

Thèse de Doctorat

Mesure de la photosynthèse et de la respiration à haute résolution temporelle par eddy covariance et analyse d'ondelettes

La végétation terrestre subit actuellement une pression sans précédent due au changement climatique. On observe une pression accrue sur la production agricole (Lin & Ma 2022), une baisse de la productivité des forêts (Chuine et al. 2023) et une mortalité des arbres, comme la mort massive d'épicéas en France depuis 2018 (Saintonge et al. 2022). Une meilleure compréhension de la façon dont les plantes répondent aux pressions environnementales telles que les vagues de chaleur et les sécheresses permettra de concevoir de meilleures mesures d'atténuation, donnera une meilleure connaissance des espèces d'arbres qui continueront à prospérer dans le climat futur et permettra de mieux représenter la résilience des plantes dans les modèles d'écosystèmes et de surface terrestre (LSM).

Le puits de carbone terrestre et les flux bruts sous-jacents

La végétation terrestre absorbe environ 25 % des émissions anthropiques de CO₂, ce qui a une influence significative sur le changement climatique futur (Friedlingstein et al. 2023). L'augmentation du puits terrestre est un élément majeur des émissions négatives prévues dans la Stratégie nationale bas-carbone. Le puits de carbone terrestre est un équilibre délicat entre l'absorption par la photosynthèse (gross primary productivity, GPP) et le rejet par les processus respiratoires (ecosystem respiration, RESP). L'avenir sera marqué par l'évolution de ces flux bruts sous-jacents. Il sera essentiel de comprendre la GPP et la RESP ainsi que leurs réponses aux vagues de chaleur et aux sécheresses afin de concevoir des mesures judicieuses pour une stratégie bas carbone et d'orienter l'adaptation de la production agricole et forestière face au changement climatique. Les modèles de surface terrestre paramètrent les flux bruts GPP et RESP indépendamment dans leurs codes informatiques, tandis que les observations portent sur le flux net NEE. Ces derniers constituent toutefois les principales données utilisées pour le calibrage des modèles LSM. Fournir de bonnes estimations des flux bruts GPP et RESP serait la contrainte ultime pour les modèles LSM et permettrait d'obtenir des projections climatiques beaucoup plus fiables (Arora et al. 2020).

Observation des flux de carbone

L'eddy covariance est une méthode de pointe pour surveiller les flux de gaz à effet de serre, fournissant des mesures directes et continues pertinentes pour le changement climatique. La communauté de l'eddy covariance s'est regroupée au sein de réseaux nationaux, régionaux et mondiaux tels que AmeriFlux aux États-Unis, ICOS en Europe et FLUXNET dans le monde entier, qui partagent des données et collaborent à des études de synthèse. Les produits issus des observations d'eddy covariance (Jung et al. 2020) sont devenus la référence standard pour toutes les recherches liées aux flux, telles que les inversions atmosphériques, les produits satellitaires, etc.

Les produits d'eddy covariance sont également utilisés pour calibrer (Kuppel et al. 2014) les modèles de surface terrestre (LSM). Ils utilisent souvent les estimations de la productivité primaire brute (GPP), car cette variable est sensible à la plupart des paramètres des LSM (Göhler et al. 2013). Ces modèles estiment la GPP et la respiration RESP plutôt que le flux net observé NEE, de sorte que les développeurs de modèles cherchent à utiliser les données les plus proches des processus modélisés. Cependant, la GPP n'est modélisée qu'à partir des flux nets NEE (Sabbatini et al. 2018), ce qui conduit à des estimations divergentes, telles que le doublement de la GPP dans les forêts boréales entre les estimations d'un même groupe (Jung et al. 2020, Nelson et al. 2024).

