

Travail de fin d'études: Influence de la circulation d'air au sein des chambres de l'écotron sur les conductances convectives

Auteur : Authelet, Valérian

Promoteur(s) : Longdoz, Bernard

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2022-2023

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/16984>

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.

**Influence de la circulation d'air au sein des chambres de
l'écotron sur les conductances convectives**

Authelet Valérian

Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
master de bioingénieur en sciences et technologies de l'environnement

Année académique 2022-2023

Promoteur : Longdoz Bernard

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

**Influence de la circulation d'air au sein des chambres de
l'écotron sur les conductances convectives**

Authelet Valérian

Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de
master de bioingénieur en sciences et technologies de l'environnement

Année académique 2022-2023

Promoteur : Longdoz Bernard

Remerciements

Je souhaite exprimer ma gratitude envers mon promoteur, Bernard Longdoz, pour son encadrement, sa relecture attentive et ses conseils pertinents. Je souhaite exprimer ma profonde reconnaissance envers Florian Vanden Brande pour son aide au quotidien, son suivi attentif et ses précieuses relectures. Sa disponibilité sans faille et son accompagnement constant ont été des atouts majeurs pour prendre les bonnes décisions et avancer sereinement dans la réalisation de ce mémoire. Sa capacité à transmettre ses connaissances de manière claire et concise m'a permis de comprendre rapidement les différentes étapes à suivre et de définir précisément l'objet de ce travail. Je tiens à exprimer ma reconnaissance envers les deux techniciens, Henri Choppin et Gaëtan Bogaerts, qui ont toujours répondu présents à mes attentes et ont généreusement consacré leur temps pour apporter une contribution technique précieuse à mon travail. Je tiens également à souligner la disponibilité et la réactivité de Quentin Beauclaire, dont l'aide a été précieuse. Grâce à votre soutien et à votre collaboration, ce travail a pu être mené à bien dans les délais impartis. Je suis profondément reconnaissant envers chacun d'entre vous pour votre participation active, qui a fait de cette expérience une source d'enrichissement personnel.

Résumé

L'objectif de cette étude est d'analyser les différences d'échanges de chaleur sensible et latente entre l'écotron et Lonzée. Comprendre ces différences revêt une importance cruciale, car elles pourraient potentiellement compromettre la capacité de l'écotron à reproduire fidèlement les conditions naturelles. Pour ce faire, une paire de feuilles artificielles en aluminium, dimensionnées à partir d'une feuille réelle de froment a été utilisée pour déterminer la conductance de couche limite dans une chambre de culture de l'écotron. La conductance de couche limite est déduite à partir de l'équation du bilan d'énergie appliquée sur les deux feuilles, l'une étant chauffée à l'aide d'une résistance électrique et l'autre non chauffée. Le dispositif a fait l'objet de mesure en soufflerie. Une fonction logarithmique à deux paramètres a été ajustée sur les points expérimentaux obtenus à partir du tunnel de vent pour établir une relation entre la conductance de couche limite et la vitesse du vent. Les expériences réalisées dans la chambre de culture en écotron ont montré que l'inclinaison et la position des feuilles n'ont pas d'impact significatif sur la conductance de la couche limite. Ces résultats ont permis d'extrapoler une conductance de couche limite à l'échelle d'un couvert de froment. Les résultantes des conductances entre les deux sites ont ensuite été comparées. La résultante des conductances à Lonzée a été calculée de deux manières différentes, par modélisation et par Eddy Covariance. Cette dernière étant plus précise et fiable, elle a été comparée à la conductance de couche limite en écotron. La conductance de couche limite en écotron est environ dix fois plus importante que la résultante des conductances à Lonzée. Par ailleurs, il s'avère que les stomates contrôlent majoritairement l'échange entre la feuille et son environnement mais que la conductance aérodynamique totale est pour la plupart du temps non négligeable. Par conséquent, la reproduction correcte de la conductance aérodynamique totale de Lonzée dans l'écotron reste nécessaire.

Mots-clés : feuilles artificielles, conductance, écotron, Lonzée, circulation de l'air, échange, froment

Abstract

The aim of this study is to analyse the differences in sensible and latent heat exchange between the ecotron and Lonzée. Understanding these differences is of crucial importance, as they could potentially compromise the ecotron's ability to faithfully reproduce natural conditions. To this end, a pair of artificial aluminium leaves, sized from a real winter wheat leaf, was used to determine the boundary layer conductance in an ecotron growth chamber. The boundary layer conductance is deduced from the energy balance equation applied to the two leaves, one heated by an electrical resistor and the other unheated. The device was measured in a wind tunnel. A two-parameter logarithmic function was fitted to the experimental points obtained from the wind tunnel to establish a relationship between boundary layer conductance and wind speed. Experiments carried out in the ecotron growth room showed that leaf inclination and position had no significant impact on boundary layer conductance. These results made it possible to extrapolate a boundary layer conductance to the scale of a wheat canopy. The conductance results between the two sites were then compared. The resultant conductance at Lonzée was calculated in two different ways, by modelling and by Eddy Covariance. As the latter is more accurate and reliable, it was compared with the extrapolated ecotron boundary layer conductance. The ecotron boundary layer conductance is around ten times greater than the resultant conductances at Lonzée. Furthermore, it turns out that the stomata control most of the exchange, but that the total aerodynamic conductance is not negligible most of the time. Consequently, it is still necessary to correctly reproduce the total aerodynamic conductance of Lonzée in the ecotron.

Keywords : artificial leaves, conductance, ecotron, Lonzée, air circulation, exchange, winter wheat

Table des matières

1	Introduction	1
2	Etat de l'art	3
2.1	Transpiration	3
2.2	Couche limite	5
2.3	Méthodes de détermination de la conductance de couche limite	6
2.4	Écotron	8
2.4.1	Circulation de l'air dans l'écotron	8
2.5	Lonzée	9
3	Matériels et méthodes	9
3.1	Bilan d'énergie de la feuille artificielle	9
3.2	Conception des feuilles artificielles	11
3.3	Température de la feuille	11
3.4	Dispositif et traitement des données	12
3.4.1	Dispositif expérimental	12
3.4.2	Fonctionnement général et traitement des données	12
3.5	Phase de calibration	14
3.5.1	Amélioration du dispositif	14
3.5.2	Test de puissance	14
3.5.3	Relation théorique entre la vitesse de vent et la conductance de couche limite	15
3.6	Mise en place du dispositif en écotron	16
3.6.1	Impact du panneau lumineux	16
3.7	Détermination de l'émissivité	17
3.8	Analyse de sensibilité	18
3.9	Détermination de la conductance aérodynamique à Lonzée	19
3.9.1	Détermination de g_{ah} par la méthode basée sur la modélisation	19
3.9.2	Détermination de g_{ah} à partir de l'Eddy Covariance	21
4	Résultats	22
4.1	Tunnel de vent	22
4.1.1	Biais sur la mesure	22
4.1.2	Relation entre la conductance et la vitesse de vent	23
4.2	Mesures en écotron	24
4.2.1	Impact de la position	24
4.2.2	Impact de l'inclinaison	24
4.3	Conductances modélisées pour le couvert à Lonzée	25
4.3.1	Dynamique temporelle et comparaison des valeurs des conductances pour une journée type	25
4.3.2	Lien avec la vitesse de vent et la vitesse de friction	26
4.3.3	Distribution des points de la conductance aérodynamique totale	27
4.4	Conductances mesurées à Lonzée à partir de l'Eddy Covariance	28
4.4.1	Dynamique temporelle et comparaison avec les conductances modélisées	28
4.4.2	Conditions climatiques pour lesquelles la conductance de canopée dépasse ou atteint la conductance aérodynamique totale	29
4.5	Extrapolation de la conductance de couche limite mesurée en écotron à la conductance aérodynamique totale	30
4.6	Comparaison de la distribution des points de g_{ah_EC} pour les trois années de culture avec $g_{ah_ecotron}$	30
5	Discussion	31
5.1	Reproductibilité du comportement d'une feuille réelle	31
5.2	Biais potentiels sur la mesure de la conductance de couche limite	31
5.3	Extrapolation de la conductance de couche limite de la feuille à la conductance aérodynamique totale dans l'écotron	32
5.3.1	Effet de la position	32
5.3.2	Effet de l'inclinaison	32

5.3.3	Effet du couvert	33
5.3.4	Effet de la conductance aérodynamique	33
5.4	Importance relative des conductances dans le transfert	33
5.5	Comparaison des vitesses de transfert entre les deux sites	34
6	Conclusions et perspectives	35
7	Annexes	41
7.1	Laboratoire	41
7.1.1	Conception des feuilles artificielles	41
7.1.2	Paire de feuilles	41
7.1.3	Impression 3D du système de support	42
7.1.4	Réalisation des pistes	43
7.1.5	Dispositif d'acquisition et de traitement des données	44
7.1.6	Tunnel de vent	44
7.1.7	Amélioration du dispositif	45
7.1.8	Réalisation de la boîte en aluminium	45
7.1.9	Démonstration du calcul de l'émissivité	46
7.2	Écotron	46
7.2.1	Circulation de l'air	46
7.2.2	Feuilles artificielles	47
7.2.3	Positionnement	47
7.2.4	Conductances des feuilles	48
7.2.5	Extrapolation	48
7.3	Représentation comparative des résistances s'opposant au transfert en écotron et à Lonzée	49
7.4	Lonzée	50
7.4.1	Mesures effectuées sur le froment d'hiver	50
7.4.2	Moments pour lesquels la conductance de canopée dépasse ou atteint la conductance aérodynamique totale	50
7.5	Codes	51
7.5.1	Code CRBasic	51
7.5.2	Code pour le traitement de données des feuilles artificielles	53
7.5.3	Code Matlab ayant servi pour extraire les différentes conductances à Lonzée	55

Table des figures

1	Transpiration en écotron et à Lonzée de jour et de nuit	2
2	Résistances au passage du flux de chaleur sensible et latente	4
3	Hausse de la température des feuilles au cours du temps	13
4	Température des feuilles au cours du temps	13
5	Test de puissance	15
6	Impact du rayonnement solaire sur la conductance	17
7	Équation du second degré ajustée au GAI	20
8	Erreur sur la conductance calculée par vitesse de vent et par feuille	22
9	Courbe ajustée sur les points expérimentaux de conductance et courbes théoriques	23
10	Influence de la position sur la conductance	24
11	Influence de l'inclinaison sur la conductance	25
12	Moyenne journalière des différentes conductances pour les trois années de culture	25
13	Moyenne journalière de la vitesse de vent et de la vitesse de friction pour les trois années	27
14	Distribution de g_{ah_m} pour le jour et la nuit lors des trois années de culture	28
15	Moyenne journalière de g_{ah_EC} et g_{ah_m} pour les trois années de culture	28
16	Comparaison de g_{ah_EC} pour les trois années de culture à Lonzée avec $g_{ah_ecotron}$	30
17	Réalisation des feuilles artificielles	41
18	Feuilles placées côte à côte	41
19	Pièces de support	42
20	Dispositif de support complet	42
21	Typon	43
22	Dispositif d'acquisition et de traitement des données	44
23	Tunnel de vent	44
24	Ajustement du système	45
25	Détermination de l'émissivité	45
26	Circulation de l'air en écotron	46
27	Placement des feuilles artificielles en écotron	47
28	Positionnement des feuilles artificielles en écotron	47
29	Conductances pour deux couples de feuilles placées à l'horizontale en écotron	48
30	Résistances au transfert en écotron	49
31	Résistances au transfert à Lonzée	49

Liste des tableaux

1	Erreur sur la mesure	18
2	Analyse de sensibilité sur chaque paramètre	18
3	Impact de l'inclinaison sur la conductance	24
4	Moyennes et écarts-types des différentes conductances le jour et la nuit pour les trois périodes de culture	26
5	Moyennes et écarts-types de la vitesse de vent et de friction le jour et la nuit pour les trois périodes de culture	27
6	Moyenne et écart-type de g_{ah_EC} et comparaison avec g_{s_EC}	29
7	Pourcentage de données pour lesquelles g_{ah_m} ou g_{ah_EC} est moins de cinq fois supérieur à g_{s_m} ou g_{s_EC}	29
8	Mesures de GAI	50
9	Paramètres météo pour lesquels g_{s_EC} ou g_{s_m} atteint ou dépasse g_{ah_EC} ou g_{ah_m}	50

