

Diss. ETH No. 24450

**BIOSPHERE-ATMOSPHERE CO<sub>2</sub> EXCHANGE  
AND ITS LINK TO SUN-INDUCED FLUORESCENCE  
IN A MIXED FOREST AND A CROPLAND**

A dissertation submitted to

**ETH ZURICH**

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

**EUGÉNIE PAUL-LIMOGES**

M.Sc., The University of British Columbia

born 7 December 1983

of Canadian nationality

Prof. Dr. Nina Buchmann, examiner  
Prof. Dr. Werner Eugster, co-examiner  
Prof. Dr. Michael Schaepman, co-examiner  
Dr. Eva van Gorsel, co-examiner

**2017**

---

## Abstract

The terrestrial biosphere plays an important role in the global carbon cycle and sequesters approximately one third of anthropogenic CO<sub>2</sub> emissions. There is currently debate as to whether this terrestrial sink will be able to continue mitigating these emissions under a warming climate. Reliable monitoring systems are thus required to increase the knowledge on spatial and temporal dynamics of biosphere-atmosphere responses to changes in climate, atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations and land use. However, quantifying the CO<sub>2</sub> exchange between the biosphere and the atmosphere is challenging, as there are many biological and environmental factors acting at different temporal and spatial scales. Two main methods exist to measure biosphere-atmosphere CO<sub>2</sub> exchange, (1) the eddy covariance (EC) technique that is temporally continuous but spatially limited to the ecosystem scale and (2) remote sensing that is often temporally limited but representative for larger scales (i.e. regional to global scales). During the last decade, sun-induced fluorescence (SIF) has emerged as a novel and promising tool holding the potential to directly assess ecosystem photosynthesis and therefore, provides an alternative approach to study the terrestrial carbon cycle. The overarching goal of this PhD thesis was to improve the quantification of biosphere-atmosphere CO<sub>2</sub> exchange in two contrasting ecosystems, and to gain a better understanding of the functional relationships between remotely sensed SIF and EC-derived photosynthesis.

An innovative combination of EC flux, ecophysiological and hyperspectral remote sensing measurements was made within this PhD project at two Swiss research sites, the Oensingen cropland site and the Lägeren mixed forest site. Continuous EC and meteorological measurements have been made at both sites during the campaign with the Airborne Prism Experiment (APEX) imaging spectrometer overflights, which started in 2009 and has been ongoing until 2017. A below canopy EC system was installed in 2014 at the Lägeren mixed forest site to quantify the contribution from the understory vegetation and soil to the ecosystem fluxes. In addition, tower-based hyperspectral spectrometers were installed at both sites in 2015 to capture a temporally-continuous SIF emission to relate to the continuous EC measurements and APEX campaign measurements.

The below canopy contribution to the ecosystem CO<sub>2</sub> fluxes at the Lägeren mixed forest site was quantified using the below canopy EC measurements. The understory vegetation and soil were found to be a net carbon source dominated by soil respiration, while ecosystem fluxes measured above canopy were dominated by tree photosynthesis leading to a net carbon sink. A decoupling of below and above canopy fluxes was found under full canopy closure and a decoupling correction was applied to the above canopy measurements. Following the correction, the annual NEP for the site agreed well with NEP derived from biomass inventories combined with models. These results showed that below canopy EC measurements are essential in this mixed forest, and possibly in many

other forest ecosystems, to fully understand the carbon dynamics within structurally complex ecosystems.

SIF retrievals from APEX were compared with gross primary production (GPP) derived from the eddy covariance measurements to explore their functional relationships in three different ecosystems: grassland, cropland and mixed forest. Relationships between SIF and GPP were found to be hyperbolic and ecosystem-specific. When compared to other commonly used vegetation indices, SIF was better correlated to GPP. The results showed that remotely sensed SIF provides a new observational approach to decrease uncertainties in estimating GPP across ecosystems, but requires additional treatment to compensate for the various confounding factors impacting SIF-GPP relationships.

SIF retrievals were also made from the tower-based hyperspectral spectrometers at the Oensingen cropland and at the Lägeren mixed forest site. When compared with GPP derived from eddy covariance measurements, the diurnal cycles in GPP and SIF corresponded in general well and followed the incoming photosynthetic photon flux density. Strong midday depressions in SIF were found due to water vapour pressure deficits limitations under high light intensity. The depression in SIF was associated with an increase in non-photochemical quenching, as indicated by the photochemical reflectance index. As a result, different GPP-SIF relationships were found for stressed and unstressed vegetation. These results showed the importance of characterizing the influence of environmental conditions on GPP-SIF relationships to reliably estimate GPP from remote sensing measurements.

Overall, the results from this PhD thesis highlight the importance of below canopy EC measurements in structurally complex forest ecosystems to ensure accurate CO<sub>2</sub> budgets for the forests. Decoupling patterns can be identified in order to correct the ecosystem fluxes accordingly. The results from this thesis also show the potential of SIF as a tool for monitoring CO<sub>2</sub> uptake based on ecosystem-specific and hyperbolic functions, while considering the effect of environmental conditions on these relationships.

