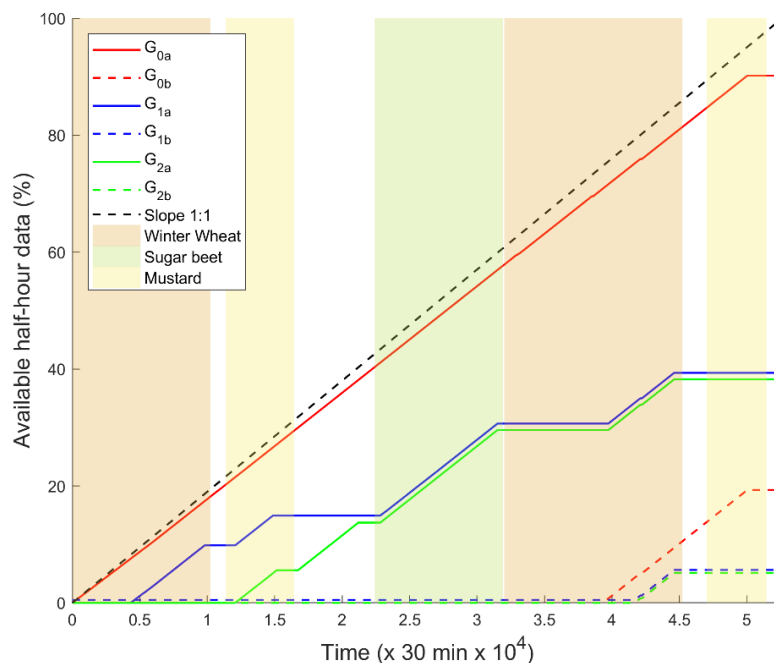


Figure 29 – Disponibilité temporelle (%) des mesures de G selon leur emplacement (G₀ au sein de la placette de CT, G_{1,2} au sein de la culture) et les répétitions (2 répétitions a et b pour chaque emplacement) d'après la somme cumulée des demi-heures de données disponibles.

La mesure de G_{0a} est la plus disponible avec environ 90% de disponibilité. Sa pente est légèrement inférieure à 1, car le capteur procède à un recalibrage régulier. Les capteurs G_{1a} et G_{2a} sont ajoutés et installés sous la culture dans le courant de 2015 et présentent régulièrement des plateaux en lien avec le travail cultural de fin de culture nécessitant leur retrait du site. Remarquons que G_{1a} et G_{2a} sont indisponibles en début de culture de blé d'hiver en 2015 et 2017. Les répétitions de capteurs G_{0b} , G_{1b} et G_{2b} ne seront installées que bien plus tard au cours de 2017.

Pour chaque endroit, les deux répétitions sont comparées l'une à l'autre pour observer leur correspondance (Figure 30), de la même manière que pour R_{net} . Mesurant G au même endroit, les relations entre les mesures des répétitions de capteurs devraient avoir une pente de 1 et une ordonnée à l'origine de 0.

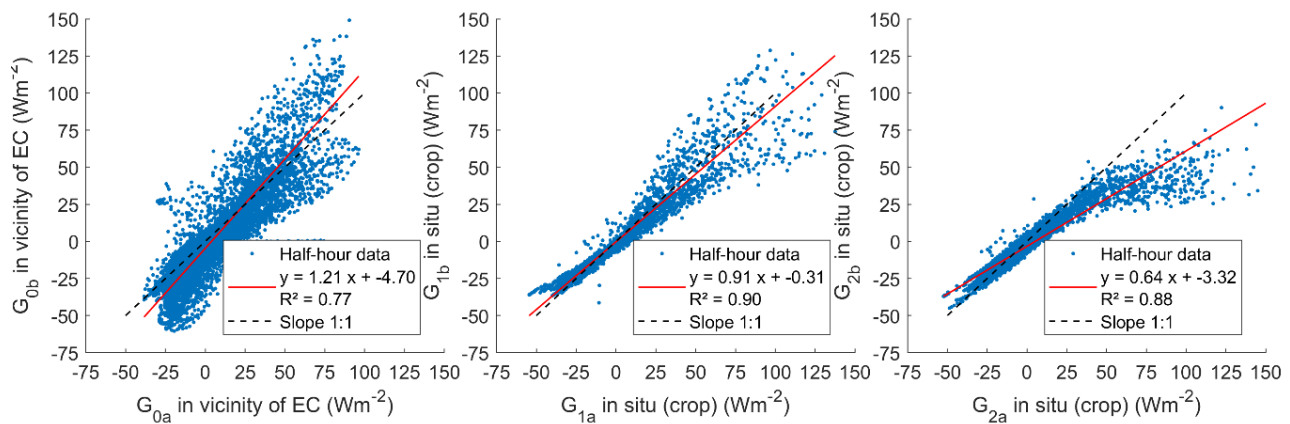


Figure 30 – Relation entre les répétitions (a et b) des mesures de flux de sol (G) réalisées au sein de la placette de la station de mesure (G_0) et au sein de la culture (G_1 et G_2). La droite y est la régression RMA entre les mesures des deux dispositifs.

Les périodes où les deux répétitions sont présentes sont assez courtes (cf. Figure 29). Il est à noter cependant que les mesures proches de 0 Wm^{-2} correspondent davantage que lorsque l'on s'en éloigne. Pour un même endroit, la « distance » à la bissectrice peut atteindre jusqu'à 50 Wm^{-2} , ce qui, proportionnellement, est assez important par rapport à l'ordre de grandeur des flux de G . Les capteurs de G_{1b} et G_{2b} semblent tomber en désaccord à partir de 50 Wm^{-2} . Les pentes de régression sont assez différentes de 1 dans le cas de G_0 et de G_2 . Dans le cas de G_0 , qui constitue la mesure la plus disponible, le R^2 entre la répétition de capteurs est plutôt faible.

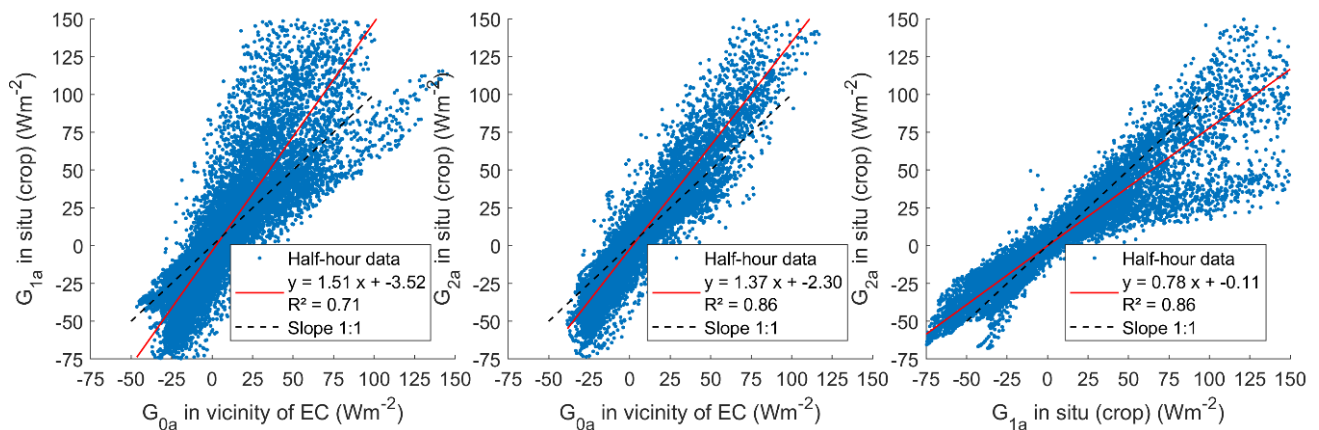


Figure 31 – Relation entre les mesures de flux de sol (G) réalisées au sein de la placette de la station d'CT (G_0) et dans la culture (G_1 et G_2) seulement pour le capteur (a). La droite y est la régression RMA entre les mesures des deux dispositifs.

À la Figure 31, les capteurs de $G_{0,1,2}$ de la répétition « a » (la plus disponible) sont comparés pour observer la variabilité spatiale entre la placette et la culture. Les discordances entre les mesures atteignent jusqu'à 75 Wm^{-2} d'un emplacement à l'autre. Les pentes des RMA sont loin d'approcher l'unité et suggèrent une hétérogénéité du sol entre les emplacements de mesure. Les relations entre G_{0a} et G_{1a} ainsi qu'entre G_{1a} et G_{2a} montrent des divergences importantes lorsque les mesures s'éloignent de l'origine. On peut apercevoir entre G_{1a} vs G_{0a} et entre G_{1a} vs G_{2a} que les points s'organisent en croix autour la droite 1:1. G_{1a} attire une partie des points vers son axe. Cette tendance suggère que G_{1a} aurait mesuré des flux plus importants que G_{0a} et G_{2a} après une réinstallation.

Contrairement à R_{net} , la mesure de G montre une grande variabilité entre les différents capteurs, que ce soit entre les répétitions de capteurs et entre les 3 emplacements de mesure. Ces différences suggèrent une influence des réinstallations de capteurs entre les cultures et une certaine hétérogénéité spatiale de G .

5.2.3. H, LE et S_p : critère de qualité de flux et disponibilité

La disponibilité des mesures de flux turbulents (H , LE et S_p) à la Figure 32 est similaire aux autres flux non turbulents que nous venons de voir.

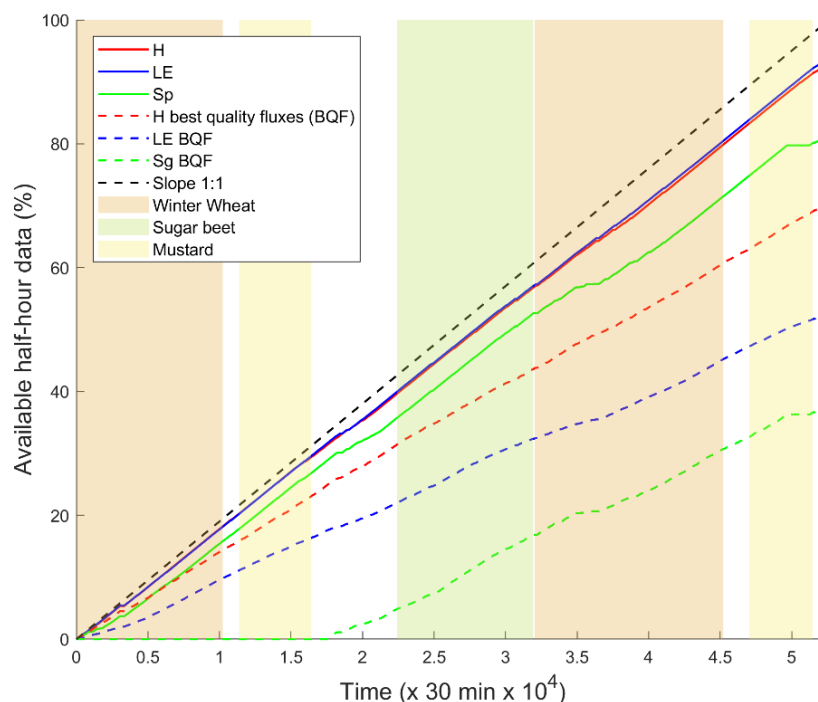


Figure 32 – Disponibilités temporelles des mesures de flux turbulents (H , LE et S_G) d'après la somme cumulée des demi-heures de données disponibles, avant et après sélection des flux de meilleure qualité d'après le test de Mauder and Foken (2004)

En revanche, en appliquant le filtre d'après le test de Mauder and Foken (2004) sur les flux turbulents et en ne gardant que les flux de meilleure qualité, une grande quantité de données est écartée. Les flux de H , LE et S_G sont respectivement réduits d'environ 25, 45 et 60%. S_G (BQF) ne présente pas de flux la première année, car les données du test de qualité ne sont pas disponibles.

Ces demi-heures de données écartées ne sont pas aléatoires. La Figure 33 est présentée pour mieux se rendre compte de l'évolution journalière et saisonnière de la proportion des mesures de flux qui est écartée. Les trois courbes bleues pour LE et jaunes pour H reprennent les proportions des mesures

de flux appartenant aux trois qualités de flux déterminées par le test de Mauder et Foken (2004) : bon, moyen et à exclure.

L'ordonnée donne la proportion des demi-heures disponibles, c'est-à-dire par rapport au nombre total théorique de demi-heures sur 3 ans, en fonction des saisons, par tranche horaire d'une journée moyenne. En général, les flux turbulents de meilleure qualité sont plus fréquents en journée que durant la nuit, et davantage au printemps et en été qu'en automne et en hiver. Les flux de LE de meilleure qualité sont essentiellement moins importants que ceux de H durant la nuit. Pour H et LE, les nombres de flux de qualité moyenne sont en général faibles (<25%). Ainsi, le choix d'étudier le BE uniquement sur les flux de meilleure qualité ne résulte pas en un nombre de demi-heures disponibles trop petit. Ce choix implique surtout la diminution du nombre de données de nuit.

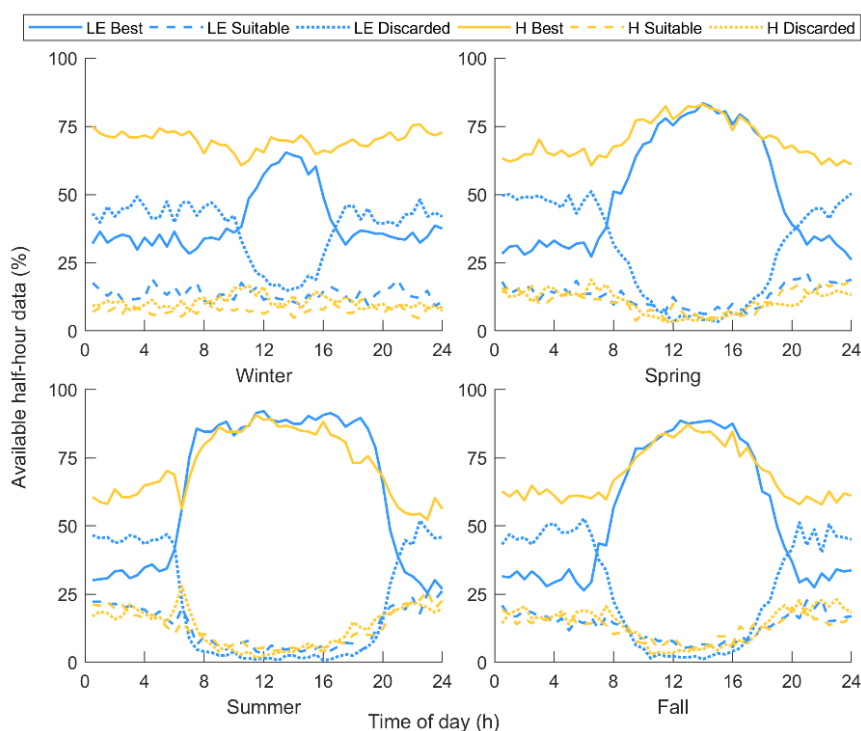


Figure 33 - Disponibilité horaire et saisonnière des mesures de flux turbulents (H et LE) selon le test de qualité des flux de Mauder and Foken (2004) : « Best » représente les meilleurs flux, « suitable » les flux moyens et « discarded » les flux à exclure.

La Figure 34 fait le point sur la quantité de demi-heures dont l'ensemble des mesures de flux est disponible en vue de réaliser le bilan énergétique sur les trois années en incluant progressivement les flux de taux de stockage. Comme on peut le constater, il ne reste plus qu'environ 45% ($= 23\,283 / 52\,560 \times 100$) du total de demi-heures disponibles sur 3 ans (52 560 demi-heures) si on étudie le bilan exclusivement sur R_{net} , G, H et LE avec les flux H et LE de meilleures qualités (en bleu). En incluant dans le bilan les flux mineurs S_G , S_P , S_H et S_{LE} , la quantité de flux restant est divisée par quatre. D'une part, S_P est indisponible en 2015 (cf. Figure 32) et le critère de qualité du flux de CO_2 associé à S_P s'ajoute à ceux de H et LE, ce qui réduit la proportion à environ 20 % (en rose). D'autre part, S_H et S_{LE} sont indisponibles en 2017 et réduisent encore cette proportion jusqu'à environ 10% (en vert). C'est pour cette raison que S_G , S_P , S_H et S_{LE} ne sont pas toujours inclus dans l'analyse du bilan selon les objectifs visés, car ils réduisent le nombre et la représentativité des données restantes.

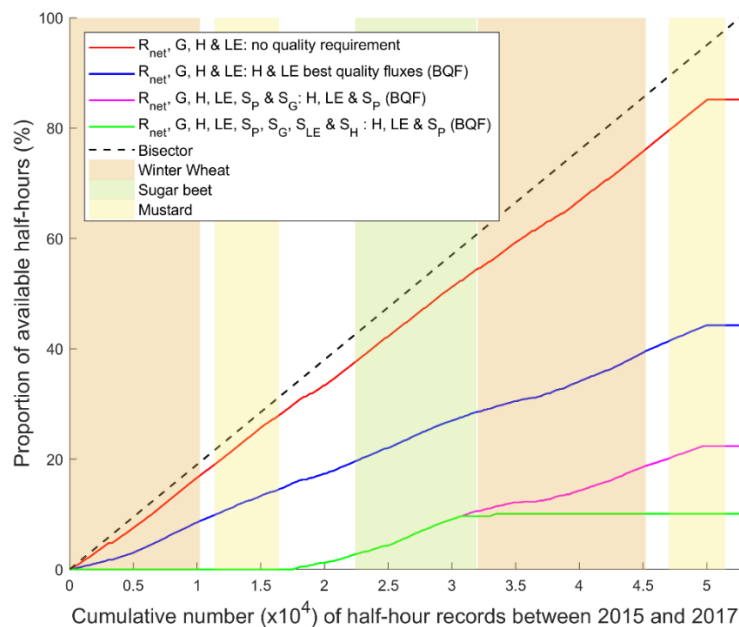


Figure 34 – Disponibilité temporelle et simultanée des mesures de flux, d’après la somme cumulée des demi-heures de données disponibles, avant et après sélection des flux de meilleure qualité d’après le test de Mauder and Foken (2004)

En regardant la disponibilité des flux majeurs (R_{net} -G et H+LE meilleures qualités) d’après les saisons et les heures de la journée, il peut être observé que la plupart des demi-heures des 45% sont obtenues durant la journée où la pente de la somme cumulée des demi-heures disponibles est proche de 1 (Figure 35).

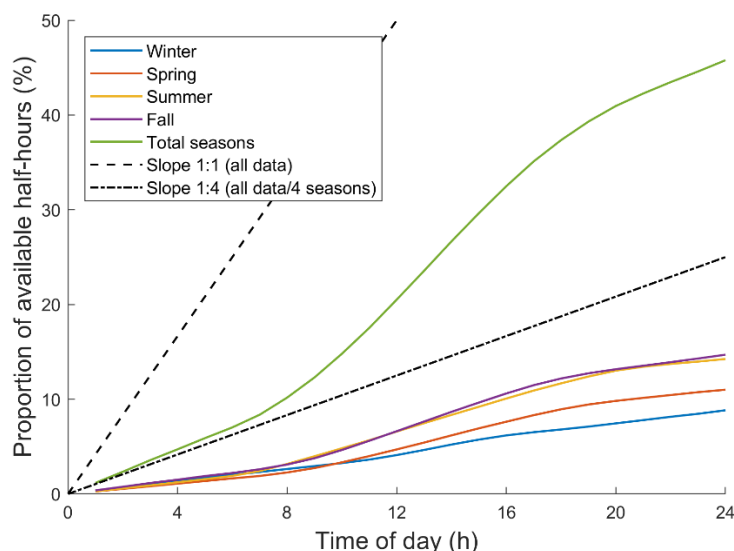


Figure 35 – Disponibilité horaire et simultanée des mesures de flux majeurs (R_{net} -G et H+LE meilleures qualités), d’après la somme cumulée des demi-heures de données disponibles.

La pente 1:4 est ici affichée pour indiquer le nombre de demi-heures totales par saison sur les trois années. En observant les quatre saisons, il apparaît que l’hiver est la période la moins représentée, où seulement environ 35% des demi-heures saisonnières sont disponibles pour effectuer le bilan. Le printemps est intermédiaire entre l’hiver, d’une part, et l’été et l’automne, d’autre part, qui comptent chacun la même proportion d’environ 65% des demi-heures saisonnières.

L’évolution horaire des courbes de saison montre également que la plupart des demi-heures disponibles sont issues des demi-heures de jour. C’est particulièrement vrai l’été et le printemps où la pente est proche de 1:4 entre 8 et 18h. L’hiver, la pente augmente légèrement plus tard, vers 10h,

et s'atténue plus tôt vers 16h. En résumé, le test de qualité de Mauder et Foken (2004) élimine davantage de mesures l'hiver et la nuit. Si on regarde la courbe du total, on constate qu'en moyenne seuls 25% des données nocturnes sont disponibles et le jour 80%.

5.3. Observations générales sur les paramètres du bilan

Dans un premier temps, il est important d'explicitier, par rapport à la littérature, les paramètres du bilan énergétique qui vont être utilisés par la suite. Le but ici est de faciliter l'interprétation des paramètres du BE afin de pouvoir les raccrocher aux phénomènes physiques.

L'EBR est un paramètre du BE qui peut être vu également comme la pente de la droite qui passe par l'origine (0;0), donc d'ordonnée à l'origine nulle, et par le point moyen de la dispersion de la relation entre $H+LE$ et $R_{net}-G$ et le point $(\sum_{i=1}^n (H + LE)_i, \sum_{i=1}^n (R_{net} - G - S)_i)$ qui est le centre d'inertie de la dispersion. Contrairement à la régression RMA, l'EBR est une régression contrainte où l'ordonnée à l'origine est fixe (= 0) et dont la pente n'est pas obtenue par la méthode des moindres carrés, qui minimise la somme quadratique des écarts à la droite de régression. Il peut donc y être associé un coefficient de détermination R^2_{EBR} . En revanche, cette droite présente l'avantage de n'être pas susceptible d'une rotation comme la droite de régression RMA. La rotation se manifeste, par exemple, par une augmentation de la pente et une ordonnée à l'origine plus basse sur l'axe vertical. Une amélioration du bilan nécessite que l'EBR et la pente RMA augmentent conjointement, signifiant que le centre d'inertie de la dispersion se rapproche de la droite 1:1.

Wilson et al. (2002) ont observé que cet estimateur du bilan a tendance à surestimer certains flux positifs de jour et sous-estimer certains flux négatifs la nuit (pour voir un exemple d'une telle situation, consulter l'Annexe 10). Leuning et al. (2012) proposent implicitement dans leur article l'utilisation d'un intervalle de confiance sur l'EBR qui vaut approximativement 2 fois l'erreur standard sur $R_{net}-G$. Pour être plus complète, l'erreur standard de l'EBR doit tenir compte des erreurs standards des moyennes du numérateur et du dénominateur. Les développements qui mènent à l'intervalle de confiance sur l'EBR utilisé dans le cadre de ce travail peuvent se trouver dans l'article de Dunlap et Clayton (1986) et se basent sur le théorème de Fieller. La valeur 2 de l'article de Leuning et al. (2012) est une approximation qui provient de la distribution de t de Student qui tend vers 1,96 lorsque le nombre de degrés de liberté est grand (> 120). La même valeur sera également utilisée pour le calcul de l'intervalle de confiance de l'EBR sauf dans les cas où le nombre de valeurs est plus petit.

5.4. Répartition des flux énergétiques et bilan énergétique général

La Figure 36 montre la distribution de fréquence relative des flux pour H , LE , R_{net} , G et le résidu $R_{net}-G-(H+LE)$, d'après la proportion de demi-heures disponibles par rapport au nombre de demi-heures théorique par saison sur les 3 années (3 ans x 365 jours/an x 48 demi-heures/jour/4 saisons/an). L'Annexe 11 reprend sous forme de tableau les médianes saisonnières et annuelles des principaux flux et le résidu du bilan énergétique.