1 Introduction

Au fil de l'histoire de la Terre, le climat a subi d'importants changements en raison de divers facteurs. Ces changements sont attribuables à des variations de l'orbite terrestre, à l'activité solaire et à l'occurrence d'éruptions volcaniques. Ces éléments ont été les moteurs des fluctuations climatiques au fil du temps. Il est désormais évident qu'un nouveau facteur s'impose parmi ceux qui ont toujours été présents. Cet autre facteur n'est autre que l'homme. En effet, il est maintenant largement accepté que l'activité humaine est un facteur majeur qui influence le climat de la Terre (Mukherji *et al.*, 2023). Les émissions de gaz à effet de serre résultant de l'utilisation des combustibles fossiles, de l'industrie, de l'agriculture intensive et de la déforestation ont considérablement accru la concentration de ces gaz dans l'atmosphère (Tanuro, 2015). À mesure que les émissions de dioxyde de carbone (CO_2) continuent d'augmenter et que les puits naturels de carbone ne sont pas capables d'absorber cette augmentation, il est inévitable que la concentration de CO_2 dans l'atmosphère continue de croître. Au cours de l'histoire de la Terre, aucune période n'a connu une augmentation aussi rapide et marquée des concentrations de CO_2 que celle observée depuis le début de la révolution industrielle (Machta, 1972). Ce constat est préoccupant car le CO_2 capture puis réémet vers la surface terrestre une partie de l'énergie que la Terre émet sous la forme d'infrarouge lointain pour se refroidir. Cela contribue à ce qu'on appelle l'effet de serre et qui se traduit par un forçage radiatif pour le système terrestre. Ces émissions d'origine humaine sont la principale cause du réchauffement climatique observé au cours des dernières décennies (Mukherji *et al.*, 2023).

L'eau est qualifiée comme ressource la plus précieuse pour l'agriculture (Rijsberman, 2006). Cependant, le changement climatique a des répercussions sur le cycle de l'eau en entraînant sa dérégulation (Collins *et al.*, 2013) et son intensification (Kundzewicz, 2008). Cela aggrave le problème du stress hydrique, qui est déjà le facteur le plus limitant en termes de productivité (Lambers *et al.*, 2008). L'élévation des températures, conséquence directe du réchauffement climatique, entraîne une augmentation de la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère, ce qui accroît la pression de vapeur saturante. Cela entraîne une demande accrue en eau par l'atmosphère et conduit à une sécheresse de la végétation (Grossiord *et al.*, 2020). De plus, l'augmentation de l'humidité atmosphérique favorise l'occurrence d'événements pluvieux intenses ainsi que de sécheresses extrêmes (He *et al.*, 2020). Les perturbations climatiques affectent le *continuum* sol-plante-atmosphère et, par conséquent, le fonctionnement des écosystèmes (Scheffers *et al.*, 2016).

De nombreuses incertitudes demeurent concernant l'impact du réchauffement climatique sur les écosystèmes. Néanmoins, des expériences de plus en plus sophistiquées ont vu le jour. Les premières expériences menées pour étudier l'impact du changement climatique sur les écosystèmes sont connues sous le nom d'expériences FACE (Free-Air Carbon Dioxide Enrichment) (Ainsworth et Long, 2005). Ces expériences impliquent la croissance de plantes en plein air enrichi en dioxyde de carbone afin de simuler les niveaux élevés de CO_2 prévus dans le futur. Elles se concentrent principalement sur l'effet isolé de cet enrichissement en CO_2 sur les plantes. Les résultats ont démontré un effet "fertilisant" du CO_2 (plus il y a du CO_2 , plus la plante peut en absorber par photosynthèse). Cette approche limitée dans la manipulation des facteurs abiotiques a probablement compromis la fiabilité des estimations des réponses des écosystèmes au changement climatique. Pour mieux comprendre les impacts réels du changement climatique sur les écosystèmes, il est essentiel de tenir compte de la multifactorialité des paramètres atmosphériques et climatiques (Rineau *et al.*, 2019). La combinaison et la manipulation simultanée de ces paramètres peuvent présenter des défis conceptuels et technologiques (Leuzinger *et al.*, 2011).

Lorsqu'une infrastructure manipule les conditions atmosphériques et/ou climatiques, leur surveillance fréquente et précise ne peut être réalisée qu'avec des équipements de pointe. Les écotrons sont composées d'enceintes qui offrent un contrôle étroit et automatisé de l'ensemble des conditions environnementales (rayonnement, température de l'air, humidité relative, irrigation, concentration en CO_2 et O_3), au-dessus d'écosystèmes entiers (plantes et sol). Ces installations sont donc parmi les plus adaptées pour représenter le climat futur et ainsi étudier de manière approfondie ses effets sur les écosystèmes.

Les écotrons permettent d'étudier le comportement des agro-écosystèmes face au changement climatique, notamment l'impact croisé des sécheresses et de l'augmentation de CO_2 . Une première expérience a été menée en 2015 visant à étudier l'impact du changement climatique sur la croissance du froment. L'expérience a été menée en comparant les observations faites dans des enceintes témoins (dans lesquelles le climat imposé était celui observé en 2015 à Lonzée, commune proche de Gembloux) et des enceintes dans lesquelles le climat imposé était celui prédit pour 2094 au même endroit. La première étape de cette expérimentation consiste en une comparaison entre la croissance du froment des enceintes témoins et celle du froment de Lonzée (site de mesure sur une parcelle de culture et sur laquelle est réalisé un suivi de l'évolution de la biomasse, des échanges de gaz entre l'écosystème et l'atmosphère, ainsi que des conditions météorologiques et édaphiques). L'objectif étant de valider l'outil écotron en démontrant qu'il reproduit correctement les comportements des écosystèmes en situations naturelles extérieures. Des divergences en termes de surface foliaire, hauteur de froment et vitesse des successions des stades phénologiques ont été observées (Antoine *et al.*, 2019). Deux hypothèses ont été identifiées pour expliquer ces différences. La première est que l'émission, vers l'écosystème, d'infrarouge lointain par l'ensemble des parois constituant l'enceinte est différente de l'émission naturelle du ciel, et cela plus particulièrement pendant la nuit. La seconde hypothèse est la différence en termes de transfert de chaleur sensible et de chaleur latente entre les feuilles de froment et l'air. Cette différence serait liée à des différences de turbulence et de vitesse moyenne de vent entre l'écotron (où cet élément n'est pas contrôlé) et le site de Lonzée. L'ensemble de ces biais potentiels pourraient entraîner des perturbations de l'état thermique des feuilles (modification des échanges radiatifs, des transferts de chaleur sensible et de chaleur latente) avec un impact sur des processus comme la photosynthèse, la respiration ou la transpiration. Cette dernière étant proportionnelle à la chaleur latente, elle est aussi directement impactée par les caractéristiques du vent. Comme l'eau transpirée provient du sol, la non reproduction des flux de transpiration pourrait entraîner des divergences significatives entre les contenus en eau du sol naturel et en lysimètres et donc conduire à des mauvaises simulations des sécheresses.

Des expériences supplémentaires dans des conditions de température et d'humidité relative de l'air identiques à 2015 ont montré une évapotranspiration plus importante dans l'écotron qu'à Lonzée (voir figure 1) ce qui semble incriminer la vitesse moyenne et la turbulence du vent pour expliquer les biais constatés dans la première expérience. L'objet de ce travail est de comparer, entre les enceintes et Lonzée, les éléments qui contrôlent ce transfert de vapeur d'eau. Plus précisément, l'influence sur le flux transpiratoire de la circulation de l'air différente dans les chambres de l'écotron par rapport à la situation naturelle sera investiguée. Les résultats obtenus se limitent au cas du froment d'hiver.

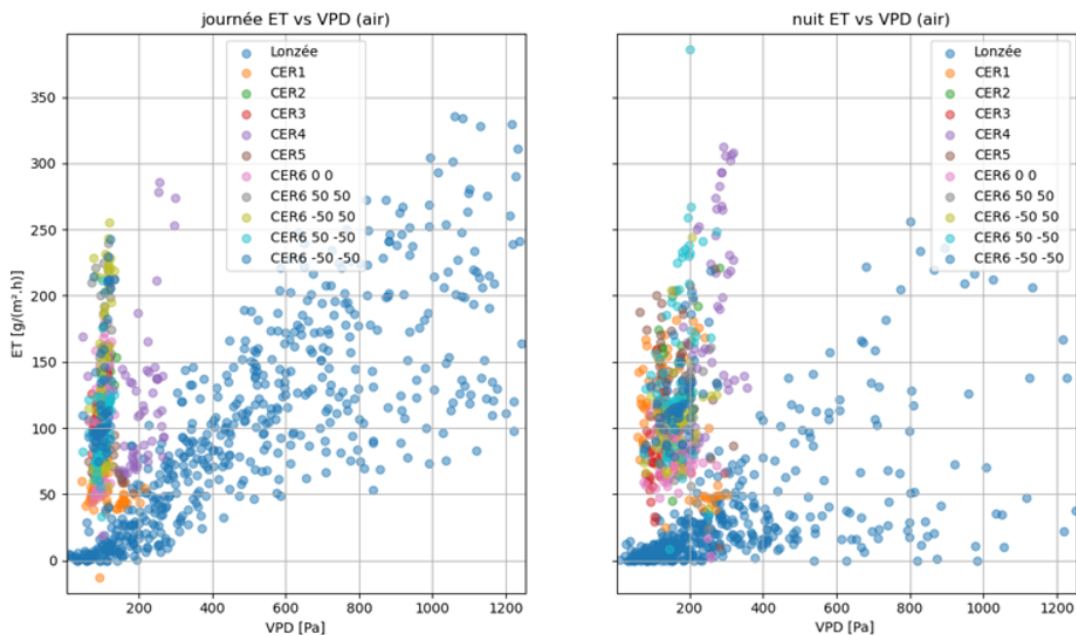


FIGURE 1 – Transpiration en écotron et à Lonzée de jour et de nuit

La transpiration en écotron (CER désigne une des six enceintes fermées de l'écotron) est bien plus importante qu'à Lonzée pour une même demande évaporative

2 Etat de l'art

2.1 Transpiration

Les plantes sont capables de percevoir des signaux extérieurs et d'y réagir (Farquhar et Sharkey, 1982). Les végétaux ont également la capacité d'interagir et échanger des flux d'énergie et de matière avec leur environnement. Les processus d'échange les plus importants pour une plante sont la photosynthèse (pour la croissance) ainsi que la transpiration (pour la régulation thermique). Les plantes ont un rôle prépondérant dans le cycle de l'eau puisque plus de 90% de l'eau absorbée est utilisée par la transpiration (Yoo *et al.*, 2009). La feuille, en tant qu'organe essentiel de la plante, est le site où se déroule la plupart des processus vitaux. Elle agit à la fois comme une source et un puits de chaleur, de matière et de quantité de mouvement (Schuepp, 1993). La transpiration a plusieurs fonctions essentielles. Tout d'abord, elle permet de réguler la température de la plante en libérant de l'eau en surface, ce qui évite la montée en température de la feuille. En effet, sous l'action du soleil, la température de la feuille peut être 10 à 20°C plus élevée que celle de l'air (Gates *et al.*, 1965). Grâce à la transpiration la température de la feuille est réduite de 2 à 3°C (Clum, 1926). De plus, le flux transpiratoire permet de prélever les minéraux et nutriments présents dans le sol (Novák et Vidovič, 2003).