---

## Résumé

La biosphère terrestre joue un rôle important dans le cycle mondial du carbone et séquestre environ un tiers des émissions anthropogéniques de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>). Il y a actuellement un débat à savoir si ce puits de carbone terrestre pourra continuer à atténuer ces émissions avec le réchauffement climatique. Des systèmes d'observations fiables sont donc nécessaires pour accroître les connaissances sur la dynamique spatiale et temporelle des réponses de la biosphère et de l'atmosphère aux changements climatiques, à l'augmentation des concentrations atmosphériques de CO<sub>2</sub> et aux changements quant à l'utilisation des terres. Cependant, la quantification de l'échange de CO<sub>2</sub> entre la biosphère et l'atmosphère soulève de nombreux défis, car il existe de nombreux facteurs biologiques et environnementaux agissant à différentes échelles temporelles et spatiales. Deux méthodes existent pour mesurer l'échange de CO<sub>2</sub> entre la biosphère et l'atmosphère, (1) la technique de la covariance de turbulence (EC) qui est temporellement continue mais spatialement limitée à l'échelle de l'écosystème et (2) la télédétection qui est souvent temporellement limitée mais qui est représentative à plus grandes échelles (i.e., régionale à mondiale). Au cours de la dernière décennie, la fluorescence chlorophyllienne induite par le soleil (SIF) est apparue comme un nouvel outil permettant d'évaluer directement la photosynthèse de l'écosystème et, par conséquent, fournit une approche alternative pour étudier le cycle du carbone terrestre. L'objectif principal de cette thèse de doctorat était d'améliorer notre quantification de l'échange de CO<sub>2</sub> entre la biosphère et l'atmosphère dans deux écosystèmes contrastés, et d'acquérir une meilleure compréhension des relations fonctionnelles entre la SIF et la photosynthèse.

Une combinaison innovatrice de mesures de covariance de turbulence, de mesures écophysiologicals et de télédétection hyperspectrale a été réalisée dans le cadre de cette thèse de doctorat sur deux sites de recherche suisses, le terrain de culture d'Oensingen et la forêt mixte de Lägeren. Des mesures continues de la covariance de turbulence et des mesures météorologiques ont été effectuées sur les deux sites au cours de la campagne avec les survols du spectromètre d'imagerie de l'Expérience du Prisme Aéroporté (APEX), qui ont débuté en 2009 et se sont poursuivis jusqu'en 2017. Un système de covariance de turbulence sous la canopée des arbres a été installé en 2014 à la forêt mixte de Lägeren pour quantifier la contribution provenant de sous la canopée au flux total de l'écosystème. De plus, des spectromètres hyperspectraux ont été installés sur les tours de mesure des deux sites de recherche en 2015 pour capter une émission de SIF temporellement continue pour ensuite comparer aux mesures continues de la covariance de turbulence et aux mesures aériennes d'APEX.

La contribution de la partie sous la canopée au site de forêt mixte de Lägeren au total flux de CO<sub>2</sub> de l'écosystème a été quantifiée en fonction des mesures de covariance de turbulence. La végétation du sous-bois et le sol se sont révélés être une source nette de carbone dominée par la respiration du sol, tandis que les flux de l'écosystème étaient

dominés par la photosynthèse des arbres résultant en un net puits de carbone. Un découplage des flux au-dessous et au-dessus de la canopée a été constaté lors des périodes de fermetures complètes de la canopée et une correction a donc été appliquée aux mesures. À la suite de cette correction, la production annuelle nette de l'écosystème (NEP) pour le site était semblable à la NEP dérivée de l'inventaire de la biomasse combinée avec des modèles. Ces résultats ont donc démontré que les mesures de la covariance de turbulence sous la canopée sont essentielles dans cette forêt, et probablement dans d'autres forêts, pour bien comprendre la dynamique du carbone dans les écosystèmes structurellement complexes.

Les mesures de SIF du capteur d'APEX ont été comparées à la production primaire brute (GPP) dérivée à partir des mesures de covariance de turbulence pour explorer les relations fonctionnelles entre SIF et GPP dans trois écosystèmes différents: prairie, terre cultivée et forêt mixte. Les relations entre SIF et GPP se sont avérées hyperboliques et spécifiques aux écosystèmes. Par rapport à d'autres indices de végétation couramment utilisés, la SIF était plus cohérente avec la GPP. Les résultats ont démontré que SIF est une nouvelle approche observationnelle pour réduire les incertitudes dans l'estimation de la GPP dans les écosystèmes, mais nécessite un traitement supplémentaire afin de compenser pour les différents facteurs qui influent sur les relations SIF-GPP.

Les mesures de SIF ont également été réalisées à partir des spectromètres hyperspectraux sur les tours de mesure aux deux sites. Par rapport à la GPP partitionnée à partir des mesures de covariance de turbulence, les cycles diurnaux de GPP et SIF correspondaient en général bien et suivaient la densité entrant de flux de photons photosynthétiques. Toutefois, de fortes dépressions ont été constatées en mi-journée dans les émissions de SIF en raison des limitations imposées par les déficits de la pression de vapeur d'eau sous une haute intensité de lumière. Les dépressions en SIF ont également été associées à une augmentation de la dissipation non-photochimique sous forme de chaleur, comme l'indique l'indice de réflectance photochimique. Ces limitations ont conduit, dans certains cas, à différentes relations GPP-SIF pour la végétation stressée et non stressée. Ces résultats démontrent l'importance de caractériser l'influence de différentes conditions environnementales sur les relations GPP-SIF dans différents écosystèmes afin d'estimer de manière fiable la GPP à partir de mesures de télédétection.

Enfin, les résultats de cette thèse ont mis en évidence l'importance des mesures de la covariance de turbulence sous la canopée dans les écosystèmes forestiers afin d'assurer des bilans de CO<sub>2</sub> précis. Certains symptômes reliés au découplage peuvent être identifiés afin de corriger en conséquence les flux de l'écosystème. Les résultats de cette thèse ont également démontré le potentiel de la SIF en tant que nouvel outil d'observation de l'absorption de CO<sub>2</sub> basé sur des fonctions hyperboliques spécifiques à l'écosystème tout en tenant compte de l'effet des conditions environnementales sur ces relations.