Les signaux provenant des sources (RESP) et des puits (GPP) doivent être transportés de manière turbulente depuis (l'intérieur) de la canopée vers les capteurs d'eddy covariance situés au-dessus de la végétation. Les

science for people, life & earth

Matthias Cuntz, UMR Silva

INRAE Centre Grand Est – Nancy
54280 Champenoux, France

Tel.: +33 3 83 39 73 03

Join us :



<https://mcuntz.github.io/fastforest/>

contributions pertinentes des tourbillons de toutes tailles et donc de toutes échelles de temps doivent être intégrées pour calculer le flux net de l'écosystème. Les « tourbillons pertinents » et, par conséquent, le choix du temps de moyennage sont basés sur la détermination de ce qu'on appelle l'écart spectral, une gamme de fréquences qui se situe entre les échelles turbulentes et les perturbations à plus grande échelle. L'écart spectral est, le cas échéant, analysé une seule fois lors de l'installation du système d'eddy covariance, et le même temps de moyennage est ensuite utilisée pendant toute la durée de vie de l'instrumentation. Cependant, la largeur et la position de l'écart spectral varient en fonction des conditions météorologiques (Von Randow et al. 2002). Des tests de post-traitement (caractéristiques de turbulence intégrées ITC, u^* , σ_w) garantissent que les flux turbulents mesurés représentent bien les flux de l'écosystème. Si l'un des tests échoue, toute la demi-heure est rejetée, ce qui entraîne un grand nombre de valeurs de flux manquantes toutes les demi-heures, souvent environ 20 à 50 % du total des données (Vitale et al. 2019).

Transformées en ondelettes pour calculer les flux nets et bruts d'échange de carbone

Les transformations en ondelettes, qui analysent les séries chronologiques dans l'espace temps-fréquence, ont été utilisées dans des études sur l'eddy covariance, par exemple sur des avions (Mauder et al. 2007) ou pour détecter les pics de flux de CH_4 provenant des sols pergélisolés (Göckede et al. 2019). Cependant, ces applications étaient limitées à des campagnes spécifiques et ne disposaient pas de méthodes complètes intégrant les transformations et corrections de données nécessaires pour obtenir des flux écosystémiques précis. S'appuyant sur ces applications antérieures, Destouet et al. (2024) ont développé une méthode basée sur les ondelettes pour identifier en continu l'écart spectral dans l'espace temps-fréquence, même dans des conditions non stationnaires, et l'ont appliquée avec succès pendant une année entière sur le site de la forêt de hêtres FR-Hes. Parallèlement, Coimbra et al. (2023) ont relevé le défi d'estimer la GPP et la RESP directement à partir des données brutes d'eddy covariance. Alors que les méthodes traditionnelles dérivent ces flux à partir de la NEE à l'aide de modèles (Tramontana et al. 2020), les premières tentatives d'estimation directe utilisant la similarité CO_2-H_2O ou l'échantillonnage conditionnel (par exemple, Scanlon & Kustas 2010, Zahn et al. 2022) se sont révélées incohérentes dans des conditions environnementales variables (Klosterhalfen et al. 2019). Coimbra et al. (2023) ont intégré l'analyse par ondelettes dans le processus de partitionnement. Cette avancée fournit un cadre plus stable et plus robuste pour dériver les flux bruts à partir de données brutes à haute fréquence.

Ce projet de doctorat combine et améliore les développements de Destouet et al. (2024) et Coimbra et al. (2023) afin de fournir une alternative au traitement actuel des données d'eddy covariance, y compris la partition des flux bruts. La méthode sera examinée à l'aide de Large-Eddy Simulations et comparée aux méthodes existantes sur tous les sites ICOS européens, tous écosystèmes et pays confondus. Ce doctorat permettra d'améliorer notre compréhension de la production agricole et forestière en produisant des observations fiables qui reflètent plus précisément les impacts climatiques sur les systèmes végétaux et les sols de manière indépendante. Ces connaissances soutiendront des études sur des sujets tels que les ressources en eau, les sécheresses, les événements extrêmes, ainsi que la surveillance à long terme des émissions de gaz à effet de serre.

Objectifs

Nous proposons un projet de doctorat visant à étudier les hypothèses clés des mesures d'eddy covariance, en veillant à ce que les signaux observés représentent les flux de l'écosystème. Le projet traduira les tests dans le domaine temps-fréquence et abordera trois questions fondamentales :

1. Observe-t-on systématiquement un écart spectral sur les hautes tours forestières ? La détection de l'écart spectral permettra de valider l'universalité de l'approche de Destouet et al. (2024) pour identifier les régions turbulentes.
2. Les tourbillons individuels peuvent-ils partitionner de manière fiable les flux directement à partir de données à 20 Hz ? À l'aide de simulations LES et d'apprentissage automatique sur les sites ICOS, cela permettra de tester et de renforcer la méthodologie de Coimbra et al. (2023).