La transpiration peut être traduite comme un processus par lequel l'eau à l'intérieur de la plante traverse une série de voies avant de se retrouver sous forme de vapeur dans l'environnement. Elle est caractérisée par une densité de flux de transfert des molécules de H_2O entre le sol et l'air, par l'intermédiaire de la plante, avec des conductances inversement proportionnelles aux résistances qui entravent la diffusion de ces molécules sur leur parcours. L'eau est en premier lieu puisée par les racines. Ensuite, elle pénètre dans le réseau vasculaire de la plante, appelé xylème. Sous l'action de la force de succion liée à un gradient de pression hydrostatique (pression de plus en plus faible lors de son avancée), l'eau poursuit sa route jusqu'au mésophylle pour enfin atteindre la cavité sous-stomatique. C'est au niveau de cette cavité que l'eau s'évapore (Tyree et Yianoulis, 1980). Les cellules de gardes s'opposent alors au passage de la vapeur d'eau à travers le stomate vers l'air en se gonflant d'eau par turgescence (Gutiérrez *et al.*, 1994). Une fois sortie à la surface de la feuille, la vapeur d'eau s'en éloigne en traversant une zone où l'humidité de l'air est d'autant plus faible qu'on s'éloigne de la surface (couche limite). La vapeur d'eau est alors dans l'air interne du couvert végétale et doit encore sortir de ce couvert pour atteindre l'atmosphère (traversée aérodynamique) où sa concentration est relativement homogène. Plusieurs auteurs, dont (Williams et Amer, 1957) font l'analogie avec la loi d'Ohm pour décrire les processus de transfert de matière. Au départ de la feuille, ces flux doivent donc surmonter en série les résistances liées aux stomates, à la couche limite et la couche aérodynamique qui s'opposent à leur passage (Raschke, 1960). Chaque résistance peut être convertie en une conductance (l'inverse de la résistance) et qui représente la facilité à passer les éléments précités. La conductance stomatique (g_s), de couche limite (g_{bh}) et éventuellement la conductance aérodynamique (g_{am}) sont placées en série sur le parcours de la matière ou de l'énergie échangée. Pour représenter cela, la figure 2 illustre les résistances aux flux de chaleur sensible et latente. La résultante de plusieurs conductances en série est équivalente au rapport entre leur produit et leur somme. Comme plusieurs feuilles sont présentes dans un couvert, le schéma pour déterminer la conductance totale du couvert doit prendre en compte la présence de plusieurs conductances en parallèle. Pour déterminer la conductance totale de conductances en parallèle, il faut sommer les conductances.

Les différents compartiments impliqués dans les échanges ne freinent pas les transferts de la même manière. En particulier, la conductance de couche limite est supérieure à la conductance stomatique (Grace, 1977; Farquhar et Sharkey, 1982). De plus, la sensibilité de la transpiration aux différents compartiments est liée à l'échelle spatiale considérée. À l'échelle d'une parcelle, la conductance de couche limite devient un paramètre non négligeable dans la résistance totale (Leuning, 1989). La plante ne transpire pas seulement par les stomates mais aussi par la cuticule même si cette alternative est moins fréquente puisque la résistance associée est importante par rapport à la résistance stomatique ((Farquhar et Sharkey, 1982). Le transfert d'eau à travers la cuticule sera négligé. Cette étude se concentrera exclusivement sur les résistances stomatique, de couche limite et aérodynamique.

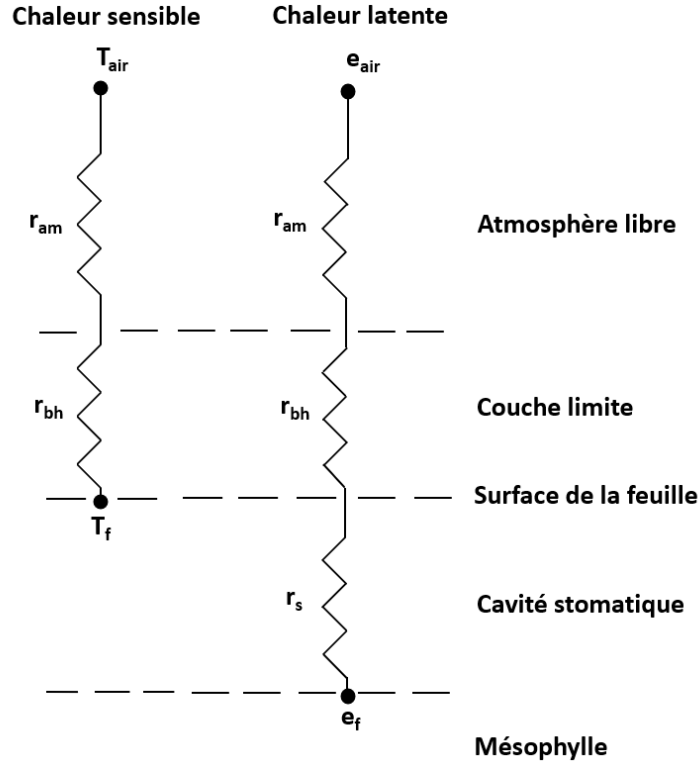


FIGURE 2 – Résistances au passage du flux de chaleur sensible et latente

Les résistances r_{bh} et r_{am} s'opposent au flux de chaleur sensible, conditionné par la différence de température. Pour la chaleur latente, r_s s'ajoute aux deux autres résistances. Le flux est dirigé par la différence de pression de vapeur entre l'intérieur de la feuille et l'air extérieur ($e_f - e_{air}$)

La transpiration est un processus continu et dynamique qui dépend de nombreux paramètres environnementaux. Le flux transpiratoire n'est jamais nul puisque les stomates du froment ne se ferment pas totalement la nuit. Pendant la nuit, la transpiration représente généralement de 5 à 15 % de la transpiration totale sur une journée complète. Par ailleurs, le flux de transpiration évolue avec le degré de développement de la culture (Gázquez *et al.*, 2008). En effet, la croissance des organes végétaux modifie les paramètres environnementaux perçus par les plantes. Lorsque la culture est dense et haute, le rayonnement solaire pénètre moins facilement au travers de la canopée, ce qui affecte directement le microclimat (température, humidité, turbulence ou encore la vitesse de vent ressenties dans le couvert) (Dixon et Grace, 1984). De plus, la transpiration est qualifiée de processus endogène puisqu'elle est régulée par des mécanismes internes grâce à l'ouverture stomatique (Resco de Dios *et al.*, 2013). Celle-ci réagit à la couleur bleue et rouge claire du spectre électromagnétique (Shimazaki *et al.*, 2007). La fonction des stomates est de réguler les échanges gazeux entre la plante et l'air environnant. En s'ouvrant, les stomates permettent à la plante de puiser le CO_2 de l'air nécessaire à la production de sucres mais s'exposent par la même manière à des pertes en eau. Plus récemment, une théorie de maximisation a été proposée pour décrire le fonctionnement des stomates. Leur dynamique d'ouverture suit une fonction de maximisation qui minimise les pertes en eau sur une journée pour une quantité de carbone séquestrée (Cowan *et al.*, 1977). Il est maintenant reconnu que l'ouverture stomatique est directement liée au VPD, à la productivité primaire brute (GPP) ainsi qu'à la concentration en CO_2 (Damour *et al.*, 2010). À l'échelle horaire, seuls le VPD et la GPP sont responsables des variations de la conductance stomatique. Comme la GPP est principalement fonction de la densité de flux de photons photosynthétiques (PPFD), les dynamiques horaires de la conductance stomatique sont principalement liées au VPD et au PPFD. Les stomates s'ouvrent pour laisser entrer le CO_2 à mesure que la quantité de lumière reçue par les plantes augmente. En revanche, le VPD est inversement proportionnel à la conductance stomatique. Lorsque le VPD augmente, surtout à des valeurs élevées et quand il y a peu d'eau dans le sol, la conductance stomatique baisse. Ceci est dû à la production d'acide abscissique par les racines, qui est ensuite transporté par le système vasculaire jusqu'aux cellules de garde pour réduire l'ouverture des stomates (Davies et Zhang, 1991). Des explications plus détaillées sur la dynamique d'ouverture du stomate et son fonctionnement sont apportées dans (Farquhar, 1978; Franks *et al.*, 1997).

Monteith est considéré comme l'un des pionniers dans l'étude de la transpiration des plantes. Ses travaux ont permis de comprendre les mécanismes physiologiques qui régissent ce processus. Il a été l'un des premiers à avoir proposé des modèles pour estimer la transpiration à partir de paramètres environnementaux. Selon lui, la transpiration dépend du déficit de pression de vapeur (VPD), la densité de flux de rayonnement solaire, la concentration en CO_2 , la teneur en eau du sol, la température de l'air, l'humidité relative et la vitesse de vent moyenne (Monteith, 1965). Cette dernière intervient à plusieurs niveaux. Tout d'abord, l'augmentation de la vitesse de vent moyenne diminue les résistances de couche limite et aérodynamique (Huang *et al.*, 2015). De plus, le vent est responsable d'un brassage de l'air et diminue la différence de température entre la feuille et l'air (Grace, 1988). Enfin, une réduction de l'ouverture stomatique est observée lorsque la vitesse de vent augmente, surtout lorsque la teneur en eau dans le sol est limitante (Kuiper, 1961). Par ailleurs, (Schuepp, 1980) a mené des expériences en laboratoire pour quantifier le transfert de chaleur et de masse dans des conditions de vent intermittent. Il a constaté que pour une vitesse de vent moyenne identique, le transfert était supérieur de 30% avec un vent intermittent. À très faible vitesse de vent, qui surviennent souvent de nuit, l'écart entre les deux pouvait atteindre jusqu'à 100%. L'intermittence du vent, en plus du vent moyen, est donc un paramètre essentiel dans l'étude du transfert de chaleur et de masse.

Il est important de reproduire correctement la transpiration dans une expérience de simulation des conditions réelles. Si ce n'est pas le cas, le bilan énergétique et la température des feuilles peuvent être impactés et modifier à leur tour les flux de chaleur latente et sensible. En effet, la transpiration joue un rôle clé dans le refroidissement des feuilles et l'échange de chaleur avec l'environnement. Lorsque la transpiration est sous-estimée, le refroidissement des feuilles est compromis, ce qui peut entraîner une augmentation de leur température. Cela peut avoir un impact sur la photosynthèse car des températures élevées peuvent affecter l'efficacité des processus biochimiques mais aussi entraîner des dommages aux tissus végétaux. D'autre part, une surestimation de la transpiration peut conduire à un refroidissement excessif des feuilles et à une perte d'eau excessive.

2.2 Couche limite

Introduit pour la première fois par Prandtl (Prandtl, 1905), le concept de la couche limite fait référence à une mince couche d'air qui entoure la feuille et la sépare de l'air homogène à proximité (Schuepp, 1993). La conductance de couche limite s'exprime en m/s . Il s'agit de la vitesse à laquelle une quantité de matière (eau, CO_2) la traverse (Mellor *et al.*, 1964). La couche limite contrôle la densité de flux avec laquelle l'énergie absorbée par rayonnement est dissipée à travers la convection par chaleur sensible et latente (Parlange *et al.*, 1971). En tant que lieu d'échange d'énergie et de matière, la couche limite joue un rôle important dans le transfert des flux entre la feuille et son environnement. L'augmentation de sa conductance se traduit par une réduction de son épaisseur, ce qui augmente la transpiration et plus généralement les échanges de masse et d'énergie.

Elle comprend trois sous-couches (Grace, 1977). La sous-couche laminaire est la couche la plus proche de la feuille. Elle est très mince par rapport à l'épaisseur totale. Cependant, elle peut contribuer à la majeure partie de la résistance d'échange (Defraeye *et al.*, 2010) puisque le flux d'énergie et de matière perpendiculaire à cette couche doit se faire sans l'aide de l'écoulement laminaire. La deuxième couche, appelée la couche de transition, se situe entre la sous-couche laminaire et la couche turbulente. Cette dernière marque la séparation avec l'air extérieur. L'épaisseur totale des trois sous-couches varie en fonction des conditions de vent. Son épaisseur varie entre 1 mm pour des vitesses de vent élevées et 1 cm pour des vitesses de vent faibles (Raschke, 1960).

