

Ce document est autorisé sous la Licence CC BY-NC-SA 4.0.

Pour obtenir une copie de cette License, veuillez consulter :

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Pour les documents traduits, nous vous suggérons de donner crédit à l'auteur original ou aux auteurs originaux, et au(x) traducteur(s) ou traductrice(s).



Mesures des flux par covariance de Foucault, Principes

Cours sur les flux au Colorado, 2023



Dennis Baldocchi
Université de Californie, Berkeley

Aperçu

- Principes de base et aperçu de la covariance de Foucault
- Application dans le monde réel
 - Transgresser les règles



Références personnelles sur la covariance de Foucault

Global Change Biology (2003) 9, 479–492

REVIEW

Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future

DENNIS D. BALDOCCHI

*Ecosystem Science Division, Department of Environmental Science, Policy and Management, 151 Hilgard Hall,
University of California, Berkeley, Berkeley, CA 94720-3110, USA*

October 1988

SPECIAL FEATURE—GAS EXCHANGE 1331

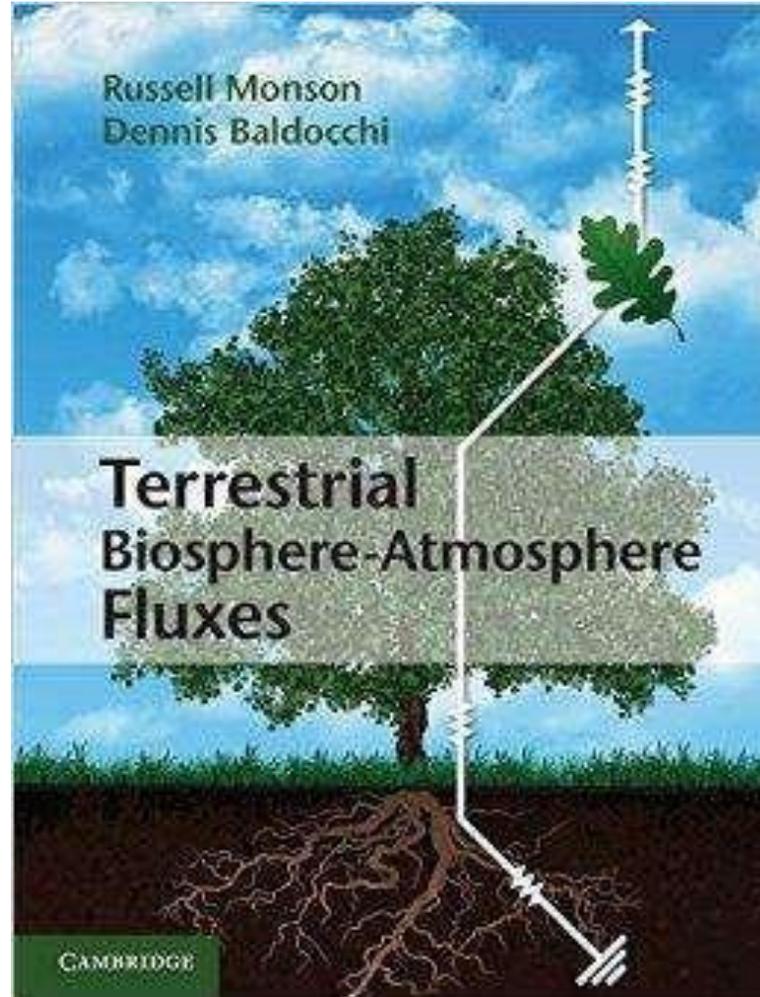
Ecology, 69(5), 1988, pp. 1331–1340
© 1988 by the Ecological Society of America

MEASURING BIOSPHERE–ATMOSPHERE EXCHANGES OF BIOLOGICALLY RELATED GASES WITH MICROMETEOROLOGICAL METHODS

DENNIS D. BALDOCCHI, BRUCE B. HICKS, AND TILDEN P. MEYERS

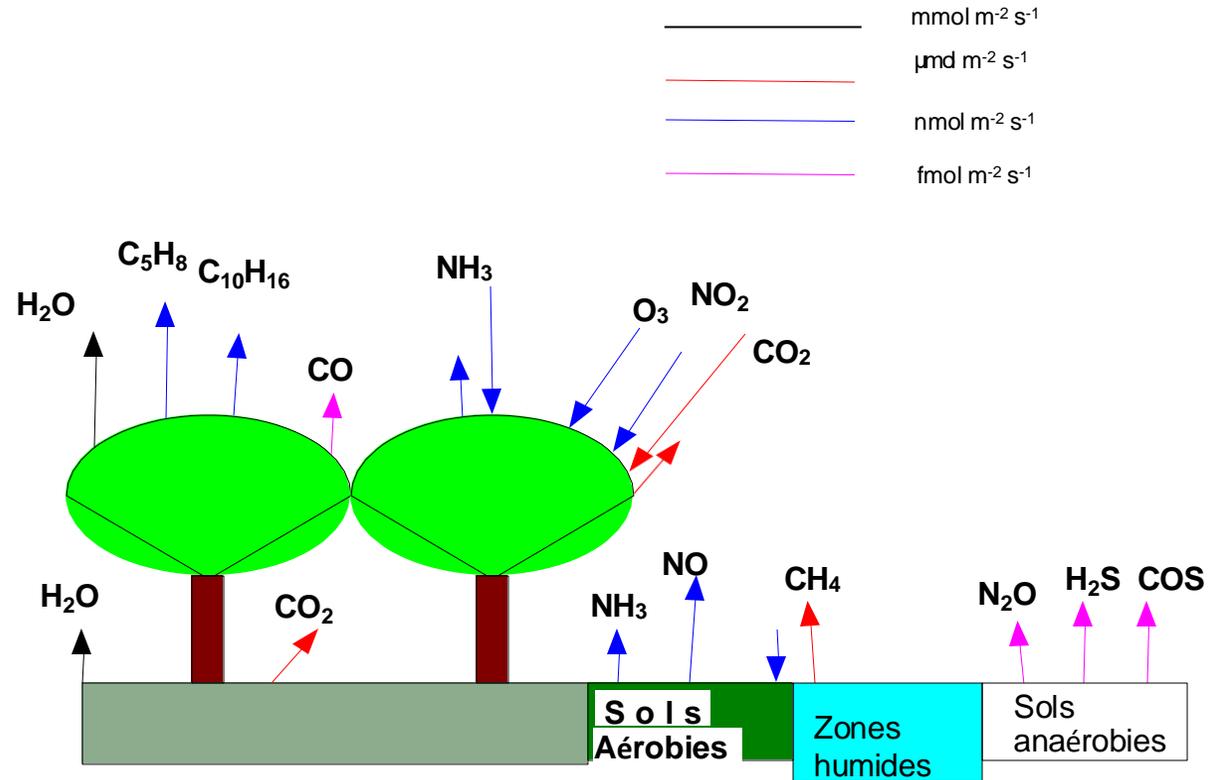
*Atmospheric Turbulence and Diffusion Division,
National Oceanic and Atmospheric Administration,
P.O. Box 2456, Oak Ridge, Tennessee 37831 USA*

"Le Grand Livre sur les flux"



Que sont les flux et pourquoi les mesurer ?

Ce que la biosphère respire



Les flux, en moles par mètre carré et par seconde, sont la monnaie d'échange pour étudier l'état de l'atmosphère et le métabolisme des écosystèmes.

Attributs de la covariance de Foucault

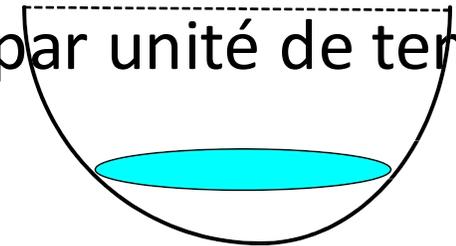
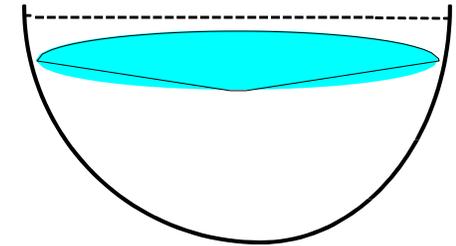
- Mesure directe du flux
- Sur le terrain
- Pas d'interférence avec le système faisant l'objet de l'enquête
- Mesure représentative d'une large population d'individus
- Automatique, ne repose pas sur des mesures manuelles, comme les chambres

Que sont les flux et pourquoi les mesurer ?

Pensez à une baignoire :

La variation de la hauteur de l'eau dans un volume est proportionnelle à la différence entre le flux entrant moins le flux sortant

Densité du flux (F) \sim masse/énergie par unité de surface et par unité de temps

$$\frac{dc}{dt} = \frac{\partial F_i}{\partial x_i}$$


Défis liés à la mesure des flux de gaz à effet de serre

- Mesure/interprétation des flux de gaz à effet de serre de manière quasi-continue pendant des jours, des années, et des décennies.
- Mesure/interprétation des flux sur des sources dispersées (par exemple CH₄, N₂O).
- Mesure/interprétation des flux de sources intermittentes dans le temps (CH₄, N₂O, O₃, C₅H₈, HNO₃, SO₂, NO_x).
- Mesure/interprétation des flux sur des terrains complexes.
- Mesure des flux de gaz à effet de serre dans les zones reculées sans courant alternatif.
- Développement de nouveaux capteurs pour l'application de routine de la covariance de Foucault, ou de la théorie micrométéorologique, pour les mesures de flux de gaz à l'état de traces et leurs isotopes (CH₄, N₂O, ¹³CO₂, C¹⁸O₂).

Objectif : Déconstruire le budget de la conservation

$$\frac{d\bar{c}}{dt} = \frac{\partial F_i}{\partial x_i} =$$
$$\frac{\partial \bar{c}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{c}}{\partial x} + v \frac{\partial \bar{c}}{\partial y} + w \frac{\partial \bar{c}}{\partial z} = - \frac{\partial \overline{u'c'}}{\partial x} - \frac{\partial \overline{v'c'}}{\partial y} - \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z}$$

u, vitesse longitudinale
v, vitesse latérale
w, vitesse verticale
C, rapport de mélange
scalaire

I : Taux de changement dans le temps

II : Advection

III : Divergence des flux



Couche de flux constant

$$\frac{d\bar{c}}{dt} = \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} = 0$$

$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} dz = C = \text{Flux} = \overline{w'c'}$$

État stable ($dc/dt = 0$) ; rapport infini et pas d'advection ($dc/dx = dc/dy = 0$) ; vitesse verticale moyenne, w , = 0

Covariance de Foucault,

Flux de densité: mol m⁻² s⁻¹ ou J m⁻² s⁻¹

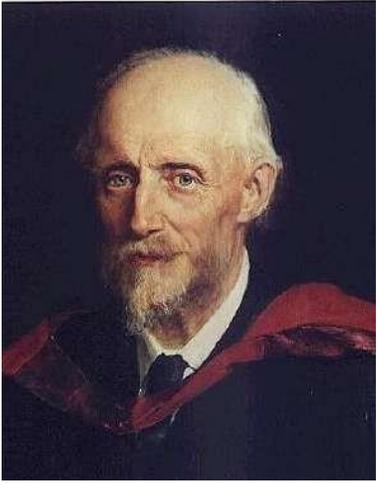
1

$$F = \overline{\rho_a w s} \sim \overline{\rho_a} \cdot \overline{w' s'}$$

$$s = \left(\frac{\rho_c}{\rho_a} \right)$$

w est la vitesse verticale ; s est la concentration spécifique ;

Les points représentent les fluctuations par rapport à la moyenne ; la barre supérieure indique la moyenne temporelle.



Règles de calcul de la moyenne de Reynolds

1) Le produit moyen (surligné) de deux variables fluctuantes (nombres premiers, ') est une fonction de la valeur de l'écart entre les deux variables.

Produit des moyennes individuelles plus une covariance,

$$\overline{xy} = \overline{x} \overline{y} + \overline{x' y'}$$

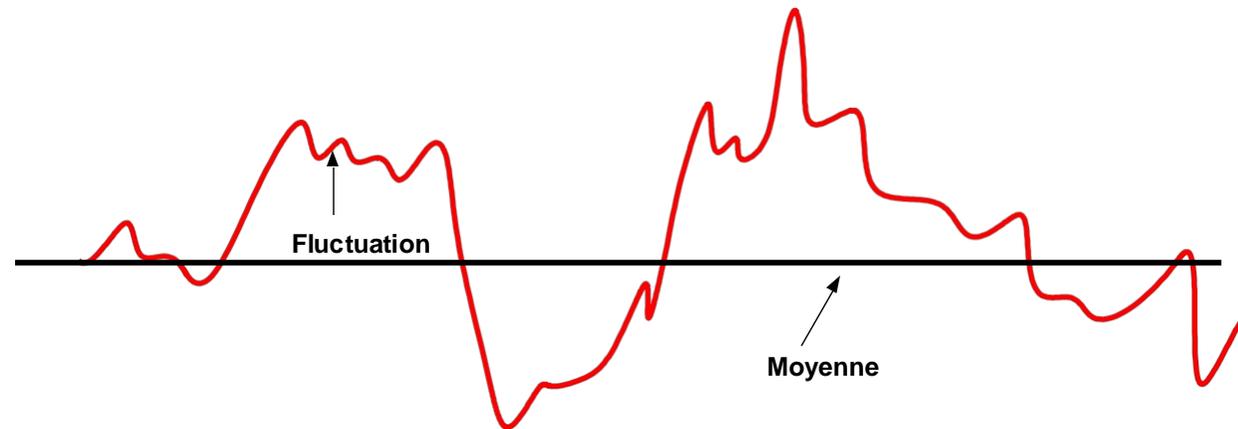
2) La moyenne de toute composante fluctuante est nulle,

$$\overline{x'} = 0$$

3) La moyenne de la somme de deux composantes est additive,

$$\overline{x + y} = \overline{x} + \overline{y}$$

Déduction des moyennes et des fluctuations de la moyenne



$$x' = x - \bar{x}$$

Fonctionnement algébrique du flux, avec décomposition de Reynolds

$$\overline{\rho_a w s} = \overline{(\bar{w} + w')(\bar{s} + s')(\bar{\rho}_a + \rho_a')}$$

8 Termes de la moyenne de Reynolds

$$\overline{(\bar{w} + w')(s + s')(\bar{\rho}_a + \rho_a')}$$

$$\begin{aligned}
& \overline{\rho_a \cdot s \cdot w'} & \overline{\rho_a \cdot w \cdot s} \\
& \overline{\rho_a \cdot w \cdot s'} & \overline{\rho_a \cdot w' s'} \\
& \overline{w' \cdot s' \rho_a'} & \overline{w \cdot s' \cdot \rho_a'} \\
& \overline{s \cdot w \cdot \rho_a'} & \overline{s \cdot w' \cdot \rho_a'}
\end{aligned}$$

**Termes qui vont jusqu'à zéro,
en tant que moyennes des fluctuations égales à zéro par définition**

$$\overline{\overline{\rho_a \cdot w \cdot s'}}$$

$$\overline{\overline{\rho_a \cdot s \cdot w'}}$$

$$\overline{\overline{s \cdot w \cdot \rho_a'}}$$

Les moments triples sont supposés négligeables

$$\overline{w' \cdot s' \rho_a'}$$

Reliquats

$$\overline{\rho_a} \cdot \overline{w' s'}$$

$$\overline{\overline{w \cdot s' \cdot \rho_a'}}$$

$$\overline{\rho_a} \cdot \overline{w} \cdot \overline{s}$$

$$\overline{\overline{s \cdot w' \cdot \rho_a'}}$$

Termes restants

Flux de covariance

$$\overline{\rho_a \cdot w' s'}$$

,

Flux vertical moyen

$$\overline{\rho_a \cdot w \cdot s}$$

,

,

Triple produit

$$\overline{w' \cdot s' \rho_a'}$$

,

Flux d'air sec

$$\overline{s \cdot w' \cdot \rho_a'}$$

$$\overline{w \cdot s' \cdot \rho_a'}$$

Évaluation de la vitesse de dérivation verticale, w

La densité de flux de l'air sec est nulle ;

Le flux de densité de l'air humide est l'évaporation

$$\overline{w\rho_a} = \overline{w'\rho_a'} + \overline{w\rho_a} = 0$$

$$\overline{w} = -\overline{w'\rho_a'} / \overline{\rho_a}$$


$$\overline{\rho_a} \cdot \overline{w} \cdot \overline{S} \quad \text{Annule} \quad \overline{S \cdot w' \cdot \rho_a'}$$

Substitution de

$$\overline{w} = \overline{-w' \rho_a' / \rho_a}$$

dans

$$\overline{\rho_a} \cdot \overline{w} \cdot \overline{s}$$

produit

$$\overline{-s \cdot w' \cdot \rho_a'}$$

Et annule

$$\overline{s \cdot w' \cdot \rho_a'}$$

Les restes incluent les termes de covariance

$$\overline{\rho_a} \cdot \overline{w' s'}$$

$$\overline{\overline{w \cdot s' \cdot \rho_a'}}$$

Substitution de

$$\overline{w} = \overline{-w' \rho_a' / \rho_a}$$

dans

$$\overline{\overline{w \cdot s' \cdot \rho_a'}}$$

$$\overline{-w' \rho_a' \cdot s' \cdot \rho_a'}$$

Moment de 4ème ordre ~ 0

Définition formelle de la covariance de Foucault, V1

$$F = \overline{\rho_a w s} \approx \overline{\rho_a} \cdot \overline{w' s'}$$

Applicable dans des conditions d'état stable, d'homogénéité horizontale, de rapport étendu et à l'intérieur de la couche limite de surface.