science for people, life & earth

Matthias Cuntz, UMR Silva
INRAE Centre Grand Est – Nancy
54280 Champenoux, France
Tel.: +33 3 83 39 73 03

Join us



<https://mcuntz.github.io/fastforest/>



INRAE

3. Des flux à haute résolution temporelle peuvent-ils être fournis sur tous les sites ICOS européens ? Une application réussie sur tous les sites ICOS positionnera cette méthode comme une alternative robuste aux produits existants, ouvrant de nouvelles possibilités de recherche.

Ce projet combine l'analyse de la turbulence, la modélisation et l'apprentissage automatique pour faire progresser la recherche sur les flux écosystémiques.

Méthodologie

Au cours de ce projet, le.a doctorant.e développera une nouvelle méthode d'analyse d'eddy covariance qui intègre directement dans le traitement des données brutes les étapes clés du post-traitement, telles que les tests de turbulence (ITC, u^*) et la répartition des flux nets en GPP et RESP. S'appuyant sur les travaux de Destouet et al. (2024) et Coimbra et al. (2023), la méthode sera affinée, validée à l'aide de simulations LES et testée par rapport au traitement standard sur tous les sites écosystémiques ICOS.

Le projet comprend :

1. Le développement d'une chaîne complète de traitement des données brutes pour remplacer les méthodes actuelles (par exemple, EddyPro®) en mettant en œuvre des corrections de fréquence, des ajustements d'humidité et des corrections de densité directement sur les données à haute fréquence.
2. La validation de la qualité des flux et de l'adéquation de la turbulence à l'aide d'informations temps-fréquence afin d'améliorer les tests ITC et de confirmer la précision des flux écosystémiques.
3. La répartition des flux en GPP et RESP à haute résolution temporelle en affinant les méthodes pour tenir compte des incertitudes dans les flux tourbillonnaires individuels et en étendant l'applicabilité à divers écosystèmes et hauteurs de tour.
4. Le test de la méthode avec des simulations LES/DNS, fournissant un banc d'essai sans bruit pour valider les hypothèses clés, telles que le confinement des comportements tourbillonnaires.
5. Appliquer la méthode à tous les sites ICOS, en tirant parti de son évolutivité dans divers écosystèmes pour démontrer son potentiel en tant qu'alternative aux produits existants.

Les travaux se concentreront dans un premier temps sur les sites gérés FR-Hes et FR-Gri, ainsi que sur la haute tour forestière SE-Svb, avant d'être étendus à l'ensemble du réseau ICOS, offrant ainsi un outil robuste et haute résolution pour la recherche sur les flux écosystémiques.

Applications

Nous recherchons un.e candidat.e motivé.e, prêt.e à s'investir dans un travail interdisciplinaire à la croisée du traitement du signal, de la mécanique des fluides et de l'écophysiologie. Une bonne maîtrise des outils informatiques, des compétences en mathématiques appliquées et un intérêt marqué pour la recherche sur le climat ou l'environnement sont requis. La capacité à collaborer dans un environnement international est un plus.

La thèse se déroulera pendant trois ans à l'[UMR Silva](#) sur le campus d'[INRAE](#) près de Nancy (54280 Champenoux) à partir de l'automne 2025, avec déplacements fréquents à l'[UMR Ecosys](#) à Paris-Saclay.

Pour postuler, veuillez envoyer une lettre de motivation, un CV, le relevé de notes du master (ou des 3 années d'école d'ingénieurs), un contact d'un.e référent.e académique.e, ainsi qu'un résumé (300 mots) du sujet du master (ou du stage de fin d'études) à :

Matthias Cuntz – matthias.cuntz@inrae.fr

Pedro Coimbra – pedro-henrique.herig-coimbra@inrae.fr

Les entretiens auront lieu entre début août et mi-septembre.

N'hésitez pas à nous contacter pour toute information complémentaire.

science for people, life & earth

Matthias Cuntz, UMR Silva
INRAE Centre Grand Est – Nancy
54280 Champenoux, France
Tel.: +33 3 83 39 73 03

Join us



<https://mcuntz.github.io/fastforest/>



INRAE