En plus de dépendre de la vitesse et de la turbulence du vent dans l'air extérieur, l'épaisseur de la couche limite dépend de la taille de la feuille, de la rugosité de la surface et de la forme des bords d'attaque que perçoit le vent en arrivant sur la feuille (Schuepp, 1993). La rugosité est déterminée par la présence de vaisseaux, trichomes, lobes, poils et même la présence de stomates (Defraeye *et al.*, 2013). Elle réduit la vitesse de vent (Schuepp, 1993) ce qui diminue l'épaisseur de la couche limite (Grace et Wilson, 1976) et est également responsable d'augmenter la turbulence (Dixon et Grace, 1984). À l'échelle de la parcelle, l'effet de la rugosité du couvert est corrélé à l'indice foliaire (LAI) (Daudet *et al.*, 1999), la hauteur du couvert et la taille des feuilles (Grantz et Vaughn, 1999; Landsberg et James, 1971). La conductance de couche limite, au cours du développement d'une culture, peut diminuer de moitié avec l'effet d'abri du couvert (Stokes *et al.*, 2006).

2.3 Méthodes de détermination de la conductance de couche limite

Selon le théorème de Vaschy-Buckingham et la théorie des nombres adimensionnels, la conductance de couche limite est déterminé par une relation entre trois nombres (Aubinet et Longdoz, 2019).

En convection forcée, les trois nombres associés sont : le nombre de Nusselt (Nu) (1), le nombre de Prandtl (Pr) (2) et le nombre de Reynolds (Re) (3) qui sont définis ci-dessous. La relation entre les trois termes dépend de la forme de la surface considérée et du type d'écoulement.

Le transfert de chaleur au travers d'une couche limite en convection naturelle est légèrement différent. La vitesse du fluide dans la couche limite ne dépend plus de la vitesse du fluide hors de la couche limite mais dépend de l'action combinée du poids de l'air et de la poussée d'Archimède. Le nombre de Reynolds est remplacé par le nombre de Grashof (Gr) (4).

Par définition :

$$Nu = \frac{d}{\kappa \times r_{bh}} \quad (1)$$

où d [m] est la taille de l'objet, κ [m^2/s] la diffusivité thermique du fluide et r_{bh} [s/m] la résistance de couche limite.

$$Pr = \frac{\nu}{\kappa} \quad (2)$$

Avec ν [m^2/s] la viscosité cinématique du fluide.

$$Re = \frac{u \times d}{\nu} \quad (3)$$

où u [m/s] est la vitesse moyenne de l'air dans la couche limite.

$$Gr = \frac{\beta \times g \times \Delta T \times d^3}{\nu^2} \quad (4)$$

où β [$1/K$] est le coefficient d'expansion volumique isobare, ΔT [K] la différence de température entre l'air ambiant et la surface et g [m/s^2] l'accélération de la pesanteur.

Les conductances de couche limite pour les échanges de chaleur sensible et chaleur latente sont différents. Un facteur correctif doit être appliqué pour passer de l'une à l'autre (Knauer *et al.*, 2018a) (5). En pratique, l'erreur de quelques pourcents est négligeable par rapport aux autres sources d'incertitude (Knauer *et al.*, 2018a).

$$\frac{1}{g_{bx}} = \frac{1}{g_{bh}} \times \frac{S_{cx}^{0,67}}{Pr} \quad (5)$$

Avec g_{bx} la conductance de couche limite pour une quantité x (vapeur d'eau), g_{bh} la conductance de couche limite pour le transfert de chaleur, S_{cx} le nombre de Schmidt pour la quantité x et $Pr = 0,71$.

La conductance de couche limite d'une feuille peut être estimée à partir du bilan énergétique d'une feuille grâce à la connaissance des flux de chaleur latente, de chaleur sensible, du rayonnement net, la conductance stomatique ainsi que de la température de la feuille. Cependant, il est complexe en pratique de mesurer tous ces éléments de façon continue et reproductible. Il existe des outils qui permettent de les quantifier mais ces derniers perturbent l'écoulement autour de la feuille et empêchent l'obtention de la conductance de couche limite de manière précise. Il est plus pratique de travailler avec des feuilles artificielles, répliques permettant de s'affranchir de la conductance stomatique. Ces répliques permettent, en outre, une meilleure reproductibilité entre les mesures (Defraeye *et al.*, 2013). En utilisant des feuilles artificielles métalliques et/ou réelles et sur base d'un travail sur le transfert de chaleur ou de masse (eau), il existe trois types d'approches.

La première approche, correspond à la méthode analytique. Cette dernière utilise de fines plaques métalliques qui sont soumises à un écoulement parallèle à leur surface et dont la vitesse est connue. Un coefficient de transfert est déduit des relations qui existent entre nombres adimensionnels.

Dans la deuxième approche, le coefficient de transfert est déterminé à partir de feuilles réelles ou artificielles soit à partir d'un transfert convectif de chaleur sensible, soit d'un transfert de masse (voir ci-dessous). Le transfert convectif de chaleur sensible est déduit à partir de feuilles réelles où la transpiration a été stoppée ou des feuilles artificielles où cette transpiration n'existe pas (affranchissement vis-à-vis de la conductance stomatique). La quantification de ce flux permet d'accéder à la conductance de couche limite. Cette autre approche, appelée méthode expérimentale peut se réaliser en laboratoire ou sur le terrain.

La dernière approche est celle des méthodes numériques, plus récentes et basées sur des simulations de la dynamique des fluides pour prédire le transfert convectif (Amara *et al.*, 2021). Ces techniques sont prometteuses car elles permettent d'obtenir des informations avec une résolution spatiale et temporelle élevée.

Nous avons choisi la deuxième approche pour plusieurs raisons. La méthode analytique manque de représentativité. Les fines plaques utilisées sont de formes géométriques souvent trop simples. Cette approche n'est pas retenue puisqu'elle s'éloigne fortement du comportement d'une feuille réelle. La dernière approche n'est pas utilisée puisque les vitesses de vent au centre de l'écotron sont extrêmement variables. En effet, le brassage de l'air et la turbulence rencontrée sont importants ce qui complique leur représentation par un modèle.

En général, pour la méthode expérimentale, les conductances déterminées à partir d'une mesure directe sont plus élevées par rapport à celles obtenues à partir d'équations théoriques qui prédisent le comportement d'une fine plaque placée parallèlement à un écoulement. Il est courant de calculer un facteur de correction, appelé facteur d'augmentation, qui est le ratio entre la conductance mesurée et la conductance théorique (Wigley et Clark, 1974). La méthode expérimentale peut être déclinée en trois versions. La première utilise une seule feuille et la conductance de couche limite est déduite en effectuant un bilan énergétique sur cette feuille chauffée (Kitano et Eguchi, 1989).

La deuxième version est celle du bilan thermique à deux états et repose sur la même approche mais elle utilise deux feuilles chauffées alternativement. Lorsqu'une feuille est chauffée, l'autre feuille ne l'est pas et ainsi de suite. Cette version est celle adoptée dans ce travail et est expliquée dans la section 3.1. Les feuilles artificielles peuvent être remplacées par des feuilles réelles mais pour empêcher leur transpiration, de la vaseline peut y être appliquée (cela fait disparaître la transpiration et la conductance stomatique inconnue du bilan énergétique) (Thorpe et Butler, 1977).

La troisième version consiste à chauffer à une température connue la feuille artificielle et ensuite analyser la courbe de refroidissement (Kumar et Barthakur, 1971; Parlange *et al.*, 1971). La quantité de chaleur perdue par convection est estimée sur base de cette courbe. La feuille peut aussi être initialement refroidie et ensuite la courbe de réchauffement dans l'air ambiant est analysée.

La dernière version se base sur la technique de transfert de masse, et celle qui est la plus rencontrée pour la détermination de la conductance de couche limite est la méthode de la perte en eau. Elle consiste à mouiller une feuille et la peser en début et fin d'expérience pour en déduire un coefficient de transfert de masse. La conductance de couche limite est déduite de ce coefficient. Le papier buvard est souvent utilisé comme matière de feuille artificielle (Brenner et Jarvis, 1995; Grace et Wilson, 1976; Schuepp, 1980; Thom, 1968). Les feuilles réelles enduites de plâtre sont également utilisées (Landsberg et Ludlow, 1970).

Les expériences sur les flux de chaleur sont préférées à celles de transfert de masse pour deux raisons principales. La détermination du coefficient de transfert de masse est moins directe et certaines techniques ne sont pas déployables pour une mesure en continu sur le terrain. C'est pour ces raisons que le dispositif expérimental imaginé dans ce travail repose sur la technique basée sur le flux de chaleur sensible.

La plupart des recherches expérimentales sur l'échange convectif se réalisent en laboratoire en raison de la relative stabilité des conditions. La sensibilité en laboratoire à un seul facteur d'influence est plus aisément identifiée et la répétabilité améliorée. Cependant, les conditions extérieures ne sont pas exactement reproduites à l'identique. Sur le terrain, il faut être conscient des sources de variabilité des facteurs environnementaux. Les résultats obtenus sont très spécifiques à une situation donnée.

Dans le cadre de ce TFE, un dispositif basé sur l'étude de l'échange convectif de chaleur sensible a été calibré et validé en laboratoire. Ce dispositif a ensuite été utilisé pour obtenir des valeurs de conductance de couche limite spécifiques à l'écotron. La méthode utilisée pour la quantification de l'échange convectif est la méthode du bilan thermique à deux états.

2.4 Écotron

Encore aujourd'hui, la connaissance sur les processus écologiques et les interactions entre facteurs à l'échelle d'une parcelle agricole est encore loin d'être totalement acquise. Un des moyens pour y arriver consiste à reproduire les conditions environnementales des écosystèmes à plus faible échelle dans des installations closes. L'avantage majeur de ce dispositif est la maîtrise de plusieurs facteurs influents et la répétabilité des expériences. L'objectif est d'avoir une compréhension générale sur le système de taille réduite pour ensuite tenter de les extrapoler à plus large échelle. Pour limiter les erreurs d'incertitudes sur l'extrapolation, il est impératif de maîtriser la qualité de la représentation des conditions environnementales.

Dans le cadre de ce travail, plusieurs expériences se sont déroulées dans le TERRA-écotron.

Ce TERRA-écotron est constitué de six enceintes fermées utilisées pour étudier les écosystèmes dans des conditions contrôlées. Il fait partie de la CARE (Cellule d'Appui à la Recherche et à l'Enseignement) appelée "Environnement Is Life". Il est situé dans le bâtiment de recherche inter-facultaire TERRA. Ce dispositif innovant a la capacité de recréer, dans la mesure du possible, des climats passés, présents et même futurs, les événements climatiques (même extrêmes) et les climats de la plupart des régions sur Terre. Il est donc possible de prévoir et d'analyser les effets du changement climatique sur les écosystèmes. Les conditions environnementales (la température de l'air, l'humidité de l'air, le rayonnement solaire, la concentration en CO_2 , la concentration en O_3 ou encore les précipitations) sont régulées par un dispositif de contrôle dirigé par un centre opérationnel.

2.4.1 Circulation de l'air dans l'écotron

L'air des enceintes est renouvelé fréquemment pour éviter l'accumulation de gaz émis par l'écosystème ou la structure et qui écarterait la situation interne de la situation naturelle. Par conséquent, l'air est pompé depuis l'extérieur. Il est ensuite chauffé ou refroidi à une température standard de 10°C. En fonction du climat imposé dans la chambre de mesure dans laquelle il sera injecté, les paramètres de l'air sont réajustés. Dans cette chambre de mesure, l'air est pulsé latéralement via deux panneaux perforés.

Le lieu du point de rencontre de l'air pulsé latéralement se trouve au centre de la chambre, où sont disposés les lysimètres. Des vitesses de vent fluctuantes combinées à la présence de nombreux tourbillons induisent un brassage très efficace au centre de la chambre. Le transport de chaleur ou de matière par l'air ne s'effectue donc pas dans une direction particulière. Il s'effectue dans toutes les directions et, *a priori*, la température et les concentrations sont relativement homogènes. Une thèse de doctorat est en cours (Florian Vanden Brande) et traite entre autre de la détermination de la circulation de l'air dans les chambres de l'écotron. Les premiers résultats viennent confirmer les attentes avec une vitesse de l'air qui change continuellement de valeur dans les trois directions dû à une turbulence élevée. En moyenne, les composantes de la vitesse de vent sont égales entre-elles mais leurs écarts-types autour de cette moyenne est important. De plus, un travail de fin d'études montre que les vitesses de vent horizontale et verticale ainsi que la vitesse de friction en écotron restent très stables dans le temps (Strivay *et al.*, 2020). La vitesse moyenne du vent horizontale et verticale étaient en moyenne respectivement de 0,15 m/s et de 0,08 m/s. La vitesse de friction moyenne sur la période de mesure était de 0,05 m/s.