Étapes du traitement des données

- Coordonnées de rotation des vecteurs de vent (x,y,z:u,v,w)
- Détourner les séries temporelles et calculer les fluctuations et les covariances
- Appliquer les corrections spectrales
- Appliquer les "corrections" de la fluctuation de la densité
- Respecter les conventions relatives aux noms des unités et des variables
- Test de stationnarité
- Rejeter ou signaler ? Données
- Appliquer les méthodes de comblement des lacunes pour les intégrals journalières et annuelles

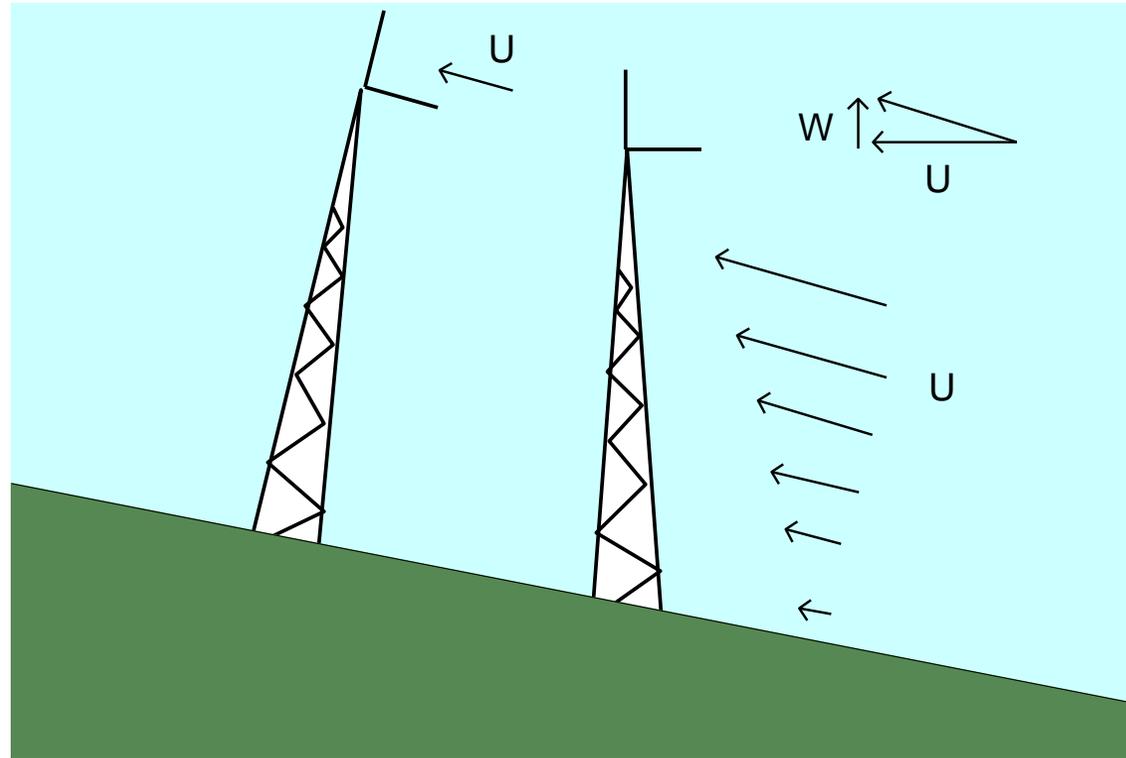
1^{er} Commandement de la covariance de
Foucault : Connaître son site
...et "Connaître ses capteurs"



Ray Leuning

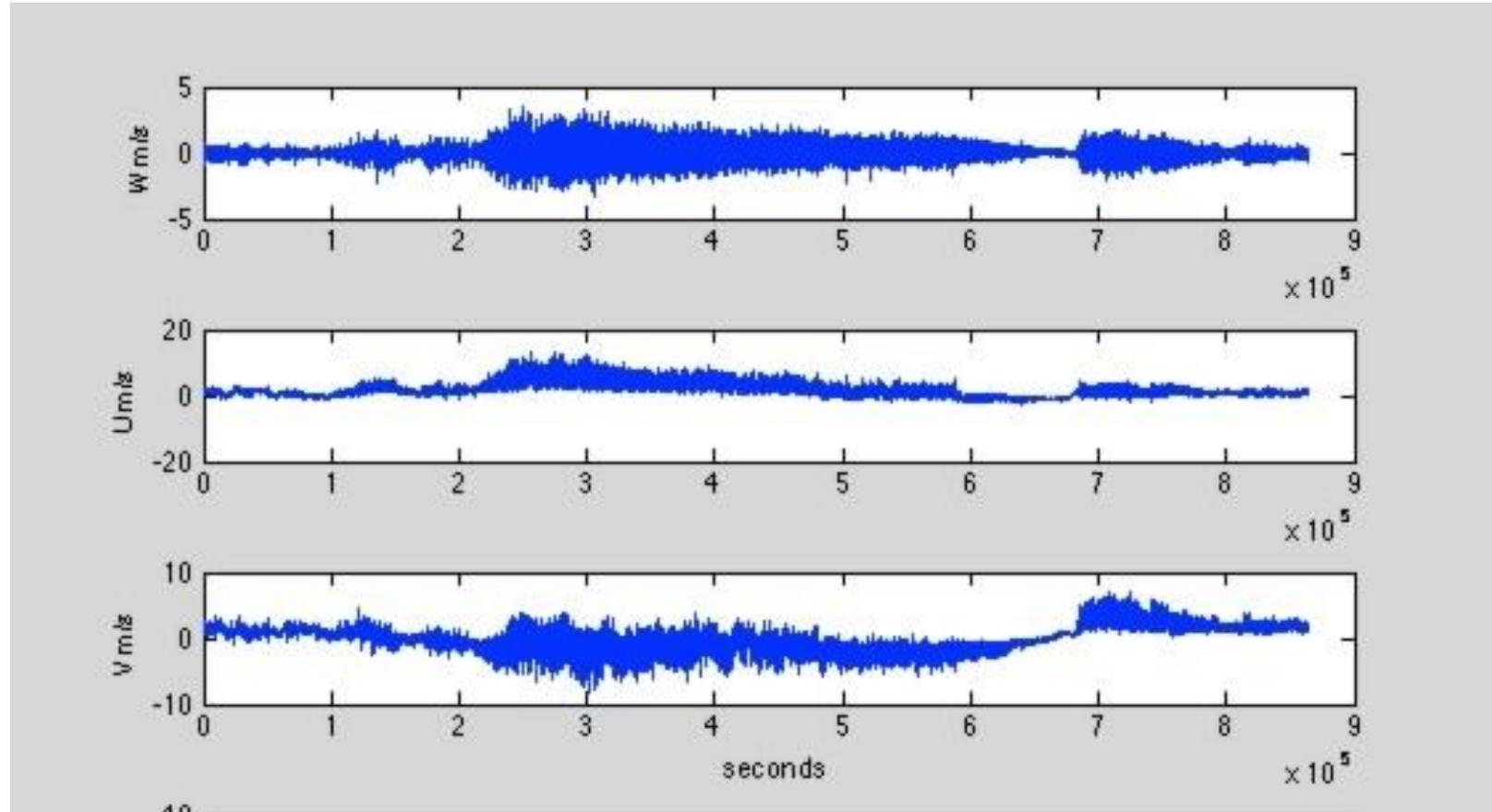
Flux sur des terrains en pente/complexes

Rotation des coordonnées 3D



W est la vitesse verticale moyenne,
Orthogonale aux lignes de courant moyennes

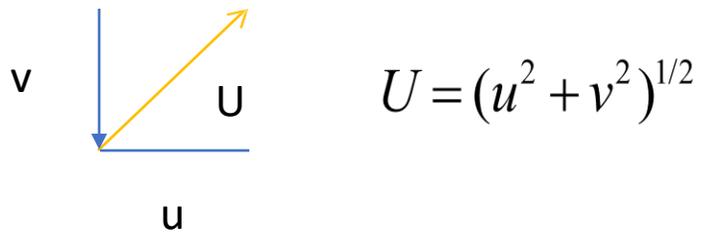
La vitesse verticale est dérivée de la rotation d'un sonique tridimensionnel



Trigonométrie de la rotation des coordonnées

$$\overline{w'c'} = \overline{W'C'}_{raw} \cdot \cos \theta - \overline{U'C'}_{raw} \cdot \sin \theta \cdot \cos \varepsilon - \overline{V'C'}_{raw} \cdot \sin \theta \cdot \sin \varepsilon$$

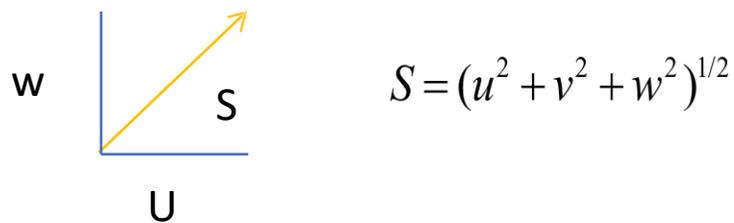
Première rotation, plan X-Y



$$\cos \varepsilon = \frac{u}{(u^2 + v^2)^{1/2}}$$

$$\sin \varepsilon = \frac{v}{(u^2 + v^2)^{1/2}}$$

Deuxième rotation, X-Y vs plan Z



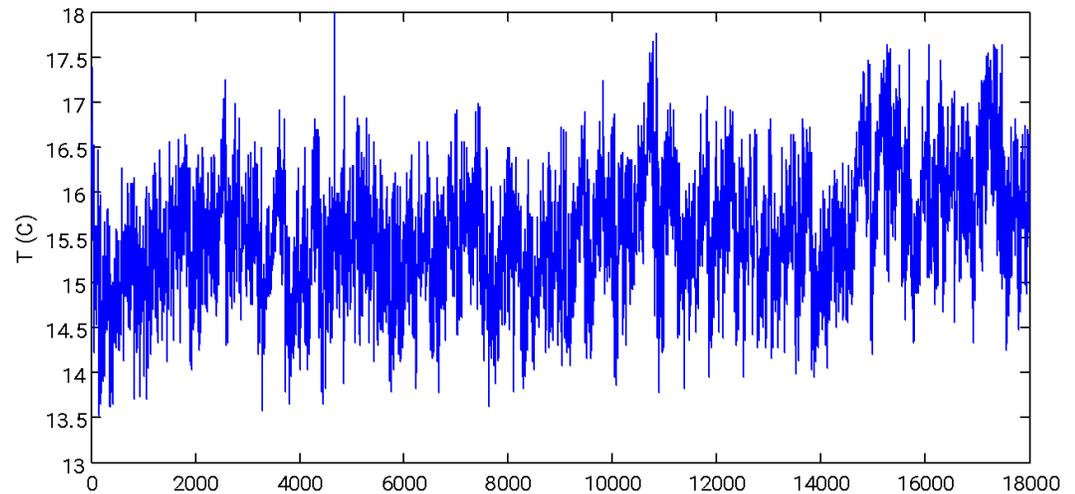
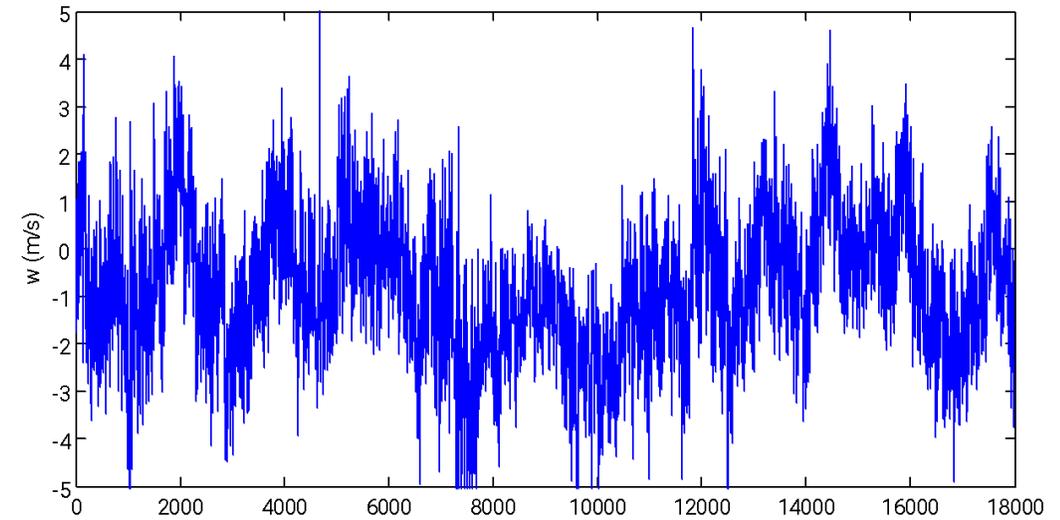
$$\cos \theta = \frac{U}{(u^2 + v^2 + w^2)^{1/2}}$$

$$\sin \theta = \frac{w}{(u^2 + v^2 + w^2)^{1/2}}$$



Marv Wesely
1944-2003

La covariance de Foucault nous oblige à échantillonner assez vite et assez longtemps



30 minutes à 10 Hz

Le spectre de puissance/co-spectre définit les fréquences à échantillonner pour mesurer la variance et la co-variance.

Spectre de puissance

$$\overline{w'w'} = \int_0^{\infty} S_{ww}(\omega) d\omega$$

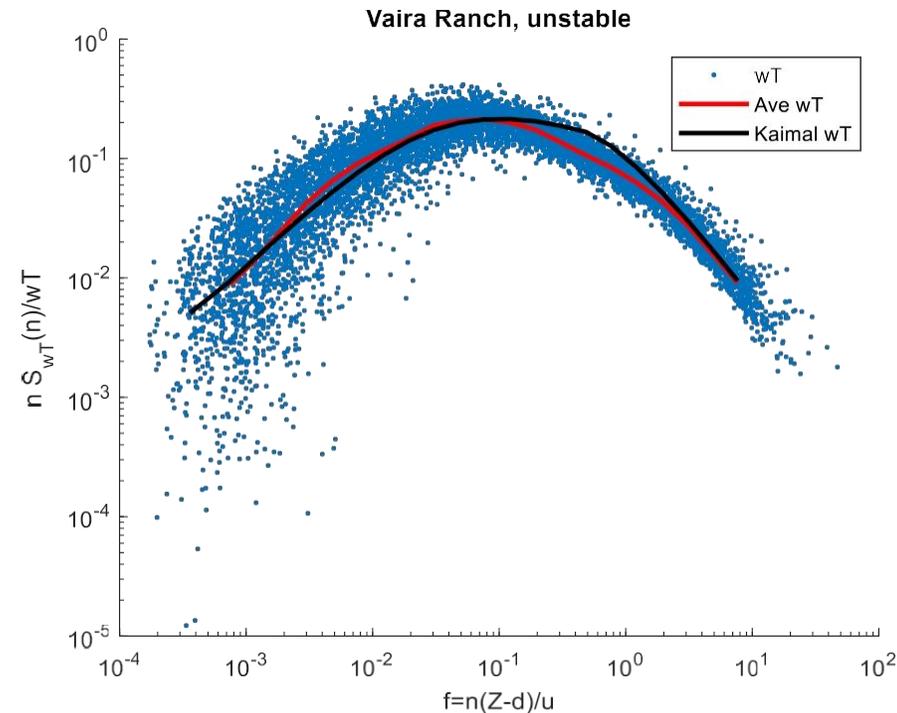
Co-spectre

$$F = \overline{w'c'} = \int_0^{\infty} S_{wc}(\omega) d\omega$$

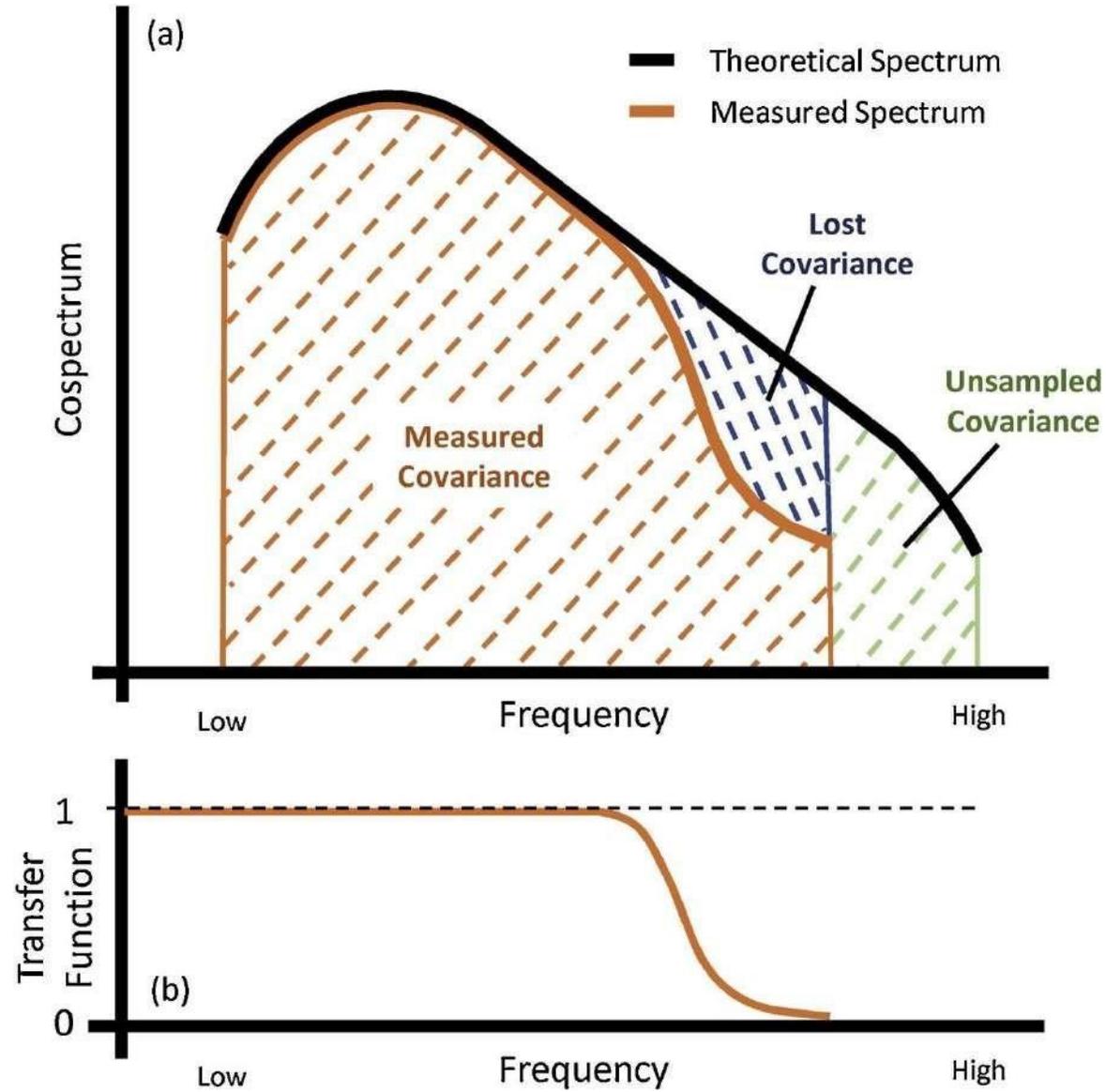


Transformée de Fourier

Quelle est la durée de l'échantillonnage ? Quelle est la vitesse de l'échantillonnage ?
Nous devons échantillonner les tourbillons jusqu'à 20 fois par seconde pendant 30 à 60 minutes



Puissance et co-spectres des séries temporelles : Transformations de Fourier ou en ondelettes



Appliquer les fonctions de transfert pour corriger les flux

$$\overline{w'c'}_{measured} = \int_0^{\infty} H(\omega) Co_{wc}(\omega) d\omega$$

Fonctions de filtrage

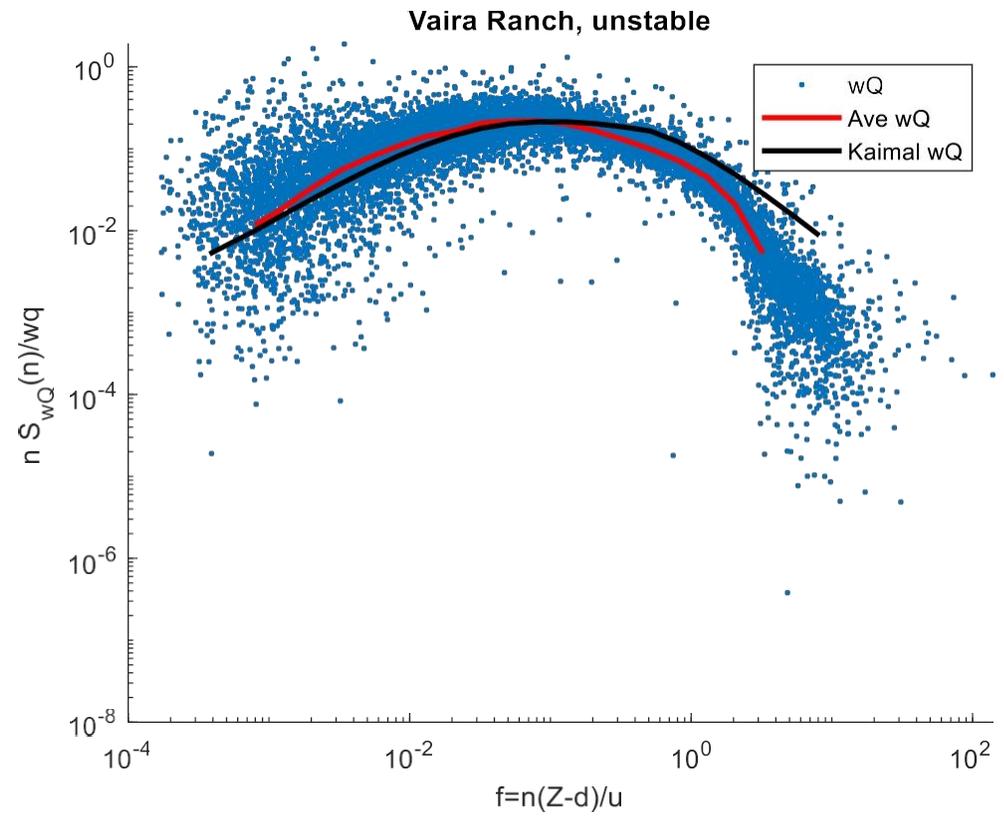
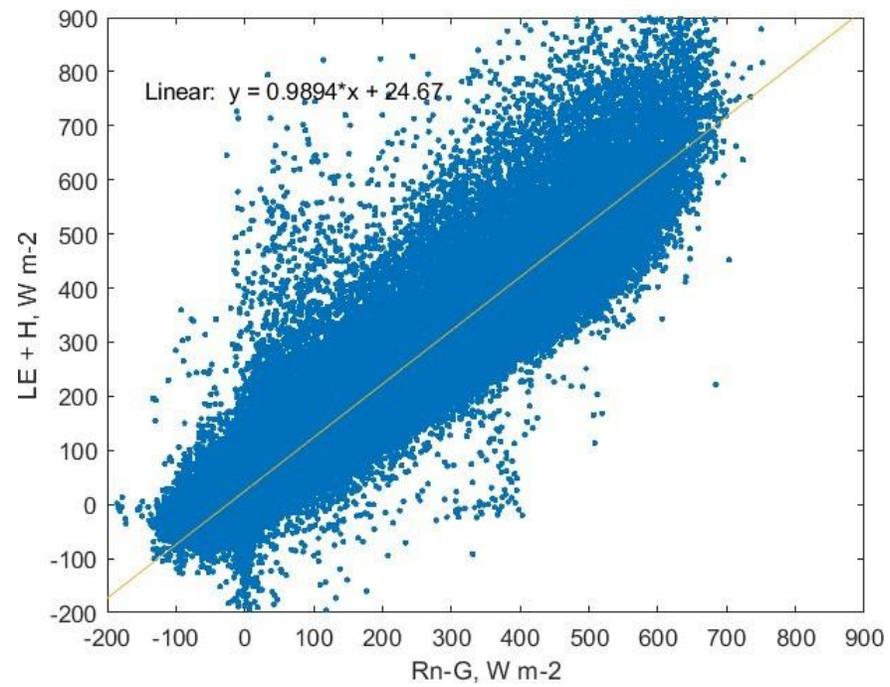
$$H(\omega) = H_1(\omega)H_2(\omega)\dots H_n(\omega) = \prod_{n=1}^N H_n(\omega)$$