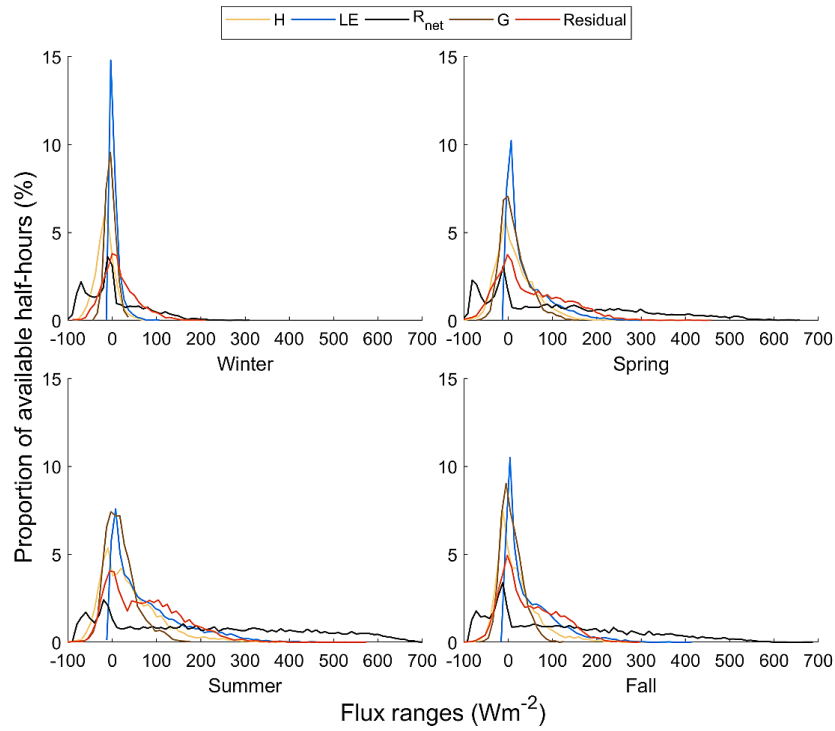


Figure 36 – Distribution de fréquence relative des flux pour H, LE, R_{net} , G et le résidu $R_{net}-G-(H+LE)$, exprimée comme la proportion des demi-heures de données disponibles.

La majorité des données de flux sont proches de 0 Wm^{-2} . Leur distribution suit plus ou moins une distribution normale asymétrique vers la droite avec une moyenne positive sauf dans le cas de H et G l'hiver. Le flux de LE est uniquement positif. R_{net} a la distribution la plus étalée, surtout en été, avec deux sauts caractéristiques pour ses valeurs négatives. Ces sauts sont liés à des conditions (moins fréquentes) de ciel plutôt dégagé avec pas ou peu de nuages clairsemés ou des conditions (plus fréquentes) de ciel « bouché » avec une épaisse couverture nuageuse. À ces conditions correspondent respectivement des émissions IR négatives plutôt importantes ou faibles (voir Forbes et Ahlgrim, 2014). De manière générale, en observant les médianes de flux (Annexe 11), il peut être constaté que le résidu le plus important proportionnellement se situe en hiver. En été, le résidu atteint presque 300 Wm^{-2} .

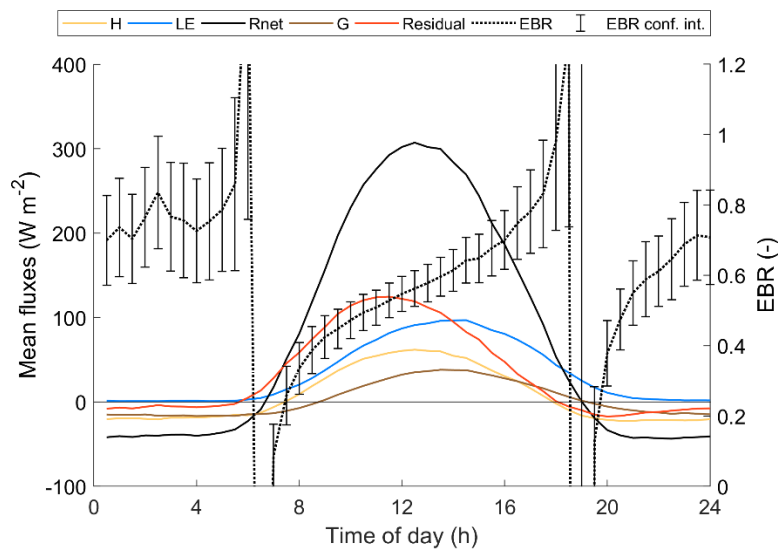


Figure 37 – Répartition moyenne horaire des flux énergétiques principaux entre 2015 et 2017, du résidu et de l'EBR (+ intervalle de confiance). Le résidu horaire = $R_{net}-G-H-(LE+L)$

La Figure 37 illustre la répartition moyenne horaire des flux énergétiques sur toutes les données disponibles entre 2015 et 2017 pour donner un cadre général des tendances observées. Elle présente également l'EBR horaire et son intervalle de confiance.

Le flux radiatif R_{net} est le flux le plus important, avec un maximum de 300 Wm^{-2} entre 12 et 13h et des valeurs nocturnes proches de -40 Wm^{-2} . Ce flux d'énergie est principalement réparti entre les flux de chaleur latente d'abord et de chaleur sensible ensuite. Le flux LE atteint maximum 100 Wm^{-2} et devient proche de 0 durant la nuit. En revenant sur la disponibilité de LE (Figure 33) d'après le test de Mauder et Foken (2004), il peut être noté que la grande majorité des flux écartés de LE a lieu la nuit où LE est quasi nul.

Il est à remarquer que la distribution horaire de LE est légèrement décalée par rapport à R_{net} et qu'elle est centrée sur 14h. Concernant le flux H, il représente 60 Wm^{-2} le jour et -20 Wm^{-2} durant la nuit. Contrairement à LE, la distribution de H est plutôt centrée sur 13h comme R_{net} . Enfin, le flux de chaleur dans le sol G est le plus petit des quatre flux, avec un maximum d'environ 40 Wm^{-2} le jour et des valeurs nocturnes de -15 Wm^{-2} , et présente une distribution similaire à LE. Le résidu horaire moyen est la différence entre R_{net} et $H+LE+G$. Il atteint jusqu'à 120 Wm^{-2} vers 11h, soit plus de 40% de R_{net} . En début de nuit, le résidu est faible ($|\text{résidu}| < 8 \text{ Wm}^{-2}$) et il descend jusqu'à -17 Wm^{-2} vers 20h.

Le matin et le soir, l'EBR n'est pas très significatif, car ces valeurs négatives ou positives importantes résultent de valeurs proches de 0 au dénominateur, lorsque $R_{\text{net}}-G$ franchit l'axe horizontal. En journée, l'EBR augmente depuis 8h jusqu'à environ 18h où il atteint presque 0,80. La nuit, l'EBR semble indiquer un meilleur bilan énergétique général, autour de 0,80. Cependant l'intervalle de confiance est beaucoup plus important (entre 0,10 et 0,17) et le R^2 est négatif la nuit. A cette période, l'EBR n'explique rien. En regardant la distribution des données à ces périodes, on observe un nuage de points et l'EBR présente effectivement une valeur autour de 0,80 trompeuse (non montré) qui est liée à l'ordonnée à l'origine (désignée par l'o.o. ci-après) fixée sur (0;0). En Annexe 12, une illustration sur des points fictifs permet de mieux visualiser cet effet de nuage de points sur l'EBR.

La Figure 38 détaille l'effet annuel et saisonnier de la répartition des flux sur les trois années. La figure est inspirée de l'étude d'Eshonkulov et al. (2019b) sur le bilan énergétique de plusieurs années-site en Allemagne à la même latitude que Lonzée, dans un contexte agricole fort semblable. Elle permet de comparer les ordres de grandeur des flux moyens. Les saisons sont ici basées sur les caractéristiques de rayonnement et définies comme les périodes centrées sur les équinoxes et les solstices. Par exemple, l'été est la période centrée sur le 21 juin, qui physiquement correspond au jour de l'année où le soleil atteint sa hauteur maximale au zénith.

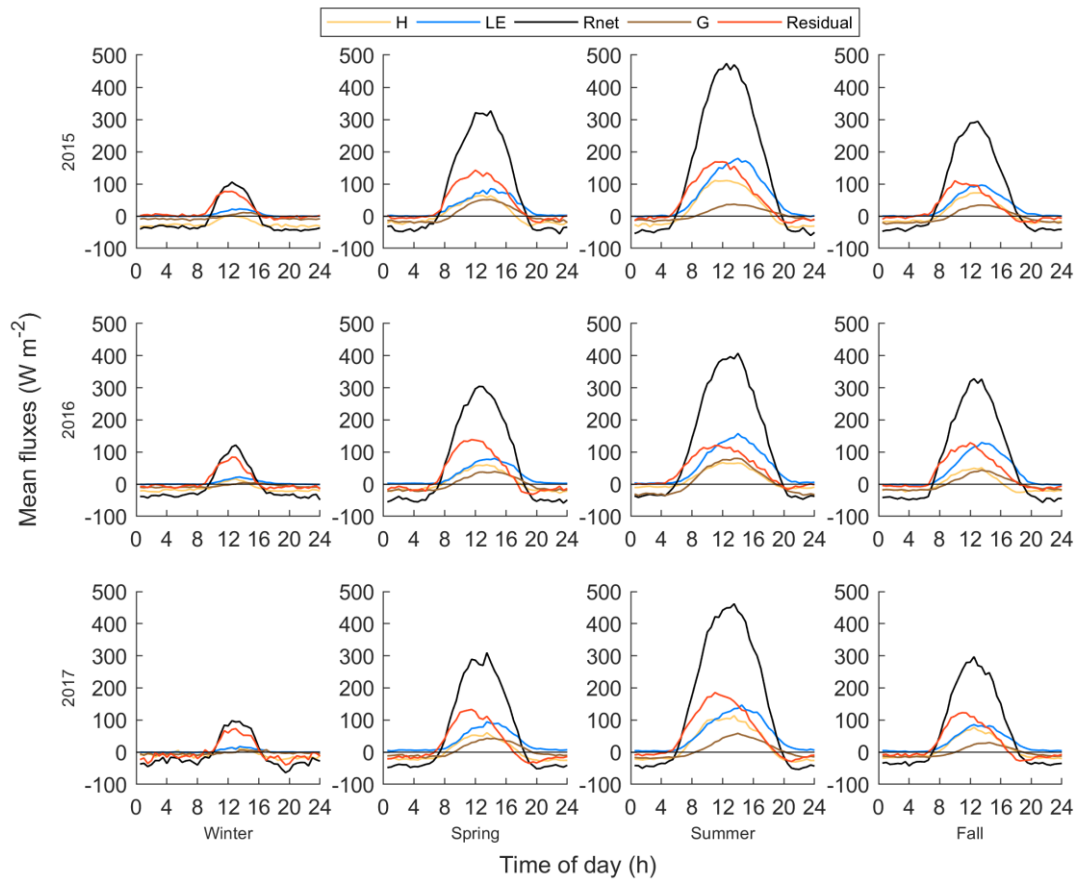


Figure 38 – Répartition moyenne horaire des flux énergétiques selon les années et les saisons

Les trois années sont globalement équivalentes en termes de flux moyens. Les relations hivernales et printanières sont assez identiques. Cependant, certaines différences sont à épingle. Le R_{net} et le résidu sont plus importants durant les étés 2015 et 2017. En 2016, G et H s'équivalent et représentent seulement la moitié de LE. Au printemps et en automne, H et LE se valent davantage sauf à l'automne 2016, où LE est du même ordre de grandeur que le résidu. Pour rappel, 2016 correspond à une année de culture de la betterave, par rapport à 2015 et 2017 où la parcelle était sous blé d'hiver.

Par rapport à Eshonkulov et al. (2019b), il convient de remarquer que les valeurs de LE de la Figure 38 sont inférieures à celles de ces auteurs (Annexe 13) pendant la saison de croissance des cultures, avec des valeurs maximales moyennes entre 100 et 150 Wm^{-2} contre 180 à 220 Wm^{-2} . Le flux G montre également la même tendance, avec des valeurs qui peuvent atteindre 100 Wm^{-2} dans leur étude contre 50 Wm^{-2} ici. Cependant, il faut noter que leurs mesures de G ne sont pas effectuées sous la culture, mais dans le pourtour de la station de CT.

Le bilan énergétique par la régression RMA entre $R_{net}-G$ et $H+LE$, sans tenir compte des flux S, de janvier 2015 à décembre 2017 est montré à la Figure 39. Le résultat permet de comparer les résultats de la station de Lonzée avec ceux de l'étude Wilson et al. (2002) sur le réseau FLUXNET (Figure 2 et Annexe 1). Les points du graphique représentent la relation à la demi-heure entre $R_{net}-G$ et $H+LE$. Enfin la représentation de Leuning et al. (2012) est également illustrée sur la Figure 39 (b) pour comparaison et discussion sur les paramètres de bilan.

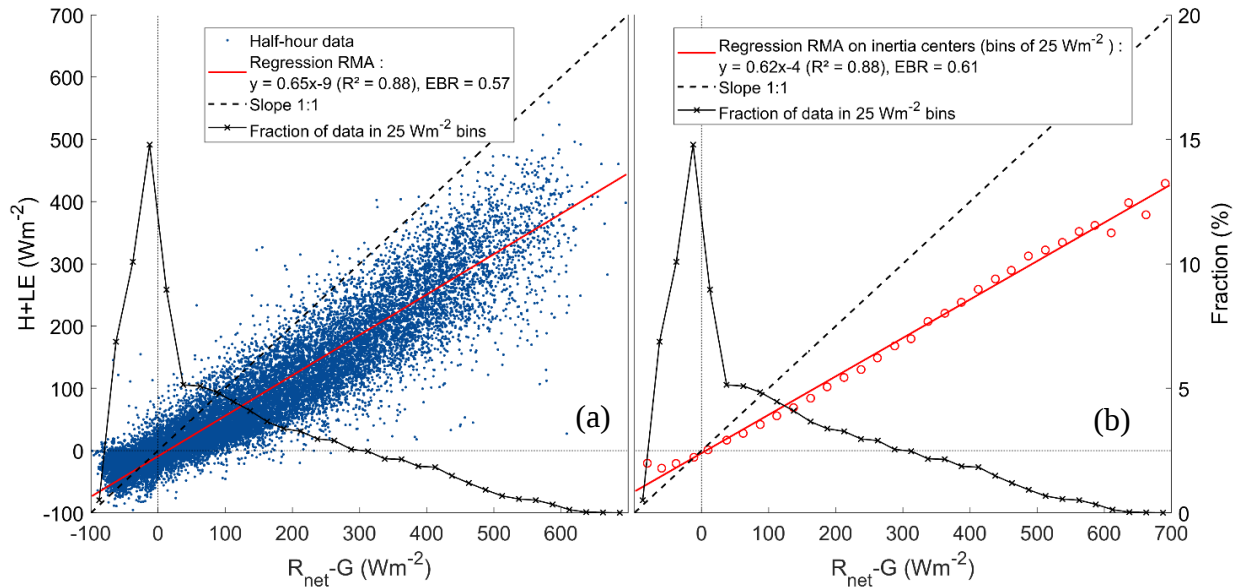


Figure 39 – (a) Régression RMA entre $R_{\text{net}}-G$ et $H+LE$ entre 2015 et 2017 et proportion des data par classes de 25 Wm^{-2} et (b) idem sur les centres d’inertie des classes de 25 Wm^{-2}

Sur la figure (a), la majorité des demi-heures montrent des flux proches de 0 Wm^{-2} avec presque 60% des points inférieurs à 100 Wm^{-2} sur l’axe horizontal. La dispersion des points augmente avec l’ordre de grandeur des flux. La pente de la régression RMA est de 0,65 (-) et l’o.o. $-9,08 \text{ Wm}^{-2}$. Le R^2 de 0,88 est plutôt élevé et les intervalles de confiance (risque d’erreur de 5%) sur les paramètres de la régression RMA selon Jolicoeur and Mosimann (1968) - McArdle (1988) sont respectivement de $[\pm 0,003]$ et $[\pm 0,342]$. Ces intervalles sont assez réduits de par le nombre de points ($n=23\,283$). Par la suite, ils ne seront pas systématiquement donnés, à moins que le nombre de points ne le justifie.

L’EBR sur les 3 années est de $0,57 [\pm 0,022]$ et est moins élevé que la pente. L’erreur sur l’EBR est assez faible grâce au nombre de points. Par la suite, tout comme pour les paramètres de la RMA, l’erreur ne sera montrée que dans les cas où elle est plus significative. Le nombre de points autour de $H+LE = 0$ est plus important et « pèse » sur le centre d’inertie de la distribution des points. Ces points correspondent essentiellement à des flux nocturnes (Annexe 14) qui présentent une grande dispersion.

Cet effet du nombre de points peut être adressé (d’après Leuning et al., 2012) en réalisant la régression sur les points moyens des classes de flux, laquelle équivaut à la régression sur les centres d’inertie des classes ou EBR par classe. Si on applique cette méthode sur les points de la Figure 39 (a), on obtient une pente moins importante de $0,62 [\pm 0,019]$ et une o.o. de $-4 [\pm 5,616]$ dont l’erreur est plus importante. L’EBR global est par contre plus grand que pour la figure (a) et montre l’effet de la représentativité des ordres de grandeur des flux sur le paramètre. En effet, on a vu que 60% de points sont proches de l’origine et ils opèrent une certaine pondération au sein des moyennes du numérateur et du dénominateur de l’EBR. C’est vrai également sur les centres de masse des flux qui semblent réaliser une asymptote quand $H+LE < 0$.

Par rapport aux valeurs des stations du réseau FLUXNET (Figure 2), Lonzée se situe dans le premier quartile des boîtes à moustaches avec un bilan énergétique plutôt médiocre comparé aux moyennes des pentes et de l’EBR qui avoisinent globalement les 0,80. Si les années sont étudiées séparément (Figure 40), elles présentent des résultats similaires à l’ensemble (Figure 39).

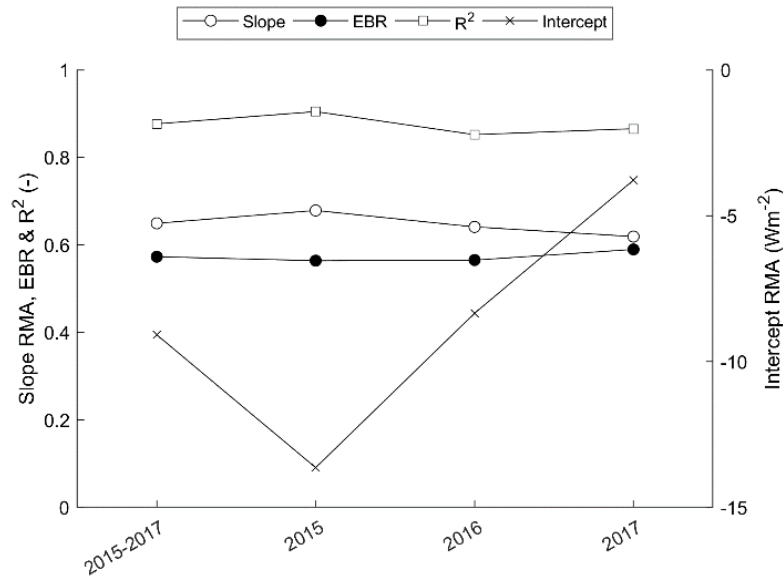


Figure 40 – Variabilité interannuelle des paramètres des régressions RMA et EBR pour 2015, 2016 et 2017 comparées à l'ensemble des données sur 2015-2017

La pente est légèrement plus grande en 2015 par rapport à 2016 et 2017. Cependant, l'EBR ne montre pas la même tendance et la droite RMA effectue en réalité une légère rotation autour du centre d'inertie. L'augmentation de la pente est marquée par une o.o. qui descend sur l'axe vertical et il est difficile de conclure que le bilan est meilleur dans ce cas-là. On peut observer en 2017 que l'EBR et la pente RMA sont quasi identiques puisque l'o.o. s'est rapprochée de 0. La Figure 41 suivante isole l'effet des périodes de l'année d'après les saisons comme définies ci-dessus (Figure 38).

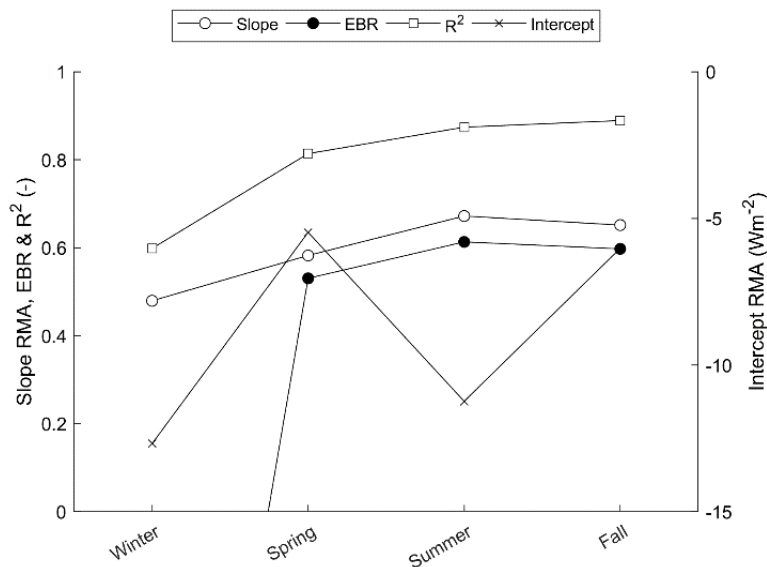


Figure 41 – Variabilité saisonnière des paramètres des régressions RMA et EBR pour les années 2015- 2017

L'hiver est la période de l'année où le bilan énergétique est le plus mauvais avec une pente inférieure à 0,5 et un R^2 peu élevé révélant une corrélation plutôt médiocre. L'EBR est négatif et vaut -1,54 [$\pm$ -0,32] (caché). En regardant la dispersion (non montré), il apparaît que le centre de masse de la dispersion est proche de l'origine à (6,2 ; -9,7). Le R^2_{EBR} associé vaut -0,08 et confirme que l'EBR n'a pas de signification en hiver. L'EBR est donc sensible aux dispersions dont le centre de masse est proche de (0;0)

L'été présente un bilan globalement meilleur caractérisé par une pente (0,67) et un EBR (0,61) conjointement supérieurs aux autres saisons, malgré une o.o. plus négative comparé au printemps et à l'automne. Comme à la Figure 40, la droite effectue une légère rotation, mais l'augmentation simultanée de la pente et de l'EBR à cette période confirme malgré tout un meilleur bilan. L'observation des paramètres mois par mois (Figure 42) permet de mieux cerner les contrastes entre les périodes de l'année.

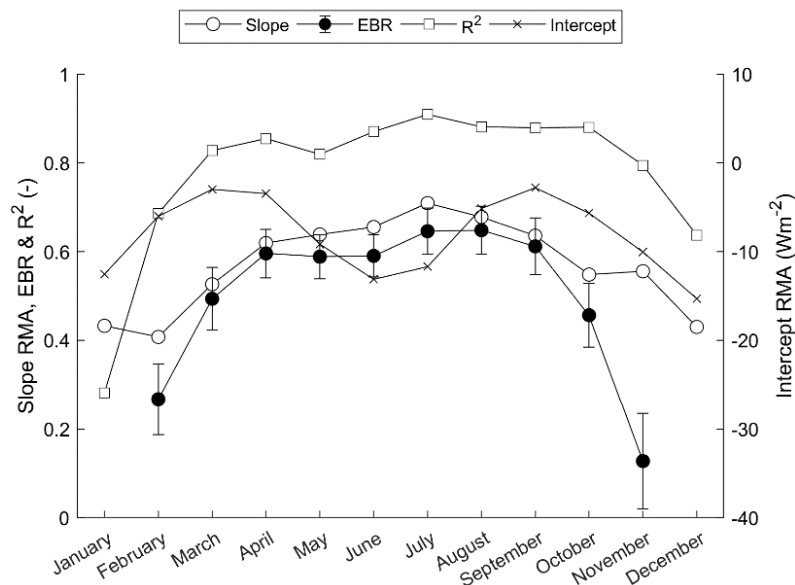


Figure 42 – Variabilité mensuelle des paramètres des régressions RMA et EBR pour les années 2015-17

Les mois de juillet, août et septembre sont en général ceux où la fermeture du BE est la meilleure. La pente atteint quasi 0,8 au mois de juillet. De nouveau, une meilleure pente est associée avec une o.o. plus importante négativement et un EBR plus faible que la pente. L'EBR présente en général une erreur plus importante que la pente dont l'erreur est inférieure à 0,02. Au mois de décembre et janvier, l'EBR vaut -23 et 28 (non montrés) et n'a pas de signification (grande erreur). Les centres d'inertie sont proches de l'origine des axes et l'EBR affiche au dénominateur un R_{net-G} proche de 0. La RMA offre l'avantage de donner dans ce cas une pente et un R^2 qui permet d'évaluer l'orientation et la dispersion des points.

5.5. Influence de la stabilité atmosphérique

Pour rappel, les trois conditions de stabilité atmosphérique peuvent être classées d'après la valeur de ξ (cf. chapitre 2.1) : stable ($\xi \geq 0,1$), neutre ($|\xi| < 0,1$) et instable ($\xi \leq -0,1$). Elles correspondent respectivement aux conditions de dissipation, neutres et de production de turbulence. Les conditions stables, neutres et instables sont référencées respectivement par CS, CN et CI ci-après.