La vitesse moyenne du vent est relativement constante au cours du temps. Cependant, pendant des courtes périodes, il a été remarqué que les vitesses de vent étaient modifiées de façon significative. Ces variations de vitesse de vent observées s'établissent lorsque le système de ventilation du panneau lumineux se met en route après avoir atteint un certain seuil de température.

Pour illustrer les propos avancés, une représentation graphique de la circulation de l'air en écotron est fournie en annexe 7.2.1

2.5 Lonzée

Lonzée est un petit village proche de Gembloux dans la région de la Hesbaye. La station de mesures de Lonzée a été installée en 2004 et est un des premiers sites en Europe voué à la production agricole. Lonzée fait partie du réseau Européen ICOS (Integrated Carbon Observation System). La station contient des capteurs qui sont capables de suivre en continu les paramètres météorologiques et des conditions édaphiques. Cette station est également dotée d'un système d'Eddy Covariance. Ce dispositif permet d'obtenir avec une résolution temporelle de 30 minutes, des flux de chaleur latente, de chaleur sensible et de CO_2 entre la parcelle et l'atmosphère.

La parcelle, dédiée à la culture, s'étend sur une surface de 11,8 ha et inclut une rotation de 4 ans entre la betterave à sucre (*Beta vulgaris* L.), le blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.), la pomme de terre (*Solanum tuberosum* L.) et le blé d'hiver (*Triticum aestivum* L.).

Les objectifs d'une telle station sont multiples. Ce dispositif permet de quantifier, de mieux comprendre les déterminants, de modéliser les échanges entre la culture et l'environnement, d'analyser le bilan énergétique et d'avoir une visualisation plus détaillée des cycles biogéochimiques. En plus de tout cela, il est également possible d'évaluer l'impact des pratiques agricoles sur ces cycles.

3 Matériels et méthodes

3.1 Bilan d'énergie de la feuille artificielle

Dix feuilles fonctionnelles ont servi pour cette étude. Elles sont utilisées par paire. Le bilan d'énergie est appliqué sur des feuilles artificielles en vue de déterminer la conductance de couche limite (6). L'équation complète du bilan énergétique décrit chaque type d'énergie entrante ou sortante du système considéré.

$$\Delta S = SW_{in} - SW_{out} + LW_{in} - LW_{out} - H - LE \quad (6)$$

SW_{in} [W/m^2] est le rayonnement solaire entrant dans le système, SW_{out} [W/m^2] le rayonnement solaire réfléchi par la feuille, LW_{in} [W/m^2] le rayonnement infrarouge lointain émis par l'environnement et perçu par la surface, LW_{out} [W/m^2] le rayonnement infrarouge lointain émis, H [W/m^2] la chaleur sensible transmise par convection entre la surface et l'air, et LE [W/m^2] la chaleur latente. C'est la chaleur échangée lors des changements de phase. Enfin, ΔS [W/m^2] est le terme de stockage dans la masse de la feuille.

Les répliques sur lesquels les expériences sont réalisées sont totalement secs (7), le terme de chaleur latente est donc supprimé. Le terme de stockage est éliminé puisque la mesure de la conductance de couche limite se réalise lorsque la variation du terme de stockage est minimum, c'est-à-dire lorsque la température de la feuille atteint la stabilisation.

$$R_n = SW_{in} \times (1 - \alpha) + LW_{in} - LW_{out} = H \quad (7)$$

R_n [W/m^2] est le rayonnement net. L'albédo de la surface de la feuille est représenté sous le terme α .

Selon (Tibbals *et al.*, 1964), le flux de chaleur sensible (8) est dépendant de la densité de l'air (ρ_{air}) [kg/m^3], la capacité thermique spécifique de l'air à pression constante (Cp_{air}) [$J/(K \times kg)$] et la différence de température entre la surface de la feuille et l'air ($T_s - T_{air}$).

$$H = \rho_{air} \times Cp_{air} \times (T_s - T_{air}) \times g_{bh} \quad (8)$$

Les paires de feuilles artificielles utilisées sont considérées comme ayant des propriétés identiques, c'est-à-dire une forme, une rugosité de surface et une surface identiques. La technique du bilan thermique à deux états va être utilisée (Brenner et Jarvis, 1995; Daudet *et al.*, 1998, 1999; Domingo *et al.*, 1996; Grantz et Vaughn, 1999; Katsoulas *et al.*, 2007; Kimura *et al.*, 2020; Leuning, 1989; Leuning et Foster, 1990; Stokes *et al.*, 2006). Les feuilles sont chauffées en alternance de phase. La chauffe alternée entre les feuilles de la paire permet de s'affranchir des propriétés de surface. Le chauffage se fait par le biais d'une résistance électrique intégrée dans la feuille et alimentée par un générateur de courant. Les équations suivantes sont applicables pour une feuille chauffée (9) et non chauffée (10) respectivement :

$$\text{Chauffé : } R_{n1} + P_e = \rho_{air} \times Cp_{air} \times (T_{s1} - T_{air}) \times g_{bh} \quad (9)$$

$$\text{Non chauffé : } R_{n2} = \rho_{air} \times Cp_{air} \times (T_{s2} - T_{air}) \times g_{bh} \quad (10)$$

Avec R_{n1} et R_{n2} les rayonnements nets (solaires et infrarouges), g_{bh} [m/s] la conductance de couche limite des feuilles (considérées comme identiques), T_{s1} et T_{s2} les températures respectives des feuilles. P_e [W] étant la puissance électrique dissipée. Comme l'albédo est identique pour les deux feuilles, on obtient :

$$\text{Chauffé : } SW_{in} \times (1 - \alpha) + LW_{in} - LW_{out1} + P_e = \rho_{air} \times Cp_{air} \times (T_{s1} - T_{air}) \times g_{bh} \quad (11)$$

$$\text{Non chauffé : } SW_{in} \times (1 - \alpha) + LW_{in} - LW_{out2} = \rho_{air} \times Cp_{air} \times (T_{s2} - T_{air}) \times g_{bh} \quad (12)$$

Normalement, les termes de rayonnement solaire et de rayonnement infrarouge lointain reçu sont identiques (feuilles similaires et mêmes conditions d'exposition). Afin de vérifier cet élément, une période de mesure d'offset est réalisée (période pendant laquelle les deux feuilles non chauffées sont mises en parallèle dans les mêmes conditions). Si une différence de température est enregistrée, cet offset est considéré comme une anomalie et soustrait de la différence de température mesurée quand une des deux feuilles est chauffée. Cette opération permet de s'affranchir des écarts liés à des différences de rayonnement solaire et IRL reçu entre les deux répliques (Brenner et Jarvis, 1995; Stokes *et al.*, 2006). L'offset permet d'éviter de devoir le mesurer sur le terrain. Une faible émissivité et un albédo élevé permettent aussi de réduire la prépondérance de cet éventuel offset (Domingo *et al.*, 1996; Stanghellini, 1987). En considérant qu'en tenant compte de cet offset, le rayonnement solaire net et IRL reçu est identique pour les deux feuilles et en réalisant la soustraction de la première équation (11) par la seconde (12) :

$$-\Delta LW_{out} = \rho_{air} \times Cp_{air} \times (T_{s1} - T_{s2}) \times g_{bh} \quad (13)$$

Comme les deux feuilles ont des températures différentes, le rayonnement infrarouge lointain émis sera différent (13). L'émissivité (ϵ) des feuilles est identique puisque le matériau de recouvrement est le même. La différence de rayonnement infrarouge émis entre les deux feuilles se traduit par (14) :

$$\Delta LW_{out} = \epsilon \times \sigma \times (T_{s1}^4 - T_{s2}^4) \quad (14)$$

Avec σ la constante de Stefan-Boltzmann [$W/(m^2 \times K^4)$].

Il est indispensable de déterminer l'émissivité de la feuille en vue de connaître la perte par rayonnement. En effet, ce paramètre n'est pas connu *a priori*. Il sera déterminé expérimentalement par la suite 3.7.

En isolant la conductance de couche limite et en supposant que les deux conductances sont indépendantes de la température (15) :

$$g_{bh} = \frac{P_e + \Delta LW_{out}}{\rho_{air} \times Cp_{air} \times (T_{s1} - T_{s2})} \quad (15)$$

Avec la puissance électrique dissipée (16) :

$$P_e = \frac{V^2}{R \times A} \quad (16)$$

Où R [Ω] est la résistance électrique de la résistance chauffante insérée dans les feuilles, V [V] la différence de potentiel électrique appliqué à cette résistance et A [m^2] la surface d'une feuille artificielle.

3.2 Conception des feuilles artificielles

Les répliques ont été dimensionnées sur base d'un modèle d'une feuille de froment mature dans le but de les reproduire le plus fidèlement possible à la réalité. La feuille de froment a été scannée et a servi de base pour la réalisation des feuilles artificielles. Cependant, les aspérités de surface telles que la présence de trichomes ou encore du système circulatoire de la feuille n'ont pas été reproduits. La longueur de la feuille est de 20,5 cm et la largeur au point le plus large est de 1,5 cm. Son épaisseur est d'un millimètre tout du long. Son aire totale est de $2,158 \times 10^{-3} m^2$.

Les parties extérieures des répliques sont recouvertes d'aluminium de grande pureté. Le choix de ce matériau se justifie par sa disponibilité sur le marché. Ce matériau est caractérisé par une faible émissivité dans l'infrarouge ainsi que par sa conductivité thermique élevée qui permet d'obtenir une température la plus homogène possible à la surface de la feuille. L'étain est aussi souvent utilisé pour servir de matériau de recouvrement des feuilles artificielles puisque par sa conductivité élevée, il permet de maintenir une température uniforme à travers la feuille (Brenner et Jarvis, 1995; Dixon et Grace, 1983, 1984; Grace *et al.*, 1980; Grantz et Vaughn, 1999; Kimura *et al.*, 2020; Kitano et Eguchi, 1989). D'autres utilisent du cuivre (Daudet *et al.*, 1998, 1999; Parkhurst *et al.*, 1968; Vogel, 1970) ou même de l'acier. L'aluminium a déjà été utilisé comme revêtement de fines plaques carrées pour étudier la conductance de couche limite en soufflerie (Chen *et al.*, 1988a,b). Ce matériau a également servi pour déterminer la résistance aérodynamique d'une feuille de pois (Thom 68). L'aluminium n'a pas encore été utilisé pour déterminer de la conductance de couche limite avec un modèle de feuille dimensionné sur base d'une feuille réelle de froment.

La première étape d'élaboration consiste à recouvrir d'une couche de peinture et de cellulose les faces d'aluminium qui seront placées du côté intérieur de la feuille. Elles servent d'isolant électrique entre l'aluminium et la résistance chauffante. Ensuite, un thermocouple laminé de type t^2 est introduit au centre de la feuille. Le thermocouple est constitué de cuivre et de constantin. Il permet de suivre l'évolution de la température au centre de celle-ci. L'effet Seebeck produit par le couple cuivre-constantin est de $38,75 \mu V$ à $0^\circ C$. Un fil de constantin (0,18 mm de diamètre), plié en zigzag à l'aide d'un moule imprimé en 3D est inséré à l'intérieur de la feuille et s'étend sur toute sa longueur. La longueur du fil de constantin constitue la résistance électrique chauffant les feuilles. Cette résistance est variable d'une feuille à l'autre puisque la longueur de constantin n'est pas exactement identique pour chaque feuille. La puissance dissipée passera à travers cette résistance et permettra de chauffer la réplique. Une fois que tout est rentré dans le gabarit, l'autre demi partie de la feuille est collée avec de la loctite. Il ne reste plus qu'à raccorder la résistance de constantin avec les fils d'alimentation pour que la feuille soit effective. De la gaine thermorétractable a été placée au niveau des soudures afin de prévenir l'entrée d'humidité. Des images prises lors de la conception des feuilles artificielles sont disponibles en annexe 7.1.1.