Moore, 1986 BLM

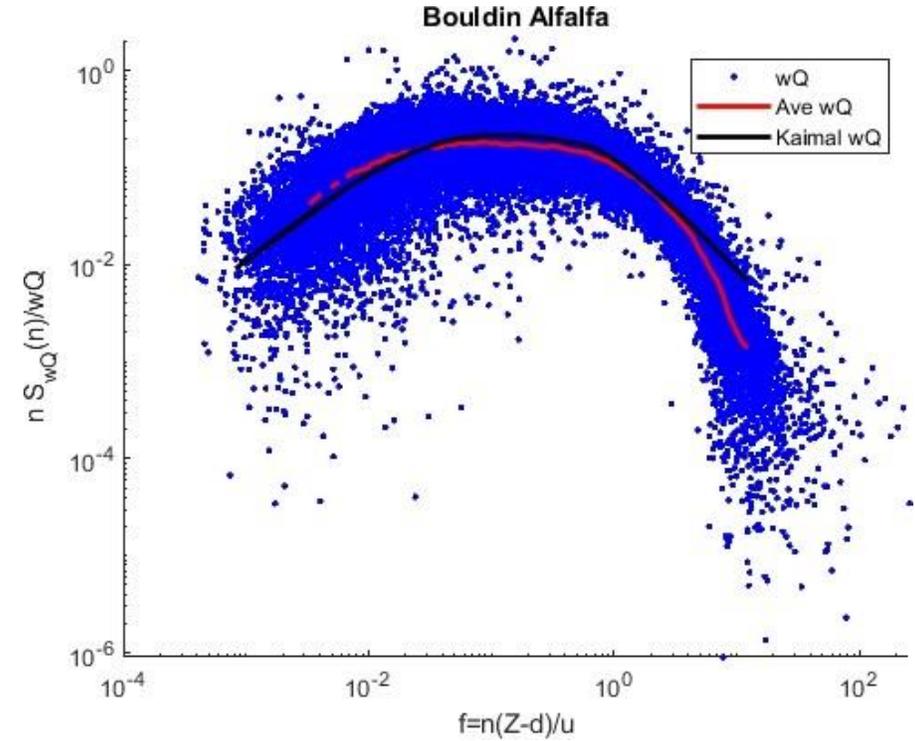
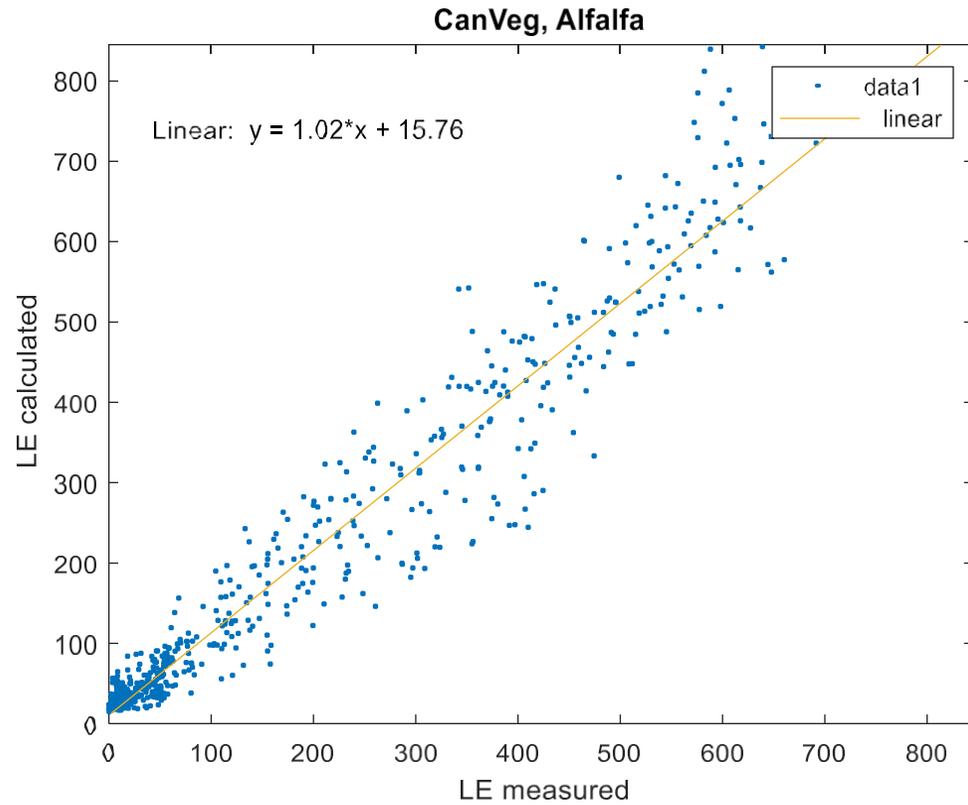
Atténuation du signal :

Le rôle des fonctions de filtrage

- Temps de réponse du capteur
- Capteur d'atténuation du signal
 - Longueur du tube et débit volumétrique
 - Ligne de capteur ou moyenne de volume
- Séparation des capteurs
 - Délais d'attente et d'exécution entre w et c
- Filtrage passe-haut et passe-bas par élimination de la moyenne
 - Taux d'échantillonnage (1-10Hz) et durée de calcul de la moyenne (30-60 min)
- Échantillonnage numérique et alias

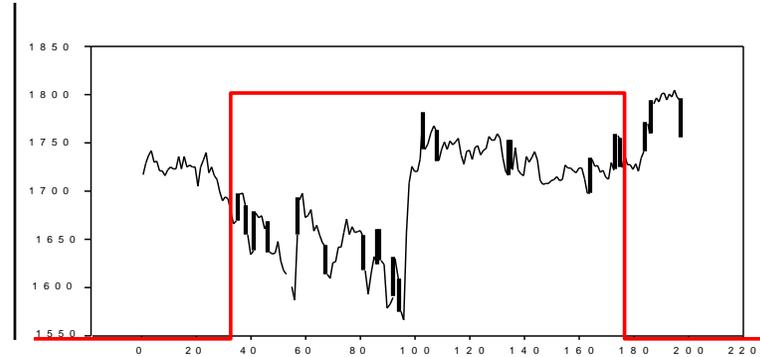


Fonction de transfert, 0.76



Filtrage par moyenne de blocs

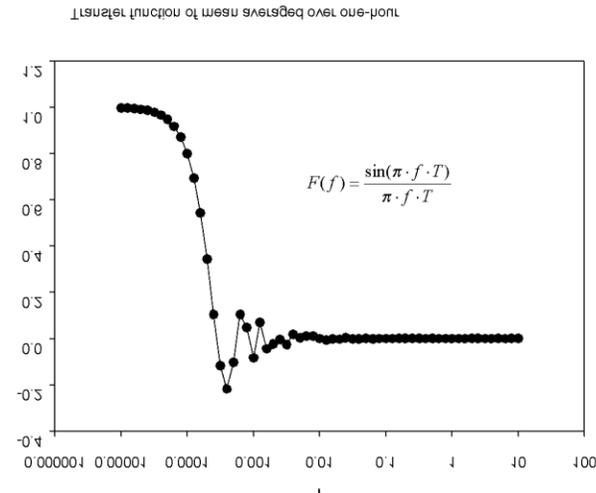
$$h(t) = 0, \quad -\frac{T}{2} < t > \frac{T}{2}$$



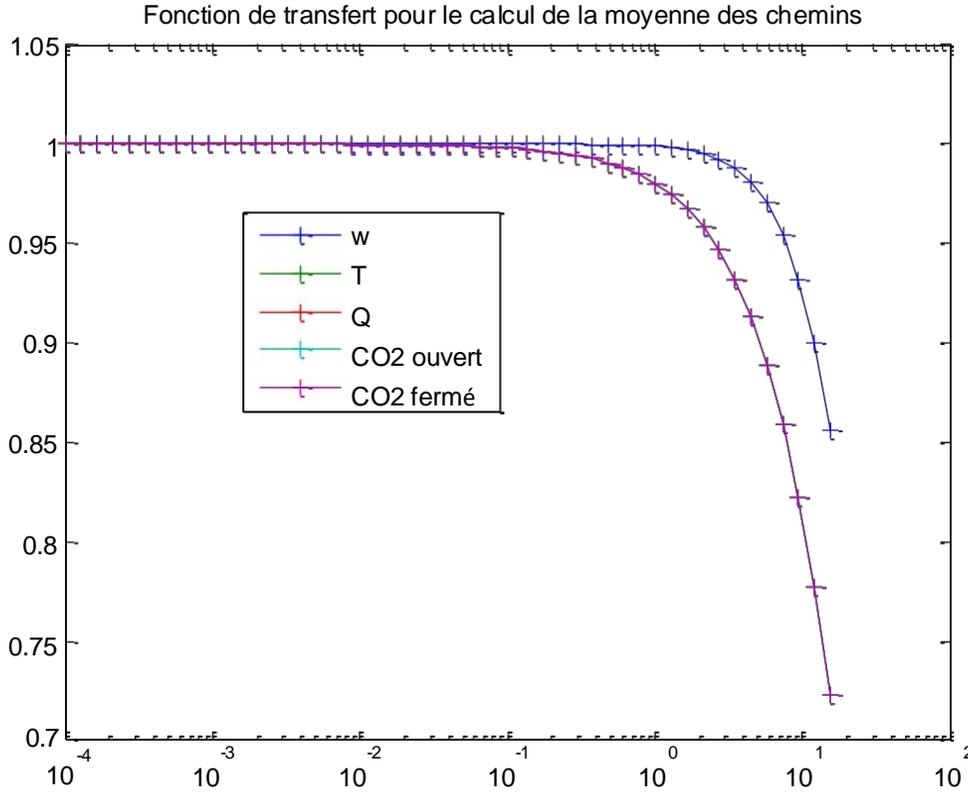
$$h(t) = 1, \quad -\frac{T}{2} > t < \frac{T}{2}$$

La transformée de Fourier d'une moyenne par bloc produit un filtrage passe-bas sinusoidal

$$F(f) = \frac{\sin(\pi \cdot f \cdot T)}{\pi \cdot f \cdot T}$$



Fonction de transfert pour le calcul de la moyenne de la trajectoire

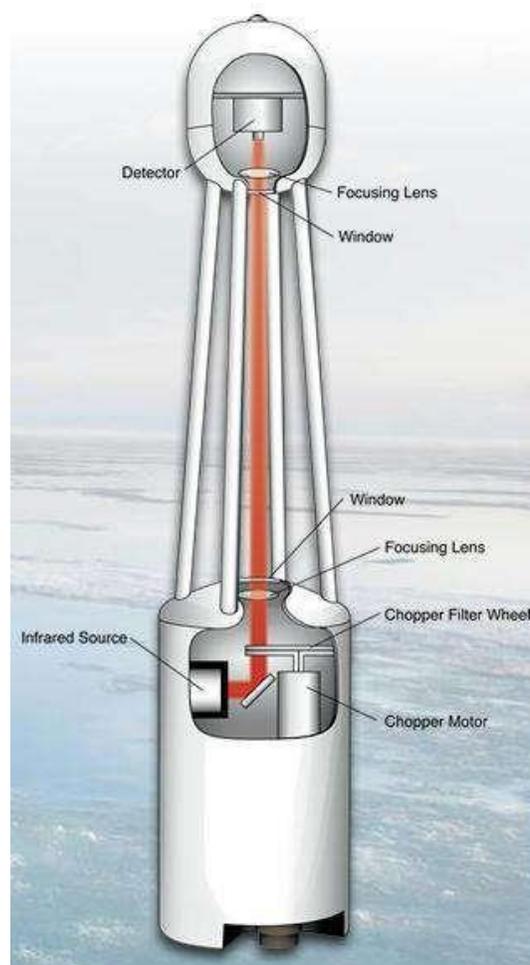


Définition formelle de la covariance de Foucault, V2

$$F = \overline{\rho_a w s} \approx \overline{\rho_a} \cdot \overline{w' s'} = \overline{w \rho_c} = \overline{w' \rho_c'} + \overline{w \rho_c}$$

De nombreux capteurs mesurent la densité molaire et non le rapport de mélange ;
par exemple, les spectromètres infrarouges qui déduisent la densité molaire
de la transmission de la lumière à travers un
trajet optique

Analyseur de CO₂/H₂O à voie ouverte populaire pour la covariance de Foucault



Mais les capteurs ne mesurent pas le rapport de mélange, ils mesurent la densité molaire

$$F = \overline{w\rho_c} = \overline{w'\rho_c'} + \overline{w\rho_c}$$

$$\overline{w} = -\overline{w'\rho_a'} / \overline{\rho_a}$$

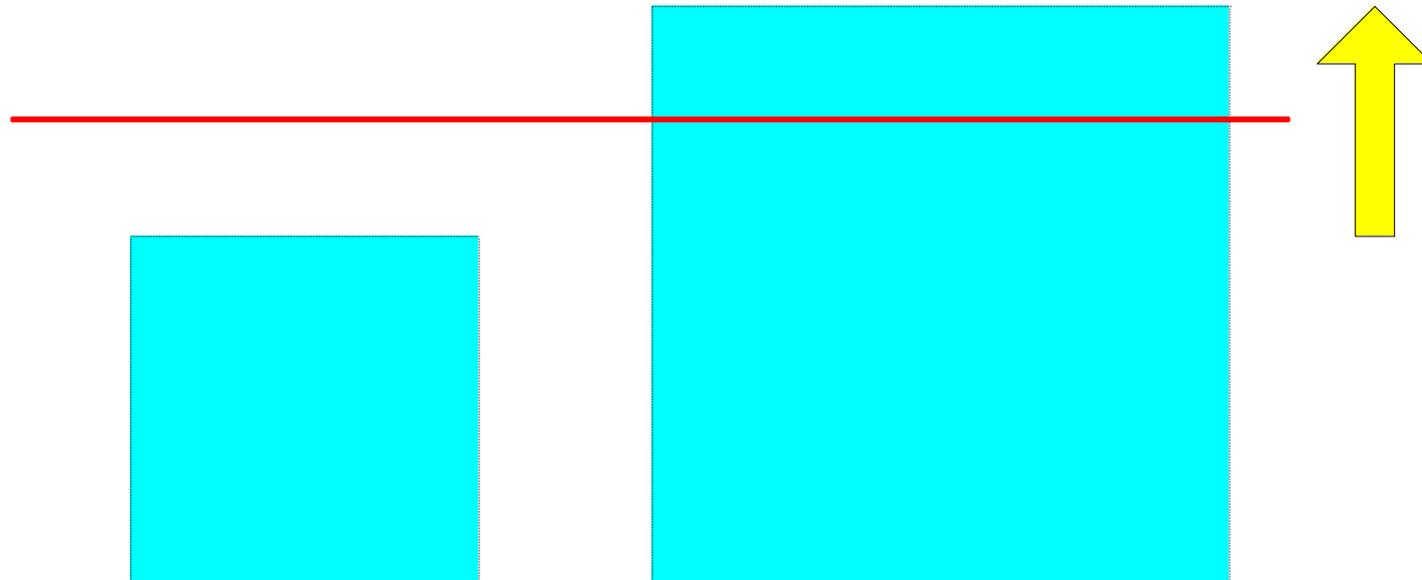
Hypothèse de 1er ordre, Approximation de Boussinesq

$$\frac{\overline{\rho_a'}}{\overline{\rho_a}} = -\frac{\overline{T'}}{\overline{T}}$$

$$F = \overline{w'\rho_c'} + \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{T}} \overline{w'T'}$$

**La densité molaire change si plus de molécules sont emballées dans un volume ou si le volume s'agrandit
Ou se contracte par la température et l'humidité**

$$dV/A = dz ; w = dz/dt$$



"Correction" pour l'air humide

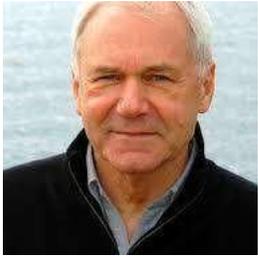
$$\frac{\rho}{m} = \frac{\rho_a}{m_a} + \frac{\rho_v}{m_v} = \frac{p}{RT}$$

$$\frac{\rho_a'}{m_a} + \frac{\rho_v'}{m_v} = -\frac{p}{RT} \frac{T'}{\bar{T}} + \dots$$

Extension de la série Taylor

$$\rho_a' = -\frac{m_a}{m_v} \rho_v' - \overline{\rho_a} \left(1 + \frac{\overline{\rho_v m_a}}{\overline{\rho_a m_v}}\right) \frac{T'}{\bar{T}}$$

$$\overline{w} = -\overline{w' \rho_a'} / \overline{\rho_a} = \frac{m_a}{m_v} \frac{\overline{w' \rho_v'}}{\overline{\rho_a}} + \left(1 + \frac{\overline{\rho_v m_a}}{\overline{\rho_a m_v}}\right) \frac{\overline{w' T'}}{\bar{T}}$$



Algorithme de Webb, Pearman, Leuning :
"Correction" pour les fluctuations de densité
lorsque l'utilisation de capteurs à chemin ouvert



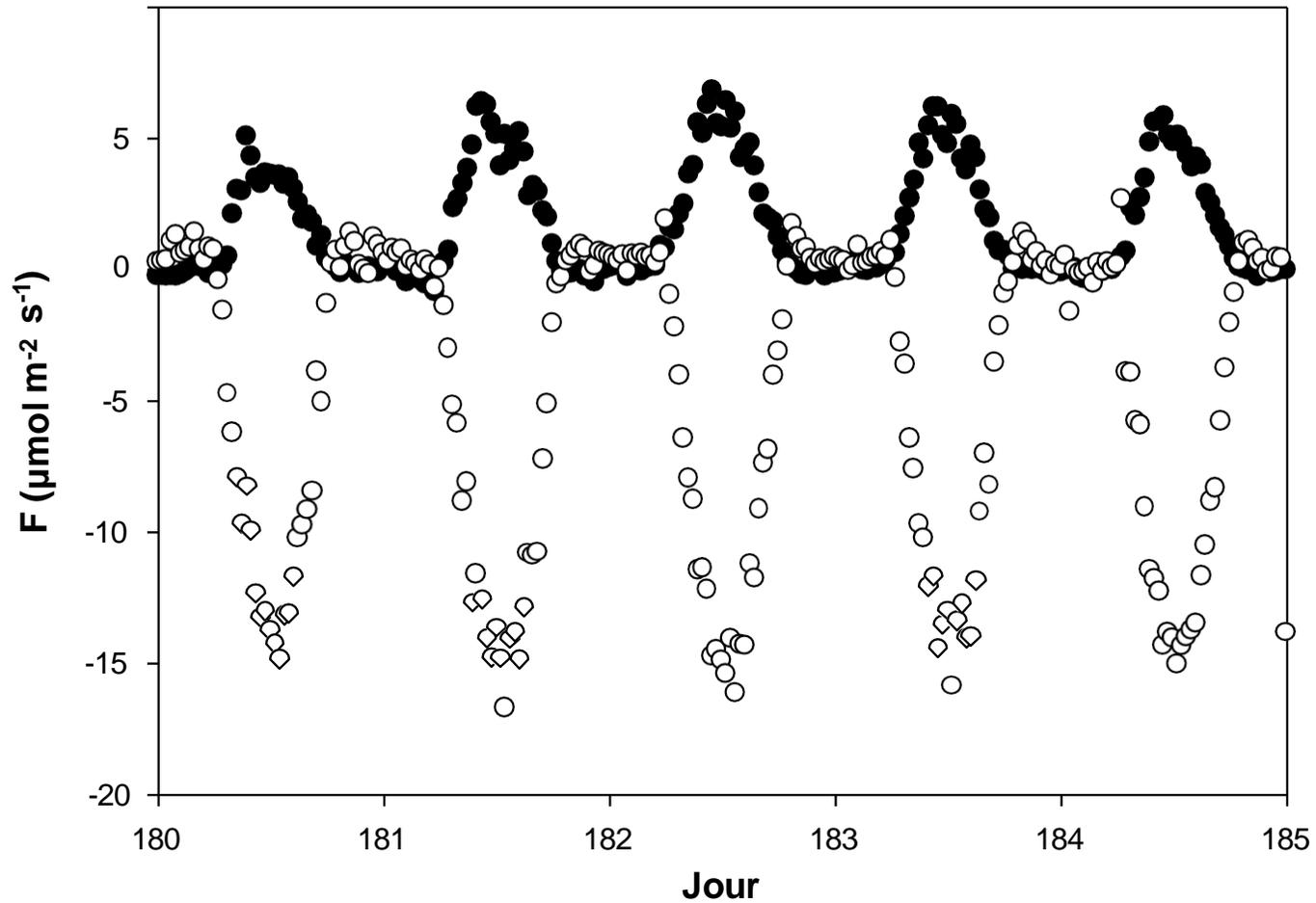
$$F_c = \overline{w' \rho_c'} + \frac{m_a}{m_v} \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{\rho_a}} \overline{w' \rho_v'} + \left(1 + \frac{\overline{\rho_v m_a}}{\overline{\rho_a m_v}}\right) \frac{\overline{\rho_c}}{\overline{T}} \overline{w' T'}$$



À se rappeler : Mesurer les covariances de la vapeur d'eau et de la température à l'aide de la Vitesse Verticale pour "corriger" la covariance du flux de CO2 brut en cas d'utilisation de capteurs à trajectoire ouverte.