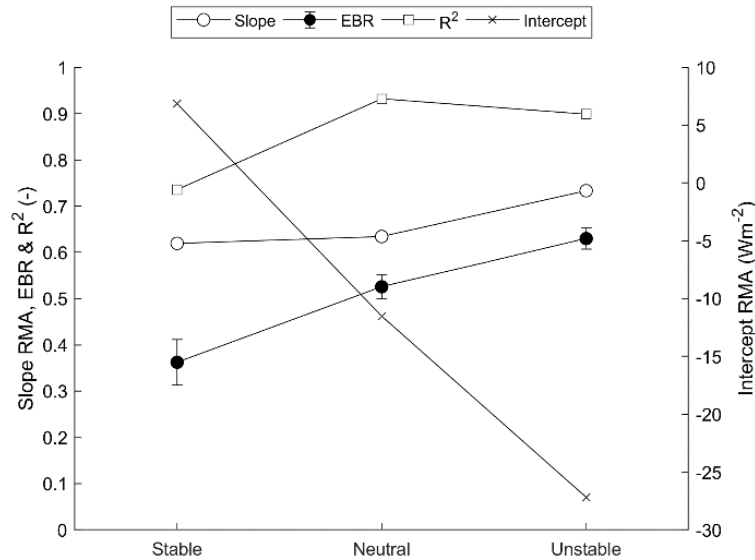


Figure 43 – Variabilité des paramètres des régressions RMA et EBR sur 2015-17 d’après les trois classes de stabilité atmosphérique

La Figure 43 montre que le BE est meilleur en CI avec une pente de 0,73 par rapport aux CN (0,63) et CS (0,62). Notons que la pente en CN est plus proche de la pente observée pour l’ensemble des données (Figure 39) puisqu’il s’agit des conditions atmosphériques les plus fréquentes. Le coefficient de détermination R^2 est plus élevé en condition neutre qu’en condition instable et s’explique par l’o.o. qui augmente négativement de stable à instable. L’EBR calculé sur les demi-heures de chaque condition atmosphérique présente quant à lui une évolution croissante entre les trois conditions. Il passe de 0,36 (CS) par 0,53 (CN) pour atteindre 0,63 (CI). Les points de la Figure 39 qui sont attribués aux trois classes de stabilité sont illustrés ci-dessous (Figure 44).

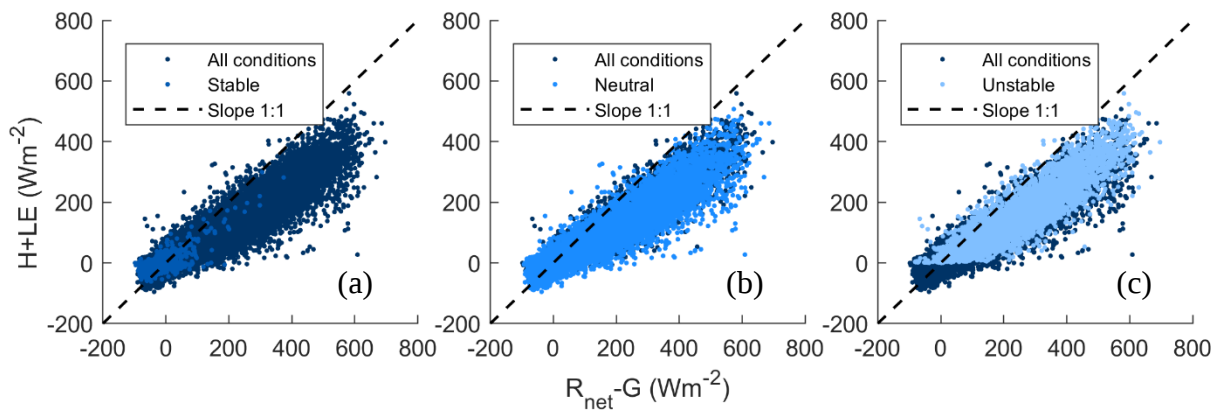


Figure 44 – Représentation relative des trois classes de stabilité atmosphérique : (a) stable, (b) neutre et (c) instable sur les points de la régression à la Figure 39

Les trois dégradés de bleu illustrent les trois conditions de stabilité et, en arrière-plan, le bleu foncé reprend toutes les conditions qui ont été présentées à la Figure 39. Les flux en conditions stables sont les moins fréquents des trois puisque, comme expliqué précédemment, ils sont en grande partie écartés par les tests de Mauder and Foken (2004). Les CS sont majoritairement représentées par de faibles flux ($|H+LE|$ et $|R_{net}-G| < 100 \text{ Wm}^{-2}$) autour de l’origine (0;0) et des points essentiellement situés au-dessus de la droite 1:1 (o.o. de 5 Wm^{-2}). Les CN sont quant à elles les conditions les plus fréquentes et sont caractérisées par toutes les gammes de flux. Enfin, les CI présentent une distribution de points similaire aux CN, excepté pour $(H+LE) < 0$ et il est à noter que la distribution horizontale

des points est légèrement moins importante qu'en condition neutre. Ces deux observations expliquent l'augmentation de la pente et la diminution de l'o.o. en condition instable.

L'inconvénient de la régression est qu'il est difficile de se rendre compte de l'évolution journalière des flux et des caractéristiques de stabilité. Comme il apparaît ci-dessus, les CN cachent plusieurs ensembles de points qui caractérisent des moments particuliers de la journée dont les influences sur le bilan énergétique sont contrastées. La proportion horaire et saisonnière des demi-heures de flux appartenant aux trois conditions de stabilité est montrée ci-dessous (Figure 45). Les proportions des flux H et LE qui sont écartées par le test de qualité de flux de Mauder et Foken (2004) y sont également représentées pour mémoire.

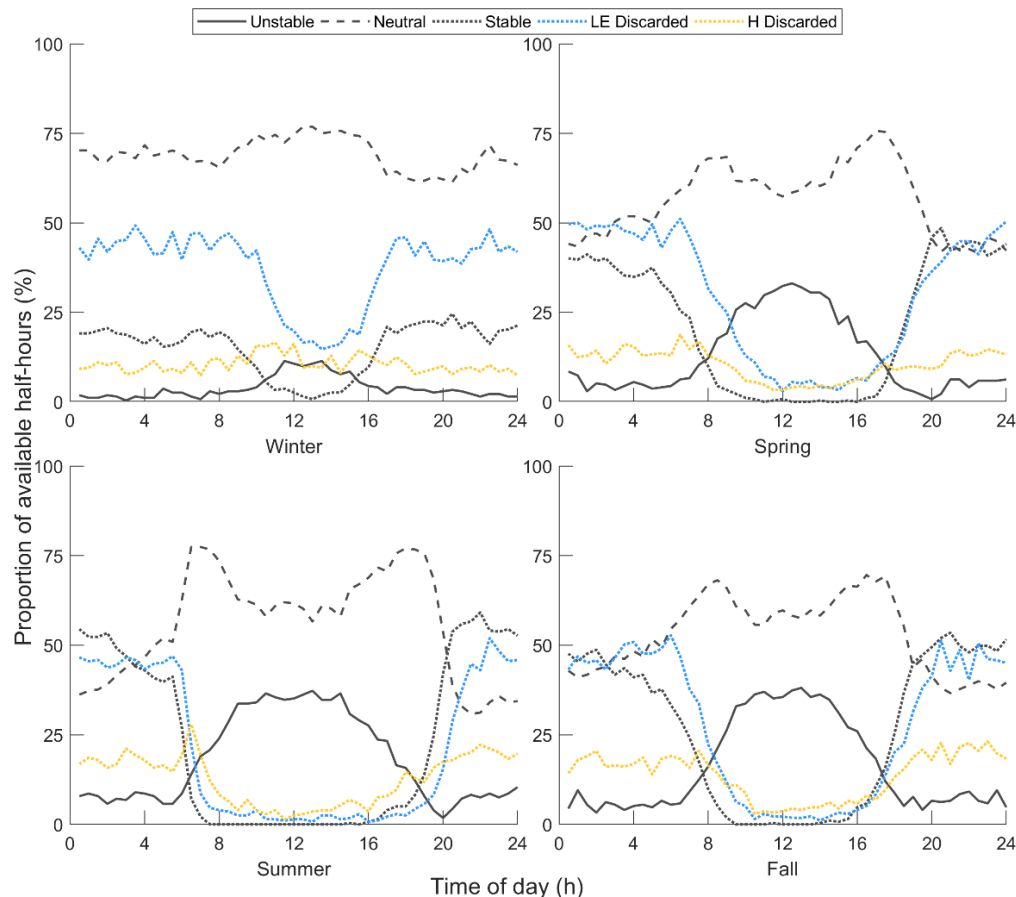


Figure 45 – Proportion horaire et saisonnière des demi-heures de flux disponibles d'après les conditions de stabilité atmosphérique (stable, neutre, instable) pour 2015-17, comparée avec le nombre de flux éliminé d'après le critère de qualité de Mauder et Foken (2004) pour H et LE (cf. Figure 33)

L'observation des courbes met en évidence toute l'année une certaine symétrie entre $0 < h < 12h$ et $12 < h < 24$. Excepté l'hiver, les journées sont principalement caractérisées par environ 30% de CI et 60% de CN. Les nuits, l'atmosphère est soit neutre ou stable et présente peu de CI ($< 10\%$). En hiver, les CS sont moins importantes que le reste de l'année et les journées sont principalement caractérisées par des CN. Enfin, le matin et le soir sont les périodes de transition qui présentent le plus de CN (jusqu'à 75%). D'après la Figure 45, quatre périodes peuvent être scindées : 2 périodes de transition (matin et soir) et 2 périodes caractéristiques de stabilité (la mi-journée et la nuit).

Ces périodes rappellent la tendance journalière observée à la Figure 37 avec un bilan médiocre la nuit qui s'améliore du matin jusqu'au soir. En Annexe 15, les points qui sont attribués à ces 4 périodes

sont mis en avant par rapport à la Figure 39. Leur observation fait apparaître une hystérèse. Effectivement, en réalisant l'EBR horaire ou centre d'inertie des points par heure de la journée sur tous les data de la Figure 39, le résultat suivant est obtenu (Figure 46).

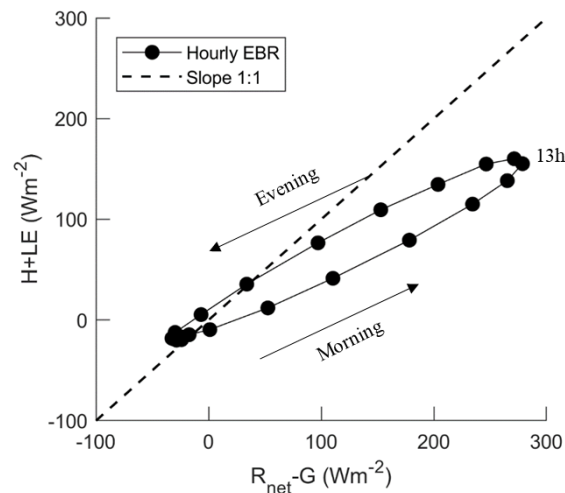


Figure 46 – Hystérèse de la relation entre $R_{\text{net-G}}$ et $H+LE$ pour 2015-17 représenté par l'EBR horaire

Cette hystérèse est également présente à toute les saisons de l'année (non montré). Le résultat du bilan énergétique en condition neutre est donc le résultat de deux tendances différentes. La comparaison avec le bilan en CI se révèle finalement peu significative en tant que telle. Cette hystérèse met en lumière ce qui est appelé dans la littérature un déphasage, lequel a été décrit implicitement lors de la description de la Figure 37. En effet, le résidu est plus important le matin que le soir et l'hypothèse citée la plus probable est la négligence ou la sous-estimation des flux de taux de stockage (Leuning et al., 2012). Ce sujet fait l'objet du sous-chapitre suivant.

Pour conclure ce sous-chapitre en décomposant ξ suivant Eshonkulov et al. (2019b), la Figure 47 met en lumière les tendances des relations de H (indicateur de la flottabilité) et de u^* (indicateur des contraintes de cisaillement) avec l'EBR à la demi-heure (EBR_{30}). Cette méthode permet de se défaire de l'effet temporel mis en évidence précédemment sur la régression. Cette représentation peut être vue comme la distribution de fréquence des valeurs d' EBR_{30} en fonction des valeurs de H , u^* et ξ . Les moyennes tronquées¹⁰ (1%) par groupe de valeurs de H , u^* et ξ sont données comme indication du centre de la distribution. La moyenne n'est pas utilisée, car elle est influencée par les valeurs extrêmes qui sont dues à de petites valeurs de $R_{\text{net-G}}$ au dénominateur. La médiane pourrait être utilisée, mais elle n'a pas de signification physique. La moyenne tronquée est le compromis qui allie la robustesse de la médiane et la représentativité de la moyenne.

¹⁰ La moyenne tronquée permet d'éviter l'influence des valeurs extrêmes auxquelles la moyenne est sensible. La série de valeurs à moyenner est triée et un certain pourcentage du nombre total de valeurs est choisi pour déterminer le nombre de valeurs aux extrémités de la série qui sont exclues.

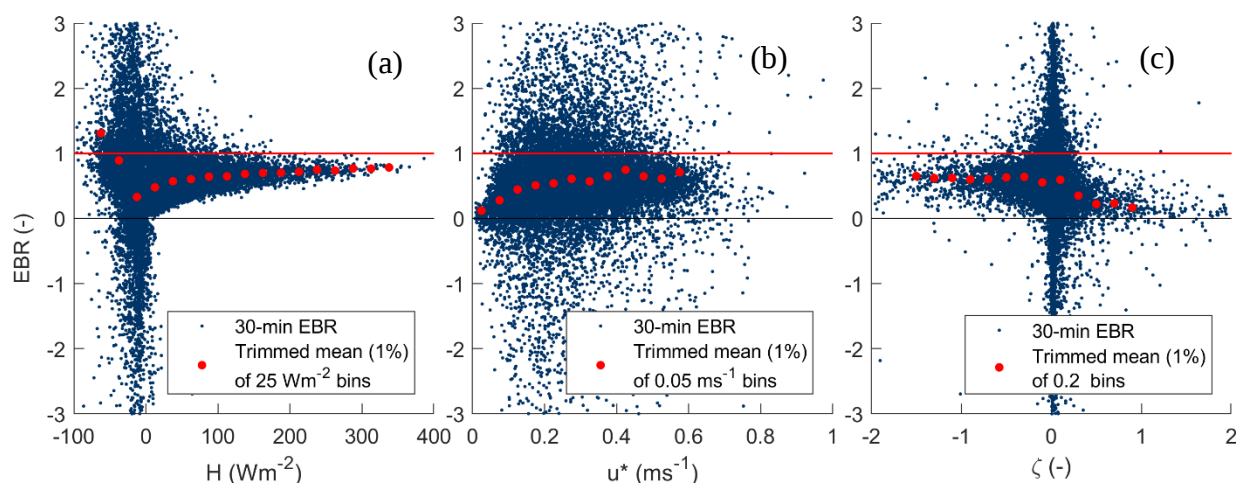


Figure 47 – Relations entre (a) H , (b) u^* et (c) ζ avec l'EBR à la demi-heure et la moyenne tronquée (1%) par classe

De manière générale, le BE s'améliore avec l'augmentation de la flottabilité et des contraintes de cisaillement qui augmentent la turbulence et favorisent les conditions d'application de la CT. Cependant, cela est surtout vrai jusqu'aux seuils $H < 50 \text{ Wm}^{-2}$ et $u^* < 0,3 \text{ ms}^{-1}$, car l'augmentation de l'EBR moyen est plutôt faible ou nulle ensuite. En revanche, sur le graphe (c), le paramètre de stabilité ζ montre surtout un effet entre les conditions neutres et stables où le BE se détériore. Sur le graphe (a), on remarque à nouveau l'effet expliqué précédemment de l'EBR pour les valeurs $H < 0$ qui donne une fausse impression de bon bilan énergétique. En conclusion, les conditions de stabilités atmosphériques expliquent peu ou pas la non-fermeture du bilan. Seule la variabilité de l'EBR₃₀ semble diminuer avec l'augmentation de H , u^* et ζ .

5.6. Parts des termes de taux de stockage dans le bilan d'énergie

Pour rappel, le terme S dans l'Équation 1 reprend S_G , S_P , S_{LE} , S_H et S_C respectivement les taux de stockage d'énergie dans le sol, par la photosynthèse, liés aux changements d'humidité et de température de l'air. Le taux de stockage lié à la canopée (S_C) n'a pas pu être déterminé dans le cadre de ce travail. Les ordres de grandeur que représentent ces flux d'après les données étudiées sont repris dans le Tableau 5. Le terme S_G est le terme de taux de stockage le plus important.

Tableau 5 – Moyenne, minimum et maximum des valeurs des termes S_G , S_P , S_{LE} et S_H pour 2015-17

	Min. (Wm^{-2})	Moy. (Wm^{-2})	Max. (Wm^{-2})
S_P	-5	0,3	15
S_G	-40	0,0	60
S_{LE}	-5	0,0	5
S_H	-4	0,0	4

Pour donner un ordre de grandeur, Eshonkulov et al. (2019a) ont obtenu un S_C de l'ordre de $-8,8$ à $9,5 \text{ Wm}^{-2}$ en moyenne (journalière) pour une culture de blé à la même latitude en Allemagne. Masseroni et al. (2014) rapportent également un ordre de grandeur similaire de -8 à 10 Wm^{-2} en moyenne (journalière) pour une culture de maïs en Italie.

Il est à remarquer qu'en moyenne, le taux de stockage général est égal à 0 sauf pour S_P . Il n'y a effectivement pas d'accumulation d'énergie dans le système si ce n'est qu'une partie est exportée par les récoltes. S_{LE} et S_H sont les taux de stockage les plus faibles des quatre et S_G le plus grand.

L'observation de l'évolution horaire moyenne de ces flux about à la répartition suivante (Figure 48) et les résultats d'Eshonkulov et al. (2019a) et de Masseroni et al. (2014) peuvent être visualisés aux Annexe 16 et Annexe 17 pour comparaison.

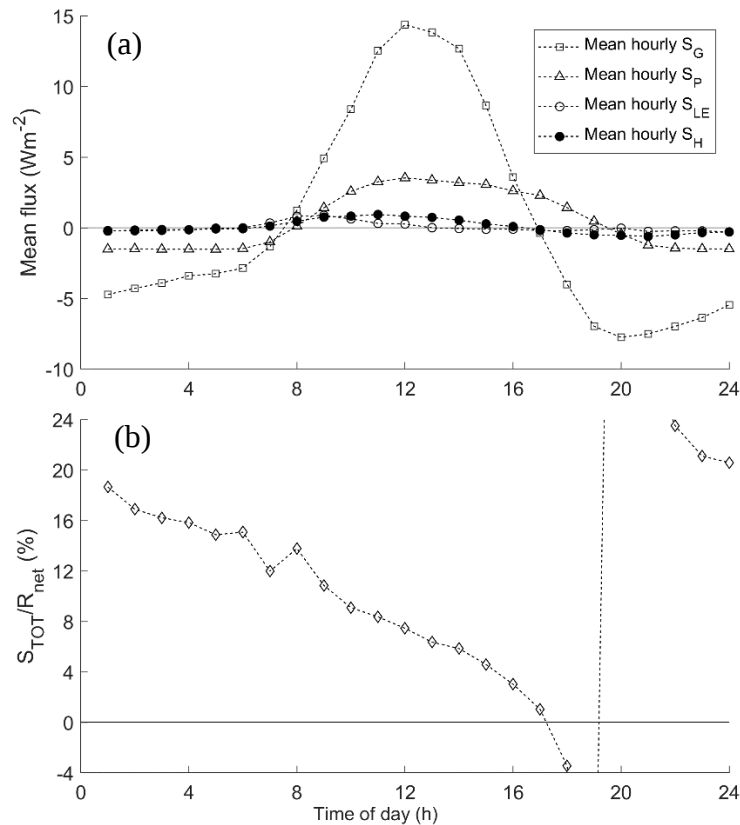


Figure 48 – (a) Flux moyens horaires correspondant aux taux de stockage $S_G + S_P + S_{LE} + S_H = S_{TOT}$ et (b) pourcentage moyen horaire que S_{TOT} représente par rapport à R_{net}

Pour rappel, ces flux ne sont disponibles que durant l'année 2016 sous betterave (cf. Figure 34). Le taux de stockage d'énergie dans le sol S_G est plutôt important durant la journée et atteint jusqu'à 15 Wm^{-2} en moyenne. Le maximum est atteint vers 13h et le minimum vers 20h. Le terme S_P suit plus ou moins la même tendance si ce n'est que sa courbe franchit l'axe des abscisses plus tard vers 20h. Enfin, S_{LE} et S_H sont quasi nuls la nuit et atteignent leur maximum vers 9h et 11h. La proportion du taux de stockage total S_{TOT} par rapport à R_{net} à chaque heure de la journée montre que S_{TOT} représente jusqu'à 20% durant la nuit. Cette proportion descend du matin jusqu'au soir avant de remonter durant le début de la nuit. Le petit et le grand saut de la courbe vers 7h et entre 18 et 20h (asymptote visible sur 19h) ne sont pas représentatifs de la proportion, car à ces périodes R_{net} (au dénominateur) est proche de 0.

Masseroni et al. (2014) montrent des valeurs de S_G et de S_P au moins deux fois plus grandes qui peuvent s'expliquer, d'une part, par l'ensoleillement en Italie pour S_G et, d'autre part, par le fait que le maïs capte à priori plus de CO_2 que la betterave. Eshonkulov et al. (2019a) indiquent une valeur moyenne journalière qui atteint entre 25 et 30 Wm^{-2} pour S_P sous culture de blé au moment du pic de croissance du blé (entre mai et juin). Concernant S_G , ces auteurs indiquent des flux entre -77 et 108 Wm^{-2} contre -40 et 60 Wm^{-2} dans notre cas d'étude. Cette différence peut s'expliquer par les différentes d'épaisseurs de sol au-dessus des fluxmètres entre les deux études.

En reprenant la Figure 37 et en observant l'effet horaire du terme S sur le résidu du bilan (Figure 49), une baisse moyenne du résidu de 18 Wm^{-2} , soit 23%, se manifeste vers 13h. Durant la nuit, le résidu devient quasi nul avec une réduction (négative) d'environ 7 Wm^{-2} .

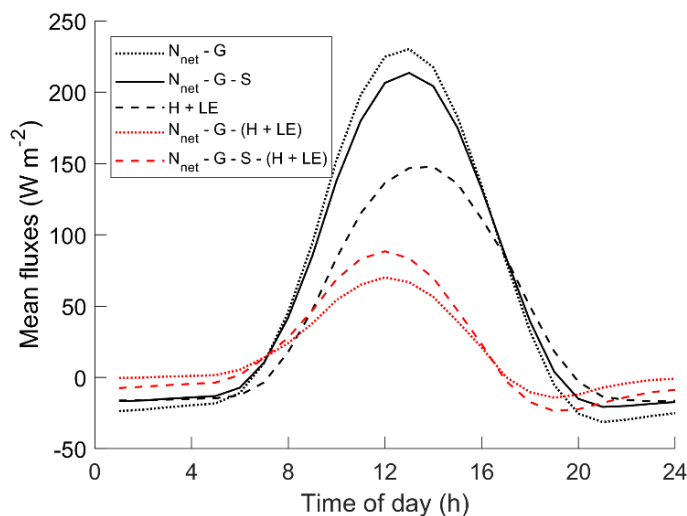


Figure 49 - Répartition moyenne horaire des flux énergétiques pour 2016 avec et sans le terme S des taux de stockage d'énergie

L'effet le plus notable de la considération du terme S sur le résidu est observé entre 17 et 20h, où il réduit le résidu négatif lié à $H + LE > R_{\text{net-G}}$. Cependant, les termes de taux de stockage considérés ne compensent pas le décalage vers la droite de $H + LE$. La distribution du nouveau résidu est toujours excentrée vers la gauche par rapport à 13h et la modification de l'hystérèse montre surtout une légère rotation sur elle-même (Figure 50) qui descend l'ordonnée à l'origine et augmente la pente.