Les deux feuilles formant une paire sont attachées à leur base par un dispositif de pince pour les maintenir dans une position stable identique l'une à côté de l'autre. Cependant, elles restent libres de se mouvoir à leur extrémité. Les deux feuilles sont écartées d'une distance minimale de 2 cm afin d'éviter toute influence mutuelle entre-elles. Une illustration de la paire de feuilles est illustré en annexe 7.1.2. Une visualisation des différentes pièces du système de support des feuilles est également fournie en annexe 7.1.3.

3.3 Température de la feuille

Le thermocouple transmet une valeur de tension qui correspond à une différence de température entre la feuille et un point de référence. Lorsque la température de référence est de $0^\circ C$, l'équation 17 peut être utilisée pour déduire la température de la feuille T_f à partir de la tension V .

$$T_f = 2.59 \times 10^1 \times V - 7.60 \times 10^{-1} \times V^2 + 4.64 \times 10^{-2} \times V^3 - 2.17 \times 10^{-2} \times V^4 \quad (17)$$

Ce n'est pas le cas dans notre expérience où la température de référence est la température ambiante T_{amb} différente de $0^\circ C$. Pour pouvoir tout de même utiliser cette équation, il ne faut pas y introduire directement la tension mesurée V_{therm} mais une tension corrigée tenant compte de la T_{amb} . Cette correction de V_{therm} en fonction de T_{amb} a été déterminé grâce à une régression effectuée sur 40 points pour une gamme de température entre $0^\circ C$ et $40^\circ C$ ³. Il s'avère que la relation est linéaire (18).

$$V = V_{therm} + 0,04 \times T_{amb} - 0,01 \quad (18)$$

Avec V la tension corrigée à introduire dans l'équation 17.

2. thermocouple FTC foil TC's, FluxTeq LLC, Blacksburg, USA
3. https://aviatechno.net/thermo/table_its90.php?type=T

3.4 Dispositif et traitement des données

3.4.1 Dispositif expérimental

Une centrale de mesure et de contrôle⁴ qui délivre une tension de 12 V et un multiplexeur⁵, afin de démultiplier les entrées de la centrale, ont été utilisés pour collecter les données en continu. En tout, six câbles sont reliés au multiplexeur par feuille. Deux câbles sont utilisés pour une mesure différentielle de la puissance injectée dans les feuilles. Deux câbles sont nécessaires pour l'alimentation. Les deux derniers servent pour une mesure différentielle du thermocouple. Une commande de relais⁶ composée de huit entrées permet de choisir quelle(s) résistance(s) chauffante(s) des feuilles artificielles est/sont alimentée(s). Cette commande est réalisée par la centrale. Les différents relais peuvent aussi être activés indépendamment et manuellement à l'aide d'interrupteurs présents sur la commande.

L'alimentation, le relais, la centrale ainsi que le multiplexeur ont été fixé sur une planche en bois. L'entièreté réside dans un casier en acier. Ce dispositif a été conçu en vue de faciliter son transport sur le terrain. Sur l'extérieur du casier, des circuits imprimés ont été conçus sur mesure pour assurer la communication entre les câbles des feuilles artificielles, branchés dans un bornier, et les câbles branchés dans les entrées du multiplexeur. Des illustrations sont fournies en annexe 7.1.4. La fabrication des pistes et la réalisation du typon sont également détaillés et illustrés en annexe 7.1.4.

Un régulateur précis de tension est positionné en amont de chaque feuille pour ajuster la valeur de la tension de chauffe V_c . Pour travailler à une puissance désirée P , étant donné que la résistance R est connue, il ne reste plus qu'à délivrer la tension exacte $V_c = \sqrt{P \times R}$. Comme la valeur de la résistance diffère d'une feuille à l'autre, la tension appliquée est ajustée pour chaque feuille afin d'attribuer une puissance identique à toutes les feuilles.

3.4.2 Fonctionnement général et traitement des données

Comme énoncé précédemment, la conductance de couche limite est déterminée à partir d'une chauffe alternée des feuilles artificielles entrecoupée par une période de mesure d'offset. Un code enregistré dans la mémoire de la centrale lui donne l'ordre de chauffer en alternance les deux feuilles de la paire. Une feuille de la paire est chauffée tandis que l'autre s'équilibre avec la température ambiante en attendant d'être chauffée à son tour.

Durant la première étape, la centrale donne l'ordre aux interrupteurs de la boîte relais de chiffre impair de s'ouvrir laissant passer le courant pour entamer la première phase de chauffe des premières feuilles des différents couples. Les interrupteurs restent allumés pendant une durée de 5 minutes. Ensuite, ils se ferment et tous les interrupteurs sont fermés pour une phase d'offset pendant 5 minutes. Les interrupteurs de chiffre pair s'ouvrent alors pendant 5 minutes pour chauffer les secondes feuilles des couples. Ils se ferment et tous les chauffages sont à nouveau éteints pendant 5 minutes pour une nouvelle phase d'offset. La séquence générale qui dure donc 20 minutes recommence alors en ouvrant les interrupteurs impaires.

Pour simplifier la compréhension du système, les phases sont représentées sur la figure 3. Lorsque les interrupteurs de la boîte relais sont ouverts, la feuille entre dans une phase de montée en température qui dure environ 1 min 40 s. Ce laps de temps correspond au tiers des 5 minutes totales que dure la chauffe et à la durée pendant laquelle la feuille voit sa température augmenter avant de se stabiliser. Pendant la période de montée en température, la feuille emmagasine plus d'énergie fournie par chauffage qu'elle n'en perd par rayonnement infrarouge et chaleur sensible transportée par convection. Il faut 1 min 40 s après l'ouvert des interrupteurs pour que le terme de stockage atteigne son maximum. Durant les 3 min 20 s restantes, la température de la feuille est stabilisée à une valeur conditionnée par la tension appliquée. Cette phase se nomme la phase de stabilisation. C'est pendant cette phase que la conductance de couche limite est calculée (15). En tout, elle est calculée 40 fois puisque la prise de données est effectuée tous les 5 secondes. Seules les données de la phase de stabilisation sont conservées pour déterminer la conductance de couche limite. Toutes les autres sont supprimées. De plus, la première période de chauffe de 5 minutes de la première feuille est systématiquement enlevée lors du calcul de la conductance. Il semblerait que les feuilles mettent un certain temps à s'acclimater aux conditions expérimentales. La structure du code permettant le traitement des données est retranscrit en annexe 7.5.2. Le code CRBasic est également disponible en annexe 7.5.1.

4. CR1000, Campbell scientific, Inc., Logan, USA

5. AM16/32B, Campbell scientific, Inc., Logan, USA

6. SDM-CD16ACA

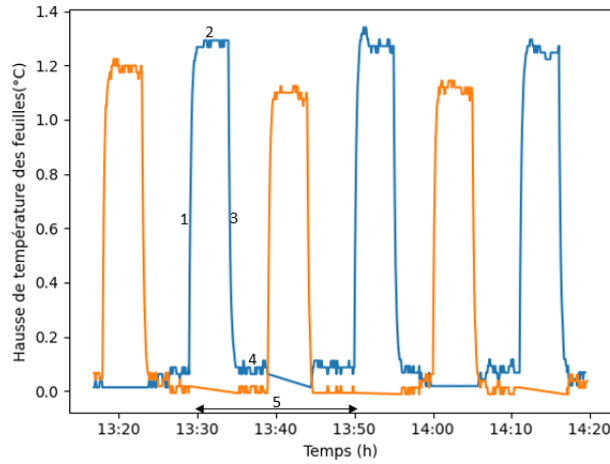


FIGURE 3 – Hausse de la température des feuilles au cours du temps
 Les différentes phases sont : (1) phase de chauffe, (2) phase de stabilisation, (3) phase de refroidissement, (4) calcul de l'offset, (5) séquence

Lorsque l'interrupteur lié à une feuille s'éteint, deux phases sont distinguées. La première est la phase de refroidissement qui a une durée approximative de 1 min 40 s. Le temps pour retomber à la température initiale est le même que celui pour arriver à la température stabilisée pendant la chauffe. Les courbes de montée et de descente en température sont symétriques. Pendant la phase d'offset, les deux feuilles ne sont pas chauffées et cela permet de prendre en compte la différence de température des feuilles alors qu'elles devraient être à la même température lorsque les deux sont totalement refroidies. En effet, la feuille qui vient d'être refroidie est censée être à la température de celle non chauffée. Une correction de la différence de température obtenue pendant la chauffe par cet offset permet non seulement de tenir compte des différences de rayonnement solaire mais aussi de prendre en compte l'incertitude sur la mesure de température faite par le thermocouple. La figure 4 représente l'ajout de l'offset à la feuille de température mesurée plus qu'il est faible.

L'avantage du système est qu'il présente une séquence relativement courte. Ceci permet de répéter le cycle un nombre de fois plus important pour une même période de temps. En comparaison, la séquence dure entre 15 minutes (Stokes *et al.*, 2006) et 1 heure (Brenner et Jarvis, 1995; Grantz et Vaughn, 1999; Katsoulas *et al.*, 2007).

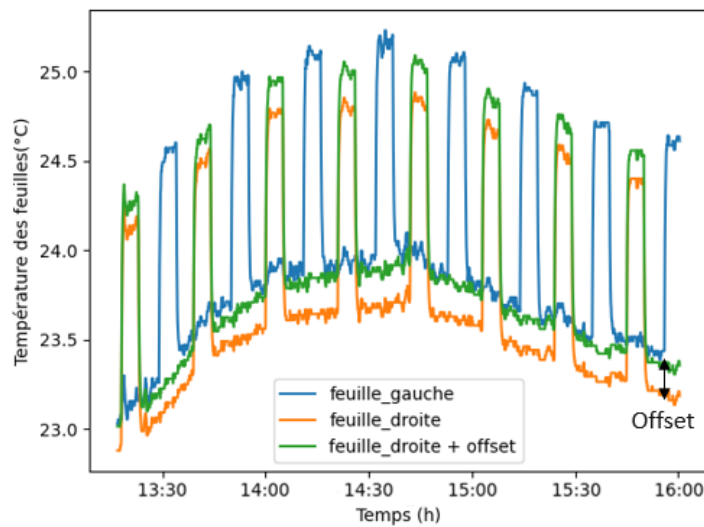


FIGURE 4 – Température des feuilles au cours du temps

Pour une vitesse de vent de 2,13 m/s et une puissance dissipée de $\frac{1}{4}W$. La hausse de température des feuilles suit également la hausse de température de la pièce

3.5 Phase de calibration

3.5.1 Amélioration du dispositif

Pendant la phase de calibration en laboratoire, les feuilles artificielles étaient placées à l'horizontale et parallèlement à l'écoulement du vent. Toute une série de mesures ont été réalisées à puissance constante de $\frac{1}{4}$ W, pour différentes vitesses de vent et plusieurs combinaisons de paires de feuilles. L'objectif est de vérifier que les conductances obtenues par les différentes feuilles sont semblables.

Un anémomètre de vent à fil chaud⁷ a été placé entre les deux feuilles à hauteur de leur surface afin de déterminer la vitesse de vent. Un tunnel de vent⁸, de débit d'air homogène, a été utilisé pour ajuster la vitesse de vent à celle choisie au cours des expériences. Des illustrations du tunnel de vent sont disponibles en annexe 7.1.6. La gamme de vitesse de vent du tunnel s'échelonne entre 0,8 m/s et plus de 5 m/s. Un sac réutilisable de fruits et légumes a été placé en sortie de tunnel permet de travailler à des vitesses plus faibles. La vitesse de vent de la pièce lorsque la soufflerie n'est pas activée, est considérée comme nulle. La température ambiante a été suivie en continu grâce à une sonde de température⁹.