Prairies annuelles
mortes

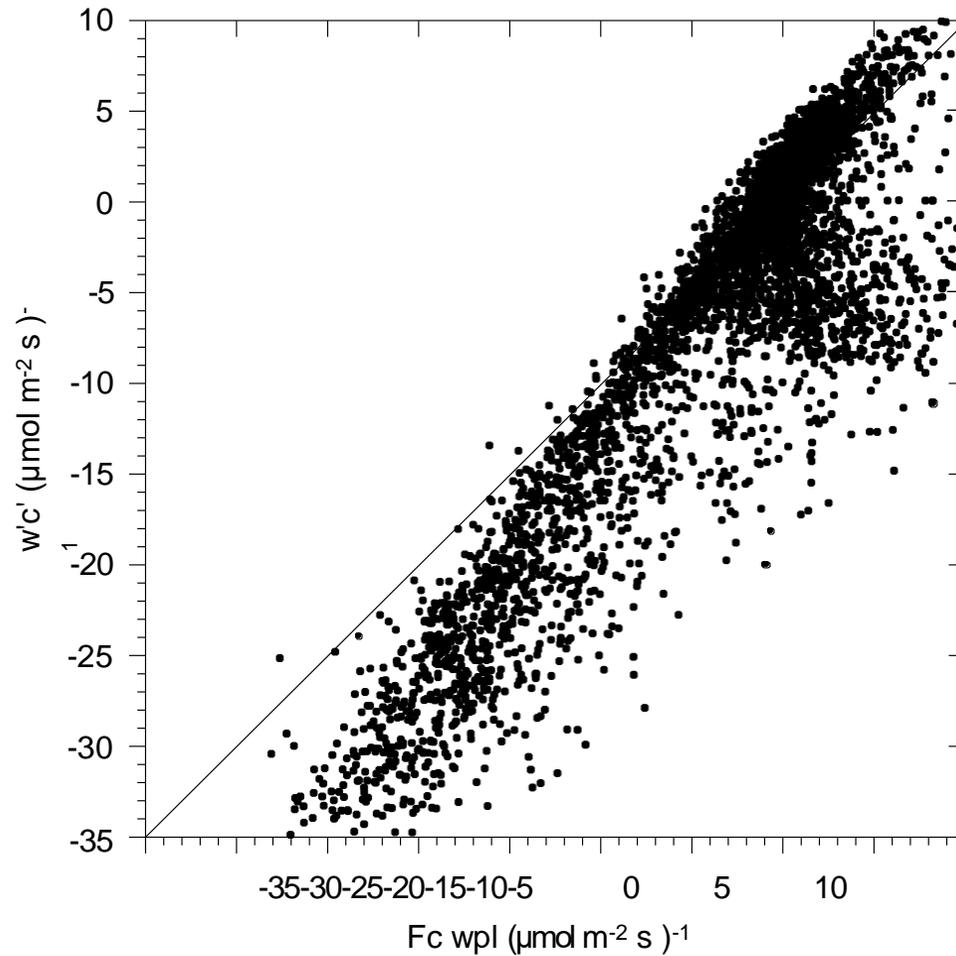
● F_{wpl}
○ $\langle w'\rho_c' \rangle$



L'herbe morte ne
font pas la
photosynthèse

Forêt tempérée, environnement humide

SEMAINE MONDIALE DE LA BICYCLETTE (WBW) 1996

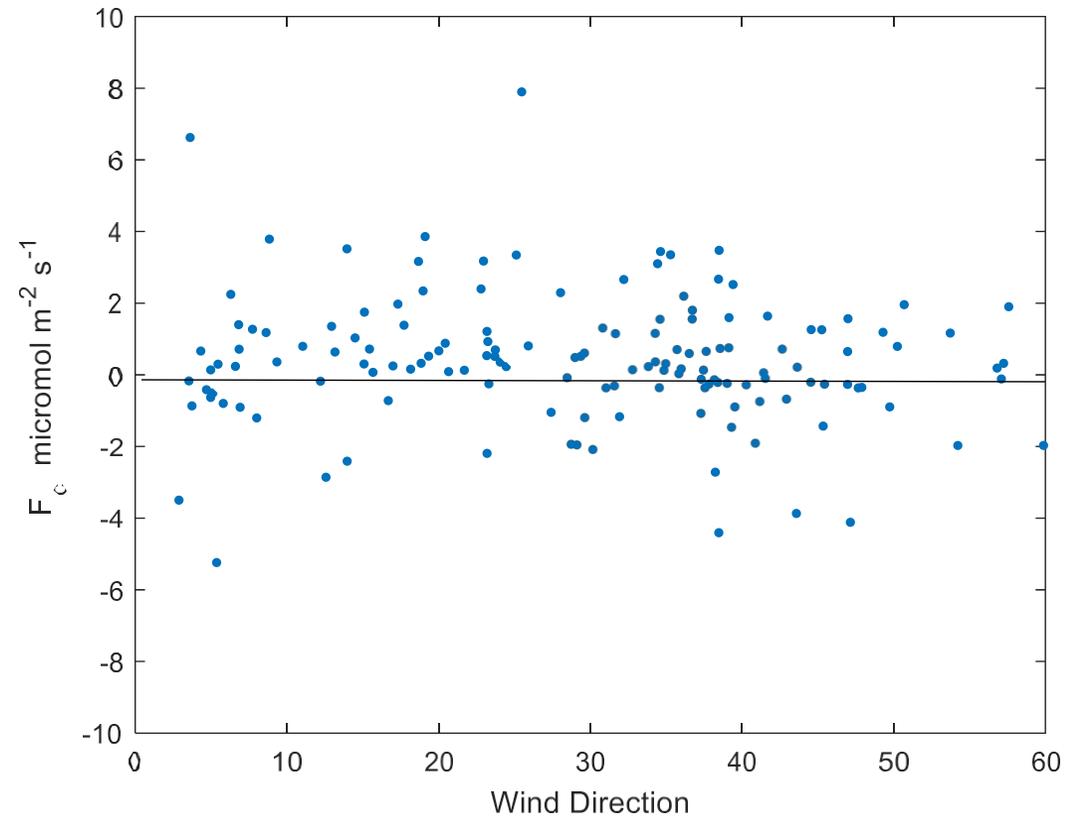


Il ne faut pas mesurer la photosynthèse la nuit lorsque la respiration est réelle

Test du WPL à Moffett Field, NASA-Ames



$$F_c (\text{dir vent } 0 | 60) = 0,375 \pm 0,129 (\text{se})$$

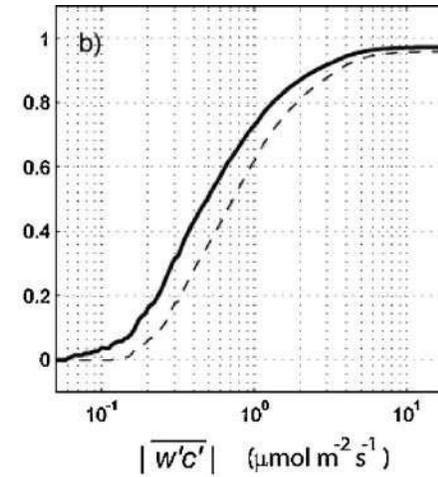
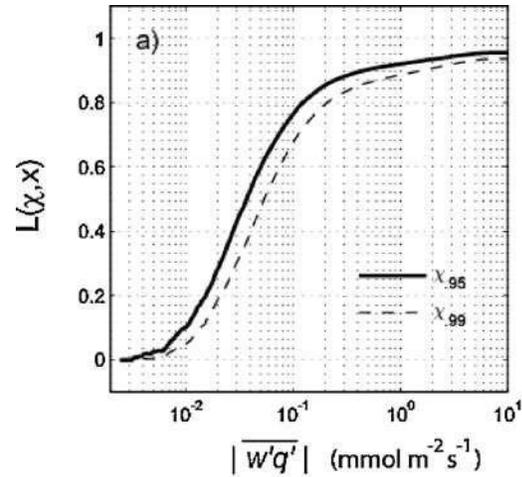


Limite de détection du flux

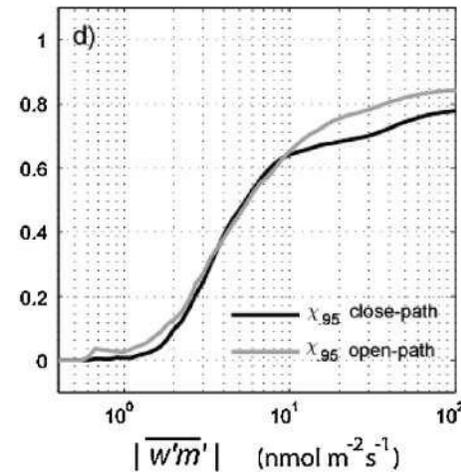
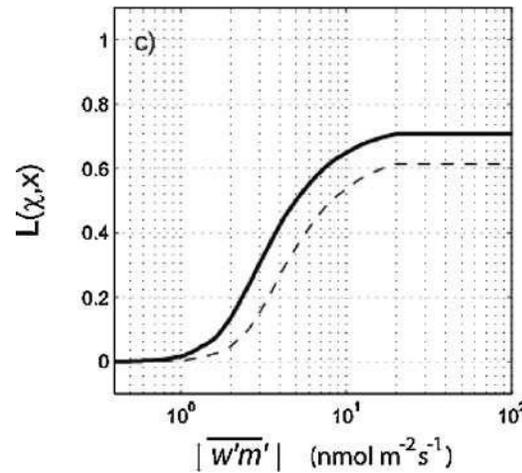
M. Detto et al. / Agricultural and Forest Meteorology 151 (2011) 1312–1324

1

$\langle w'q' \rangle$
 $> 0,035 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$



$\langle w'c' \rangle$
 $0,31 \text{ μmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$



$\langle w'm' \rangle$
 $3,85 \text{ nmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$

Enfreindre les règles : Assurance et contrôle de la qualité



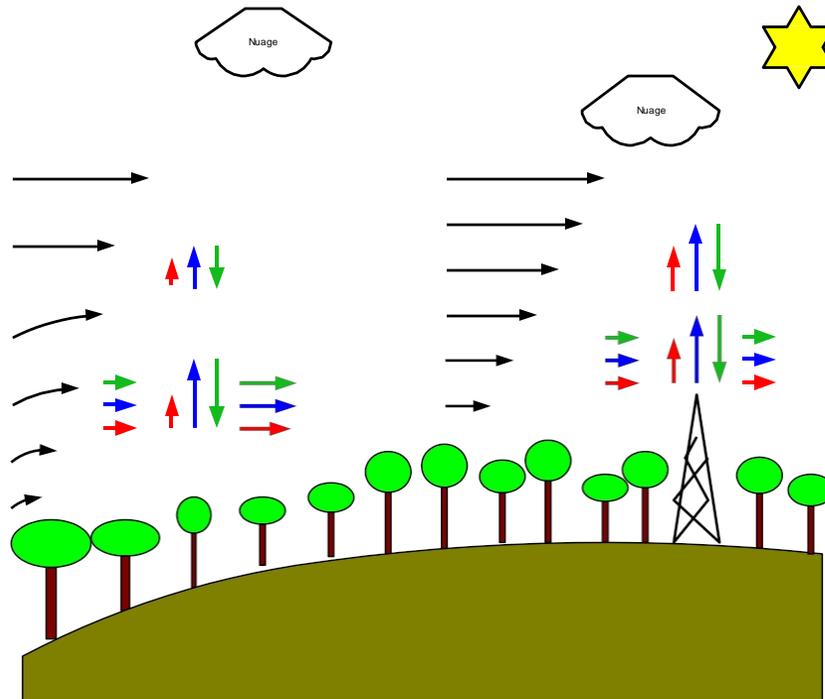
**Le monde réel n'est pas le Kansas,
qui est plus plat qu'une crêpe**

Le monde réel n'offre pas la possibilité d'une recherche infinie

Le monde réel est une mosaïque de sources et de puits

Le monde réel ne connaît pas de turbulences régulières et bien mélangées

La covariance de Foucault dans le monde réel



La couche à flux constant suppose PAS de divergence des flux

L'advection peut entraîner une divergence des flux

Drainage et découplage des flux

Zones humides, qui par nature, sont PLATS, mais dont les sources sont hétérogènes

Erreurs systématiques et aléatoires

- Absence de rapport/biais spatiaux
- Changement dans le stockage
- Advection/Flux de divergence
- Correction de U^* pour l'absence de mélange turbulent adéquat pendant la nuit
- Mauvaise performance du capteur
 - Dérive de l'étalonnage (pente et interception), pointes/bruit, hors-gamme a/d
 - Filtrage et signalisation des signaux
- Test d'équilibre énergétique Fermeture
- Erreurs de traitement des logiciels
- Lacunes et comblement des lacunes

Idéal, en régime permanent, avec un rapport infini, sans advection

$$0 = -\overline{\rho_a} \frac{\partial \overline{w'c'}}{\partial z} + S_B(z)$$

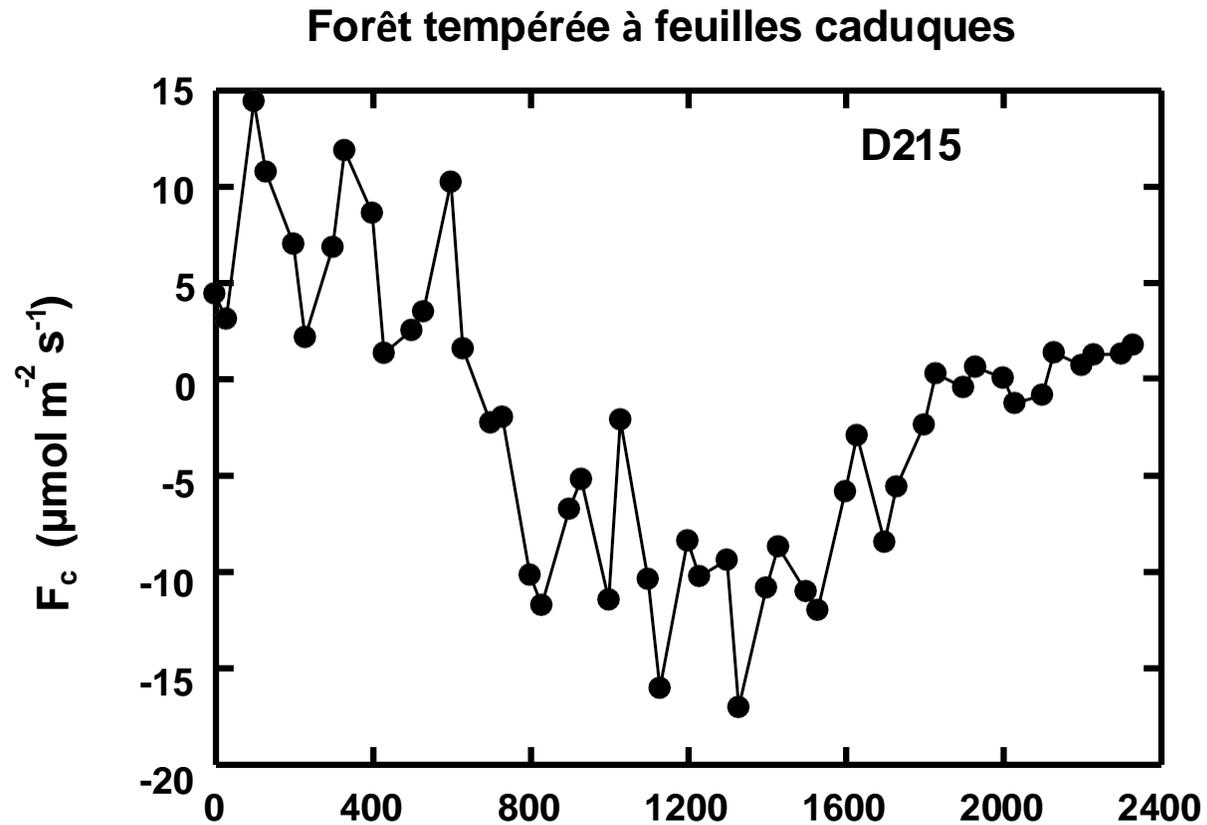
Intégrer et définir la couche à flux constant

$$F = \overline{\rho_a w'c'(h)} = \overline{\rho_a w'c'(0)} + \int_0^h S(z) dz$$

Sol

Vegetation

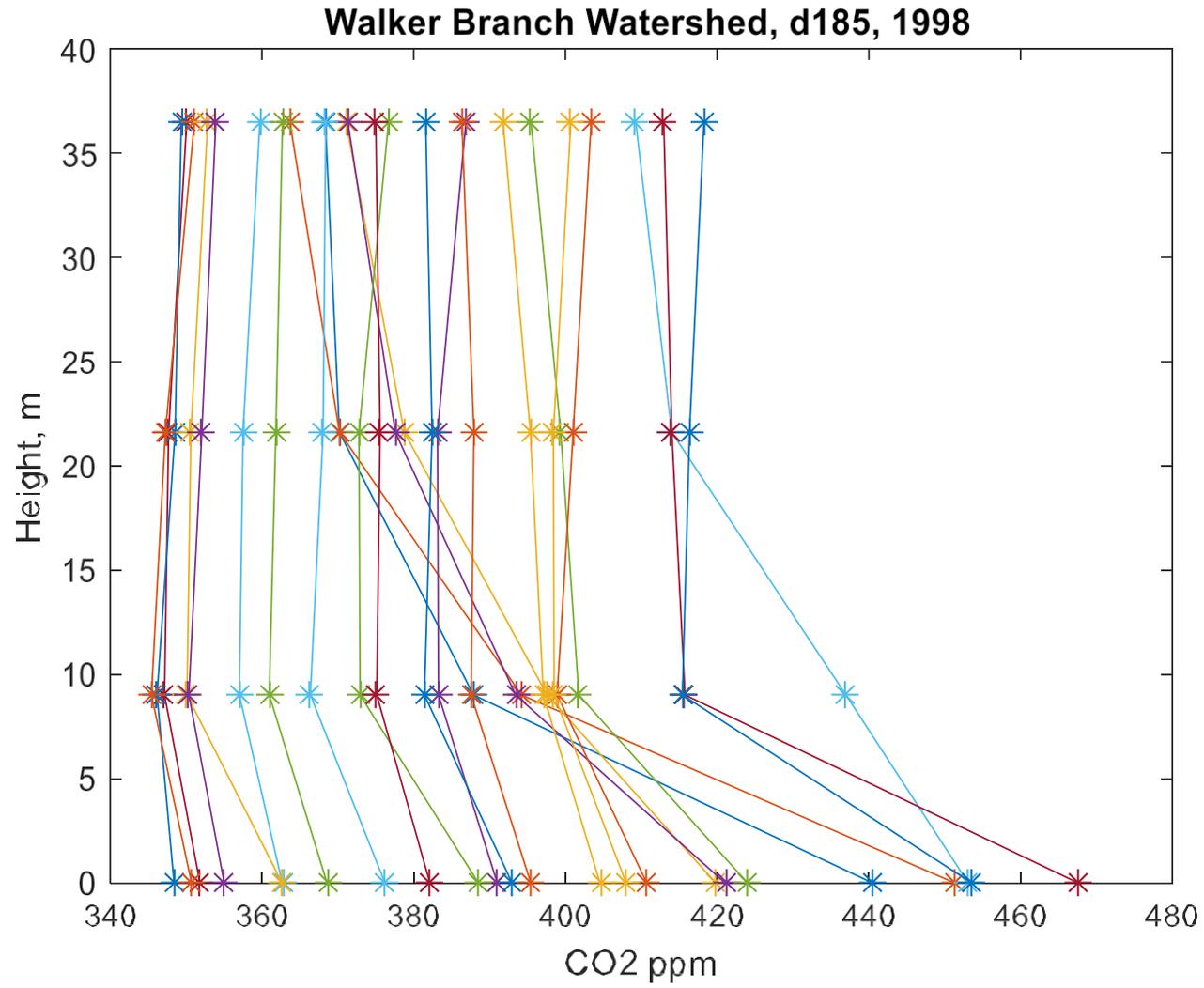
Tous les flux C ne sont pas ce qu'ils semblent être : Oscillations nocturnes, flux non-biologiques