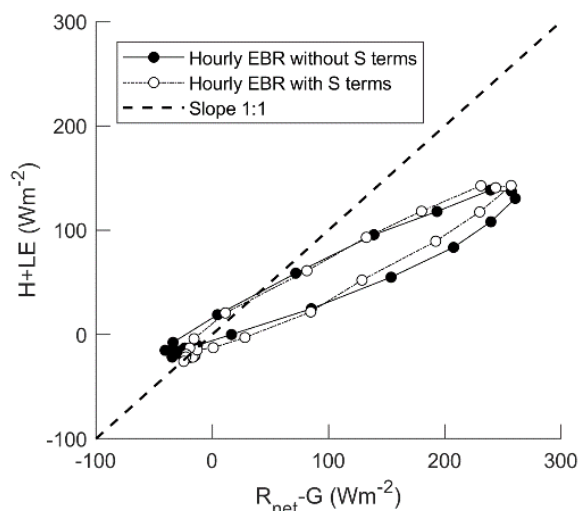


Figure 50 – Hystérèse de la relation entre $R_{\text{net-G}}$ et $H+LE$ pour 2016 représenté par l'EBR horaire avec et sans les termes de taux de stockage S

D'après Masseroni et al. (2014), ce décalage serait compensé par l'ajout du terme de S_C dont la valeur maximale journalière se situe tôt le matin avec une évolution décroissante durant la journée (Annexe 17). Cela signifierait que l'hystérèse se refermerait et formerait une droite (cf. Leuning et al., 2012). Cependant, la même hystérèse est visible au printemps alors que les cultures ne sont pas ou peu développées à ce moment-là (Annexe 18).

En refaisant le BE réalisé à la Figure 39 en incluant le terme S, une pente de 0,72 et une o.o. de -13 Wm⁻² (R²=0,89) sont obtenus. Les flux des taux de stockage augmentent la pente de 0,07 et l'o.o. légèrement de 0,04 (négativement). Cette amélioration est essentiellement due à l'ajout du terme S_G. L'EBR passe quant à lui de 0,57 à 0,61. Son augmentation est moins forte de par l'augmentation de l'o.o.. A noter que les points disponibles de l'ensemble des flux et de S pour la régression sont des demi-heures de flux de 2016 uniquement (cf. Figure 34).

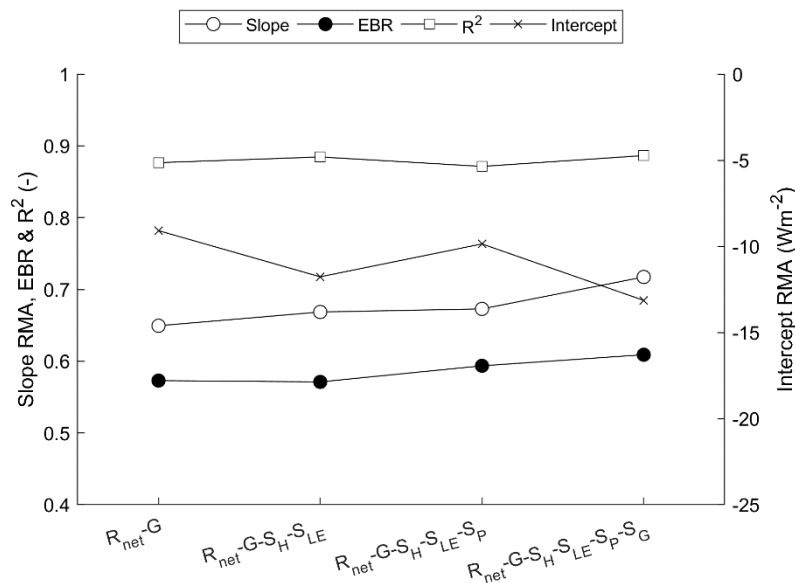


Figure 51 – Paramètres des régressions RMA et EBR sur 2016 avec l'ajout des termes des taux de stockages

Les taux de stockage S_H et S_{LE} ne font que très légèrement augmenter la pente (+0,02) et l'ajout de S_P n'opère quasi aucune différence (+0,003). En revanche, en ce qui concerne l'influence de ces termes mineurs mois par mois, il est à remarquer que la contribution de S_P durant l'été est plus importante et correspond à toute la période de culture de la betterave. L'effet inverse est observé pour S_G dont la contribution est plus grande au printemps et à l'automne lorsque le sol est moins recouvert par la culture.

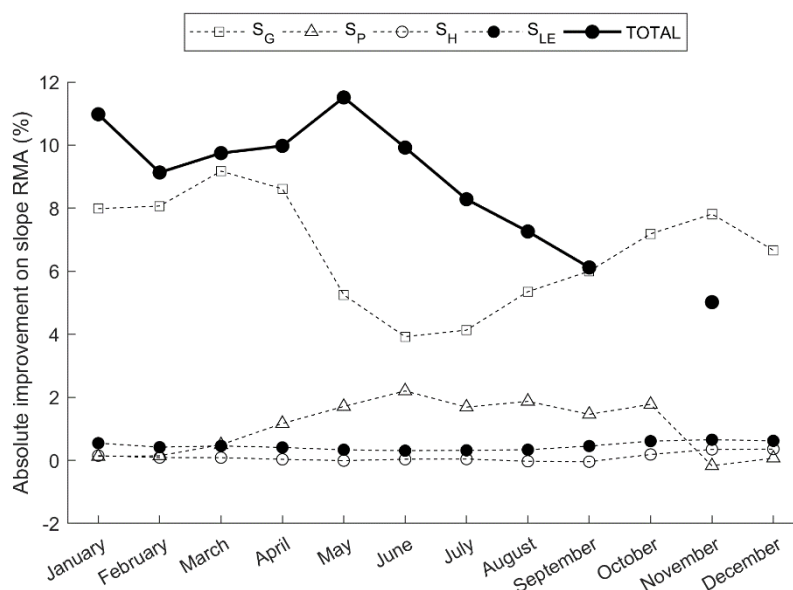


Figure 52 – Amélioration mensuelle de la pente de la régression RMA lorsque les termes de taux de stockage sont inclus dans le bilan

L'erreur standard (non montrée) est peu importante même si le nombre de données représentées chaque mois diminue considérablement en incluant tous les termes. Le minimum est de 236 et le maximum de 791 demi-heures par mois. Les mois d'octobre et novembre ne présentent pas de demi-heures disponibles pour tous les termes simultanés.

5.7. Influence de l'état de surface

Un élément caractéristique de la surface est la présence, le type et le développement de la culture. Elle influence notamment la hauteur de mesure (z_m), la rugosité (z_0), l'albédo (indice de réflexion de surface) et les caractéristiques du volume de contrôle (Figure 10) en apportant de nouveaux termes à l'équation du bilan (S_c et S_p).

La Figure 53 montre l'évolution des paramètres du bilan énergétique (régression RMA et EBR) entre début 2015 et fin 2017 avec en arrière-plan la présence des cultures au cours du temps.

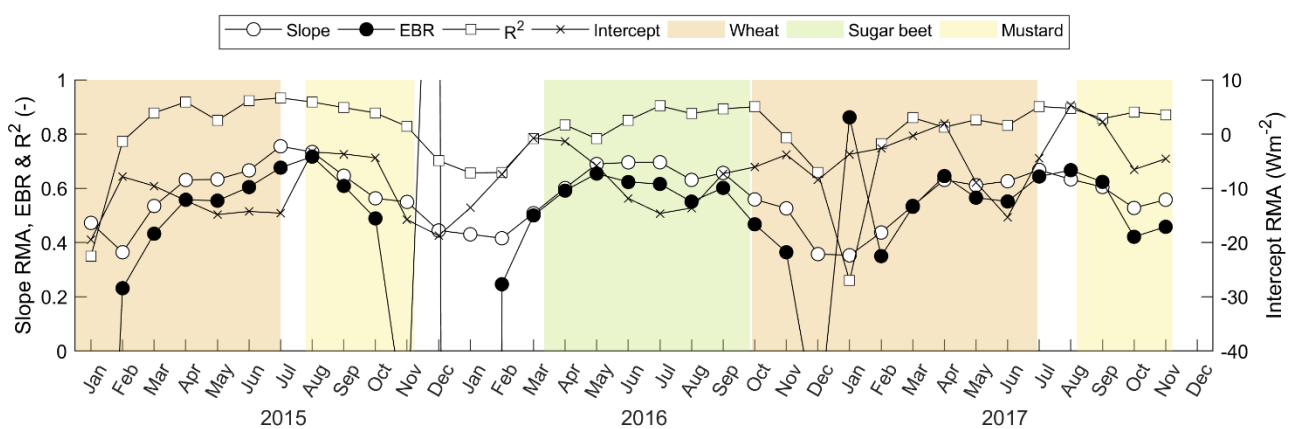


Figure 53 – Évolution mensuelle et annuelle des paramètres de régression RMA entre $H+LE$ et R_{net-G} et de l'EBR. Les périodes de culture sont également représentées en arrière-plan.

La pente de la régression et l'EBR montrent de manière générale une évolution croissante pour atteindre un maximum aux alentours du mois de juillet. Le coefficient de détermination R^2 est supérieur à 0,80 entre avril et octobre et diminue durant l'hiver. L'ordonnée suit quant à elle une autre tendance. Les premiers et derniers mois de l'année, elle est plutôt proche de 0 alors qu'elle tend à augmenter négativement en milieu d'année, lorsque la pente est la plus élevée, et durant l'hiver. Aux mois de novembre, décembre et janvier, l'EBR présente des valeurs non montrées sur la figure (dans l'ordre : -2,18 ; -0,31 ; 2,66 ; -33,19 ; -0,30) et dont l'interprétation a été discutée à la Figure 41.

Entre février et avril, la pente et l'EBR montrent l'accroissement le plus important de l'année. Ensuite, leur évolution dépend de l'année. En 2015 et 2017, sous culture de blé d'hiver, la tendance de ces deux paramètres diffère légèrement. En 2015, ils ne progressent pas ou peu jusqu'au mois de juin avant de remonter jusqu'à leur maximum aux mois de juillet pour la pente ($= 0,76$) et d'août pour l'EBR ($= 0,72$). En 2017, la même tendance est observée entre avril et juillet, mais les deux paramètres montrent un maximum inférieur à 2015, avec 0,67 pour la pente et 0,64 pour l'EBR. En 2016, sous betterave, le maximum de la pente et de l'EBR est atteint dès le mois de mai (respectivement $= 0,69$ et $= 0,65$) et les mois de juin et de juillet conservent les mêmes valeurs. En ce qui concerne la moutarde qui est cultivée en fin d'année, la pente et l'EBR diminuent de manière importante ainsi que l'o.o..

Les mois où la croissance des cultures est la plus importante, entre avril et juin pour le blé d'hiver et entre juin et août pour la betterave, correspondent aux périodes où la pente et l'EBR réalisent un palier après avoir augmenté de manière importante entre février et avril. Cette observation suggère un lien entre la fermeture du bilan et l'état de surface.

Comme on l'a vu à la Figure 38, le flux de chaleur latente est plus important pendant l'été, entre mai et juillet, lorsque le blé est en pleine croissance. C'est également vrai durant l'automne dans le cas de la culture de la betterave. La figure suivante (Figure 54) scinde l'influence de conditions où l'un ou l'autre flux turbulent (H ou LE) prédomine par rapport à la situation où H+LE est équitablement réparti entre les deux. De cette manière, il est possible de mieux se rendre compte de la sous-estimation éventuelle de H et/ou de LE si, dans certaines conditions, le bilan est mieux fermé quand H+LE est majoritairement représenté par l'un ou l'autre flux. Pour cela, le rapport de Bowen (RB), ou en anglais *Bowen ratio* (BR), est utilisé pour caractériser la proportion de ces flux à la demi-heure. Ce rapport est, par définition, le rapport entre le flux de chaleur sensible H et de chaleur latente LE. Par exemple, dans la figure suivante, un rapport de Bowen inférieur à 0,5 signifie que $LE > 2 \times H$.

D'un point de vue physiologique chez les plantes, un petit rapport de Bowen signifie une activité photosynthétique et une transpiration importante. Pour étudier l'influence du RB sur le BE, seules les demi-heures de jour entre 10 et 18h et les CI ont été sélectionnées, en excluant l'hiver.

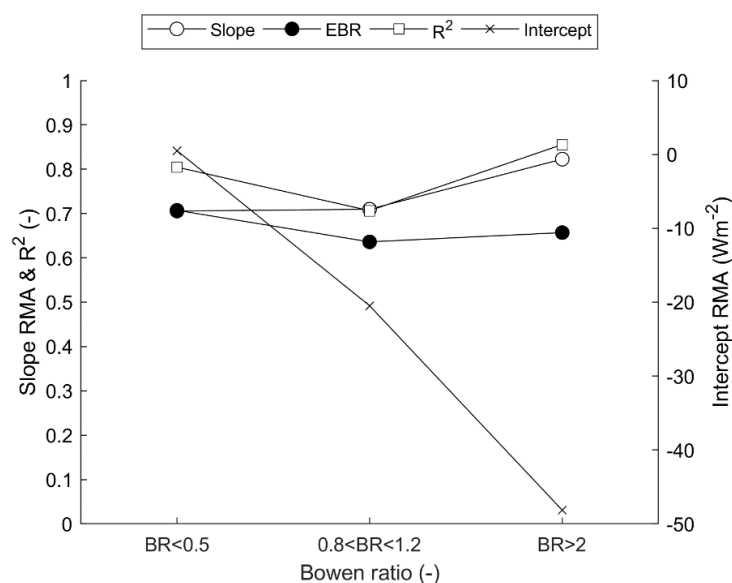


Figure 54 – Paramètres des régressions RMA et EBR sur 2015-17 selon 3 classes de rapport de Bowen et pour des demi-heures de jour (10<h<18), en conditions instables et en excluant l'hiver.

Respectivement, 982, 567 et 384 demi-heures de flux représentent les trois classes de RB. Lorsque le rapport de Bowen est petit, l'ordonnée de la régression est représentée majoritairement par LE (>66% de H+LE), la pente observée est de 0,70 et l'ordonnée à l'origine de 1 Wm⁻². Lorsque la part du rapport est plus ou moins représentée équitablement par H et LE, la pente reste semblable (0,71) et l'ordonnée à l'origine descend à -20 Wm⁻². En revanche, lorsque le rapport de Bowen est supérieur à 2, H est le flux le plus représentatif (>66% de H+LE). La pente augmente à 0,82 [0,79 0,85] et l'o.o. descend davantage à -48 Wm⁻² [-57 -39], témoignant davantage d'une rotation de la droite plutôt que d'une amélioration du bilan. L'EBR suit d'ailleurs une évolution inverse à la pente entre les classes de RB et rend difficile de dégager une tendance générale. La réalisation du même graphique en

incluant les CS font apparaître les mêmes tendances que celles observées ici sur les paramètres (Annexe 19). Cependant, pour un rapport de Bowen proche de 1, la pente est inférieure aux deux autres classes de RB.

La Figure 55 suivante permet de mieux interpréter la figure précédente dont la pente et l'EBR se contrarient pour expliquer l'influence du RB sur le BE. L'EBR₃₀ est ici mis en graphique en fonction du RB et la moyenne tronquée est affichée pour indiquer le centre de la distribution du EBR₃₀ pour chaque classe de RB. Les mêmes données que celles utilisées à la Figure 54 sont reprises ici.

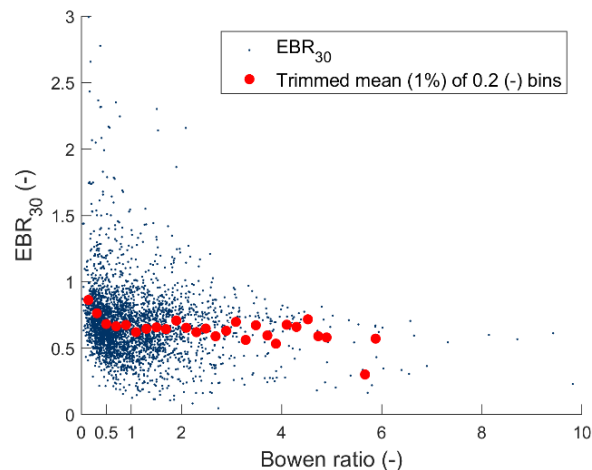


Figure 55 - Relation entre le rapport de Bowen (RB) et l'EBR à la demi-heure (EBR₃₀) et la moyenne tronquée (1%) par classe de RB de jour (10<h<18), en conditions instables et en excluant l'hiver.

Dans ces conditions, la tendance des points moyens indique des EBR₃₀ qui tendent vers 1 pour de petits RB. En CN, on peut également l'observer, mais l'effet est moins important (Annexe 20). Cette figure suggère donc que le flux H est sous-estimé par rapport à LE. Ce résultat rejoint l'observation de Foken (2008) qui montre que le flux H serait le plus sous-estimé des deux par la CT. Ceci serait dû à la fréquence de mesure qui serait trop courte pour mesurer les flux à basses fréquences (>30 min).

5.8. Hétérogénéité de surface au sein de l'empreinte

Cette partie s'intéresse à l'hétérogénéité locale des surfaces émettrices des flux turbulents mesurés par le dispositif de CT et à son influence potentielle sur le BE telle qu'investiguée par Eshonkulov et al. (2019b) et Masseroni et al. (2014). Ces auteurs argumentent qu'une part de la non-fermeture du BE est liée à la représentativité des flux qui est fonction de l'échelle de l'empreinte. Plus l'empreinte est étendue, moins les flux mesurés seraient représentatifs des surfaces émettrices.

Si on regarde principalement les CN et les CI, le modèle de Kljun et al. (2015) prédit que 90% du signal mesuré provient respectivement de distances inférieures à 160, 215 et 360 m de la station de mesure dans 43, 89 et 100% des demi-heures entre 2015 et 2017. Ces distances caractéristiques correspondent aux trois distances représentées à la Figure 23 entre la station et les limites de la parcelle, dans les directions de vent les plus fréquentes (sud-ouest). Dans l'ensemble, le modèle donne des résultats qui confirment que, dans la grande majorité des cas, les flux mesurés par le système de CT proviennent de la parcelle agricole, et non de surfaces voisines, lorsque les conditions atmosphériques sont neutres ou instables.

L'homogénéité des surfaces est une des conditions d'application de la CT (2.2.1). Une manière de vérifier cette condition peut être de regarder les paramètres des régressions RMA et l'EBR selon que les flux ont une origine proche ou éloignée de la station de CT. La Figure 56 décrit les paramètres du BE évalués au sein des quartiles des distances des surfaces émettrices du pic de concentration mesuré par le système de CT (cf. Figure 16). De la même manière qu'au sous-chapitre précédent, seules les conditions de stabilité neutres, entre 10 et 18h, sont reprises, en excluant l'hiver. Les CI ne sont pas reprises ici puisqu'elles concernent des flux principalement émis à proximité de la station (cf. Figure 16) et moins par le reste de la parcelle. De plus, les CN sont les plus fréquentes de jour (Figure 45).

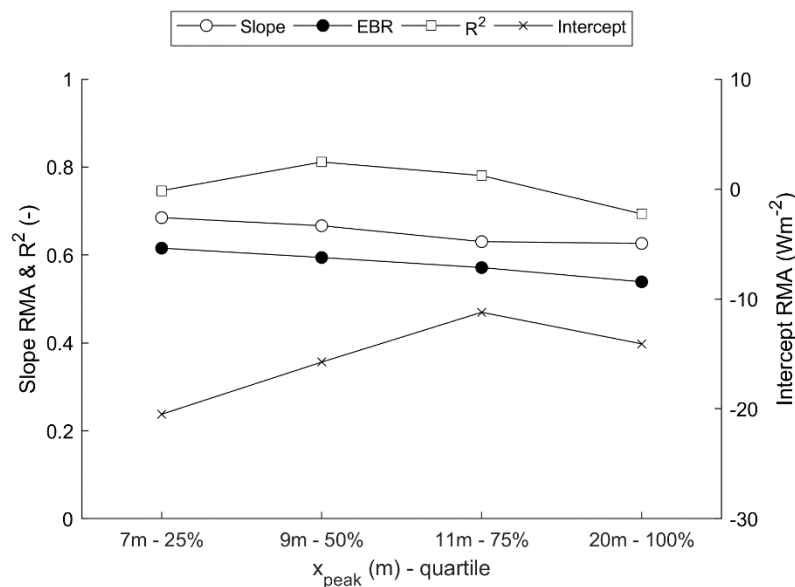


Figure 56 – Paramètres des régressions RMA et EBR sur 2015-17 selon les quartiles de la distance des surfaces émettrices du pic de concentration mesuré par CT (modèle du *footprint* de Kjlun et al., 2015), pour les conditions atmosphériques neutres et instables, entre 10h et 18h, excluant l'hiver.

La totalité des demi-heures sélectionnées (6895, soit ~1724/quartile) montre des flux dont la distance du pic de concentration est inférieure à 20 m de la station de CT et dont 75 % sont situés avant 11 m. Une légère tendance à la baisse de la pente et de l'EBR est observée avec la distance. La pente passe de 0,68 à 0,62 et l'EBR de 0,62 à 0,54. Ces résultats rejoignent également les observations de Masseroni et al. (2014) et d'Eshonkulov et al. (2019b).

En s'inspirant de ces derniers, les paramètres du BE dans toutes les directions du vent sont investigués pour éventuellement donner l'indication d'éventuelles caractéristiques du paysage qui seraient responsables de cet effet sur le bilan. Les deux figures suivantes sont assez complexes au premier coup d'œil et méritent une explication préalable. Il s'agit de roses des vents par tranche de direction de 30°, où la longueur des tranches représente la fréquence d'occurrence (en %). Au sein des tranches sont reprises non pas les distributions de vitesse de vent, mais de fréquence du EBR à la demi-heure (EBR₃₀) dans chaque direction. Autour de la rose gravitent les paramètres du bilan énergétique pour chaque classe de direction de vent.

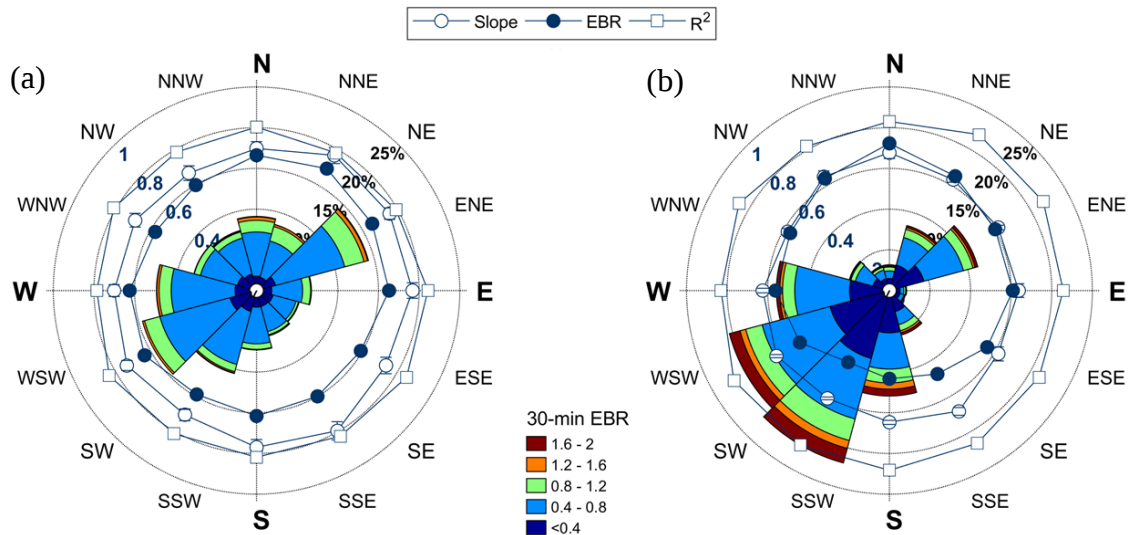


Figure 57 – Roses des vents avec fréquence d’occurrence des directions de vent (par 30°) et, en leur sein, non pas la distribution de vitesse, mais du EBR à la demi-heure. Sont également représentés pour chaque classe de direction de vent les paramètres du BE. En (a) sont reprises les conditions atmosphériques instables et en (b) neutres

De manière générale, en CI, la distribution de fréquence des directions de vent est davantage répartie qu’en moyenne sur toutes les conditions (Annexe 5). En effet, les CN, plus fréquentes, confirment bien la dominance des vents du sud-ouest. La relation entre les paramètres du BE et les directions de vent est plutôt uniforme et donne peu d’indications sur l’effet de la Figure 56. Le R^2 des régressions est proche de 0,80 dans toutes les directions et le nombre de points est suffisamment important pour ne pas représenter l’erreur sur les paramètres, qui est faible. Dans le cas de l’EBR, l’erreur est plus importante dans le cas des directions de vent où le nombre de points est petit (Figure 57b). Pour le reste, l’erreur est inférieure à 0,10 et est relativement constante d’une classe de direction à l’autre.

En CI, l’EBR est proche de 0,60 excepté au NNE où il atteint 0,69. La pente se situe entre 0,65 et 0,80 et montre des valeurs qui augmentent au-delà de 0,70 entre le NEE jusqu’à W avec un maximum de 0,80 au SSE pour des valeurs de EBR stables. L’effet inverse peut être observé en CN entre ESE et W où la pente est relativement stable (elle atteint 0,69 entre SE et SSE) et l’EBR diminue dans ces directions. A noter également au nord la valeur de l’EBR (0,72) supérieure à la moyenne (0,68). Ces discordances entre l’EBR et la pente traduisent des modifications sur l’o.o. non montrées (cf. Figure 40). Enfin, la distribution de l’EBR₃₀ ne montre pas de grand changement de distribution selon les directions de vent. On peut noter qu’en CI, la distribution est moins étalée et la majorité des EBR₃₀ sont compris entre 0,4 et 0,8.

