

LABO - Axe ou Equipe

Institut Pascal - axe GePEB

Directeur de thèse : Jean-Pierre FONTAINE, PR – j-pierre.fontaine@uca.fr

Participant à l'encadrement : Claude-Gilles DUSSAP, PR – C-Gilles.DUSSAP@uca.fr

Titre du sujet de thèse : Mise à l'échelle d'un modèle de croissance de plantes supérieures, de la feuille à la canopée, en environnement de gravité réduite

Résumé du sujet de thèse :

L'exploration spatiale de longue durée, comme l'exploration de la Lune ou de Mars, nécessite le développement d'un système de support-vie efficace et robuste pour recycler l'atmosphère, l'eau et les déchets afin d'assurer la survie de l'équipage. Selon certaines prédictions de la NASA, au moins 15 % de la nourriture devrait être produite à bord pour les longs voyages. L'Agence spatiale européenne (ESA) développe le projet MELiSSA (Micro-Ecological Life-Support System Alternative) depuis plus de 35 ans. Il concerne la croissance de plantes supérieures, qui est fortement influencée par les conditions environnementales (g , p , T , HR , flux d'air, pression partielle d' O_2 ou de CO_2). Des conditions de croissance optimales nécessitent donc un niveau élevé de contrôle et de gestion, et aussi une compréhension approfondie des phénomènes clés et de leurs interactions avec l'environnement (comme la transpiration ou le transfert de masse).

L'objectif de cette étude est d'améliorer et de valider le modèle physique mécaniste en cours de développement à l'Institut Pascal (axe GePEB) pour prédire l'effet de la microgravité ou d'un environnement de gravité réduite sur la croissance des plantes à ses niveaux morphologique, physico-chimique et biochimique. En effet, pendant la croissance, les phénomènes limitants sont principalement (i) le transfert d'évapotranspiration au niveau de la feuille associé à la régulation de la température de surface de la feuille, (ii) la migration de l'eau dans la plante (provenant du sol ou du milieu hydroponique après absorption par les racines) et (iii) l'échange CO_2/O_2 produit par le processus de photosynthèse. Une approche mécaniste, multicouche et multi-échelle (espace et temps) est donc étudiée. Aujourd'hui, le modèle MELiSSA pour les plantes supérieures est basé sur des bilans de masse et d'énergie au niveau d'une seule feuille, avec l'objectif d'estimer les coefficients d'échange gazeux de transpiration KLa pour les conditions environnementales d'un habitat spatial.

L'influence de la gravité a été introduite par L. Poulet (thèse CNES-CNRS, 2018), en considérant l'altération des échanges gazeux due à la faiblesse ou à l'absence de convection libre en cas de gravité réduite. En conséquence, une réduction de la production de biomasse est attendue. La tendance globale du modèle confirme certaines données expérimentales obtenues lors de vols paraboliques par Kitaya et al. (2001, 2006), mais une validation plus large reste nécessaire. J. Kuzma (doctorat CNES-ESA en cours) a développé un système de réplique foliaire spécifique pour la campagne parabolique VP175 (CNES, octobre 2023) afin de caractériser le flux évaporatif pendant les phases transitoires et de valider le modèle. Plusieurs intensités de vitesse d'air sont étudiées ainsi que l'inclinaison de la réplique par rapport au flux moyen. Les répliques de feuilles sont étudiées pour réaliser des expériences d'évaporation purement physiques afin d'éviter toutes les questions biochimiques/biologiques concomitantes ou les variations génétiques qui se développent au cours de la croissance.

L'objectif de cette thèse est d'étendre le modèle du niveau de la feuille à celui de la canopée afin de développer une description basée sur la connaissance des échanges de masse, de chaleur et d'énergie au lieu de modèles empiriques (non développés pour des environnements fermés ou spatiaux). Les échanges de masse (carbone, gaz) et de chaleur dépendent fortement de l'épaisseur de la couche limite des feuilles et de la canopée, qui dépend des mouvements de l'air, et donc de la convection forcée et libre - résultat des forces de flottabilité et donc de la gravité. Pour la mise à l'échelle, il sera fondamental de déterminer les interactions avec l'environnement, car il ne s'agit généralement pas d'une simple somme d'interactions entre les feuilles individuelles, mais d'une intégration non linéaire. Par exemple, chaque feuille affecte de manière significative son environnement en modifiant localement la vitesse du vent, l'irradiation ou l'humidité relative locale.

L'accent sera mis sur l'augmentation d'un ordre de grandeur de la taille de notre système de réplique, d'une feuille carrée de 5 cm de côté à une canopée de 50 cm de côté dans un environnement contrôlé. Plusieurs

formes de feuilles devraient être étudiées : carrée, triangulaire ou circulaire. Deux "couches de feuilles" pourraient être envisagées pour étudier l'interaction entre le sous-étage et la canopée, ainsi que différents angles (-30 à +30 degrés, cf. Kuzma 2023). Le débit doit varier de 0 à 1,5 m/s dans des conditions standard : 20°C de température ambiante et 70% d'humidité moyenne.

L'objectif initial sera de développer un modèle simulation numérique CFD pour étudier le transfert couplé de chaleur et de masse, basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes et d'énergie en 3D avec le logiciel Phoenix. Le niveau d'humidité pourrait être représenté par l'ajout d'une équation de conservation de la concentration d'eau, pour représenter la modification du niveau local d'humidité relative par une feuille individuelle et le profil d'humidité relative dans la canopée. Le flux d'évaporation sera simulé par un terme source sur la face inférieure des feuilles, car les stomates (pores de 50 μm pour la transpiration de la plante) sont principalement situés en dessous. La simulation se concentrera sur des cas spécifiques et limites, comme pour (i) la gravité 0-g (ou 10^{-2}), g/6 (Lune), 1-g ; (ii) l'intensité du débit ; (iii) la configuration géométrique de la canopée.

Le deuxième objectif sera de développer un banc d'essai correspondant aux cas optimaux et de les tester lors de campagnes de vols paraboliques afin de valider les résultats numériques.