Stockage en couche d'air, comme la nuit

$$\overline{\rho_a w' s'(h)} + \overline{\rho_a \int_0^h \frac{\partial s}{\partial t} dz} = \overline{\rho_a w' s'(0)} + \int_0^h S(z) dz$$

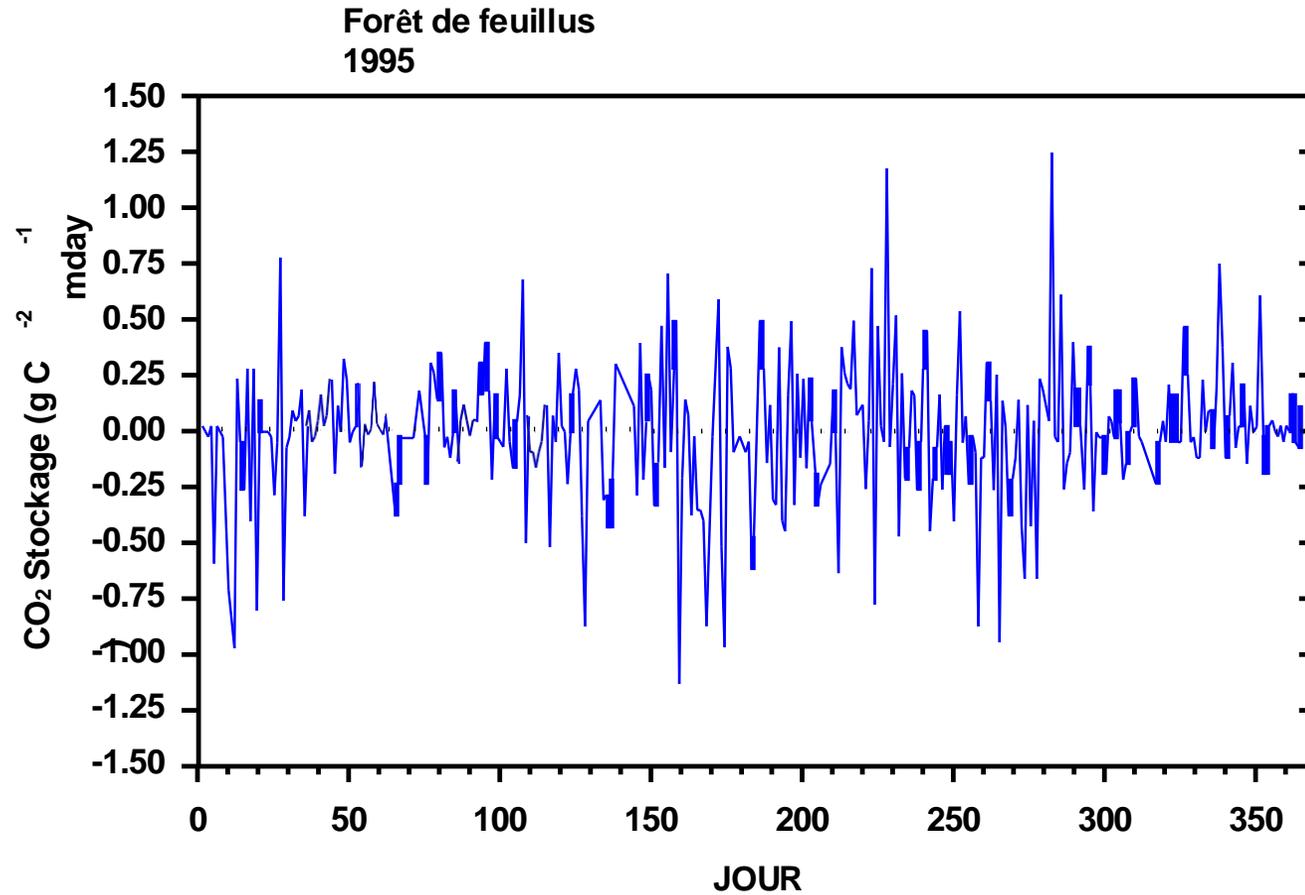
Nécessité de mesurer la variation du carbone en fonction du temps dans le profil allant du sol au capteur



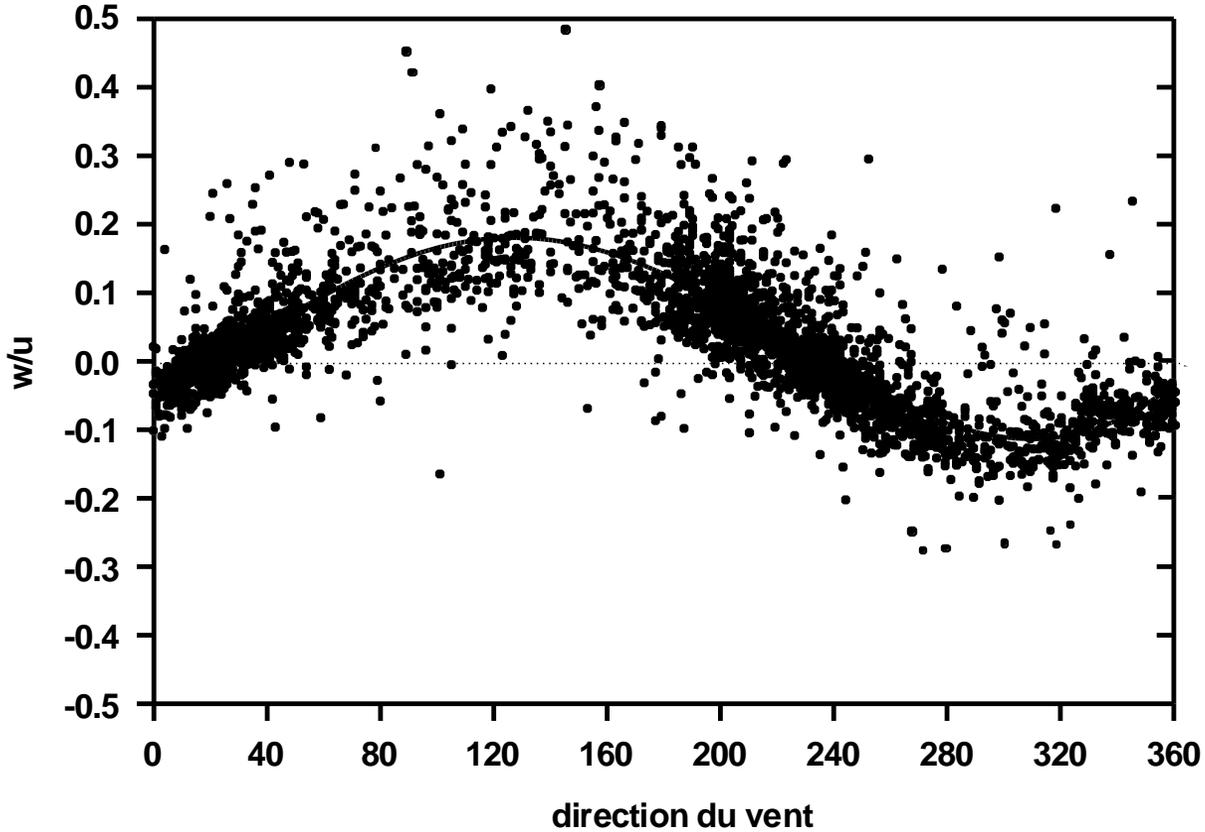
$$\overline{\rho_a} \int_0^h \frac{\partial s}{\partial t} dz$$

La durée de stockage du CO₂ est faible à l'échelle quotidienne et annuelle

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial z}$$



Ajustement planaire : Terrain vallonné



Effet du terrain sur w et u , Oak Ridge, TN

La moyenne mesurée w est fonction d'une composante aléatoire, w_r , et la composante terrain, w_t

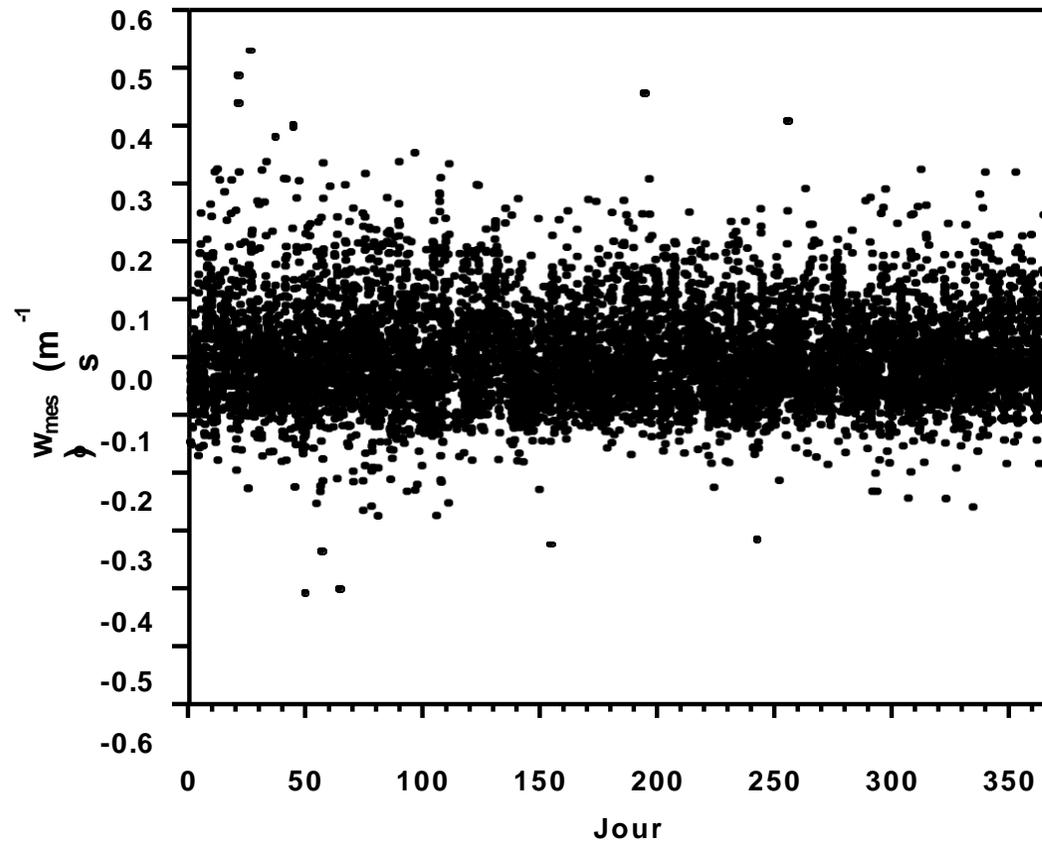
$$\overline{w_m} = \overline{w_r} + \overline{w_T}$$

La vitesse induite par le terrain, w , peut être calculée comme suit avec un ajustement planaire à u_m et v_m

$$\overline{w_T} = b_0 + b_1 \overline{u_m} + b_2 \overline{v_m}$$

Mésoéchelle w qui est tournée à zéro

$$\overline{w_r} = \overline{w_m} - \overline{w_T}$$

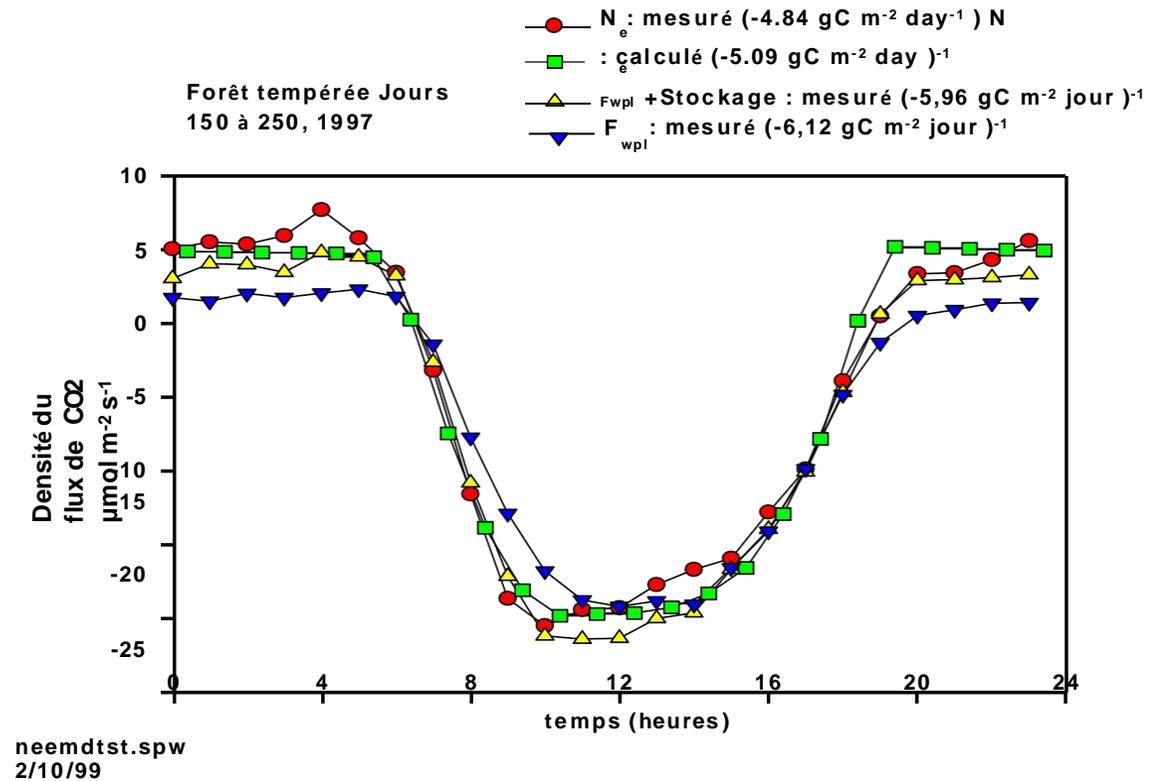


Utilisation des informations w_r

$$\begin{aligned} \text{NEE} &\equiv \int_0^{z_r} s dz + (\overline{w'c'})|_{z=0} \\ &= \int_0^{z_r} \frac{\partial \bar{c}}{\partial t} dz + (\overline{w'c'})_r + \bar{w}_r(\bar{c}_r - \langle \bar{c} \rangle) \end{aligned}$$

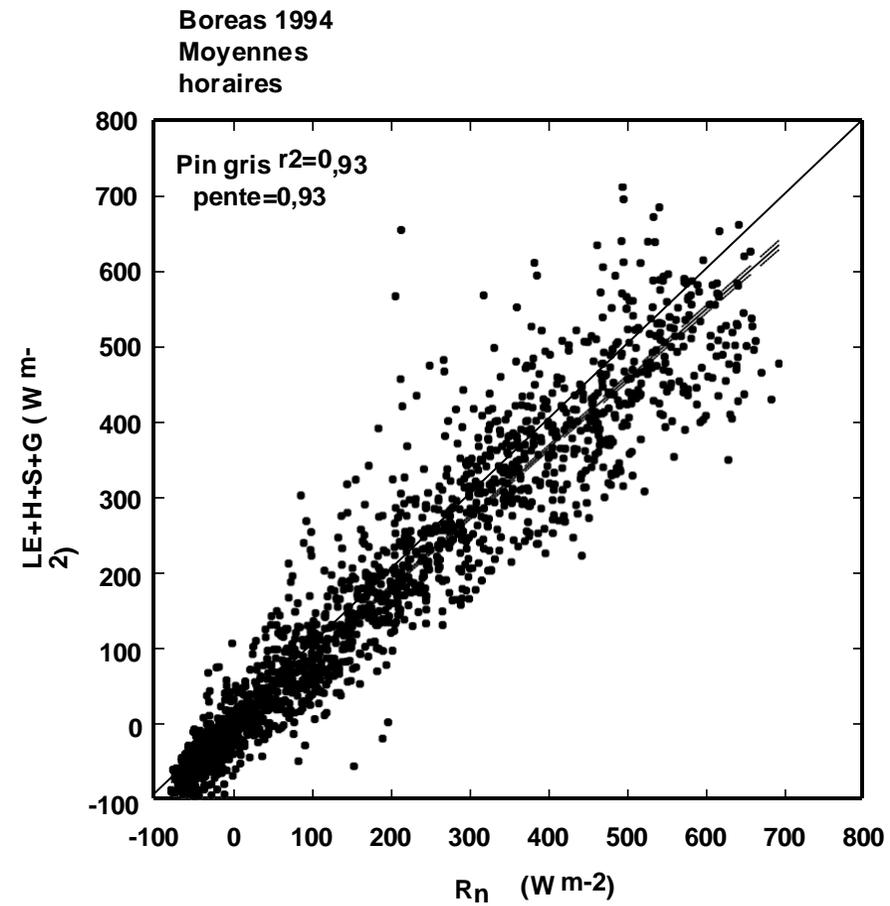
Amélioration des statistiques d'échantillonnage et du stockage

$$\frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial F}{\partial z}$$



Baldocchi et al 2000 BLM

Diagnostiquer les erreurs :
Test de clôture de l'équilibre énergétique





Agricultural and Forest Meteorology 113 (2002) 223–243

AGRICULTURAL
AND
FOREST
METEOROLOGY

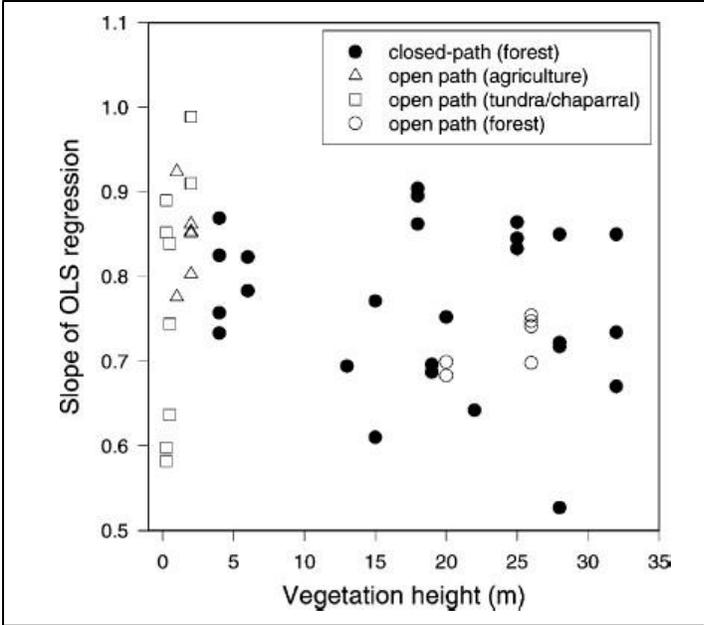
www.elsevier.com/locate/agrformet

Energy balance closure at FLUXNET sites

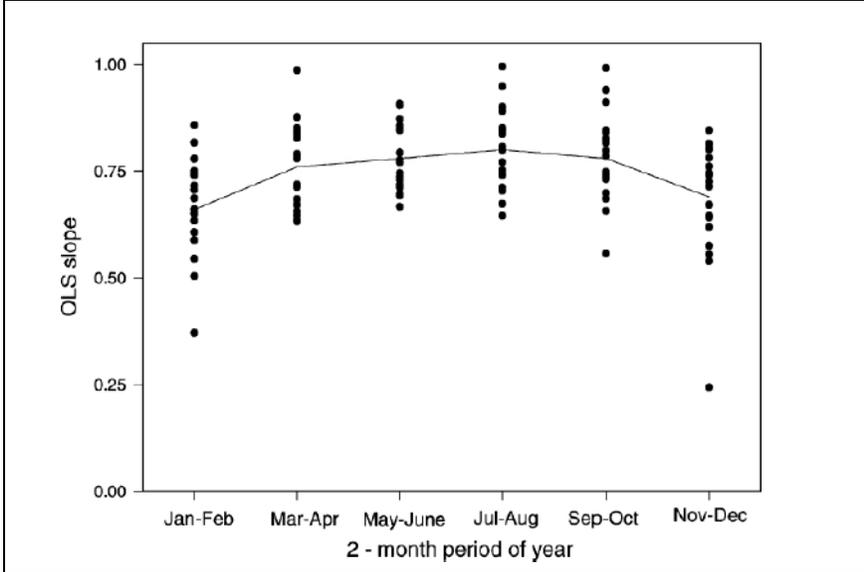
Kell Wilson^a, Allen Goldstein^b, Eva Falge^c, Marc Aubinet^d, Dennis Baldocchi^{b,*},
Paul Berbigier^e, Christian Bernhofer^f, Reinhart Ceulemans^g, Han Dolman^h,
Chris Fieldⁱ, Achim Grelle^j, Andreas Ibrom^k, B.E. Law^l, Andy Kowalski^g,
Tilden Meyers^a, John Moncrieff^m, Russ Monsonⁿ, Walter Oechel^o, John Tenhunen^c,
Riccardo Valentini^p, Shashi Verma^q