Au-dessus du sol, la culture est réalisée de manière à maximiser l’homogénéité de la surface d’étude. Si une hétérogénéité existe et joue un rôle sur le BE, elle peut difficilement s’expliquer par l’état de la culture. Pour mieux s’en rendre compte, l’état du couvert végétal à deux périodes de l’année peut être observé sur des photos de culture de blé d’hiver prises les 4 avril et 10 juin 2017 à l’Annexe 21.

5.9. Augmentation de la période du calcul de la covariance de turbulence

D’après les données de référence, l’année 2015 montre une pente de 0,68, une o.o. de -14 Wm^{-2} et un EBR de 0,55. Avant de regarder l’influence sur le BE de l’augmentation de la période du calcul de la moyenne, les paramètres du BE sont calculés sur les données issues d’EddyPro. À cette fin, la sélection des demi-heures de données est identique à la sélection opérée en 2015 sur les données de

référence. La pente obtenue est beaucoup plus importante (0,87) et l'o.o. de -17 Wm^{-2} est similaire avec un EBR de 0,70. La comparaison respective des flux de H et de LE d'après les deux ensembles de données donne le résultat suivant (Figure 58).

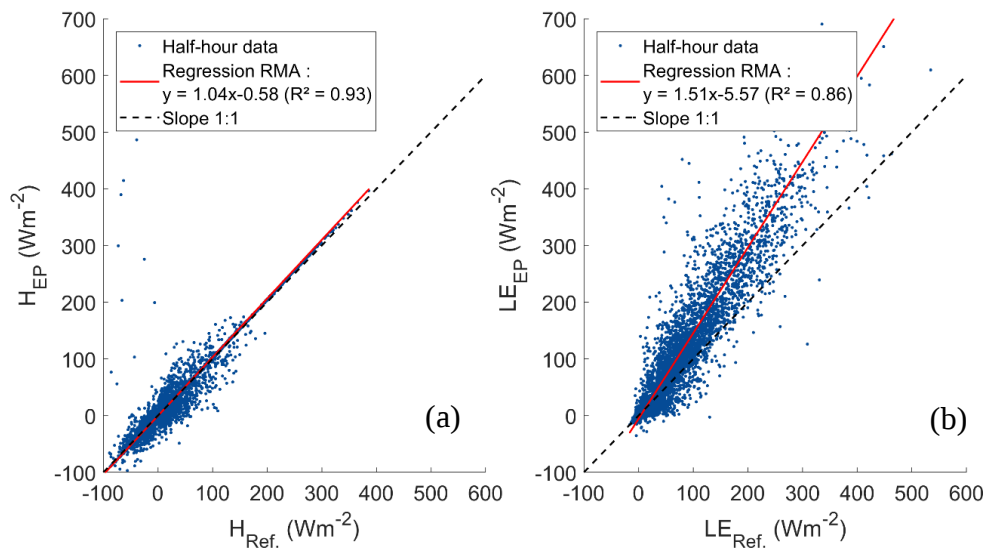


Figure 58 – Comparaisons des valeurs de H et LE entre l'ensemble de données de référence et celui obtenu par EddyPro pour les mêmes demi-heures

Le flux de chaleur latente est celui qui montre le plus de discordance, avec une pente de 1,51, et qui explique la différence de BE entre les deux ensembles de données. Selon Anne De Ligne (travaux non publiés), ce résultat n'est pas étonnant dans la mesure où la méthode de Fratini et al. (2012) pour la correction spectrale des hautes fréquences (cf. 4.4.3) surestimerait significativement le flux LE. Il est intéressant de noter que les critères de qualité sur H et LE (Mauder et Foken, 2004) ne coïncident pas entièrement. Pour rappel, un choix a été fait de conserver uniquement les demi-heures de flux de meilleure qualité. Cependant, ces mêmes demi-heures sélectionnées dans les données d'EddyPro présentent des flux de moindre qualité à hauteur de 7% pour H et 18% pour LE. Cette discordance ne modifie pas la relation de la Figure 58 (b) (non montré). Enfin, H_{EP} et $H_{Ref.}$ indiquent une relation assez étroite entre 150 et 400 Wm^{-2} qui est peu visible. La variabilité est davantage concentrée entre -100 et 150 Wm^{-2} .

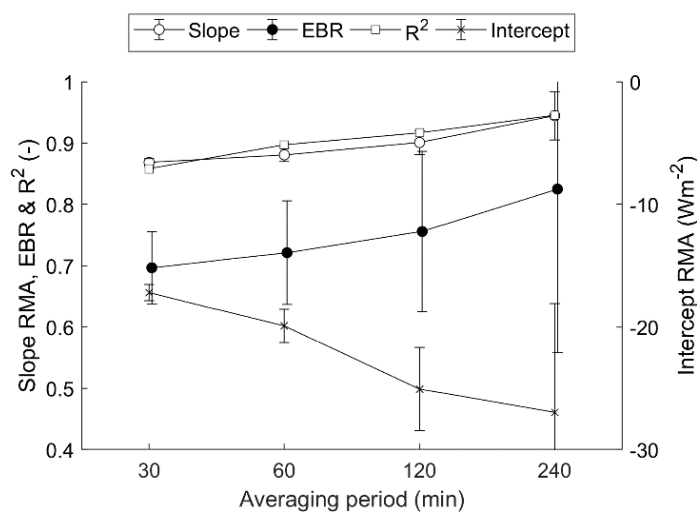


Figure 59 – Paramètres des régressions RMA et EBR sur 2015 sur les données EddyPro en fonction de la période du calcul de la moyenne

Les résultats du bilan énergétique en fonction de la période du calcul de la moyenne sont décrits ci-dessus (Figure 59). Seuls les résultats sur les périodes de 30, 60, 120 et 240 minutes sont disponibles pour l'étude du bilan énergétique sur l'année 2015. Ces résultats suggèrent une amélioration du BE en augmentant la période du calcul de la moyenne jusqu'à 4 heures malgré l'augmentation négative de l'o.o.. La pente RMA passe de 0,87 à 0,95 et l'EBR de 0,70 à 0,83. Le nombre de points diminue de plus en plus en fonction de l'augmentation de la période de calcul de la moyenne. Ceci n'est pas dû uniquement au fait qu'on divise par (un multiple de) deux le nombre de données, mais également au fait que les conditions de développement de turbulence et de stationnarité sont de moins en moins respectées lorsqu'on augmente la période (non montré). De la même manière, les tests statistiques opérés sur ces périodes se soldent de plus en plus par un rejet (cf. 4.4.2). Pour les périodes de 30, 60, 120 et 240 minutes, on passe respectivement de 36% à 23% puis 12% et enfin 5% du nombre théorique de ces périodes entre les dates d'étude.

Les résultats d'EddyPro obtenus pour les périodes de 480 et de 1440 minutes ont été obtenus seulement pour les mois de mai, juin et juillet 2015. Un problème a également été rencontré lors de la correction spectrale pour les basses fréquences dont l'impact sur les résultats est difficile à quantifier à ce stade. A noter aussi que la version 6.2.1 d'EddyPro rencontre un problème interne spécifique au calcul de la moyenne sur la période de 1440 minutes. EddyPro semble vouloir accéder une mémoire de l'ordinateur auquel il ne peut avoir accès. Ce problème est apparu de la même manière sur différents ordinateurs et n'apparaît pas sur la nouvelle version 7.0.4. Malgré que ces résultats ne puissent être présentés, il faut noter que la proportion des résultats restant, après avoir écarté les flux de mauvaise qualité, est très petite. Comme indiqué ci-dessus sur un an, seuls 5 % du nombre théorique de 240 minutes sur 2015 sont disponibles pour l'étude du bilan. Cette proportion est encore plus faible pour 480 et 1440 minutes et implique l'étude d'un très long ensemble de données pour bénéficier de suffisamment de données représentatives.

Proportionnellement à LE, c'est le flux H qui montre la plus forte évolution avec l'augmentation de la période (Figure 60). Ce résultat corrobore la tendance observée avec le rapport de Bowen qui indique que le bilan a tendance à être meilleur lorsque le H est peu ou pas représentatif de H+LE dans le bilan. L'augmentation de LE avec la période ici peut être remise en question. L'effet de la correction spectrale (discuté à la Figure 58) avec l'augmentation de la période est inconnu et l'étude du rapport de Bowen n'a pas mis en évidence une évolution du bilan liée à LE.

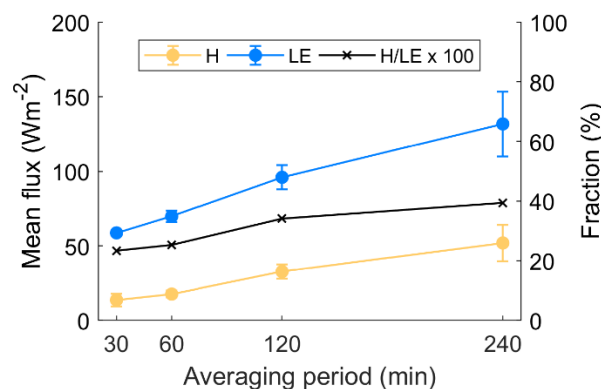


Figure 60 – Evolutions de la distribution des flux de H et LE représentées par leur moyenne tronquée (1%) et intervalle de confiance, ainsi que leur proportion en fonction de la période de calcul de la covariance de turbulence.

Si l'hétérogénéité des surfaces à une échelle plus grande et non locale est à « blâmer » pour expliquer la contribution non négligeable de flux de fréquences supérieures à 30 minutes, plusieurs éléments dans le paysage à proximité de Lonzée peuvent être mis en évidence, de manière qualitative.

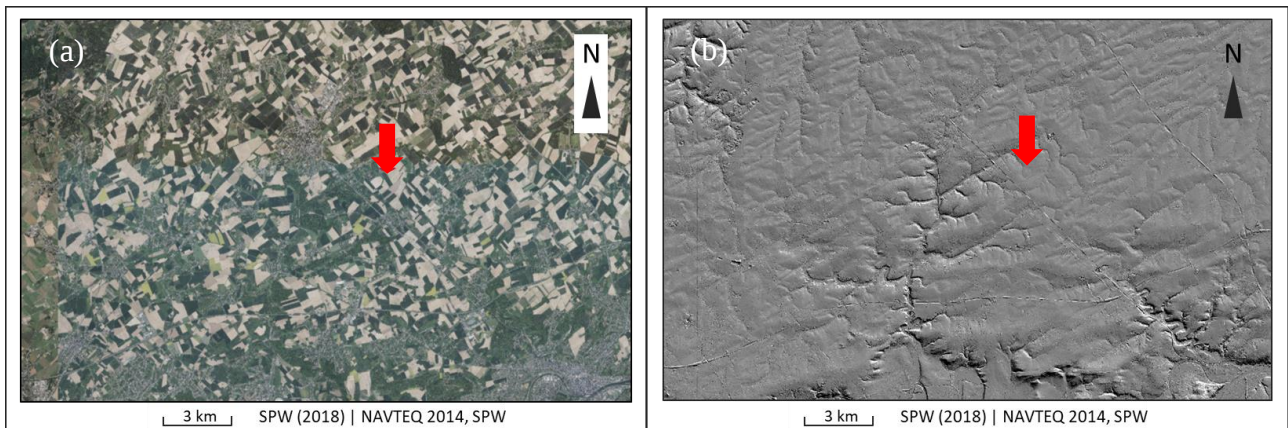


Photo 1 – (a) Orthophoto (2018) et (b) modèle numérique de terrain (type « hillshade », 2014) du paysage à proximité de Lonzée, indiqué par la flèche rouge, principalement le sud-ouest (origine principale du vent). Source : Service Public de Wallonie (SPW)

L'hétérogénéité du paysage est palpable sur l'orthophoto avec l'alternance de cultures, de bois et de villes (en gris). En observant le relief, on peut apercevoir le bassin versant de l'Orneau au sud-ouest de Lonzée, ainsi que celui du Houyoux au sud-est. On retrouve plus bas encore, à environ 10 km, une partie du versant nord de la Sambre. Ces observations rejoignent celles de Mauder et al. (2007) qui sont discutées par Foken (2008). Celui-ci argumente que la non-fermeture du bilan entre 25-35% de sites présents dans un environnement tel que celui de Lonzée pourrait s'expliquer par la formation de tourbillons impliqués dans des circulations secondaires (Figure 21) et qui seraient générés aux limites entre différentes occupations du sol.

6. DISCUSSION

6.1. Qualité des données pour l'analyse

Cette étude met en avant une représentation de la disponibilité des données qui permet au lecteur de visualiser celles qui ont été utilisées pour étudier le bilan énergétique. Elle établit clairement la représentativité relative des conditions environnementales où la covariance de turbulence permet de monitorer les flux de l'écosystème étudié. Elle met également en lumière les contraintes qui existent lorsque plusieurs répétitions de capteurs coexistent pour mesurer la variabilité spatiale d'un flux tel que G et S_G . Pour de futures études destinées à l'étude du BE, la représentation graphique de la disponibilité des données donne des indications sur les capteurs et les flux qui nécessitent une attention particulière, notamment pour augmenter la représentativité des flux G , S_G , S_P et S_C utilisés pour le BE. Même s'il s'agit de flux mineurs, ils interviennent de manière significative dans le BE.

L'objectif du BE est d'évaluer la qualité des flux mesurés par CT en les comparant à des mesures indépendantes de flux d'énergies disponibles ($R_{net}-G-S$). Pour cela, il est important d'évaluer la confiance qui peut leur être accordée avant d'émettre des hypothèses sur la qualité de la méthode de CT. Les répétitions de capteurs pour G et R_{net} ont permis de mettre en avant la variabilité qui existe autour de la mesure de ces flux et qui est proportionnellement importante pour les faibles flux inférieurs à 100 Wm^{-2} .

Les mesures de R_{net} entre les deux radiomètres sont globalement concordantes. Cependant, elles montrent une certaine proportion de demi-heures où les deux appareils mesurent des flux différents, jusqu'à 100 Wm^{-2} . Cette discordance est principalement liée au rayonnement infrarouge provenant du ciel. Pourtant, les deux radiomètres sont situés à proximité l'un de l'autre et il n'y a pas de raison apparente pour expliquer ces discordances. Les mesures du radiomètre CNR4 ont été choisies préférentiellement pour l'étude du bilan, car il s'agit de l'appareil de référence pour la mesure R_{net} . Le CNR1 est uniquement utilisé dans le cas où le CNR4 est indisponible. Entre 2015 et 2017, cela n'est arrivé que brièvement en 2015. A priori, les discordances sont liées au CNR1, mais il serait intéressant de vérifier si tel est le cas.

La mesure du flux G dispose principalement d'un capteur sur la placette de mesure de CT. Dans le courant de 2015, deux capteurs ont été ajoutés sous la culture, dont les mesures ne sont disponibles que 40% du temps. C'est seulement à partir de fin 2017 qu'une répétition de capteur a été ajoutée sur la placette et aux deux endroits sous la culture. Lors de la courte période où les répétitions de capteur mesurent G en simultanée, on peut observer de grandes discordances de mesures entre les répétitions de capteurs, jusqu'à 50 Wm^{-2} , soit dans certains cas jusqu'à 50% de différence. Entre les mesures effectuées sous la culture et la placette de mesure de la CT, ces différences atteignent 75 Wm^{-2} et les pentes des régressions suggèrent une hétérogénéité de sol entre les différents emplacements.

6.2. Analyse des paramètres d'évaluation de la fermeture du bilan énergétique

Ces observations corroborent les pourcentages d'erreur de 5-20% pour R_{net} et de 20-50 % pour G (Tableau 1) avancés par Foken (1998b). Bien que G soit en général un flux mineur (figure 38), une différence jusqu'à 50% pourrait expliquer une partie du résidu. Ces différences posent également la

question de la représentativité de la mesure de G à l'échelle de la parcelle (Wilson et al., 2002 ; Masseroni et al., 2014 ; Eshonkulov et al., 2019a). Des relations croisées apparaissent entre les mesures des trois emplacements, lesquelles suggèrent aussi une influence de la réinstallation des capteurs sous la culture. L'observation de la variabilité du BE à la Figure 57 selon les directions de vent peut également indiquer un problème d'échelle où les flux turbulents mesurés sont issus de surfaces dont la mesure de G à proximité de la station n'est pas représentative. Maintenant que des répétitions de capteur sont présentes et davantage disponibles depuis 2017, il serait intéressant d'investiguer plus finement sur l'origine de ces discordances afin de mieux déterminer G pour l'étude du BE. Eshonkulov et al. (2019a) suggèrent des mesures de G par analyse harmonique qui ne nécessitent que la mesure de température du sol. La comparaison des deux méthodes permettrait certainement d'améliorer l'évaluation de G et de comprendre la part des discordances observées avec les fluxmètres qui est liée (a) soit aux erreurs de mesure (b) soit à l'hétérogénéité du sol.

Un autre objectif de ce travail consistait à expliciter la représentation des paramètres d'évaluation du bilan énergétique, car leur signification ne ressortait pas toujours clairement dans la littérature. Leur utilisation conjointe dans ce travail permet de mettre en avant leurs avantages et inconvénients selon les objectifs qui sont poursuivis dans l'étude du BE. L'EBR est effectivement une autre méthode de régression, conceptuellement plus simple de par l'ordonnée à l'origine fixe sur l'origine des axes et de par la détermination de la pente qui passe par le centre d'inertie des points du graphe. Dans le cas idéal d'un bilan fermé, la droite de régression RMA et l'EBR montrent graphiquement presque la même chose. Dans la pratique (Annexe 1), ce n'est pas nécessairement le cas.

Dans ce contexte de non-fermeture du bilan énergétique, de nombreuses régressions sont réalisées sur des ensembles de points différents, qui représentent des conditions environnementales contrastées, afin d'identifier les paramètres d'influence sur le bilan. Dans certains cas, la régression qui est sous-entendue derrière la valeur de l'EBR ne signifie rien. Le R^2 est un bon indicateur de ces situations où, par exemple, le centre d'inertie de la dispersion est proche de l'origine des axes, ou de celles où la dispersion est importante et qu'il n'y a pas de relation linéaire entre les points. Aussi, un intervalle de confiance peut être associé à l'EBR et la méthode pour le calculer est donnée dans ce travail. Ces critères de qualité de régression ne sont cependant ni montrés ni explicitement discutés dans la littérature et nécessitent d'être analysés au cas par cas pour juger de la fiabilité du paramètre.

La régression RMA et l'EBR sont tous deux affectés par un effet de moyenne pondérée. En effet, la pente RMA est obtenue par la méthode des moindres carrés, qui minimise la somme des carrés des écarts à la droite, c'est-à-dire la moyenne de la distance des points à la droite de régression. Dans la pratique, cette droite passe par le centre d'inertie de la dispersion (exemple en Annexe 10). Compte tenu du fait que la proportion des points n'est pas constante à travers les gammes de valeurs de flux (Figure 39), les points qui correspondent à de faibles flux ($< 100 \text{ Wm}^{-2}$) « pèsent » sur le centre d'inertie. Cet effet est mis en évidence dans la Figure 39(b) où l'EBR et la pente sont calculés sur les points des moyennes par classe de valeur (d'après Leuning et al., 2012). Les deux paramètres convergent vers une même valeur (0,62), intermédiaire par rapport à celles de la Figure 39(a), avec une ordonnée à l'origine (-4) plus proche de 0. Cette manière de procéder est peut-être plus représentative pour caractériser le bilan dans l'ensemble avec un seul paramètre. La régression RMA

indique quant à elle deux informations : l'ordonnée à l'origine entre -100 et 100 Wm^{-2} et la pente pour les points $>100 \text{ Wm}^{-2}$.

Le choix d'afficher les paramètres de régression RMA et l'EBR sur chaque figure de ce travail, lorsque la distribution des points n'est pas visible, se justifie particulièrement dans les cas où l'EBR n'est pas significatif et dans le cas où la pente RMA montre une augmentation et où l'ordonnée à l'origine s'éloigne de l'origine. Ce dernier traduit une rotation de la droite autour du centre d'inertie et, si l'EBR n'évolue pas, ne signifie pas nécessairement une amélioration du bilan. L'observation exclusive de la pente, parfois constatée dans la littérature, peut mener à de fausses interprétations de l'évolution du BE. Selon certains auteurs, l'ordonnée à l'origine traduit aussi une erreur systématique sur les flux (Masseroni et al., 2014, cependant, l'ordre de grandeur des valeurs obtenues pose question. Comme la droite de régression passe par les centres d'inertie de la distribution des points, l'ordonnée à l'origine est particulièrement influencée par la qualité et le nombre de points dans son entourage. La variabilité horizontale des points liée à $R_{\text{net}}-G$ près de l'origine des axes discutée plus haut joue un rôle important et doit être prise en compte dans l'interprétation des paramètres du bilan énergétique.

Une autre manière d'étudier le bilan énergétique est de mettre en graphique l'EBR à la demi-heure (EBR_{30}) avec une variable dont on veut étudier l'influence (Figure 47 et Figure 55). L' EBR_{30} permet de condenser sur un axe l'information exprimée par deux axes dans le cadre de la régression entre $R_{\text{net}}-G$ et $H+LE$. Cette représentation peut être vue comme la distribution de fréquence des valeurs d' EBR_{30} en fonction des valeurs de la variable étudiée. Son inconvénient réside dans le fait que cette représentation donne une indication sur le bilan qui n'est pas chiffrée.

6.3. Conditions et mécanismes d'amélioration du bilan

Le bilan énergétique de la station ICOS de Lonzée indique globalement sur trois ans une pente de régression de 0,65 avec une ordonnée à l'origine de -9 Wm^{-2} . L'EBR de 0,57 résume le déficit énergétique à 43 %. Comparé aux autres stations du réseau FLUXNET (Wilson et al., 2002), le site de Lonzée se situe dans le premier quartile des distributions de pentes et d'EBR (Figure 2). Cependant, ce résultat peut être relativisé en fonction des procédures de traitement des données de flux qui diffèrent selon les études. Dans le cadre de ce travail, il est à remarquer que le bilan établi à partir des données de flux issues d'EddyPro est fort différent, avec une pente de 0,87, du bilan établi sur les données de référence à la même période. L'hypothèse la plus probable pour l'expliquer est l'utilisation de procédures différentes pour la correction spectrale sur les basses fréquences (cf. 4.4.3). La méthode sélectionnée dans EddyPro (Fratini et al., 2012) surestimerait de manière importante le flux de LE (Anne De Ligne, travaux non publiés) et expliquerait cette importante différence.

La nuit, les paramètres de régression sont peu significatifs, car la dispersion des points est grande par rapport à l'ordre de grandeur des flux. Cette grande variabilité s'observe principalement horizontalement entre -100 et 100 Wm^{-2} . Deux hypothèses peuvent expliquer la dispersion des data de nuit : (1) le flux LE est nul et le flux (négatif) de H est sous-estimé et/ou (2) les variabilités de G et du flux IR incident sont proportionnellement plus importants dans ces conditions de faibles flux.

Durant l'hiver, les points présentent des caractéristiques de dispersion similaires aux conditions de nuit qui viennent d'être discutées. De plus, le centre d'inertie à cette période tend vers l'origine des axes et peut engendrer des valeurs extrêmes d'EBR, non significatives. L'été (mai, juin et juillet) est par contre caractérisé par un meilleur bilan que le printemps et l'automne. L'étude de l'influence du rapport de Bowen indique que le bilan tend à s'améliorer lorsque le flux LE est supérieur au flux de H. Or le pic de croissance des cultures a lieu entre mai et juillet pour le blé d'hiver et contrôle le flux de LE. A cette période, la Figure 38 indique clairement une dominance du flux LE sur le flux H et renforce l'hypothèse selon laquelle H pourrait être sous-estimé.

En général, le bilan énergétique s'améliore constamment dans le courant de la journée et cette tendance se manifeste par une hystérèse des points moyens de la régression. Cette observation est notamment discutée par Leuning et al. (2012) lorsque les termes G et S_G ne sont pas inclus dans le bilan. Leur négligence a pour conséquence ce qu'ils appellent un décalage de phase entre $H+LE$ et R_{net} , décrit dans le cadre de la Figure 37. L'observation de l'hystérèse dans cette étude suggère également la négligence ou la sous-estimation de certains flux.