Une première expérience de calibration a mis en doute l'hypothèse de l'absence de conduction entre les feuilles et leur support lors des phases de chauffe et de stabilisation. Il a été observé pour certaines feuilles que la température de la feuille non chauffée augmentait de façon non négligeable lorsque l'autre feuille de la paire chauffait. Deux explications à cette hausse de température peuvent être avancées. La chaleur peut soit se propager à travers le dispositif de support des feuilles par conduction, soit par convection d'une feuille à l'autre. L'ajout d'un matériau de faible conductivité thermique, beaucoup plus faible que le support constitué d'acide polylactique (PLA), a été imaginé en vue d'endiguer la perte de chaleur par conduction. Pour ce faire, de fines lamelles de balsa (3 mm d'épaisseur) ont été fixées au niveau de la base des feuilles. Le tout empêche d'avoir un contact direct entre l'aluminium des feuilles et le support en PLA. Après plusieurs essais, plus aucune augmentation de température n'a été observée lorsqu'une des feuilles était chauffée. Comme le problème a été résolu grâce à l'isolant, la chaleur se transmettait donc bien par conduction et non par convection.

Lors des premières mesures, le support était placé dans le prolongement direct du tunnel de vent en amont des feuilles. La turbulence induite par le support n'est pas homogène et elle peut mettre les feuilles d'un même couple dans des conditions légèrement différentes et potentiellement avoir une répercussion importante sur la mesure de conductance (Domingo *et al.*, 1996). En plaçant le support en aval, la valeur de conductance changeait et cela d'autant plus que la vitesse de vent était importante. Il a donc été supposé que l'hypothèse d'un support générant une turbulence qui modifiait la valeur de la conductance était correcte. Pour la suite de l'expérience, la pointe des feuilles est orientée directement face au tunnel et le support est placé en aval pour supprimer son effet sur l'écoulement. Des images du nouveau dispositif sont jointes en annexe 7.1.7.

3.5.2 Test de puissance

Après avoir amélioré le dispositif, un test incluant des mesures à puissances différentes a été réalisé avec une vitesse de vent identique et pour une même paire de feuille. L'augmentation de la puissance de chauffe permet de diminuer l'incertitude sur la mesure de la conductance de couche limite. Cette erreur est en grande partie liée à l'incertitude de la température obtenue par le thermocouple. Plus la différence de température entre la feuille chaude et la feuille froide est importante plus faible est son impact sur la conductance. Le but de ce test était de pouvoir déterminer la puissance maximum. En effet, il existe une limite supérieure à partir de laquelle la différence de température entre la feuille et l'air est tellement grande que de la convection naturelle est observée. La présence de cette convection est à éviter car le contexte de ce travail est la vérification de l'impact de la circulation d'air artificielle dans l'écotron sur les échanges de chaleur et de masse. Or cette circulation ne peut être impactante que si les couches limites sont celles associées à la convection forcée. Nous avons donc déterminé une puissance maximum pour rester dans cette condition de convection forcée. De plus, une chauffe trop importante surestime la mesure de la conductance (Daudet *et al.*, 1998). La hausse de la température de la feuille dépend à la fois de la tension délivrée à ses bornes et de la vitesse de vent. Plus la vitesse de vent est importante et plus la température en surface est réduite.

7. DTL08

8. The VKI School Lab portable Wind Tunnel, Von Karman Institute for Fluid Dynamics

9. HMP155, VAISALA

Après plusieurs essais, il a été jugé qu'une faible vitesse de vent doit être utilisée dans le test pour éviter de devoir utiliser des puissances de chauffe trop importantes (et endommager le dispositif) et faire monter la température des feuilles à des valeurs suffisantes. Pour se rapprocher des conditions de l'écotron, la vitesse de vent choisie pour le test est égale à 0,5 m/s. Celle-ci est obtenue grâce au sac réutilisable de fruits et légumes déposé sur la face extérieure du tunnel de vent pour réduire la vitesse de sortie. Plusieurs puissances (1,5, 1, $\frac{3}{4}$, $\frac{1}{2}$ et $\frac{1}{4}$ W) ont été injectées dans les feuilles.

La figure 5 montre les valeurs des conductances obtenues à différentes puissances dissipées. La conductance de couche limite augmente clairement au-dessus de 0,8 W. La conductance mesurée à 1 W est significativement plus grande que pour les autres puissances. La conductance mesurée au-delà de 1,5 W retombe à des valeurs bien plus faibles qu'à 1 W. Il semblerait qu'à une puissance de 1,5 W, la température de la feuille est telle qu'elle l'endommage. C'est certainement pour cette raison que la conductance diminue brusquement. Dans le but de garder le matériel intact et d'éviter de générer de la convection naturelle, la tension appliquée aux feuilles artificielles en écotron sera de 0,5 W.

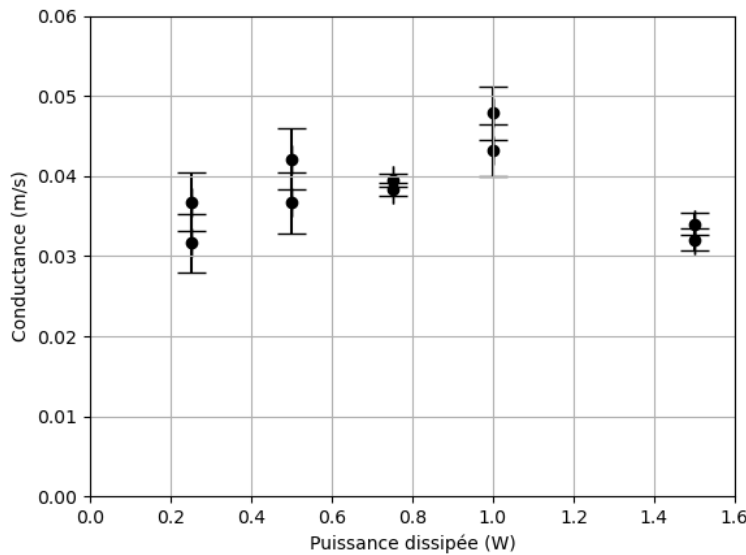


FIGURE 5 – Test de puissance

Plusieurs auteurs se sont déjà penchés sur la question mais ils ont identifié les différences de températures air-feuille maximum et pas la puissance de chauffe qui est spécifique au matériel utilisé. La convection naturelle devient non négligeable pour une différence de température dépassant les 5°C pour (Boulard et Wang, 2000). De façon empirique, l'effet de la flottabilité est négligeable pour des vitesses de vent supérieures à 2 m/s (Bailey, 2000; Kittas *et al.*, 1997; Papadakis *et al.*, 1996). Pour éviter les problèmes liés à la convection naturelle, (Leuning et Foster, 1990) a chauffé chaque paire 1°C seulement au-dessus de la température ambiante. (Stokes *et al.*, 2006) chauffe quant à lui ses feuilles artificielles à une température proche des 10°C au-dessus de la température ambiante.

3.5.3 Relation théorique entre la vitesse de vent et la conductance de couche limite

Il est courant dans la littérature d'établir une relation entre la conductance et la vitesse de vent puisqu'elle est assez directe. Pour cette étude, une fonction logarithmique à deux paramètres est utilisée pour établir cette relation (Brenner et Jarvis, 1995). La relation est simple (19) puisqu'elle n'utilise que deux paramètres a et b. Selon les auteurs, le premier paramètre (a) dépend des caractéristiques de l'air (diffusibilité thermique et viscosité cinématique) alors que le deuxième (b) est borné entre deux valeurs en fonction de l'écoulement dans la couche limite. Les valeurs de diffusibilité thermique et viscosité cinématique ont été choisies pour une température de 20°C. En théorie, le paramètre b a une valeur de 0,5 pour un écoulement laminaire et 0,8 pour un écoulement turbulent.

$$g_{bh} = a \times u^b \quad (19)$$

Les équations 20 et 21, tirées de (Kreith, 1973) ne sont valables que dans le cas d’une convection forcée, pour une surface plate et seulement une seule face d’échange (Kreith et Manglik, 2016). Il faut donc multiplier le numérateur par 2 pour calculer l’échange sur les deux faces. Ces courbes théoriques représentent les valeurs de conductance théoriques qui sont atteintes pour des couches limites purement laminares ou turbulentes, respectivement.

$$g_{bh} = \frac{0,664 \times \kappa^{0,67} \times u^{0,5}}{l^{0,5} \times \nu^{0,17}} \times 2 \quad (20)$$

$$g_{bh} = \frac{0,036 \times \kappa^{0,67} \times u^{0,8}}{l^{0,2} \times \nu^{0,47}} \times 2 \quad (21)$$

Avec l la dimension caractéristique de la feuille. C’est la longueur parallèle à l’écoulement, c’est-à-dire la longueur de la feuille.

La fonction curve fit sur python sera utilisée pour ajuster l’équation (19) sur les points expérimentaux obtenus quand la procédure énoncée dans la section 3.4.2 sera appliquée pour différentes vitesses de vent. Cela permettra d’obtenir la valeur des paramètres a et b .

3.6 Mise en place du dispositif en écotron

Les feuilles ont tout d’abord été placées à l’horizontal. Ensuite, elles ont été inclinées dans une plage d’angle classique observée dans une culture réelle de froment (Shibayama, 2006; Shibayama et Watanabe, 2007). Les feuilles artificielles ont été inclinées vers le haut successivement à 45, 55, 65 et 75° par rapport à l’horizontal. L’angle d’inclinaison a été mesuré avec un rapporteur. Deux paires de feuilles fonctionnelles ont servi pour l’expérimentation. Elles étaient disposées dans une chambre de mesure vide, sans végétation. Des images sont jointes en annexe 7.2.2.

Le climat imposé dans la cellule de mesure est resté constant durant toute l’expérience. Etant donné que l’humidité relative n’influence ni la mesure de la conductance, ni la circulation de l’air dans l’écotron et que la température de l’air n’influence pas la circulation de l’air et est prise en compte dans le calcul de conductance, ces variables ne pas pertinentes dans la détermination de la couche limite. La température qui régnait dans l’enceinte était de 20°C avec une humidité de 50% et un régime de vent comme décrit dans le point 2.4.1.

La prise de mesure en écotron était bien plus longue (8h-16h) qu’avec le tunnel de vent (2-3h). Il n’y a pas eu de répétition entre les mesures.

Deux paramètres ont été modifiés par rapport à la prise de mesure avec le tunnel de vent. La durée du cycle complet a été multipliée par 3 en vue d’augmenter le nombre de points de mesures lors de la phase de stabilisation. De plus, la puissance dissipée dans les feuilles est doublée. Avec le tunnel de vent, les feuilles ont été chauffées avec une puissance dissipée de $\frac{1}{4}$ W alors qu’en écotron la puissance dissipée était de $\frac{1}{2}$ W.

Les feuilles ont toujours été disposées au même endroit dans la chambre de mesure et à la même hauteur par rapport au niveau du sol (45 cm). Seul l’angle d’inclinaison variait entre chaque série de mesures. Le positionnement des feuilles en écotron est représenté en annexe 7.2.3. Toutes les mesures ont été effectuées dans le noir sauf lorsque l’impact du panneau solaire a été étudié.

3.6.1 Impact du panneau lumineux

La figure 6 montre l’effet du panneau solaire pour les deux positions (P1, P2) pour des feuilles placées à l’horizontal. L’allumage du panneau lumineux permet de vérifier si une éventuelle différence de rayonnement solaire perçu par les feuilles artificielles est correctement compensée par l’offset, et n’affecte pas la conductance la couche limite. Un autre risque est que le système de refroidissement par ventilation du panneau lumineux vient influencer sur la mesure de la conductance de couche limite en modifiant les caractéristiques du vent autour des feuilles.

Toutes les données fournies par les deux paires de feuilles pour les deux positions ont été rassemblées et utilisées ensemble pour déterminer l’impact du panneaux lumineux sur la mesure puisque la position n’avait pas d’influence (voir section 4.2.1). Le test de Student indique que le panneau solaire n’a pas d’effet significatif (p -valeur = 0,152) sur la conductance de couche limite. Le rayonnement solaire est donc correctement pris en considération par l’offset. De plus, si le système de refroidissement du panneau lumineux s’est bien déclenché au cours de l’expérimentation, celui-ci n’a pas d’effet sur la mesure de la conductance de couche limite.