Existe-t-il un problème de clôture de l'équilibre énergétique ? Preuves tirées de FLUXNET

Instrument/Rugosité de la canopée

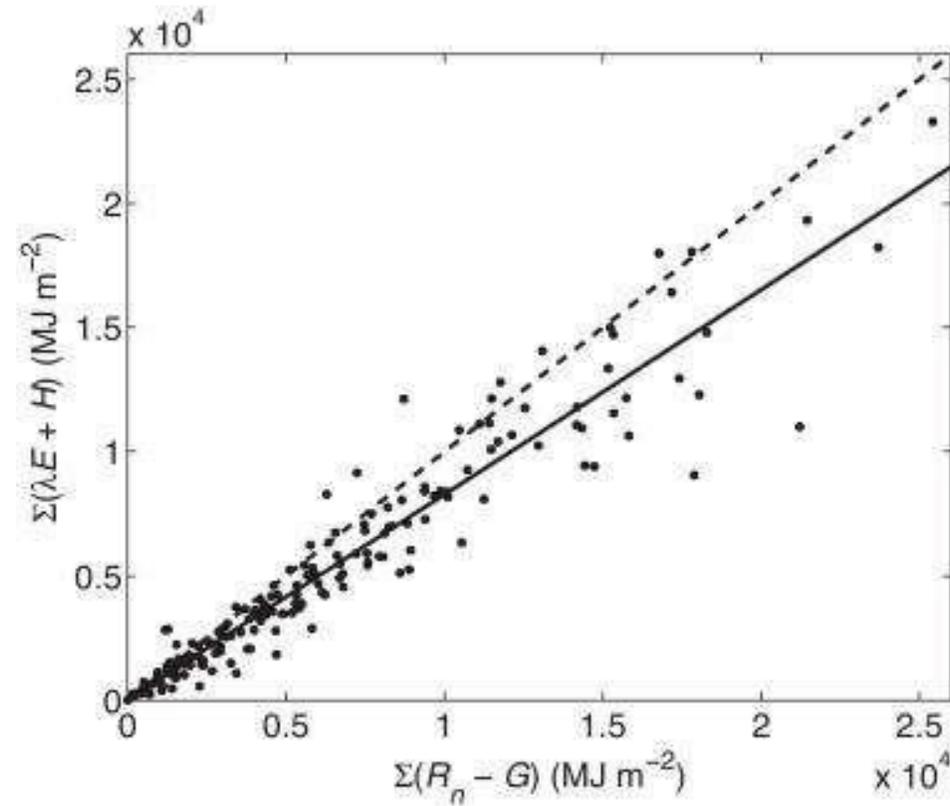


Période/saison



Wilson et al, 2002 AgForMet

Fermeture de Fluxnet



Stoy et al. 2013, AgForMet

Sources potentielles d'équilibre ou de déséquilibre énergétique

- Erreurs de mesure
 - Instruments
 - Température sonore vs température virtuelle
 - IRGA à voie ouverte ou fermée
 - Flux de Foucault
 - Durée et méthode de calcul de la moyenne
 - Fonctions de transfert
 - Angle de flux
 - Flux de chaleur du sol
 - Stockage
 - Profondeur
- Erreurs d'échantillonnage
 - Échantillonnage insuffisant de R_{net} et G
 - Inadéquation des empreintes entre $R_{net} + G$ & $\lambda E + H$
- Autres processus
 - Advection
 - Photosynthèse
 - Végétation Stockage de la chaleur

Y a-t-il un problème de fermeture ?

Preuves contraires

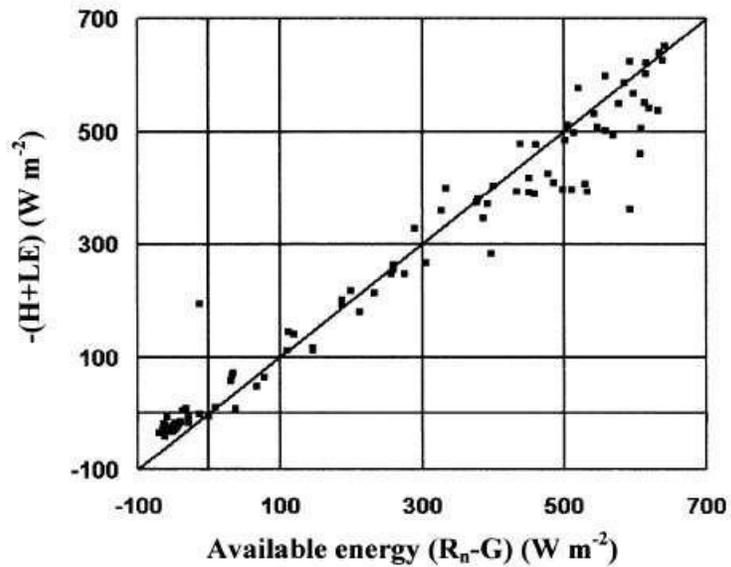
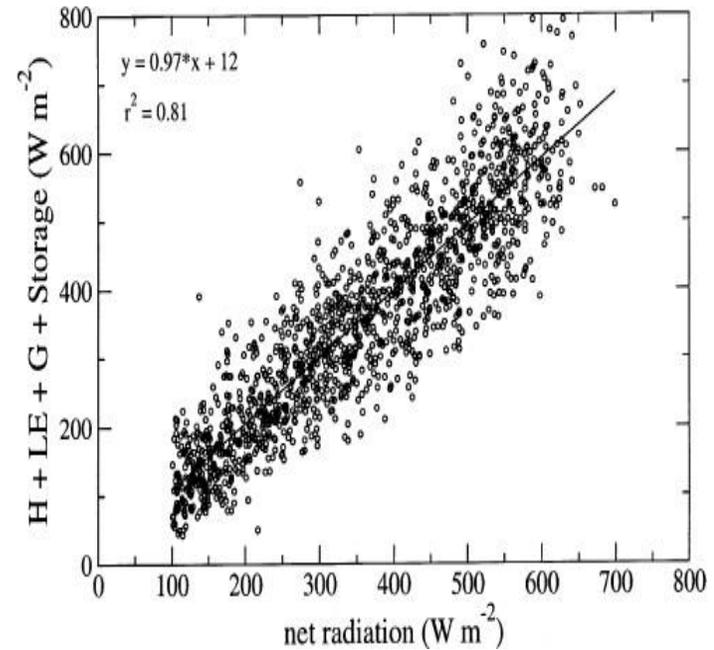


FIG. 9. Energy balance measured by the portable system during the third deployment.

Billesbach et al. 2004



Meyers et Hollinger, 2004

De nombreuses études ne tiennent pas compte du stockage de la chaleur des forêts correctement ou pas du tout, et de fermer le bilan énergétique lorsqu'ils le font

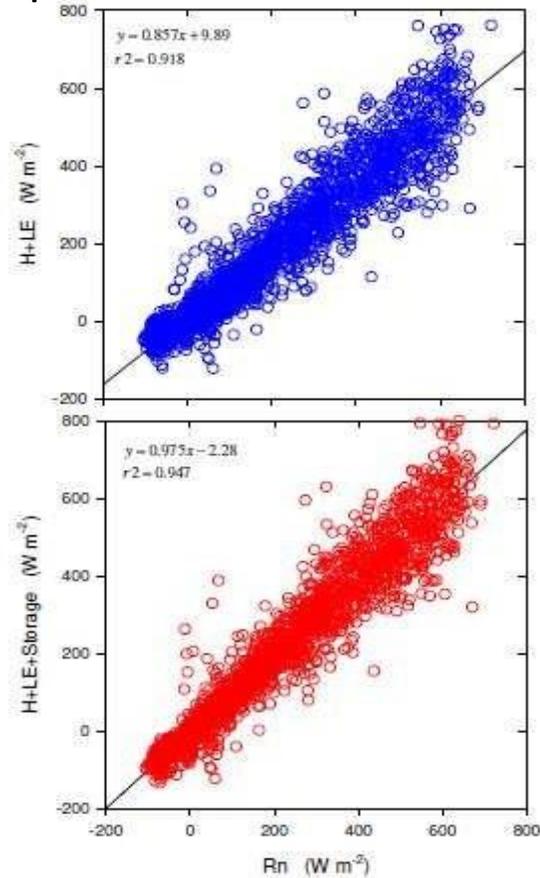
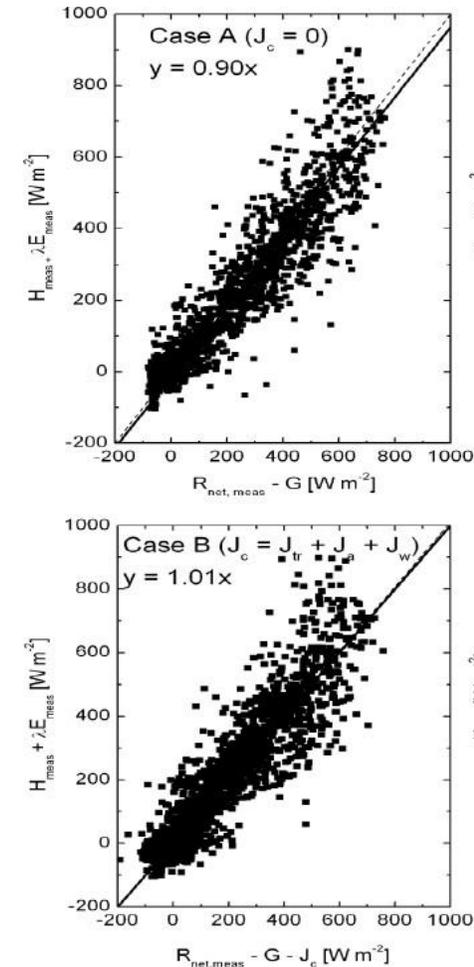


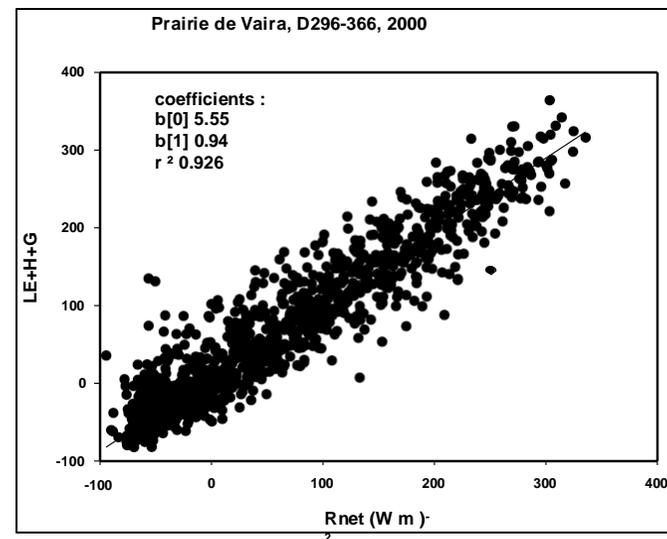
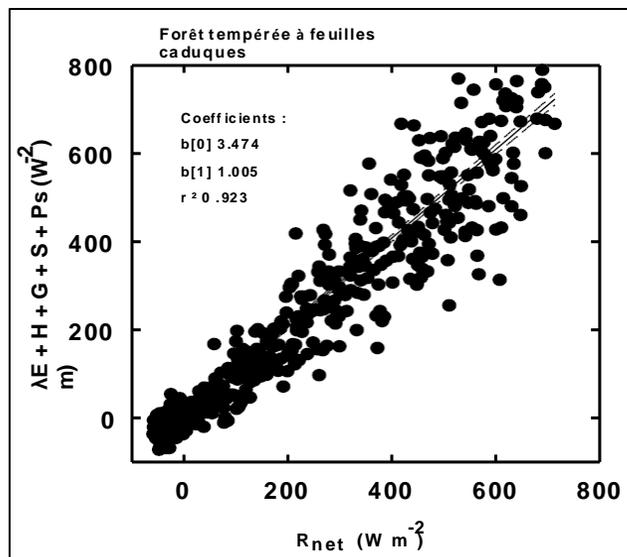
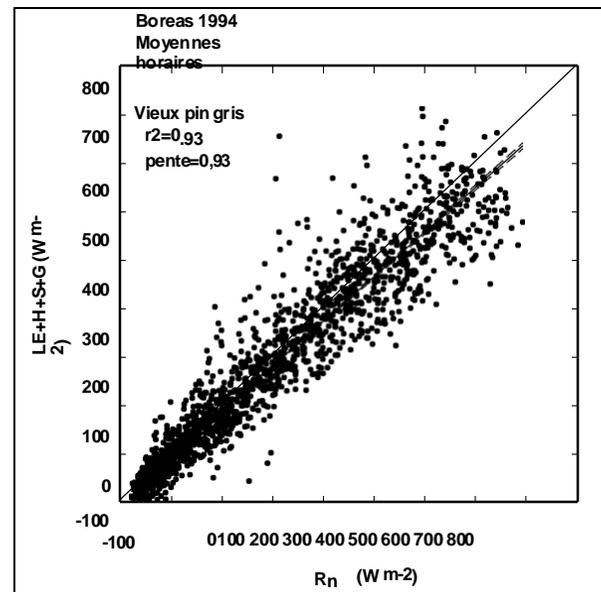
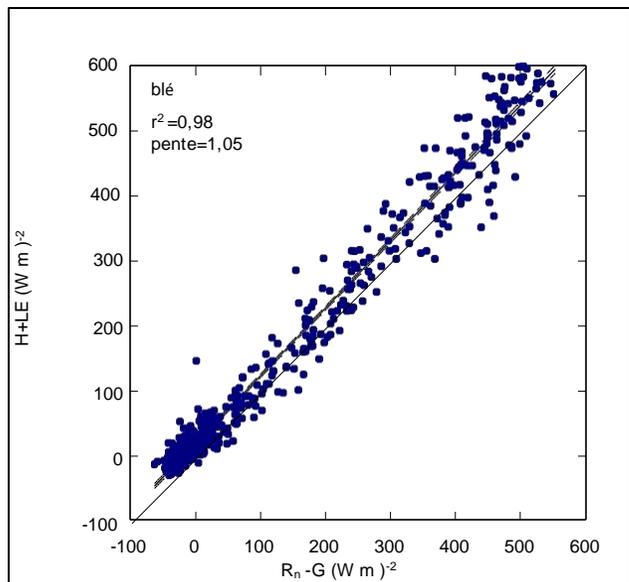
Fig. 8. The sum of the turbulent fluxes versus net radiation without (top) storage flux and with (bottom) the total storage flux included.