Selon divers auteurs (e.g. Wilson et al., 2002 ; Foken, 2008 ; Leuning et al., 2012 ; Masseroni et al., 2014 ; Eshonkulov et al., 2019b), ce décalage serait principalement lié à la négligence des termes de taux de stockages, souvent considérés comme mineurs dans le bilan. Le stockage d'énergie par la canopée (S_C) serait le flux principal qui expliquerait que le bilan est moins bon le matin, car S_C est beaucoup plus faible l'après-midi. Contrairement aux autres termes mineurs, S_C n'a malheureusement pas pu être calculé dans le cadre de cette étude (données manquantes). Les termes de stockage d'énergie dans le sol et par la photosynthèse contribuent à l'amélioration du bilan en réduisant le résidu moyen de 23% (Figure 49). Les termes S_G et S_P atteignent en moyenne respectivement 15 Wm^{-2} et 3 Wm^{-2} durant la journée. La considération de ces termes n'affecte cependant pas le décalage entre $H+LE$ et R_{net} et encourage la détermination de S_C qui nécessite le prélèvement régulier d'échantillons de la culture et la pesée de la biomasse fraîche lors de futures investigations.

Enfin, l'extension de la période du calcul de la moyenne des flux jusqu'à 240 minutes indique une augmentation constante de la pente de $0,87 \pm 0,08$ et de l'EBR de $0,70 \pm 0,13$ pour un an de données (Figure 59). Ce résultat étaye l'hypothèse selon laquelle la période 30 minutes serait parfois trop courte pour capter l'ensemble du signal énergétique mesuré par covariance de turbulence (Foken (2008) ; Leuning et al., 2012 ; Masseroni et al., 2014). Ces auteurs montrent que l'effet lié à l'augmentation de la période s'observerait en particulier pour la période de 24h et d'autres principalement pour les périodes entre 1 et 4 heures (Finnigan et al., 2003). Dans ce travail, l'amélioration du bilan est effectivement observée à chaque augmentation de la période, de 1 à 4 heures, mais ne permet pas la fermeture complète du bilan. La comparaison des données issues d'EddyPro avec les données de référence indique une surestimation de LE, probablement en lien avec le choix de la correction spectrale sur les basses fréquences par Fratini et al. (2012). Elle a pour conséquence de biaiser les valeurs de pentes mentionnées au début du paragraphe, mais ne remet pas en cause l'amélioration relative qui est discutée. Lors d'investigations futures, une maîtrise plus approfondie d'EddyPro permettrait certainement d'étudier plus finement les résultats obtenus.

D'après Foken (2008), l'amélioration du bilan par l'augmentation de la période de la moyenne serait principalement liée au flux chaleur sensible H . L'observation de la distribution de fréquence des valeurs de H selon la période du calcul de la moyenne montre en effet une augmentation de H plus importante proportionnellement à LE . L'augmentation de la moyenne de H indique un déplacement positif de la distribution de fréquence de ce flux de presque 40 Wm^{-2} (Figure 60) qui comblerait une partie non négligeable du résidu (Figure 38). Le flux LE montre également la même évolution, mais son interprétation est difficile à ce stade sans connaître exactement l'influence de la correction spectrale de Fratini et al. (2012) sur LE . De plus, l'étude du rapport de Bowen semble indiquer que le flux de LE serait moins sous-estimé que H .

L'augmentation de la période jusqu'à 24h implique une diminution drastique du nombre de points pour l'étude du BE et une augmentation de l'intervalle de confiance sur les paramètres du bilan. Elle est aussi liée à l'augmentation de la proportion des données de flux qui sont écartées. L'augmentation de la période accroît le risque que les séries temporelles ne respectent pas les critères de qualités statistiques, de stationnarité et de développement de turbulence qui conditionnent la validité du calcul de la covariance de turbulence. Ces éléments doivent être pris en compte pour déterminer la période d'étude. Pour étudier l'influence de périodes de 24h sur le bilan, cette étude indique que plusieurs années de données sont nécessaires pour assurer un nombre suffisant de périodes finales qui respectent toutes les conditions d'utilisation de la CT. Cependant, l'utilisation d'EddyPro dans ce cadre dépasse à priori l'utilisation qui a été prévue pour ce logiciel, dont la lenteur de calcul augmente de manière exponentielle et contraignante avec la période de la moyenne choisie.

6.4. Perspectives

Pour conclure cette discussion, cette étude met en évidence les éléments qui permettent de contribuer à l'amélioration de la fermeture du bilan énergétique. Il peut être retenu que les hypothèses les plus probables pour expliquer la non-fermeture du bilan concernent : (1) un problème d'échelle lié à G et de représentativité de la surface d'empreinte de G qui est de plusieurs ordres de grandeur inférieure à celle des flux turbulents ; (2) la négligence ou la sous-estimation des termes de taux de stockages du volume de contrôle ; (3) une période de calcul de la moyenne des flux trop courte qui a pour conséquence une sous-estimation du flux H principalement. Comme perspectives pour de futures recherches, cette étude suggère : (a) d'approfondir l'étude de l'augmentation de la moyenne jusqu'à 24h ; (b) d'analyser le choix de la période de la moyenne et la pertinence d'inclure les flux de basses fréquences non locales dans le bilan d'énergie (Sievers et al., 2015) ; (c) de s'interroger sur la nécessité/possibilité de fermer le bilan énergétique et, sinon, d'en expliquer les raisons et les implications sur la qualité des mesures réalisées par covariance de turbulence ; (d) et d'investiguer la possibilité de phénomènes d'advection sur le site de Lonzée.

7. CONCLUSION

Les objectifs de ce mémoire consistaient à mettre en évidence, par une analyse pluriannuelle, des contrastes de qualité des mesures de flux énergétiques par covariance de turbulence, dans de multiples conditions environnementales, afin d'identifier les mécanismes qui expliqueraient la non-fermeture du bilan énergétique.

Les hypothèses qui ont été formulées dans ce travail s'inspirent de la littérature et dessinent trois pistes principales. La première concerne la sous-estimation et/ou la négligence de certains termes qui expliqueraient la non-fermeture du bilan. La suivante évoque l'hétérogénéité locale des surfaces à différentes échelles spatiales dont sont mesurés et représentatifs les flux énergétiques. Enfin, la troisième hypothèse stipule que la période de calcul de la moyenne des flux sur 30 minutes est parfois trop courte, ce qui peut entraîner une sous-estimation du signal des flux turbulents.

Effectivement, l'analyse sur plusieurs années dans des conditions environnementales différentes et dynamiques a permis de mettre en lumière des contrastes de bilans énergétiques permettant de vérifier ces hypothèses. Pour trois années de données à Lonzée sur une grande culture, les paramètres du bilan montrent une pente de régression de 0,65 avec une ordonnée à l'origine de -9 Wm^{-2} et l'EBR de 0,57 affiche un déficit énergétique à 43 %. Durant les périodes de faibles flux, typiquement durant l'hiver, pendant la nuit et lors de conditions atmosphériques stables, les paramètres du bilan sont problématiques et posent question de la méthode de mesure ou de la méthode d'évaluation du bilan énergétique dans ces conditions.

La comparaison des mesures des répétitions de capteurs de G indique une importante variabilité et une erreur de mesure jusqu'à 50%. Ces observations suggèrent également une variabilité spatiale du flux G alors que l'application de la théorie de la covariance de turbulence nécessite des caractéristiques de surface homogènes. L'étude du bilan dans toutes les directions de vent et d'après l'empreinte des flux turbulents appuie l'hypothèse de l'hétérogénéité du sol à l'échelle de la parcelle et celle d'un problème de représentativité des flux actuels de G pour toute la parcelle. Lors de futures investigations, il est recommandé d'augmenter le nombre de capteurs de G, d'étendre dans la mesure du possible leurs distances respectives et de tester la méthode par analyse harmonique.

L'évaluation de tous les termes de flux, excepté celui de S_C , impliqués dans le bilan énergétique confirme l'observation dans la littérature de la nécessité d'inclure les termes de taux de stockages mineurs, souvent considérés comme négligeables dans le cas des cultures. Ceux-ci contribuent de manière significative dans le bilan en réduisant le résidu de 23% en moyenne, principalement grâce à S_G et S_P . Cette étude met également en évidence l'utilité de mettre en place un protocole de mesure de S_C à Lonzée, qui est en fait peu contraignant. Malgré que ce terme ait été cité pour réduire de manière importante le résidu, les résultats présentés suggèrent cependant qu'il ne permet pas d'expliquer le résidu du bilan restant.

Enfin, l'augmentation de la période du calcul de la covariance de turbulence montre une amélioration certaine du bilan énergétique entre 30 minutes et 1, 2 et 4 heures avec une augmentation totale de la pente de 0,08. Par rapport aux flux de LE, les flux de H sont proportionnellement marqués par une augmentation plus importante avec un déplacement positif la distribution des flux avec de presque

40 Wm^{-2} . Ceci corrobore l'observation de l'amélioration du bilan avec la diminution du rapport de Bowen. Cependant, ces améliorations du bilan ne permettent pas d'indiquer que la fermeture énergétique du site de Lonzée est atteinte.

Ces résultats renforcent l'hypothèse principale selon laquelle la période de 30 minutes serait trop courte pour intégrer toutes les fréquences du signal turbulent, menant à la sous-estimation des flux turbulents et à la non-fermeture énergétique. Certains auteurs remettent cependant en doute la pertinence de l'inclusion dans le bilan de ces basses fréquences, dont l'origine des flux dépasse l'échelle des surfaces monitorées et étudiées par la covariance de turbulence. D'après la littérature et les résultats de ce mémoire, les questions qui se posent maintenant sont : quelle période choisir pour le calcul de la moyenne ? Ne devrait-elle pas être dynamique selon les caractéristiques environnementales ? Enfin, quelle est la pertinence d'inclure les flux de basses fréquences non locales dans le bilan d'énergie ? Cela étant dit, des progrès pour améliorer la qualité des mesures indépendantes de la covariance turbulente sont encouragés, car ils sont le prérequis de l'analyse du bilan énergétique et de l'étude de la qualité des mesures des flux turbulents.

BIBLIOGRAPHIE

Aubinet M., Vesala T. & Papale D. (Éd.), 2012. *Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*, Springer ed., New York.

Baldocchi D., Falge E., Gu L., Olson R., Hollinger D., Running S., Anthoni P., Bernhofer C., Davis K., Evans R., Fuentes J., Goldstein A., Katul G., Law B., Lee X., Malhi Y., Meyers T., Munger W., Oechel W., Paw K.T., Pilegaard K., Schmid H.P., Valentini R., Verma S., Vesala T., Wilson K., Wofsy S., Baldocchi D., Falge E., Gu L., Olson R., Hollinger D., Running S., Anthoni P., Bernhofer C., Davis K., Evans R., Fuentes J., Goldstein A., Katul G., Law B., Lee X., Malhi Y., Meyers T., Munger W., Oechel W., U K.T.P., Pilegaard K., Schmid H.P., Valentini R., Verma S., Vesala T., Wilson K. & Wofsy S., 2001. FLUXNET: A New Tool to Study the Temporal and Spatial Variability of Ecosystem–Scale Carbon Dioxide, Water Vapor, and Energy Flux Densities. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* **82**(11), 2415-2434.

Beyrich F. & Mengelkamp H.-T., 2006. Evaporation over a Heterogeneous Land Surface: EVA_GRIPS and the LITFASS-2003 Experiment—An Overview. *Boundary-Layer Meteorol.* **121**(1), 5-32.

Blanken P.D., Black T.A., Yang P.C., Neumann H.H., Nesic Z., Staebler R., den Hartog G., Novak M.D. & Lee X., 1997. Energy balance and canopy conductance of a boreal aspen forest: Partitioning overstory and understory components. *J. Geophys. Res. Atmos.* **102**(D24), 28915-28927.

BUCHAN G.D., 1989. APPLICABILITY OF THE SIMPLE LOGNORMAL MODEL TO PARTICLE-SIZE DISTRIBUTION IN SOILS. *Soil Sci.* **147**(3).

Buyse P., Bodson B., Debacq A., De Ligne A., Heinesch B., Manise T., Moureaux C. & Aubinet M., 2017. Carbon budget measurement over 12 years at a crop production site in the silty-loam region in Belgium. *Agric. For. Meteorol.* **246**(March), 241-255.

Cava D., Contini D., Donato A. & Martano P., 2008. Analysis of short-term closure of the surface energy balance above short vegetation. *Agric. For. Meteorol.* **148**(1), 82-93.

Culf A.D., Foken T. & Gash J.H.C., 2004. *The Energy Balance Closure Problem*. Springer, Berlin, Heidelberg, 159-166.

Dagnelie P., 2013. *Statistique théorique et appliquée. 1, Statistique descriptive et bases de l'inférence statistique*, De Boeck.

De Ligne A. & Manise T., 2014. Documentation on the Terrestrial Observatory of Lonzée (OTL).

Desjardins R.L., Macpherson J.I., Schuepp P.H. & Karanja F., 1989. An Evaluation of Aircraft Flux Measurements of CO₂, Water Vapor and Sensible Heat. In: *Boundary Layer Studies and Applications*. Springer Netherlands, Dordrecht, 55-69.

Dumortier P., Aubinet M., Lebeau F., Naiken A. & Heinesch B., 2019. Point source emission estimation using eddy covariance: Validation using an artificial source experiment. *Agric. For. Meteorol.* **266-267**(July 2018), 148-156.

Dunlap W.P. & Silver N.C., 1986. Confidence intervals and standard errors for ratios of normal variables, *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 469-516.

DeVries D. A., 1963. Thermal Properties of Soils. W. R. van Wijk, Ed., *Physics of Plant Environment*, John Wiley & Sons, New York, 210-235.

Eshonkulov R., Poyda A., Ingwersen J., Pulatov A. & Streck T., 2019 (a). Improving the energy balance closure over a winter wheat field by accounting for minor storage terms. *Agric. For. Meteorol.* **264**(October 2018), 283-296.

Eshonkulov R., Poyda A., Ingwersen J., Wizemann H.D., Weber T.K.D., Kremer P., Högy P., Pulatov A. & Streck T., 2019 (b). Evaluating multi-year, multi-site data on the energy balance closure of eddy-covariance flux measurements at cropland sites in southwestern Germany. *Biogeosciences* **16**(2), 521-540.

Eugster W. & Merbold L., 2015. Eddy covariance for quantifying trace gas fluxes from soils **1**, 187-205.

- Finkelstein P.L. & Sims P.F., 2001. Sampling error in eddy correlation flux measurements. *J. Geophys. Res. Atmos.* **106**(D4), 3503-3509.
- Finnigan J.J., Clement R., Malhi Y., Leuning R. & Cleugh H.A., 2003. A RE-EVALUATION OF LONG-TERM FLUX MEASUREMENT TECHNIQUES PART I: AVERAGING AND COORDINATE ROTATION, *Boundary-Layer Meteorology*, 1-48.
- Foken T., Wimmer F., Mauder M., Thomas C. & Liebethal C., 2006. Some aspects of the energy balance closure problem, *Atmos. Chem. Phys.*, 4395-4402.
- Foken T., 2008. THE ENERGY BALANCE CLOSURE PROBLEM: AN OVERVIEW. *Ecol. Appl.* **18**(6), 1351-1367.
- Foken T., 1998 (a). Die scheinbar ungeschlossene Energiebilanz am Erdboden - eine Herausforderung an die Experimentelle Meteorologie. *Sitzungsberichte der Leibniz-Sozietät* **24**, 131-150.
- Foken T., 1998 (b). Ergebnisse des Linex-97/1 Experimentes. *Dtsch. Wetterd. Forschung* (Arbeitsergebnisse 53).
- Foken T., Mauder M., Liebethal C., Wimmer F., Beyrich F., Leps J.-P., Raasch S., DeBruin H.A.R., Meijninger W.M.L. & Bange J., 2010. Energy balance closure for the LITFASS-2003 experiment. *Theor. Appl. Climatol.* **101**(1-2), 149-160.
- Forbes R.M. & Ahlgrimm M., 2014. On the Representation of High-Latitude Boundary Layer Mixed-Phase Cloud in the ECMWF Global Model. *Mon. Weather Rev.* **142**(9), 3425-3445.
- Franssen H.J.H., Stöckli R., Lehner I., Rotenberg E. & Seneviratne S.I., 2010. Energy balance closure of eddy-covariance data: A multisite analysis for European FLUXNET stations. *Agric. For. Meteorol.* **150**(12), 1553-1567.
- Fratini G., Ibrom A., Arriga N., Burba G. & Papale D., 2012. Relative humidity effects on water vapour fluxes measured with closed-path eddy-covariance systems with short sampling lines. *Agric. For. Meteorol.* **165**, 53-63.
- Fuchs M. & Tanner C.B., 1968. Calibration and Field Test of Soil Heat Flux Plates1. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **32**(3), 326.
- Harman I.N. & Finnigan J.J., 2010. Flow Over Hills Covered by a Plant Canopy: Extension to Generalised Two-Dimensional Topography. *Boundary-Layer Meteorol.* **135**(1), 51-65.
- Heusinkveld B., Jacobs A.F., Holtslag A.A. & Berkowicz S., 2004. Surface energy balance closure in an arid region: role of soil heat flux. *Agric. For. Meteorol.* **122**(1-2), 21-37.
- Horst T.W. & Lenschow D.H., 2009. Attenuation of Scalar Fluxes Measured with Spatially-displaced Sensors. *Boundary-Layer Meteorol.* **130**(2), 275-300.
- Jacobs A.F.G., Heusinkveld B.G. & Holtslag A.A.M., 2007. Towards Closing the Surface Energy Budget of a Mid-latitude Grassland. *Boundary-Layer Meteorol.* **126**(1), 125-136.
- Jolicoeur P. & Mosimann J.E., 1968. Intervalles de confiance pour la pente de l'axe majeur d'une distribution normale bidimensionnelle. *Biometrie-praximetrie* **9**, 121-140.
- Kaimal J.C. & Finnigan J.J. (John J., 1994. *Atmospheric boundary layer flows : their structure and measurement*, Oxford University Press, 289.
- Kaimal J.C., Wyngaard J.C., Izumi Y. & Coté O.R., 1972. Spectral characteristics of surface-layer turbulence. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **98**(417), 563-589.
- Kanda M., Inagaki A., Letzel M.O., Raasch S. & Watanabe T., 2004. LES Study of the Energy Imbalance Problem with Eddy Covariance Fluxes. *Boundary-Layer Meteorol.* **110**(3), 381-404.
- Katul G.G., Finnigan J.J., Poggi D., Leuning R. & Belcher S.E., 2006. The Influence of Hilly Terrain on Canopy-Atmosphere Carbon Dioxide Exchange. *Boundary-Layer Meteorol.* **118**(1), 189-216.

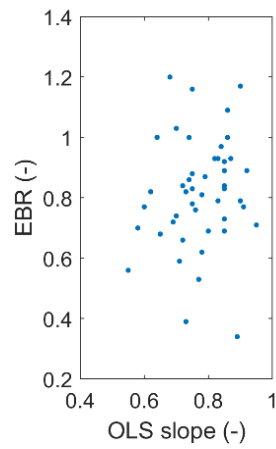
- Kidston J., Brümmer C., Black T.A., Morgenstern K., Nesic Z., McCaughey J.H. & Barr A.G., 2010. Energy Balance Closure Using Eddy Covariance Above Two Different Land Surfaces and Implications for CO₂ Flux Measurements. *Boundary-Layer Meteorol.* **136**(2), 193-218.
- Kljun N., Calanca P., Rotach M.W. & Schmid H.P., 2015. A simple two-dimensional parameterisation for Flux Footprint Prediction (FFP). *Geosci. Model Dev* **8**, 3695-3713.
- Kljun N., Rotach M.W. & Schmid H.P., 2002. A THREE-DIMENSIONAL BACKWARD LAGRANGIAN FOOTPRINT MODEL FOR A WIDE RANGE OF BOUNDARY-LAYER STRATIFICATIONS.
- Kohsiek W., Liebethal C., Foken T., Vogt R., Oncley S.P., Bernhofer C. & Debruin H.A.R., 2007. The Energy Balance Experiment EBEX-2000. Part III: Behaviour and quality of the radiation measurements. *Boundary-Layer Meteorol.* **123**(1), 55-75.
- Lee X., Massman W.J. & Law B., 2005. *Handbook of Micrometeorology: A guide for surface flux measurement and analysis*, Atmospheric and Oceanographic Sciences Library. Lee, X., Massman, W., Law, B. éd., Springer Netherlands, Dordrecht.
- Lee X., 2018. *Fundamentals of boundary-layer meteorology*, Springer International Publishing, 256.
- Lee X., 1998. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agric. For. Meteorol.* **91**(1-2), 39-49.
- Leuning R., 2004. Measurements of Trace Gas Fluxes in the Atmosphere Using Eddy Covariance: WPL Corrections Revisited. In: *Handbook of Micrometeorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 119-132.
- Leuning R., van Gorsel E., Massman W.J. & Isaac P.R., 2012. Reflections on the surface energy imbalance problem. *Agric. For. Meteorol.* **156**, 65-74.
- Lognoul M., Debacq A., De Ligne A., Dumont B., Manise T., Bodson B., Heinesch B. & Aubinet M., 2019. N₂O flux short-term response to temperature and topsoil disturbance in a fertilized crop: An eddy covariance campaign. *Agric. For. Meteorol.* **271**(October 2018), 193-206.
- Mahrt L. & Mahrt L., 1998. Flux Sampling Errors for Aircraft and Towers. *J. Atmos. Ocean. Technol.* **15**(2), 416-429.
- Malhi Y., McNaughton K. & Von Randow C., 2004. Low Frequency Atmospheric Transport and Surface Flux Measurements. Springer, Dordrecht, 101-118.
- Masseroni D., Corbari C. & Mancini M., 2014. Limitations and improvements of the energy balance closure with reference to experimental data measured over a maize field. *Atmósfera* **27**(4), 335-352.
- Mauder M., Jegede O.O., Okogbue E.C., Wimmer F. & Foken T., 2007. Surface energy balance measurements at a tropical site in West Africa during the transition from dry to wet season. *Theor. Appl. Climatol.* **89**(3-4), 171-183.
- Mauder M., Jegede O.O., Okogbue E.C., Wimmer F. & Foken T., 2007. Surface energy balance measurements at a tropical site in West Africa during the transition from dry to wet season. *Theor. Appl. Clim.* **89**, 171-183.
- Mauder M., 2013. A Comment on “How Well Can We Measure the Vertical Wind Speed? Implications for Fluxes of Energy and Mass” by Kochendorfer et al. *Boundary-Layer Meteorol.* **147**(2), 329-335.
- Mauder M. & Foken T., 2006. Impact of post-field data processing on eddy covariance flux estimates and energy balance closure. *Meteorol. Zeitschrift* **15**(6), 597-609.
- McArdle B.H., 1988. The structural relationship: regression in biology. *Can. J. Zool.* **66**(11), 2329-2339.
- Meek D.W., Prueger J.H. & Sauer T.J., 1998. Solutions for three regression problems commonly found in meteorological data analysis. In: *23rd Conference on Agricultural Forest Meteorology*, American Meteorological Society, Albuquerque, NM.

- Meijninger W.M.L., Beyrich F., Lüdi A., Kohsiek W. & Bruin H.A.R.D., 2006. Scintillometer-Based Turbulent Fluxes of Sensible and Latent Heat Over a Heterogeneous Land Surface – A Contribution to Litfass-2003. *Boundary-Layer Meteorol.* **121**(1), 89-110.
- Meijninger W.M.L., Hartogensis O.K., Kohsiek W., Hoedjes J.C.B., Zuurbier R.M. & De Bruin H.A.R., 2002. Determination of Area-Averaged Sensible Heat Fluxes with a Large Aperture Scintillometer over a Heterogeneous Surface – Flevoland Field Experiment. *Boundary-Layer Meteorol.* **105**(1), 37-62.
- Meyers T.P. & Hollinger S.E., 2004. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean. *Agric. For. Meteorol.* **125**(1-2), 105-115.
- Mikrometeorologie A., Mauder M. & Foken T., 2004. Documentation and Instruction Manual of the Eddy Covariance Software Package TK2, Arbeitsergebnisse Nr, 1.
- Moncrieff J.B., Massheder J.M., de Bruin H., Elbers J., Friborg T., Heusinkveld B., Kabat P., Scott S., Soegaard H. & Verhoef A., 1997. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. *J. Hydrol.* **188-189**, 589-611.
- Moncrieff J., Clement R., Finnigan J. & Meyers T., 2004. Averaging, Detrending, and Filtering of Eddy Covariance Time Series. In: *Handbook of Micrometeorology*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 7-31.
- Moore C.J., 1986. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorol.* **37**(1-2), 17-35.
- Moureaux C., Debacq A., Bodson B., Heinesch B. & Aubinet M., 2006. Annual net ecosystem carbon exchange by a sugar beet crop. *Agric. For. Meteorol.* **139**(1-2), 25-39.
- Novick K., Brantley S., Miniati C.F., Walker J. & Vose J.M., 2014. Inferring the contribution of advection to total ecosystem scalar fluxes over a tall forest in complex terrain. *Agric. For. Meteorol.* **185**, 1-13.
- Obukhov A.M., 1960. Structure of temperature and velocity fields under conditions of free convection. *Work. Inst. Theor. Geophys. Acad. Sci. USSR* **1**, 95-115.
- Ochsner T.E., Sauer T.J. & Horton R., 2007. Soil Heat Storage Measurements in Energy Balance Studies. *Agron. J.* **99**(1), 311.
- Oncley S.P., Foken T., Vogt R., Kohsiek W., DeBruin H.A.R., Bernhofer C., Christen A., Gorsel E. van, Grantz D., Feigenwinter C., Lehner I., Liebethal C., Liu H., Mauder M., Pitacco A., Ribeiro L. & Weidinger T., 2007. The Energy Balance Experiment EBEX-2000. Part I: overview and energy balance. *Boundary-Layer Meteorol.* **123**(1), 1-28.
- Oncley S.P., Friehe C.A., Larue J.C., Businger J.A., Itsweire E.C., Chang S.S., Oncley S.P., Friehe C.A., Larue J.C., Businger J.A., Itsweire E.C. & Chang S.S., 1996. Surface-Layer Fluxes, Profiles, and Turbulence Measurements over Uniform Terrain under Near-Neutral Conditions. *J. Atmos. Sci.* **53**(7), 1029-1044.
- Pasquill F. & Smith F.B., 1983. Atmospheric diffusion.: Study of the dispersion of windborne material from industrial and other sources. NEW YORK, USA.
- Pirk N., Sievers J., Mertes J., Parmentier F.-J.W., Mastepanov M. & Christensen T.R., 2017. Spatial variability of CO₂ uptake in polygonal tundra: assessing low-frequency disturbances in eddy covariance flux estimates. *Biogeosciences* **14**, 3157-3169.
- Ricker W.E., 1973. Linear Regressions in Fishery Research. *J. Fish. Res. Board Canada* **30**(3), 409-434.
- Ruppert J., Thomas C. & Foken T., 2006. Scalar Similarity for Relaxed Eddy Accumulation Methods. *Boundary-Layer Meteorol.* **120**(1), 39-63.
- Sánchez J.M., Caselles V. & Rubio E.M., 2010. Analysis of the energy balance closure over a FLUXNET boreal forest in Finland. *Hydrol. Earth Syst. Sci.* **14**(8), 1487-1497.

- Schmid H.P., 2002. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agric. For. Meteorol.* **113**(1-4), 159-183.
- Sievers J., Papakyriakou T., Larsen S.E., Jammet M.M., Rysgaard S., Sejr M.K. & Sørensen L.L., 2015. Estimating surface fluxes using eddy covariance and numerical ogive optimization. *Atmos. Chem. Phys.* **15**(4), 2081-2103.
- Sokal R.R. & Rohlf F.J., 1995. Biometry: the principles and practice of statistics in biological research 3rd ed Freeman. New York, NY.
- Steinfeld G., Letzel M.O., Raasch S., Kanda M. & Inagaki A., 2007. Spatial representativeness of single tower measurements and the imbalance problem with eddy-covariance fluxes: results of a large-eddy simulation study. *Boundary-Layer Meteorol.* **123**(1), 77-98.
- Stull R.B., 1988. *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, Springer Netherlands.
- Taylor G.I., 1938. The Spectrum of Turbulence. *Proc. R. Soc. London. Ser. A - Math. Phys. Sci.* **164**(919), 476-490.
- Trujillo-Ortiz, A. and R. Hernandez-Walls., 2010. gmregress: Geometric Mean Regression (Reduced Major Axis Regression). A MATLAB file. [WWW document]. URL <http://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27918-gmregress>
- Twine T.E., Kustas W.P., Norman J.M., Cook D.R., Houser P.R., Meyers T.P., Prueger J.H., Starks P.J. & Wesely M.L., 2000. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agric. For. Meteorol.* **103**(3), 279-300.
- Van Wijk W.R. & De Vries D.A., 1963. Periodic temperature variations in a homogeneous soil. *Phys. plant Environ.* **1**, 103-143.
- Vickers D., Mahrt L., Vickers D. & Mahrt L., 1997. Quality Control and Flux Sampling Problems for Tower and Aircraft Data. *J. Atmos. Ocean. Technol.* **14**(3), 512-526.
- Webb E.K., Pearman G.I. & Leuning R., 1980. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* **106**(447), 85-100.
- Wilczak J.M., Oncley S.P. & Stage S.A., 2001. Sonic Anemometer Tilt Correction Algorithms. *Boundary-Layer Meteorol.* **99**(1), 127-150.
- Wilson J.D. & Swaters G.E., 1991. The source area influencing a measurement in the Planetary Boundary Layer: The footprint and the distribution of contact distance. *Boundary-Layer Meteorol.* **55**(1-2), 25-46.
- Wilson K., Goldstein A., Falge E., Aubinet M., Baldocchi D., Berbigier P., Bernhofer C., Ceulemans R., Dolman H., Field C., Grelle A., Ibrom A., Law B., Kowalski A., Meyers T., Moncrieff J., Monson R., Oechel W., Tenhunen J., Valentini R. & Verma S., 2002. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agric. For. Meteorol.* **113**(1-4), 223-243.
- Xu Z., Ma Y., Liu S., Shi W., Wang J., Xu Z., Ma Y., Liu S., Shi W. & Wang J., 2017. Assessment of the Energy Balance Closure under Advective Conditions and Its Impact Using Remote Sensing Data. *J. Appl. Meteorol. Climatol.* **56**(1), 127-140.
- Yuan H. & Li F., 2014. A comparative study of measurement-based Thevenin equivalents identification methods. In: *2014 North American Power Symposium (NAPS)*. IEEE, 1-6.

ANNEXES

Annexe 1 – Correspondances entre les résultats de la régression OLS et de l'EBR réalisées à partir des résultats de Wilson et al. (2002) sur 22 sites et 50 années-sites de mesures du bilan énergétique



Annexe 2 – Extrait de Finnigan et al. (2003)

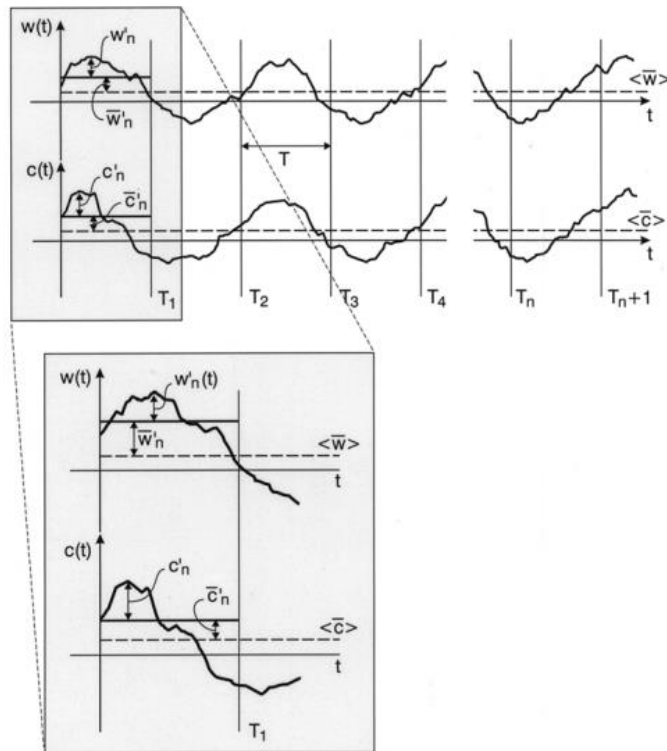
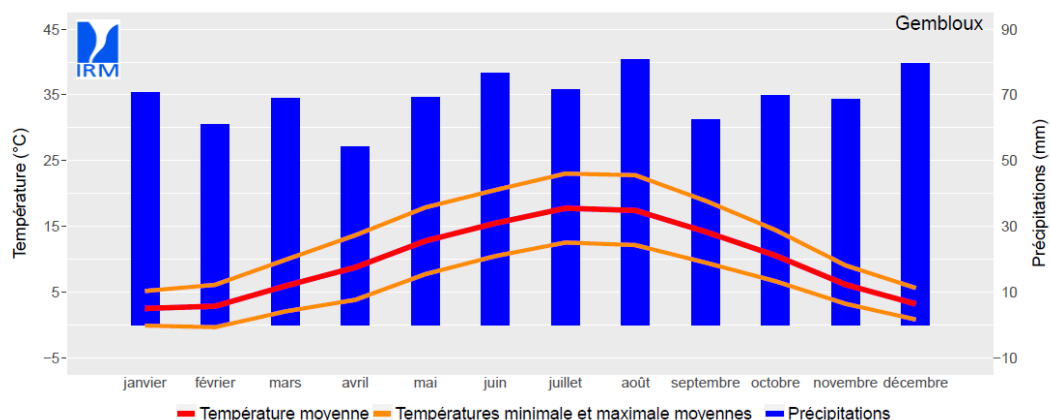


Figure 3. Block-ensemble average of a turbulent signal with low frequency content.

Annexe 3 – Températures de l'air et précipitations moyennes mensuelles pour la commune de Gembloux (période de référence : 1981-2010). Source : IRM.



Annexe 4 – Climat, températures de l'air et précipitations moyennes mensuelles et annuelles pour la commune de Gembloux (période de référence : 1981-2010). Source : IRM.

	année	janv.	févr.	mars	avr.	mai	juin	juil.	août	sept.	oct.	nov.	déc.
Température moyenne (°C)	9.8	2.5	2.9	5.9	8.8	12.8	15.5	17.8	17.4	14.2	10.6	6.1	3.2
Température maximale moyenne (°C)	13.9	5.2	6.1	9.9	13.7	17.9	20.5	23.0	22.8	18.9	14.4	9.1	5.6
Température minimale moyenne (°C)	5.7	-0.1	-0.4	2.1	3.8	7.7	10.5	12.5	12.2	9.5	6.7	3.2	0.8
Degrés-jours 15/15 (°C) ⁽¹⁾	2144.7	386.3	342.6	278.1	189.4	86.6	32.3	6.4	7.2	45.8	141.0	264.6	364.4
Jours de printemps ⁽²⁾	87.9	0	0	0.4	3.2	9.8	15.4	22.9	23.2	10.3	2.5	0	0
Jours d'été ⁽³⁾	29.4	0	0	0	0.4	2.3	5.3	10.4	8.5	2.3	0.2	0	0
Jours de chaleur ⁽⁴⁾	4.7	0	0	0	0	0.1	0.5	2.1	1.9	0	0	0	0
Jours d'hiver ⁽⁵⁾	9.6	3.6	2.9	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0.4	2.4
Jours de gel ⁽⁶⁾	62.3	13.9	13.8	9.5	4.0	0.1	0	0	0	0	1.8	6.7	12.4
Jours de gel sévère ⁽⁷⁾	3.0	1.6	1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.3
Quantité de précipitations (mm)	833.7	70.7	60.9	69.0	54.4	69.4	76.6	71.5	80.8	62.6	69.8	68.6	79.5
Jours de précipitations, 1 mm/jour ⁽⁸⁾	135.9	12.4	11.0	12.8	10.1	11.1	11.0	10.4	10.6	10.4	10.6	12.0	13.4
Jours de précipitations, 10 mm/jour ⁽⁸⁾	22.5	1.7	1.5	1.7	1.3	2.1	2.2	2.2	2.3	1.6	2.0	1.8	2.1

⁽¹⁾ Degrés-jours 15/15: Cumul moyen de la différence entre un seuil de 15°C et la température journalière moyenne lorsque celle-ci est inférieure à 15°C.

⁽²⁾ Jours de printemps: Nombre moyen de jours où la température maximale égale ou dépasse 20°C.

⁽³⁾ Jours d'été: Nombre moyen de jours où la température maximale égale ou dépasse 25°C.

⁽⁴⁾ Jours de chaleur: Nombre moyen de jours où la température maximale égale ou dépasse 30°C.

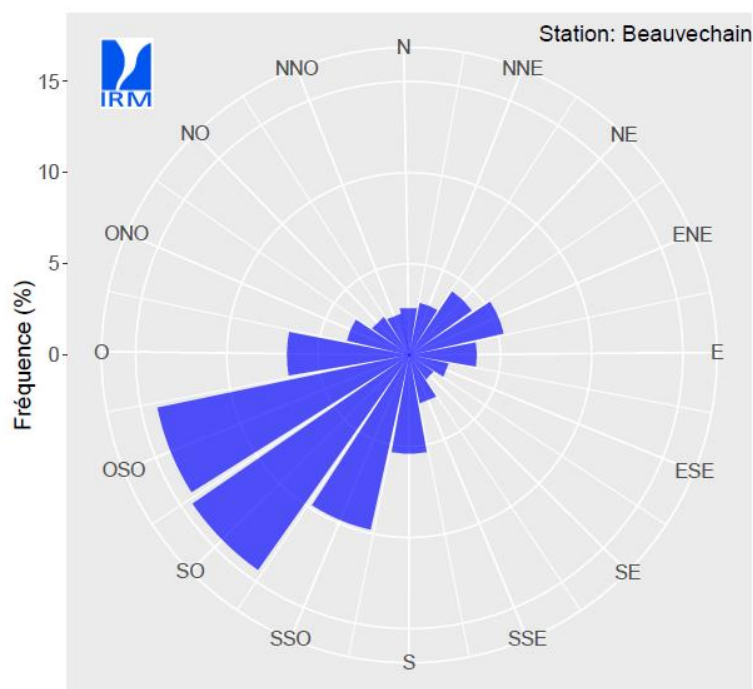
⁽⁵⁾ Jours d'hiver: Nombre moyen de jours où la température maximale est inférieure à 0°C.

⁽⁶⁾ Jours de gel: Nombre moyen de jours où la température minimale est inférieure à 0°C.

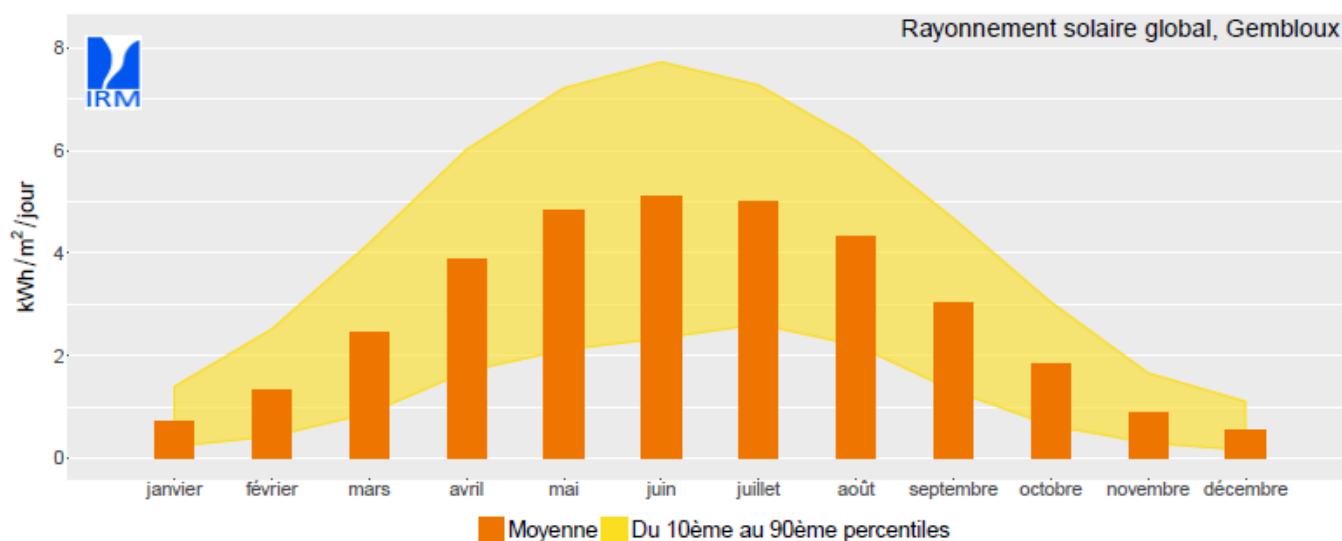
⁽⁷⁾ Jours de gel sévère: Nombre moyen de jours où la température minimale est inférieure à -10°C.

⁽⁸⁾ Jours de précipitations: Nombre moyen de jours où les quantités de précipitations valent au moins 1 ou 10 mm.

Annexe 5 – Vitesse et directions moyennes du vent à 10 mètres à Beauvechain, référence pour Gembloux (période de référence : 1981-2010). Source : IRM.



Annexe 6 – Rayonnement solaire moyen pour la commune de Gembloux (période de référence : 1984-2013). Source : IRM.



Annexe 7 – Opérations culturales réalisées sur la parcelle expérimentale d'octobre 2014 et décembre 2017.

Date	Opération culturale	Détails techniques
14 octobre 2014	Labour superficiel Semis	Variety: Sahara (130 kg ha ⁻¹)
24 novembre 2014	Désherbage	IP (2 l ha ⁻¹)
24 novembre 2014	Insecticide	Lambda 50 EC (0.1 l ha ⁻¹)
12 mars 2015	Désherbage	Capri Duo (200 g ha ⁻¹)
14 mars 2015	Fertilisation	Azote liquide (58.5 Units N ha ⁻¹)
15 avril 2015	Fertilisation	Azote liquide (39 Units N ha ⁻¹)
16 avril 2015	Régulateur de croissance	Cycocel 75 (1 l ha ⁻¹)
11 mai 2015	Fertilisation	Azote liquide (78 Units N ha ⁻¹)

26 mai 2015	Fongicide	Evora XPro (1,25 l ha ⁻¹)
2 août 2015	Récolte	Grain: 10.11 t ha ⁻¹ et pailles : 5280 kg ha ⁻¹
17 août 2015	Fertilisation	Fumier (50 t ha ⁻¹ = 295 kg nitrogen ha ⁻¹)
21 août 2015	Fertilisation	Chaulage (10 t ha ⁻¹)
21 août 2015	Semis moutarde	Moutarde (10 kg ha ⁻¹)
7-8-9 août 2015	Labour	
22 mars 2016	Fertilisation	Azote liquide (350 l ha ⁻¹ = 136,5 units N ha ⁻¹)
9 avril 2016	Désherbage	Vival (2,7 l ha ⁻¹ = 972 g ha ⁻¹ Glyphosate)
12-13 avril 2016	Semis	Betterave sucrière cv. Lisanna KWS
3 mai 2016	Désherbage	Kemifam (0,7 l ha ⁻¹ = 112 g ha ⁻¹ Phenmédiphame) + Kemiron (0,2l ha ⁻¹ = 112 g ha ⁻¹ Ethofumesate) + Kombo (0,5l ha ⁻¹ = 350 g ha ⁻¹ Metamitrone) + Safari (10 g ha ⁻¹ = 5 g ha ⁻¹ Triflusaluron-Méthyl)
9 mai 2016	Désherbage	Kemifam (1,2 l ha ⁻¹ = 192 g ha ⁻¹ Phenmédiphame) + Kemiron (0,25l ha ⁻¹ = 125 g ha ⁻¹ Ethofumesate) + Kombo (0,7l ha ⁻¹ = 490 g ha ⁻¹ Metamitrone) + Venzar (0,06 l ha ⁻¹ = 30 g ha ⁻¹ Lemacile)
19 mai 2016	Désherbage	Kemifam (1,5 l ha ⁻¹ = 240 g ha ⁻¹ Phenmédiphame) + Kemiron (0,2l ha ⁻¹ = 112 g ha ⁻¹ Ethofumesate) + Kombo (0,5l ha ⁻¹ = 350 g ha ⁻¹ Metamitrone) + Frontier Elite (0,4 l ha ⁻¹ = 288 g ha ⁻¹ Dimethenamide-P) + Safari (20 g ha ⁻¹ = 10 g ha ⁻¹ Triflusaluron-Méthyl)
11 juin 2016	Fertilisation	Azomag (20 l ha ⁻¹ = 4 kg ha ⁻¹ N Uréique)
23 juin 2016	Désherbage	Venzar (1 l ha ⁻¹ = 500 g ha ⁻¹ Lemacile)
1 août 2016	Fongicide	Opus Team (0,7 l ha ⁻¹ = 58,8 g ha ⁻¹ Epoxyconazole + 175 g ha ⁻¹ Fenpropimorphe)
14 août 2016	Fongicide	Retengo plus (0,7 l ha ⁻¹ = 35 g ha ⁻¹ Epoxyconazole + 93,1 g ha ⁻¹ Pyraclostrobine)
27 octobre 2016	Récolte	
29 octobre 2016	Labour + préparation du lit de semence	
29 octobre 2016	Semis	Froment d'hiver (cv. Tobak)
15 mars 2017	Désherbage	Lexus Millenium (70 g ha ⁻¹) + Capri Duo (200 g ha ⁻¹)
16 mars 2017	Fertilisation	Azote liquide (175 l N ha ⁻¹)
12 avril 2017	Fertilisation	Azote liquide (100 l N ha ⁻¹)
12 avril 2017	Régulateur de croissance	Cycocel 75 (1 l ha ⁻¹)
8 mai 2017	Fongicide	Cherokee (1,5 l ha ⁻¹)
12 mai 2017	Fertilisation	Azote liquide (175 l N ha ⁻¹)
1 juin 2017	Fongicide	Seguris (0,8 l ha ⁻¹) + Riza (0,8 l ha ⁻¹)
29-30 juillet 2017	Récolte	
26 août 2017	Désherbage	Round-Up (5 l ha ⁻¹)
06-07 septembre 2017	Déchaumage	
	Semis moutarde	Moutarde (10 kg ha ⁻¹)
6 décembre 2017	Broyage et labour	
8 décembre 2017	Broyage et labour	L(-25)C(-2):LCL(L(-39)C(-2):LC

Annexe 8 – Capture d'écran du paramétrage du calcul du spectre et cospectre pour chaque période de la moyenne calculée des flux pour effectuer la correction spectrale dans le cas d'une sous-estimation des flux mesurés

Spectra and Cospectra Calculation

☒ Binned (co)spectra files not available

☐ Binned (co)spectra files available for this dataset: C:\Users\Francois\Desktop\Test_eddy_pro_Heinesch\eddypro_binned_cospectra

Browse...

☐ Select a different period

Start: 1 Jan 2000 00:00

End: 23 Apr 2019 08:56

Tapering window: Hamming

Frequency bins for (co)spectra reduction: 50

☒ Use power-of-two samples to speed up the FFT

CO₂

H₂O

CH₄

4th Gas

Removal of high frequency noise

Lowest noise frequency: 10.0000 [Hz]

3.0000 [Hz]

1.0000 [Hz]

1.0000 [Hz]

Spectra and Cospectra QA/QC

	Friction velocity	Sensible heat flux	Latent heat flux	CO ₂ flux	CH ₄ flux	4 th gas flux
Minimum, unstable:	0.1000 [m/s]	20.0000 [W/m ²]	20.0000 [W/m ²]	2.0000 [μmol/m ² s]	0.0100 [μmol/m ² s]	0.0100 [μmol/m ² s]
Minimum, stable:	0.0500 [m/s]	5.0000 [W/m ²]	3.0000 [W/m ²]	0.5000 [μmol/m ² s]	0.0050 [μmol/m ² s]	0.0050 [μmol/m ² s]
Maximum:	5.0000 [m/s]	1000.0000 [W/m ²]	1000.0000 [W/m ²]	100.0000 [μmol/m ² s]	20.0000 [μmol/m ² s]	20.0000 [μmol/m ² s]

Minimum number of (co)spectra for valid averages: 10

☒ Filter (co)spectra according to Vickers and Mahrt (1997) test results

Filter (co)spectra according to micrometeorological quality test results (Mauder and Foken, 2004)

☐ Low data quality (flag value = 2)

☐ Moderate data quality (flag value = 1)

Spectral Correction Options

Low frequency range

☒ Analytic correction of high-pass filtering effects (Moncrieff et al. 2004)

High frequency range

☒ Correction of low-pass filtering effects

Method: Fratini et al. (2012) - In situ/analytic

☒ Correction for instruments separation

Method: Horst and Lenschow (2009), only crosswind and vertical

☐ Spectral assessment file available for this dataset: drag and drop here

Load...