Lindroth et al 2010 Biogeoscience

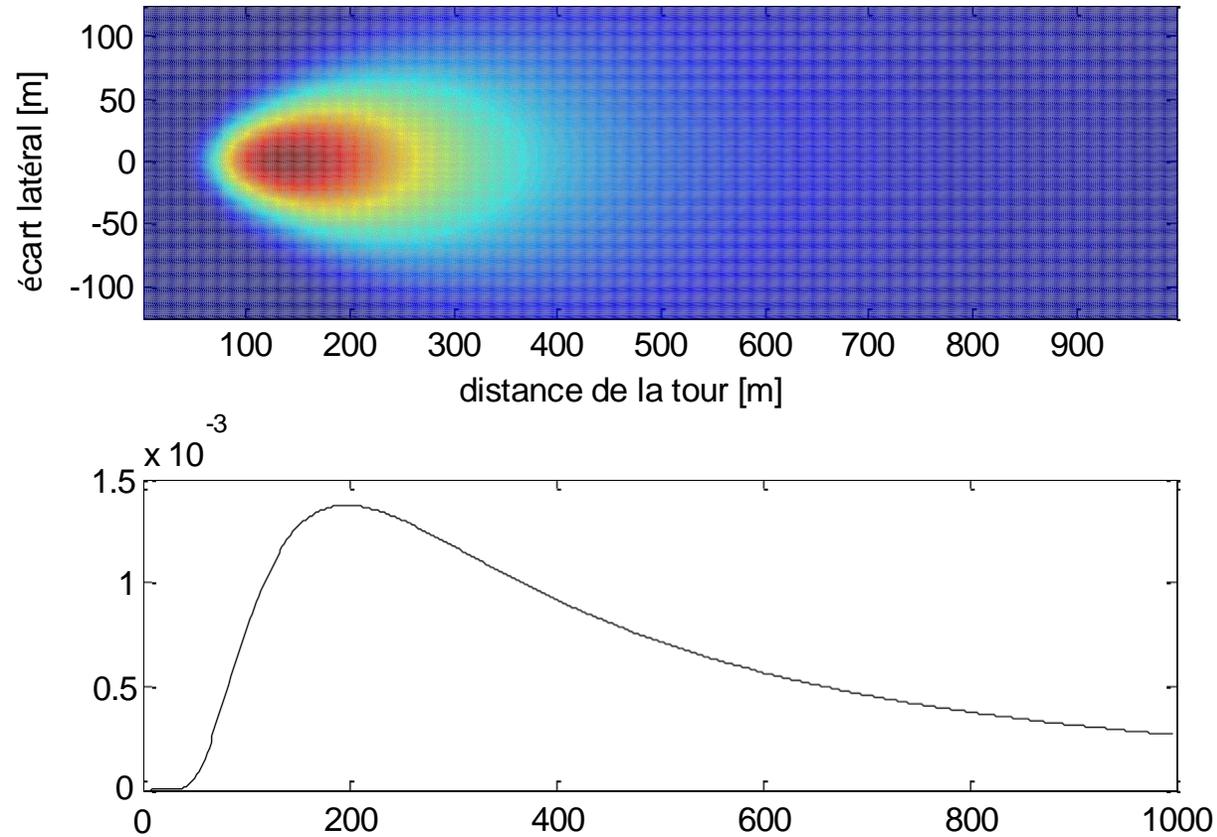
Haverd et al 2007 AgForMet

Test de clôture de l'équilibre énergétique en tant que contrôle de qualité

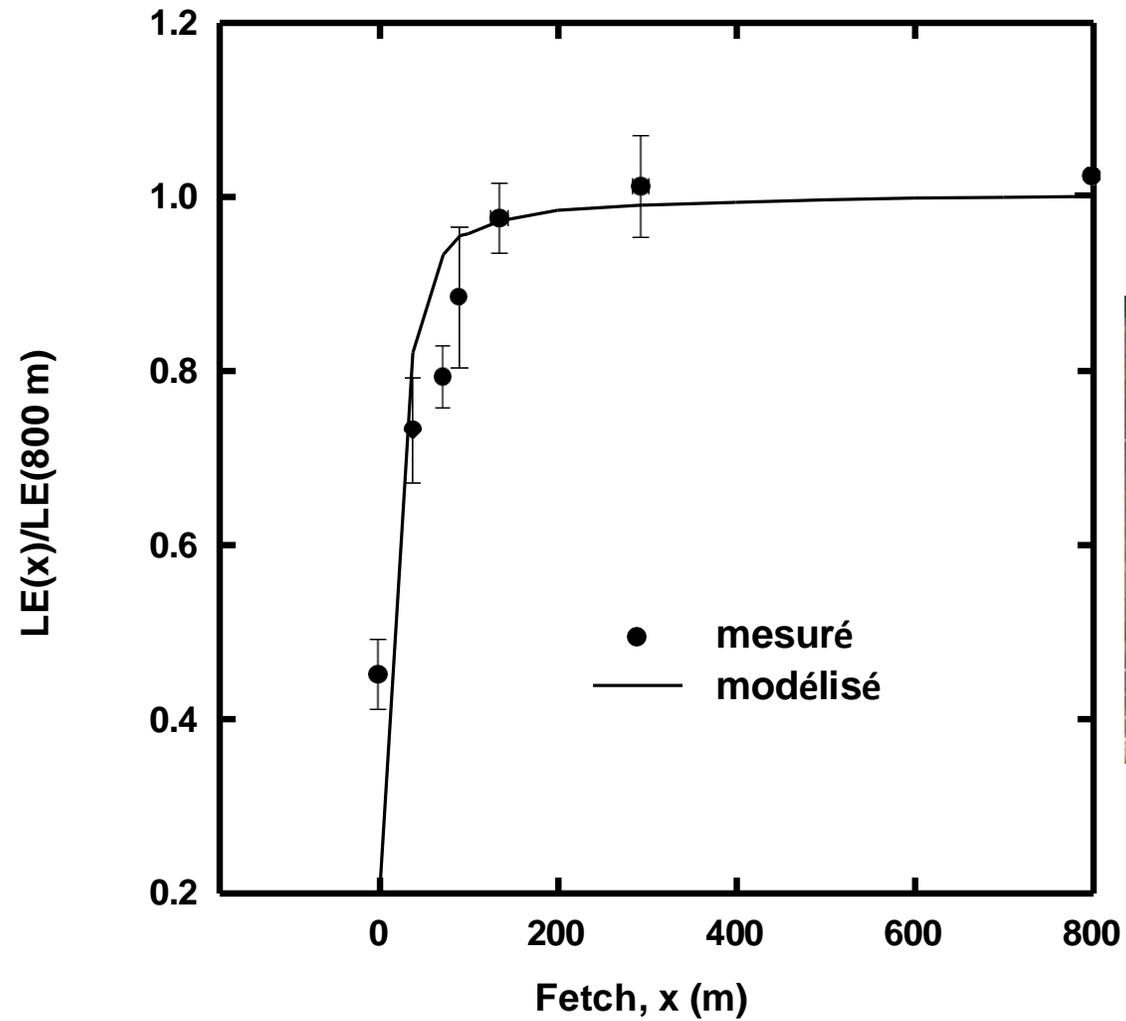


Choisir son site :

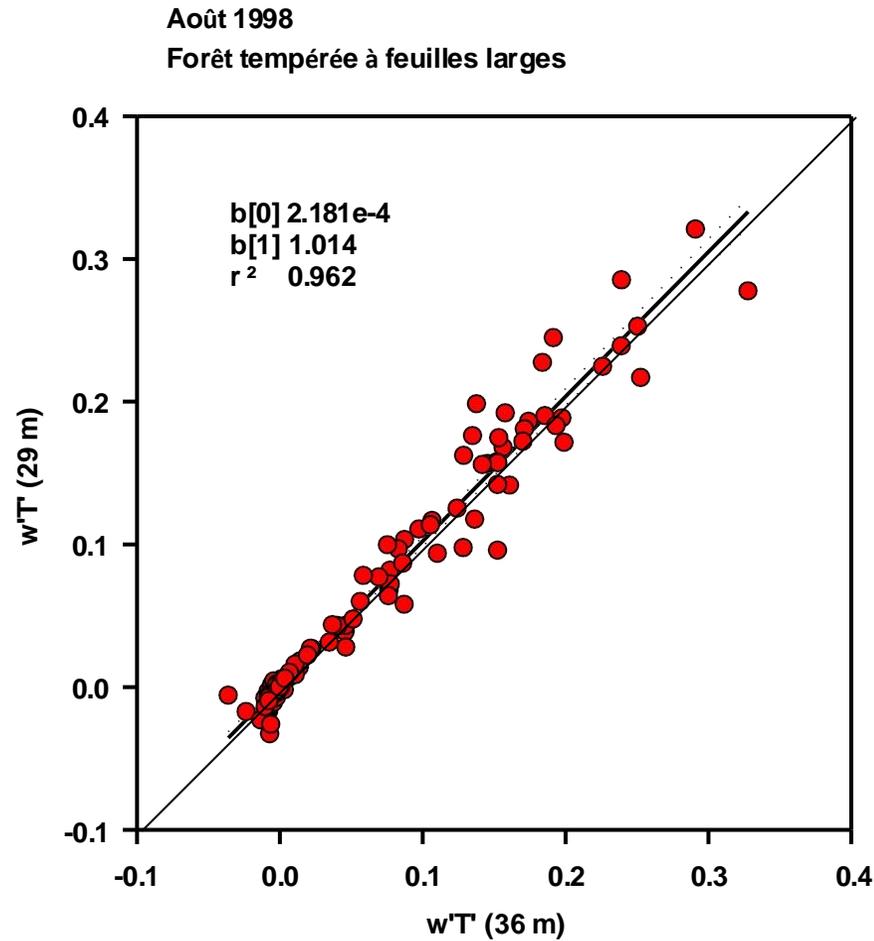
Modèle d'empreinte 2D de Detto-Hsieh et Fetch



Représentativité, advection et effets de bord



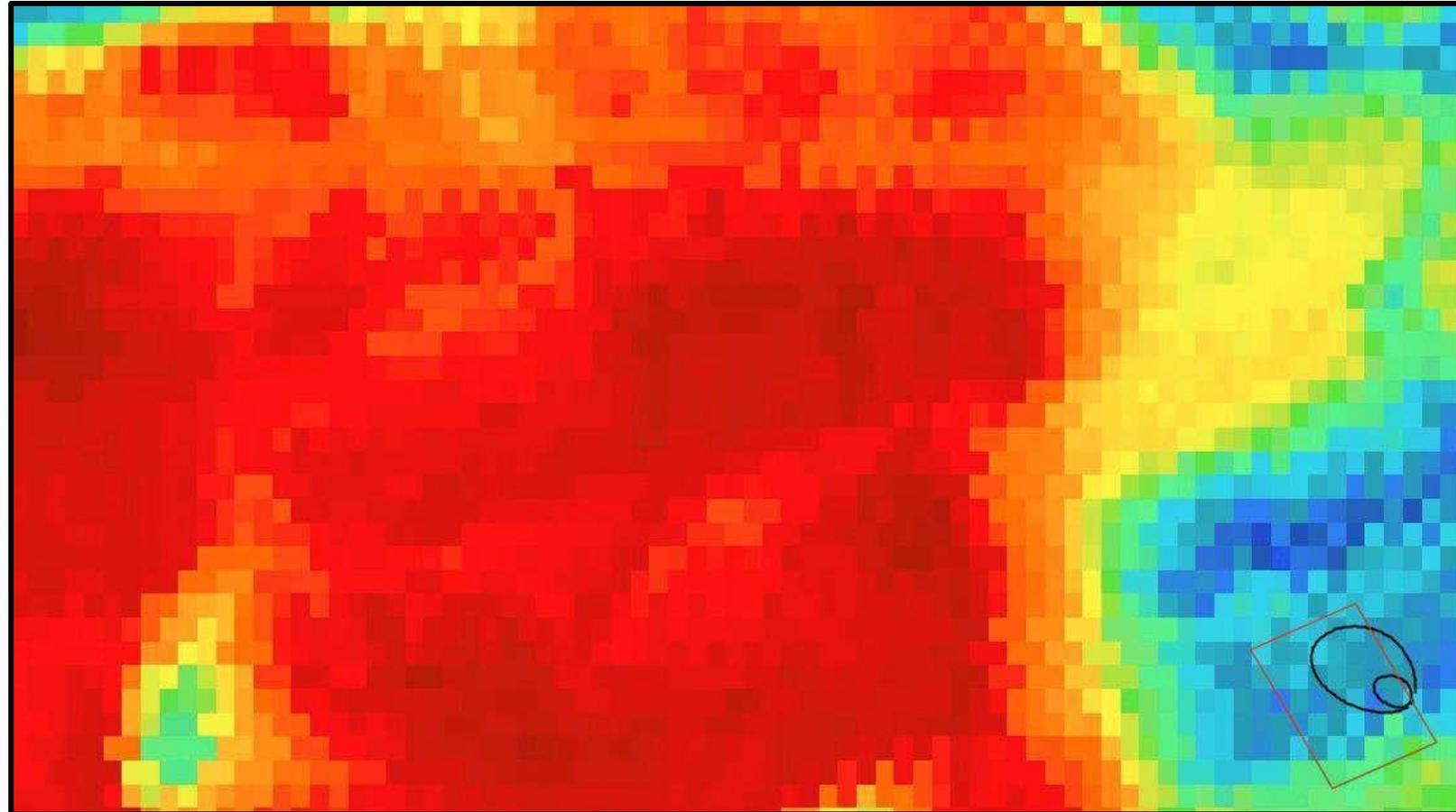
Test de divergence du flux : Mesurer les flux à deux hauteurs



Baldocchi et al 2000 BLM

ECOSTRESS LST
2022-05-29 14:34

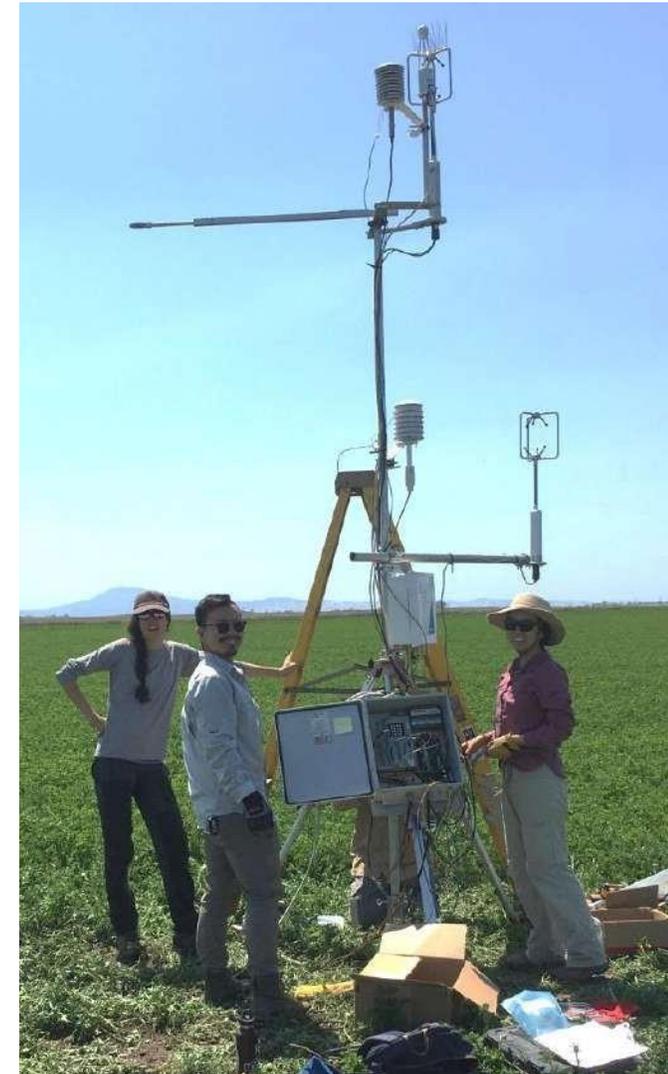
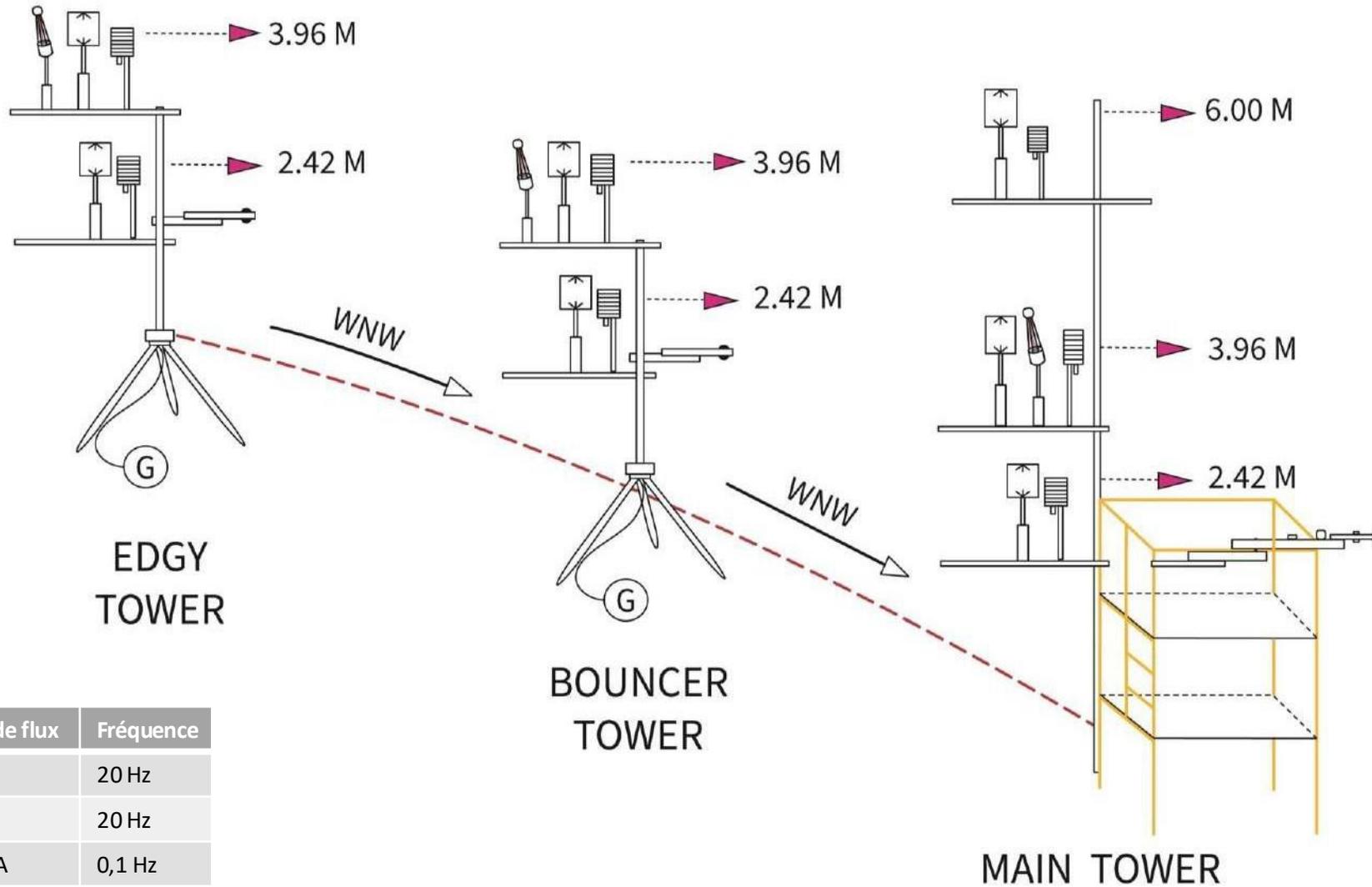
Passage de l'état sec à l'état humide



Luzerne de Bouldin, Tianxin Wang

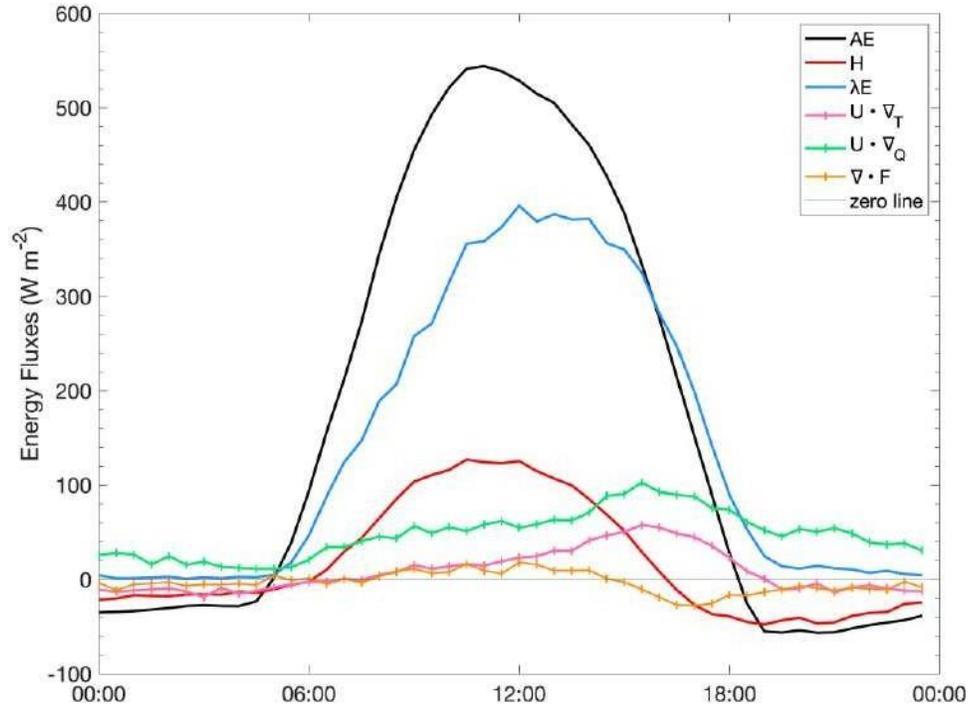
ESPM 228 Sujets avancés Micromet & Biomet

ACT II : Campagne d'advection 2022



Capteur de flux	Fréquence
IRGA	20 Hz
Sonique	20 Hz
HMP155A	0,1 Hz

2022 moyenne journalière :
05-18 à 05-25 & 06-20 à 06-27 & 07-16 à 07-22 (n=1104)



L'advection de chaleur et d'humidité a affaibli H et augmenté LE. L'augmentation de la LE n'a pas été aussi radicale en raison de la luzerne moins productive (GPP) en 2022.