☒ Spectral assessment file not available

Assessment of high-frequency attenuation

CO₂

H₂O

CH₄

4th Gas

Frequency range for fitting in-situ transfer functions (based on temperature and concentrations spectra)

Lowest frequency: 0.5000 [Hz]

0.0000 [Hz]

0.0050 [Hz]

0.0050 [Hz]

Highest frequency: 10.0000 [Hz]

0.5000 [Hz]

2.0000 [Hz]

2.0000 [Hz]

Fratini et al. (2012) method settings

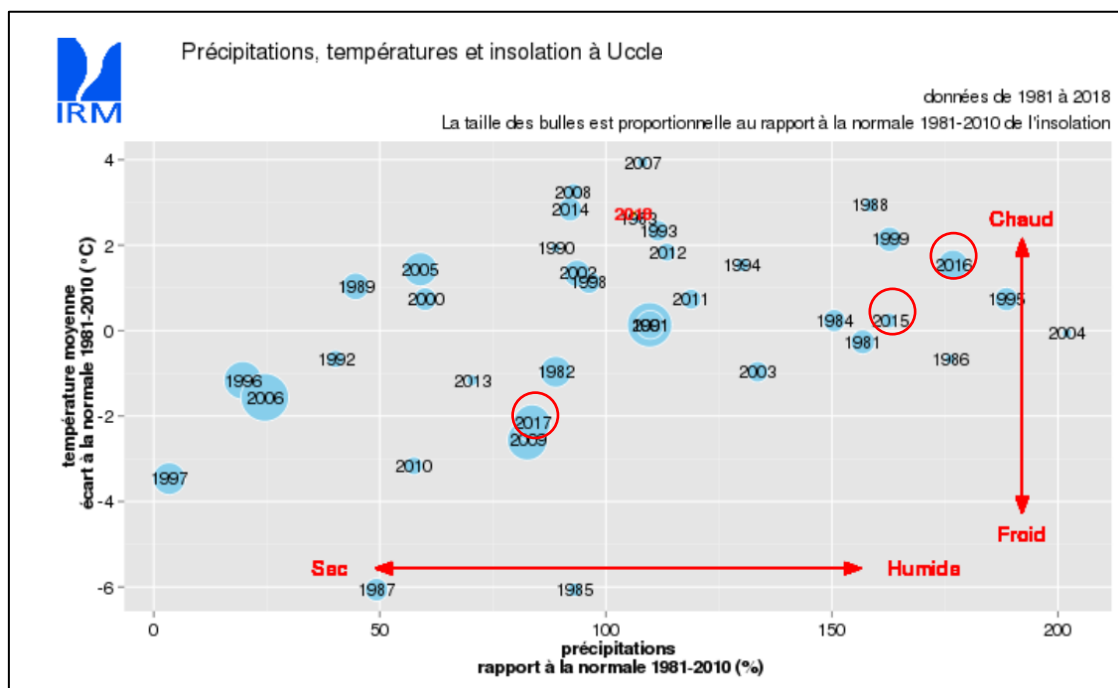
☒ Full w/Ts cospectra files not available

☐ Full w/Ts cospectra files available for this dataset: C:\Users\Francois\Desktop\Test_eddy_pro_Heinesch\eddypro_full_cospectra

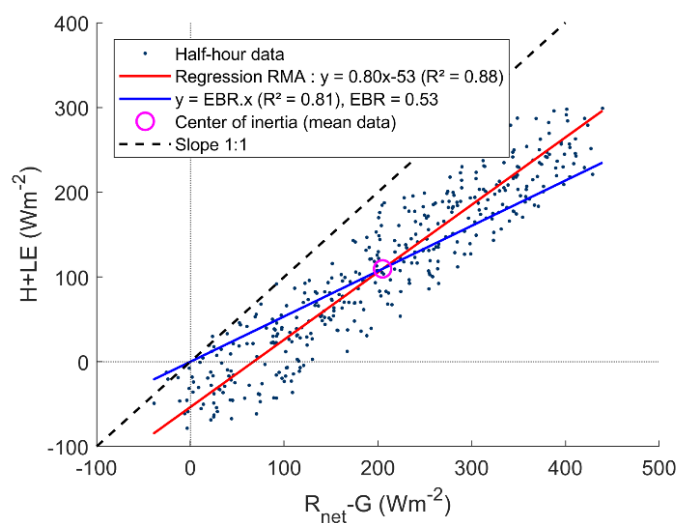
Browse...

☒ Include anemometer losses for path averaging and time response

Annexe 9 – Précipitations, températures et insolation annuelles à Uccle entre 1981 et 2018. Les années 2015-16-17 sont entourées en rouge. Source : IRM



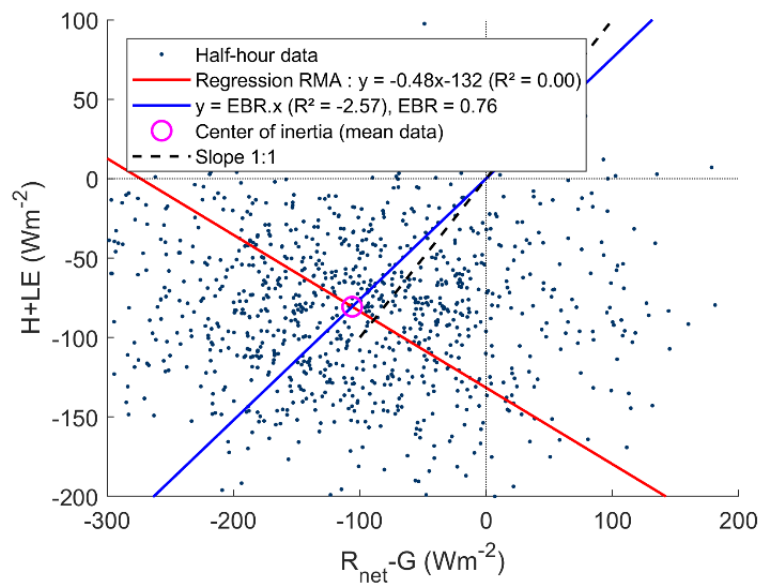
Annexe 10 – Illustration des différences entre les paramètres de la régression RMA et l'EBR sur un ensemble de données fictives



Annexe 11 – Médiane saisonnière et annuelle des principaux flux et du résidu du BE

	Flux median (Wm^{-2})				
	H	LE	R_{net}	G	Residual
Winter	-15.8 (188%)	1.3 (-15%)	-8.4 (100%)	-5.1 (61%)	9.2 (-110%)
Spring	6.8 (9%)	19.7 (25%)	79.4 (100%)	6.5 (8%)	29.3 (37%)
Summer	24.3 (13%)	51.5 (28%)	183.0 (100%)	13.3 (7%)	63.4 (35%)
Fall	7.6 (10%)	25.4 (32%)	78.8 (100%)	4.2 (5%)	29.0 (37%)
Annual	5.1 (7%)	21.3 (29%)	74.0 (100%)	4.4 (6%)	29.0 (39%)

Annexe 12 – Cas particulier des différences entre les paramètres de la régression RMA et l’EBR, sur un ensemble de données fictives, pour montrer l’importance de l’intervalle de confiance pour l’interprétation de l’EBR.



Annexe 13 – Extrait d’Eshonkulov et al. (2019b)

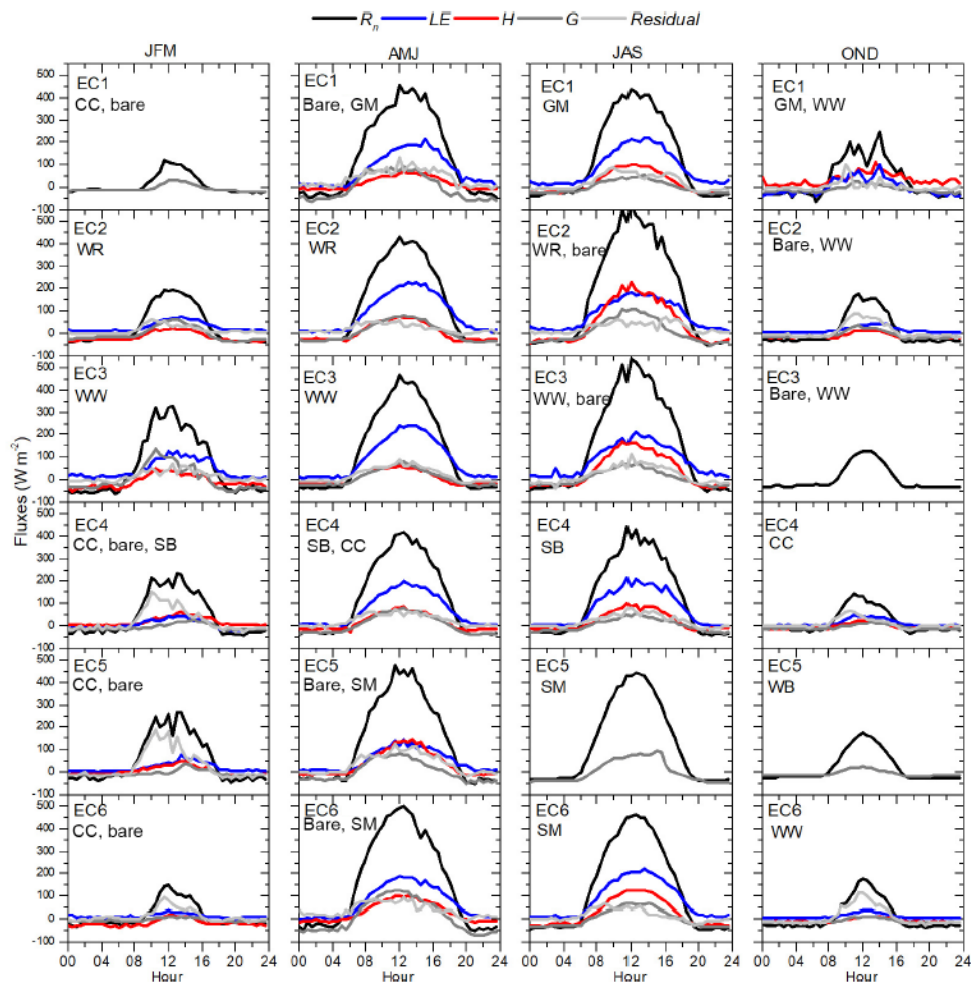
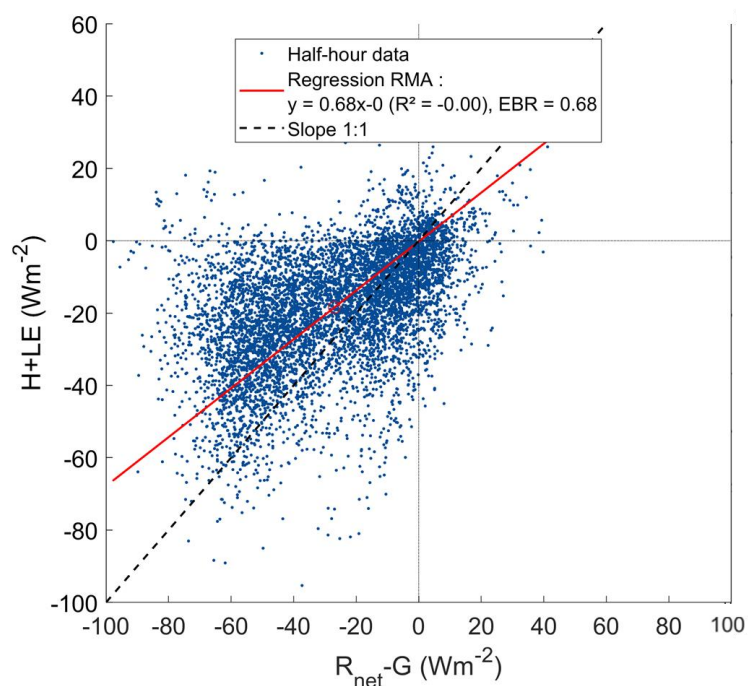
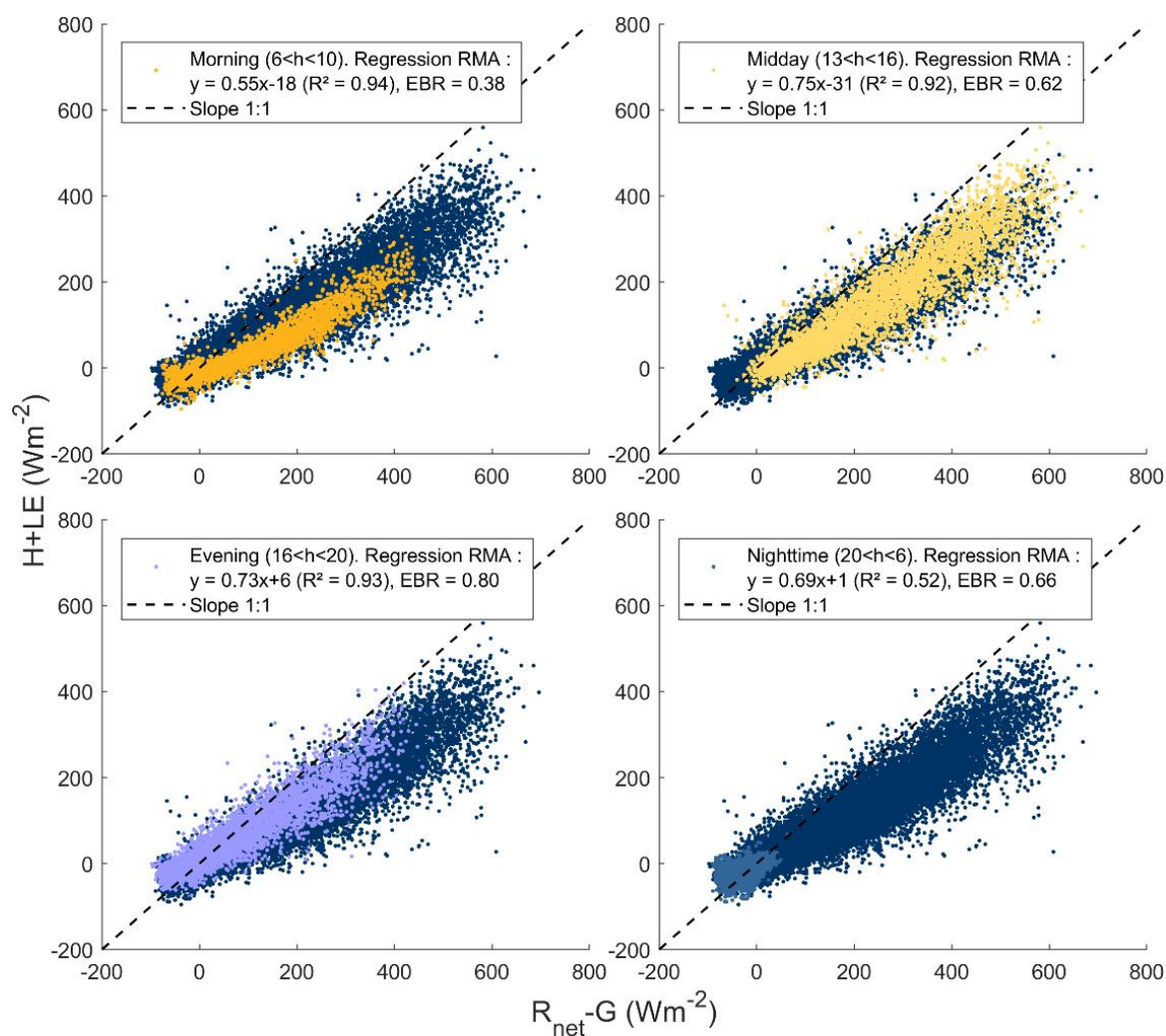


Figure 4. Diurnal courses of energy balance components averaged over 3-month periods in Kraichgau (EC1, EC2, and EC3) and Swabian Jura (EC4, EC5, and EC6) in 2016. Insets denote the different crops grown in 2016; see main text for explanation. Because of energy shortage during winter at the EC1, EC3, EC4, and EC5 sites, the fluxes shown in the JFM and OND graphs were measured only in March and from 1 October to mid-November, respectively.

Annexe 14 – Régression RMA et EBR sur les données de nuit (2015-17)



Annexe 15 - Décomposition de la relation entre $R_{net}-G$ et $H+LE$ pour 2015-17 pour quatre périodes spécifiques de stabilité différentes : deux périodes de transition (matin et soir) et deux périodes caractéristiques (mi-journée et nuit)



Annexe 16 – Extrait d'Eshonkulov et al. (2019a)

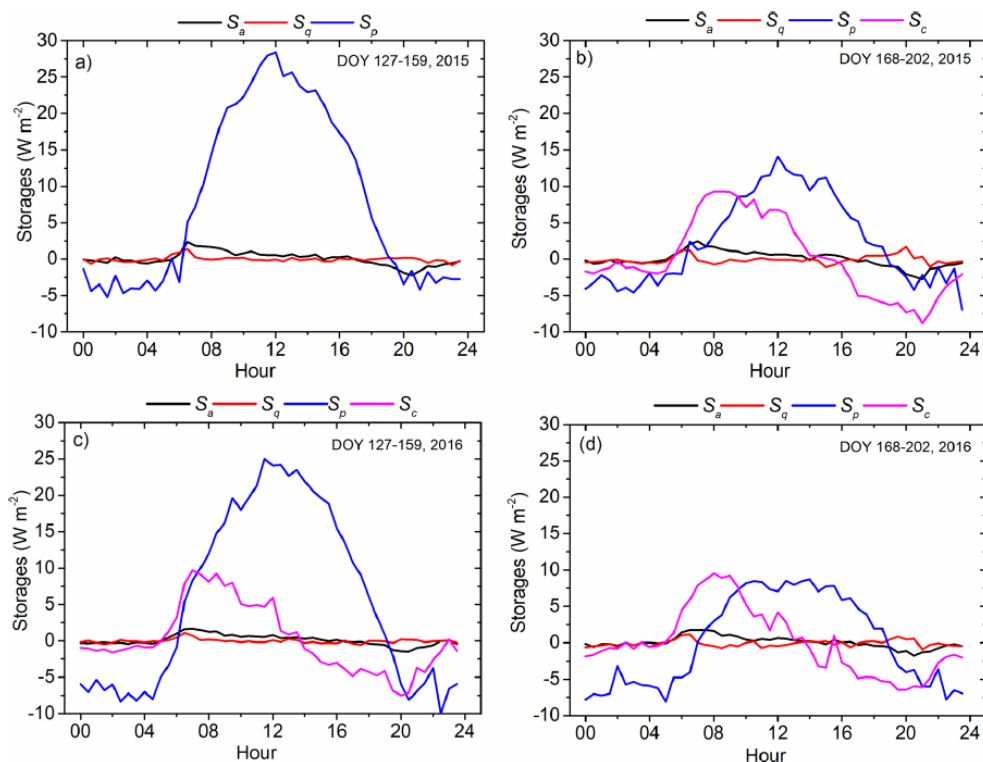


Fig. 5. Mean diurnal cycles of minor flux and storage terms from winter wheat stands: S_a : air enthalpy change, S_g : atmospheric moisture change, S_p : energy consumption and release by photosynthesis and respiration, S_c : enthalpy change in the plant canopy.

Annexe 17 – Extrait de Masseroni et al. (2014)

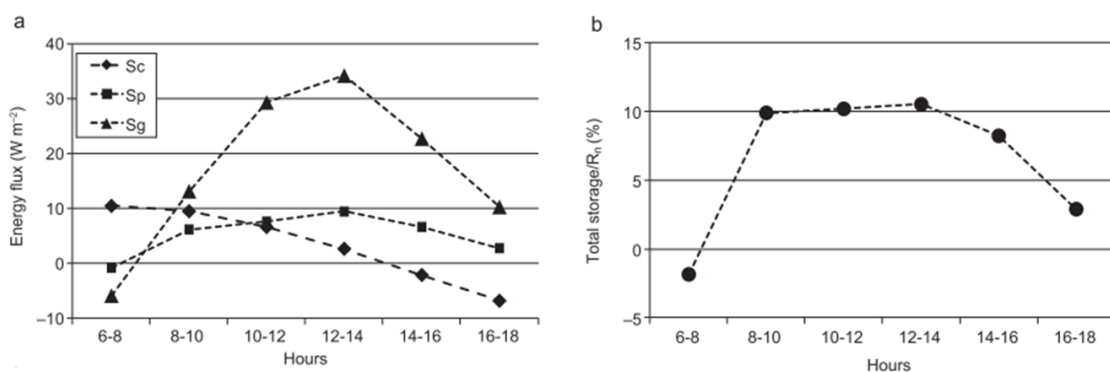
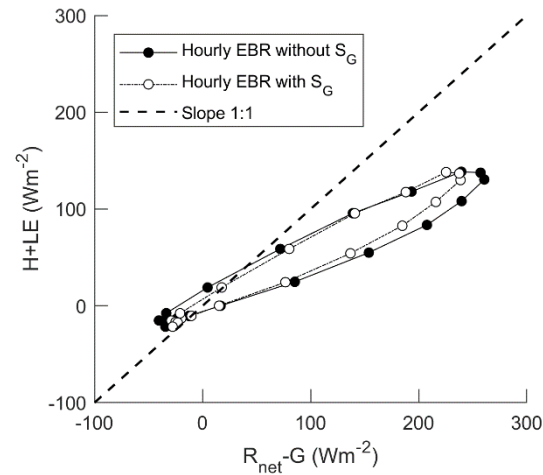
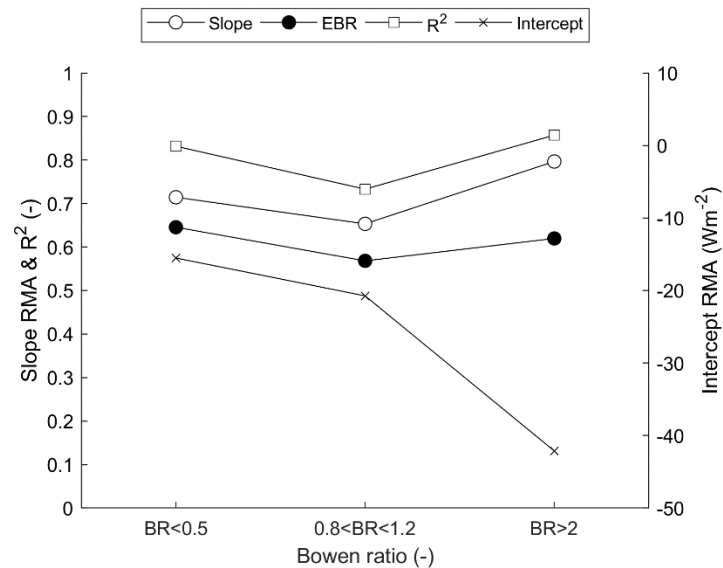


Fig. 3. (a) Average daytime cycle for each storage term for the whole experimental period. (b) Fraction of net radiation that is portioned to storage for maize plants.

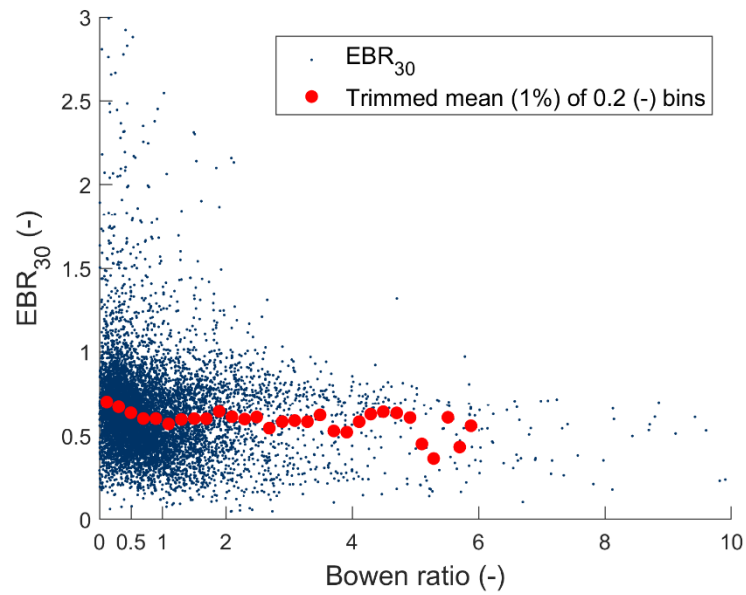
Annexe 18 - Hystérèse de la relation entre $R_{\text{net}}-G$ et $H+LE$ pour les données de printemps 2016-17, représenté par l'EBR horaire avec et sans le terme de stockage S_G



Annexe 19 – Paramètres des régressions RMA et EBR sur 2015-17 selon 3 classes de rapport de Bowen et pour des demi-heures de jour ($10 < h < 18$), en conditions instables et neutre, en excluant l'hiver.



Annexe 20 - Relation entre le rapport de Bowen (RB) et l'EBR à la demi-heure (EBR_{30}) et la moyenne tronquée (1%) par classe de RB de jour ($10 < h < 18$), en conditions neutres et en excluant l'hiver



Annexe 21 – Photos du couvert végétal (blé d'hiver) sur la parcelle expérimentale de Lonzée prises le (a) 04/04/2017 et (b) le 10/06/2017. La flèche rouge indique l'endroit où la photo a été prise et la direction.