L'équilibre advectif :

$$\int_{z_{veg}}^{Z_m} \rho \cdot C_p \cdot \bar{u} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} dz = - \int_{z_{veg}}^{Z_m} \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial \overline{w'T'}}{\partial z} dz$$

$$\int_{z_{veg}}^{Z_m} \rho \cdot C_p \cdot \overline{U(z)} \cdot \frac{\partial \bar{T}}{\partial x} dz + \int_{z_{veg}}^{Z_m} \rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial \overline{w'T'}}{\partial z} dz$$

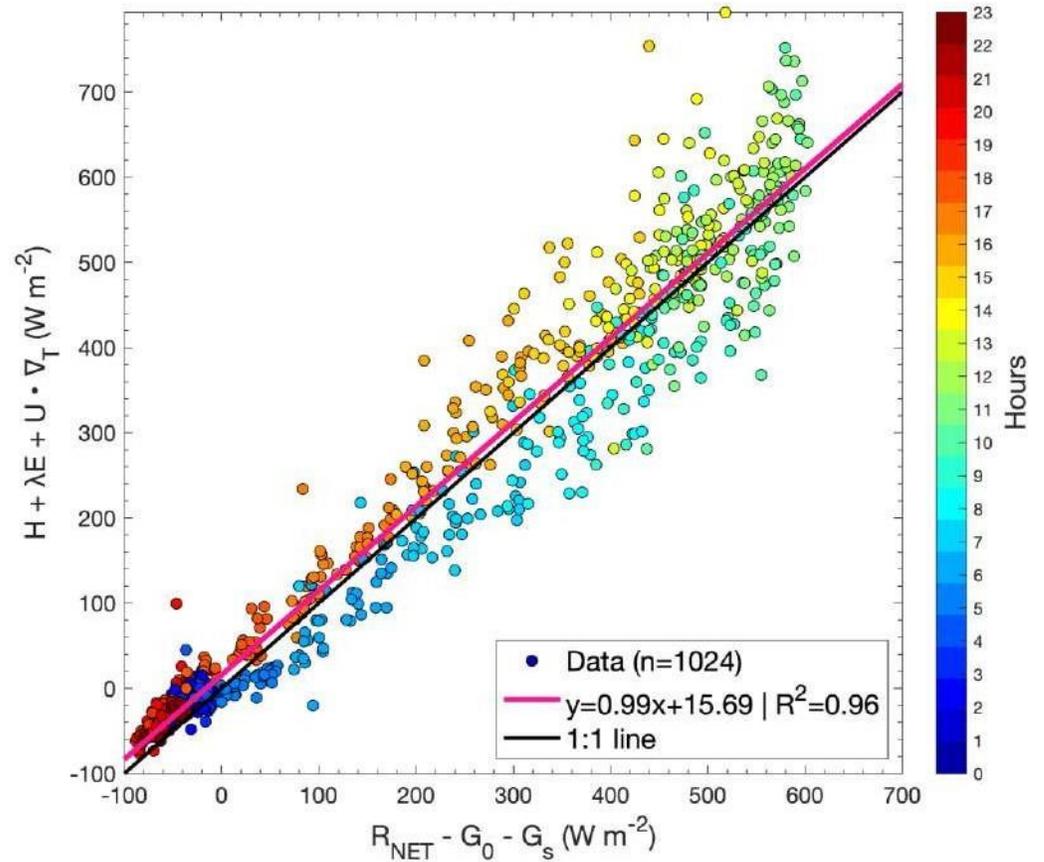
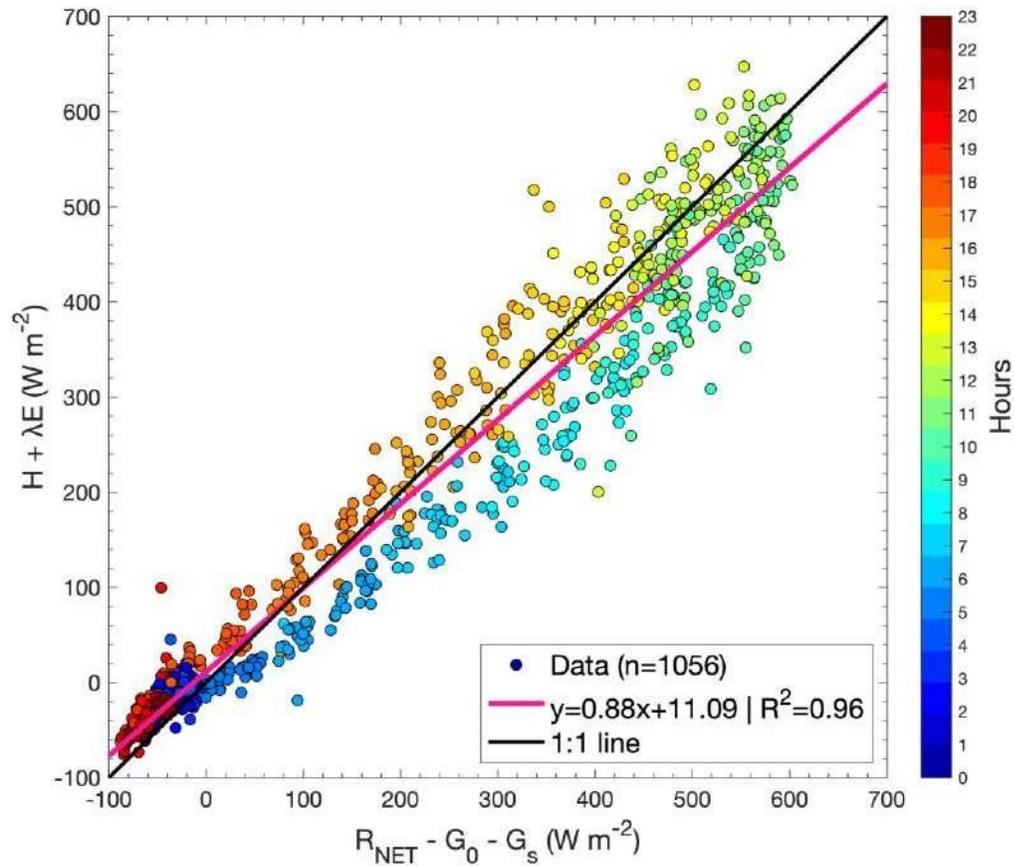
||

$$5.02 \text{ Wm}^{-2}$$

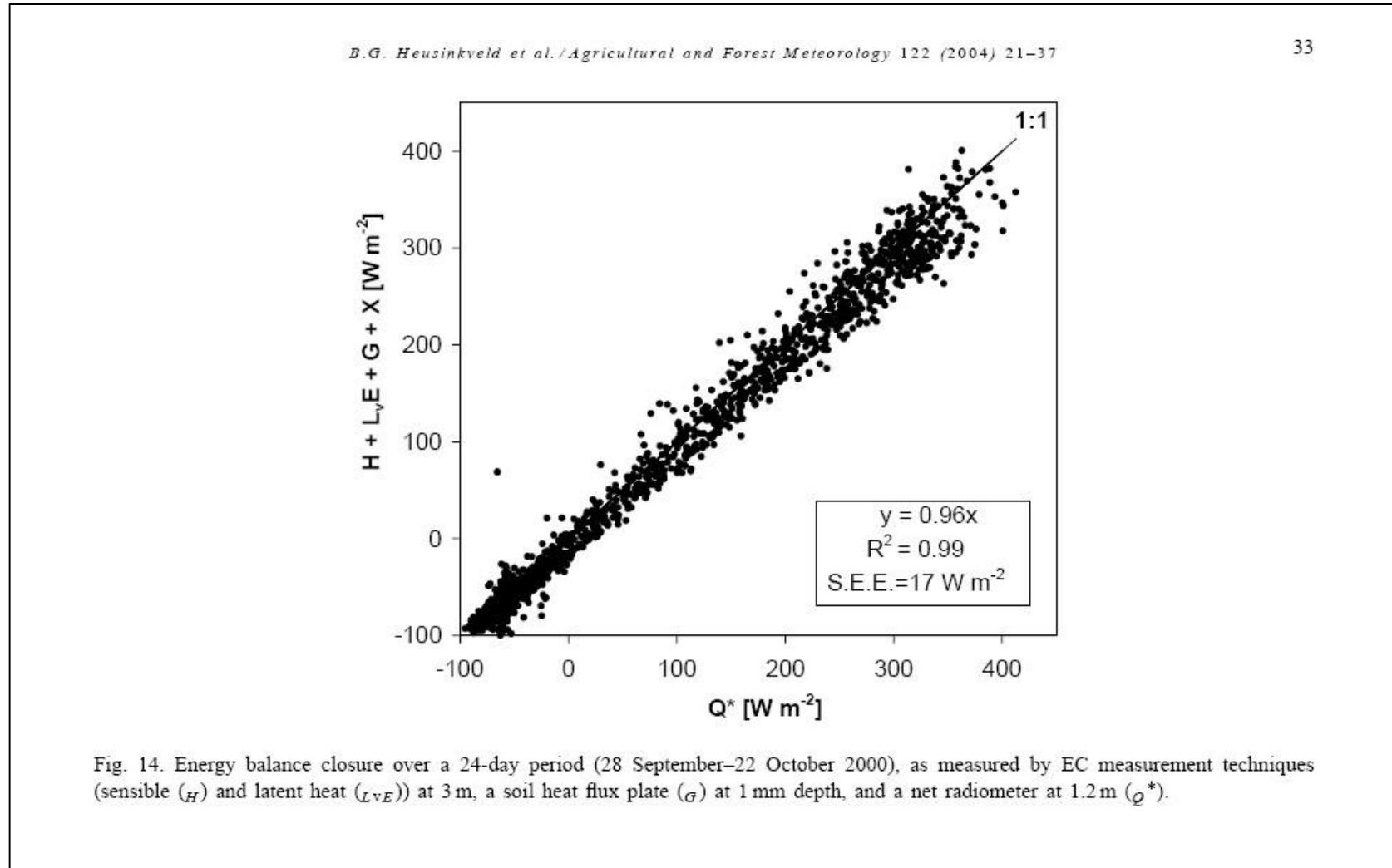
Noir :	Rnet - G - G_storage
Rouge :	H corrigé spectralement
Bleu :	LE corrigé spectralement
Rose :	Advection de chaleur à 4m
Orange :	Divergence du flux entre 4m et la canopée

2022 moyenne journalière :
05-18 à 05-25 & 06-20 à 06-27 & 07-16 à 07-22 (n=1104)

La prise en compte de l'**advection de la chaleur et de l'humidité** a permis d'améliorer la fermeture du bilan énergétique de 11 %



Meilleur équilibre énergétique avec un capteur G peu profond



Mesurer la divergence du flux de chaleur du sol et l'extrapoler à zéro

Profil horaire moyen depuis 2013

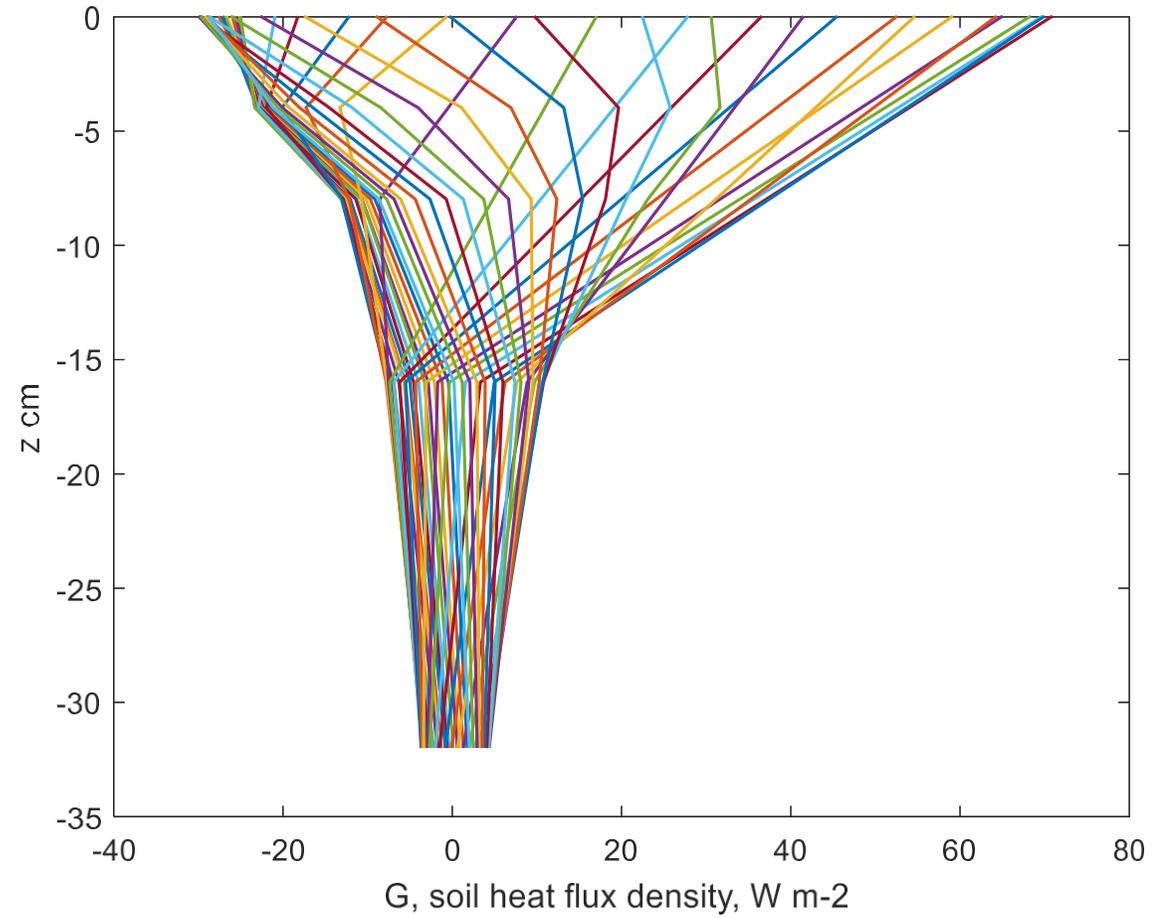
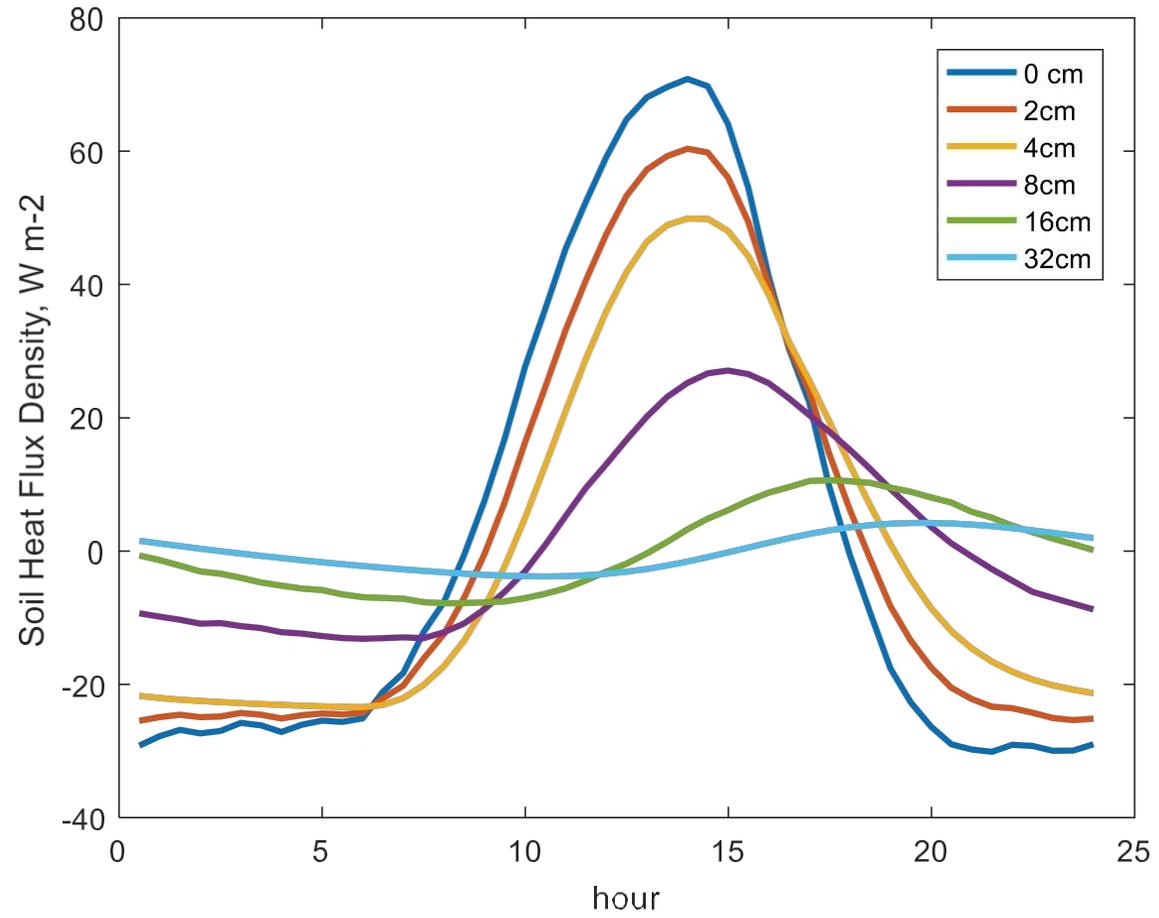


Schéma diurne moyen depuis 2013



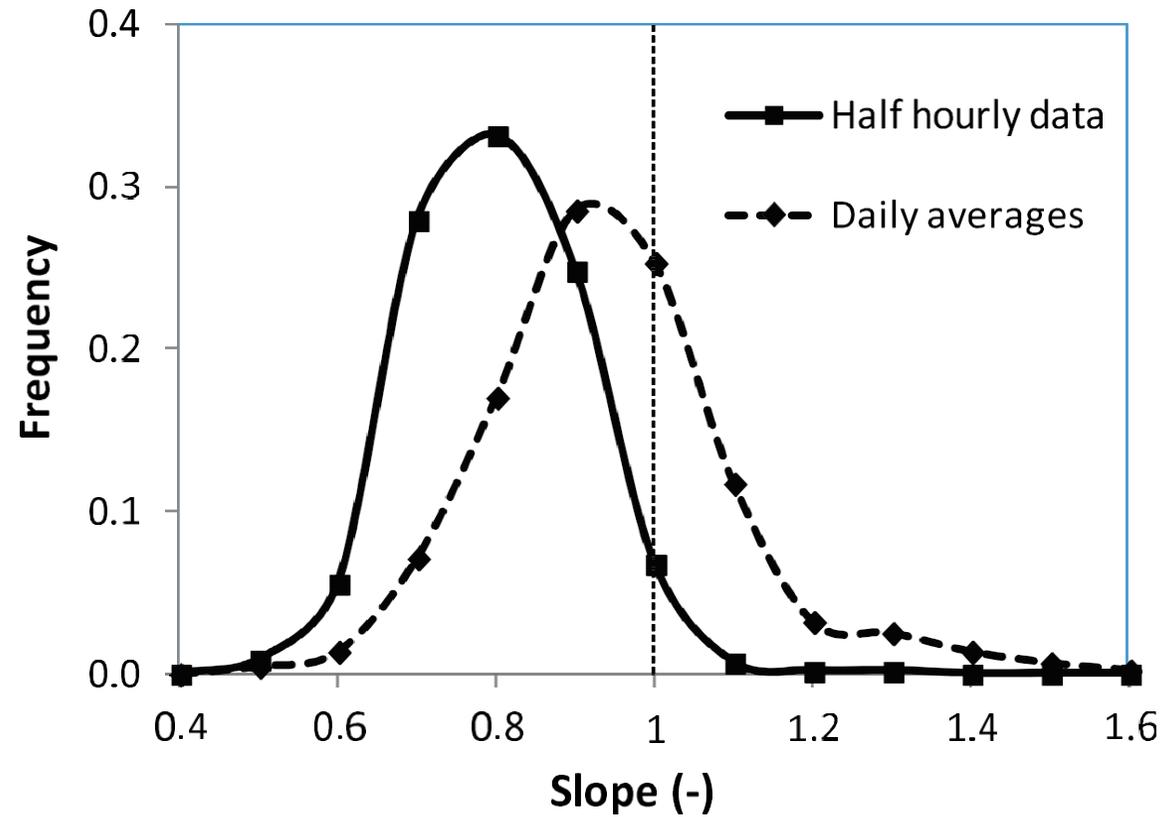


fig. 5. Frequency distributions for the slope of $H + E$ versus $R_n - G_0$ (forced through ero) for half-hourly and daily averages of measurements reported in the La Thuile atset.

Ne pas jeter le bébé avec l'eau du bain

- On peut avoir confiance dans la covariance de Foucault si les hypothèses sont respectées, même si la fermeture du bilan énergétique n'est pas parfaite
- Exemples d'adéquation du bilan hydrique

Défis/Points à emporter

- Assurer le fonctionnement des sites de flux à long terme
 - Il faut du personnel et des ressources
 - Visiter le site fréquemment
 - Calibrer, calibrer...
- Interpréter les flux sur des paysages complexes avec des mosaïques de sources et de puits
 - Prend des tours à flux multiples
 - Prend l'évaluation des termes dans le budget de conservation
- Interpréter les flux à l'aide d'images de télédétection et de modèles d'empreinte de flux
- Partager et distribuer des données



Message à emporter pour l'application de la
méthode de covariance de Foucault dans des
conditions non idéales

- Savoir quand enfreindre les règles
- Respecter les principes directeurs
de l'équation de conservation

- Conception d'une expérience qui mesure
la divergence et le stockage des flux, en
plus de la covariance, lorsque les sites
sont loin d'être idéaux