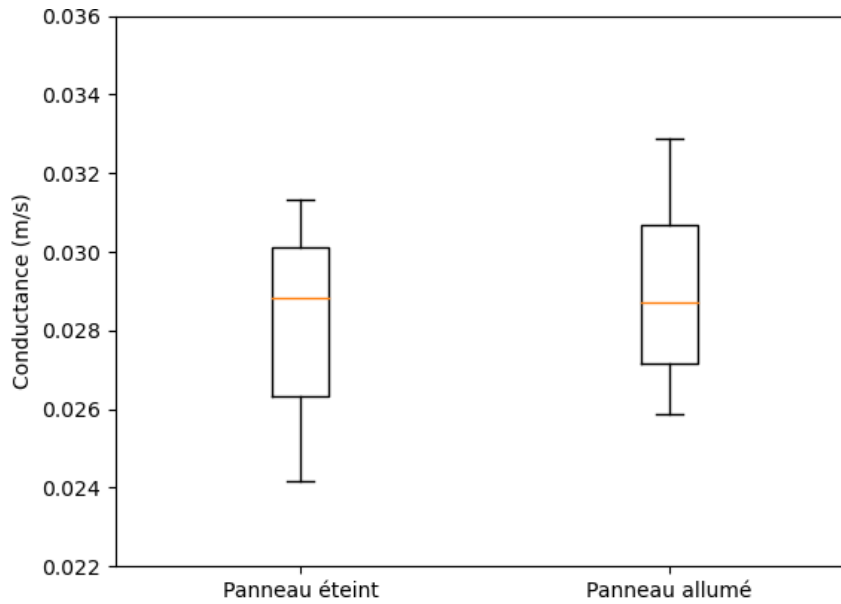


FIGURE 6 – Impact du rayonnement solaire sur la conductance

3.7 Détermination de l'émissivité

Dans le calcul de la conductance, l'émissivité est le seul paramètre qui n'est pas encore connu avec une valeur précise. Une caméra thermique¹⁰ a été utilisée pour la détermination de l'émissivité de la feuille artificielle. Elle permet de visualiser la quantité de rayonnement IRL émis par la feuille chauffée. Le thermocouple introduit à l'intérieur de la feuille sert de référence pour mesurer la température. En connaissant cette température et les IRL émis (LW_{out}), on peut utiliser la loi de Stefan-Boltzmann ($LW_{out} = \epsilon \times \theta \times T^4$) pour obtenir l'émissivité ϵ .

La première idée était de calculer l'émissivité de la feuille en écotron. En exposant la feuille à l'environnement de l'écotron, il aurait fallu augmenter la contribution de la feuille par rapport aux parois pour que la majorité du signal perçu par la caméra vienne effectivement de la feuille. En effet, l'émissivité des parois de l'écotron est bien plus importante. Pour cela, il aurait fallu soit augmenter la température de la feuille de façon importante, soit diminuer la température de l'environnement ou encore diminuer l'émissivité des parois. En approximant une valeur d'émissivité à l'aluminium, il est possible de déterminer la gamme de température à laquelle la feuille doit être chauffée pour atteindre un pourcentage très important du signal perçu par la caméra thermique provenant de la feuille. Les premières estimations effectuées indiquaient que la température de chauffage devait dépasser de loin la tolérance des matériaux constituant la réplique. Enfermer la feuille dans une boîte de même émissivité semble être la meilleure solution pour capter la majorité du signal venant de la feuille et empêcher la part importante du signal venant des corps environnants. La possibilité d'isoler et obtenir l'émissivité de la feuille dans ces conditions est démontrée en 7.1.9. Cette démonstration utilise le fait que la feuille est placée dans un environnement de même émissivité qu'elle.

Une boîte en bois (30×30 cm) en forme de cube a été construite. Deux orifices ont été percés pour introduire d'une part la feuille artificielle et de l'autre la caméra thermique. Un premier trou sur le dessus de la boîte, de même diamètre que l'objectif de la caméra thermique a été effectué dans le bois. La caméra thermique est placée à la verticale, l'objectif pointant vers le bas. Elle repose d'elle-même sur le dessus de la boîte. Un autre trou a été réalisé sur une des faces du cube juste pour faire passer la feuille artificielle. Cette dernière est maintenue à l'horizontale grâce à un support se trouvant à l'extérieur de la boîte. Lorsque la feuille chauffée a été introduite dans la boîte, la température perçue par la caméra montait instantanément de plusieurs degrés.

10. Optris PI 640

Le logiciel IRBIS 3 a servi pour visualiser les images prises par la caméra thermique. Il renseigne la température de la feuille mesurée par la caméra. Cette dernière fournit non pas une valeur d'IRL émis mais une température qui correspond à un corps d'émissivité égale à 1 et qui émettrait les IRL enregistrés. La température le long de la feuille était assez homogène. La température fournie par la caméra sur le long de la feuille variait entre 26°C et 27,5°C, ce qui a été utilisé comme bornes inférieure et supérieure pour le terme relatif au rayonnement IRL mesuré par la caméra. Le thermocouple a enregistré une température de la feuille comprise entre 75°C et 90°C. De la même manière, ces deux valeurs ont été utilisées comme bornes inférieure et supérieure pour le terme relatif au rayonnement IRL émis par la feuille. Ces bornes permettent de déterminer la plage d'émissivité dans laquelle se situe la feuille. La sonde de température, placée à l'extérieur de la boîte indiquait une valeur constante de 21,92°C sur la période de mesure. A partir de ces données, l'émissivité calculée pour la feuille d'aluminium se situe entre 0,378-0,395. La manipulation nécessitant la destruction de la feuille et étant donné que le nombre de réplica était limité, elle n'a pas été répétée.

3.8 Analyse de sensibilité

Un fichier reprenant une partie des données mesurées dans l'écotron a servi pour l'analyse de sensibilité de la valeur de la conductance vis-à-vis de différents facteurs. Ce fichier reprend plus de quatre jours de données sur les deux paires de feuilles placées à l'horizontale dans l'écotron. Une sensibilité par feuille a été calculée.

L'analyse de sensibilité consiste à évaluer comment les variations dans les entrées et les paramètres d'un modèle affectent les résultats de celui-ci. En d'autres termes, elle permet de comprendre de quelle manière les variables d'entrées influencent les résultats ou les variables de sorties. Dans notre cas, les variables d'entrées sont la différence de potentiel (V), la température chaude (T_c) et froide (T_f) et les paramètres sont la résistance du thermocouple (R) et l'émissivité de l'aluminium (ϵ_{al}). La variable de sortie est la conductance de couche limite. Cette analyse permet d'identifier les variables dont l'incertitude sur la valeur entraîne des conséquences les plus importantes dans son calcul. Une sensibilité plus élevée signifie une réponse plus importante de la variable de sortie à une variation de la variable d'entrée/paramètre. Une attention plus particulière est adressée à la grandeur proposant la sensibilité la plus importante. Il faut la déterminer avec précision puisque son impact sur le résultat est important.

L'incertitude sur la différence de potentiel appliquée au thermocouple, la résistance du thermocouple et la mesure des températures chaude et froide ont été identifiées dans les manuels techniques du thermocouple et du voltmètre. Elles sont répertoriées dans la table 1. À cela, il faut ajouter l'incertitude sur l'émissivité (fixée d'après les mesures réalisées dans la boîte décrite ci-dessus avec une valeur supérieure égale à 0,395 et la valeur minimale est fixée à 0 puisque c'est la valeur maximale d'émissivité qui nous intéresse). Seul un paramètre ou entrée est modifié à la fois, tandis que les autres conservent leur valeur initiale. L'influence de chaque paramètre ou entrée est analysée de manière séquentielle, une après l'autre.

La table 2 donne les valeurs de sensibilité en pourcent pour chaque feuille. Il est important d'ajuster avec précision la tension aux bornes des feuilles puisque c'est l'entrée/paramètre ayant le plus d'impact. Les autres entrées/paramètres ont des sensibilités relativement proches et plus réduites par rapport à la tension. L'incertitude sur la résistance et l'émissivité n'ont pas une conséquence importante sur la détermination de la conductance. Les résultats sont très peu variables entre les feuilles.

TABLE 1 – Erreur sur la mesure

Température (°C)	Résistance (Ω)	Tension (V)
0,5	0,00004	0,00006

TABLE 2 – Analyse de sensibilité sur chaque paramètre

Numéro de la feuille	R	V	T_c	T_f	ϵ
3	0,24	2,45	0,63	0,70	0,39
9	0,31	2,78	0,65	0,58	0,39
11	0,29	2,60	0,61	0,62	0,39
12	0,30	2,64	0,52	0,51	0,39

3.9 Détermination de la conductance aérodynamique à Lonzée

A Lonzée, les mesures de la station ICOS permettent de déterminer une conductance totale (g_{ah}) qui comprend à la fois la résultante de toutes les conductances de couche limite pour passer de la surface des feuilles à l'air du couvert (g_{bh}) et la conductance pour passer de l'air du couvert au point de mesure du système d'Eddy covariance (EC) appelée conductance aérodynamique (g_{am}). La formule 23 résume cette association de conductance :

$$R_{ah} = R_{bh} + R_{am} \quad (22)$$

$$g_{ah} = \frac{1}{g_{bh} + g_{am}} \quad (23)$$

Dans l'écotron, la turbulence verticale dans l'air de la chambre est très importante, et comme le transport se fait majoritairement par turbulence, les concentrations et températures de l'air sont homogènes. Ainsi, la conductance aérodynamique peut être considérée comme infinie. Par conséquent, la g_{ah} de l'écotron correspond à la résultante de toutes les g_{bh} qui seront déterminées grâce aux mesures faites avec les feuilles d'aluminium. Cette g_{ah} de l'écotron sera comparée à celle de Lonzée pour savoir si l'écotron reproduit bien les situations naturelles. Une représentation des schémas de résistances pour les deux sites est illustré en annexe 7.3.

Deux méthodes ont été utilisées pour permettre de calculer la g_{ah} à Lonzée. La première méthode utilisée est basée sur un modèle de représentation de g_{am} et de g_{bh} qui dépend de la vitesse de friction et de la vitesse de vent. La seconde technique repose sur les mesures directes réalisées par la station ICOS (flux de chaleur sensible par Eddy Covariance, la température de l'air et la température du couvert obtenue à partir des IRL qu'il émet). Trois cultures de froment ont été analysées pour déterminer l'évolution temporelle de g_{ah} , couvrant la période de 2014 à 2019.

3.9.1 Détermination de g_{ah} par la méthode basée sur la modélisation

Le modèle Bigleaf a permis la détermination des conductances. Dans ce modèle, la végétation est représentée comme une seule feuille. Une seule couche uniforme est utilisée pour déduire les caractéristiques de l'écosystème. Cette approche suppose que les conditions météorologiques ainsi que la végétation sont homogènes aussi bien verticalement qu'horizontalement (Knauer *et al.*, 2018a). Les différentes formules de conductances sont tirées de cet article.

La g_{bh} est calculée à partir du modèle de Thom avec l'équation 24. C'est un modèle simple puisqu'il ne fait intervenir qu'une seule variable, la vitesse de friction. Cette dernière est utilisée pour décrire les champs de vitesse résultant du cisaillement et de la force de frottement interne dans un fluide en mouvement. Elle est indicatrice de la turbulence. La g_{am} est calculée avec l'équation 25. La résultante des deux (g_{ah}) est alors déduite avec la formule 26. L'indice "_m" est utilisé pour indiquer que ces conductances sont modélisées.

$$g_{bh_m} = (6,2 \times u_{star}^{-0,667})^{-1} \quad (24)$$

$$g_{am_m} = \frac{u_{star}^2}{u} \quad (25)$$

$$g_{ah_m} = \frac{1}{\frac{u}{u_{star}^2} + 6,2 \times u_{star}^{-0,667}} \quad (26)$$

Avec u_{star} [m/s] la vitesse de friction

À côté de ces conductances de transfert dans l'air, la conductance de canopée (g_s) mesure la capacité avec laquelle les transferts se font dans la végétation vers la surface des feuilles. Elle correspond à la somme des conductances stomatiques. Cette dernière a également été modélisée avec l'équation 27. La conductance de canopée g_s à l'extérieur et dans l'écotron est supposée identique puisqu'elle dépend de variables environnementales qui sont totalement reproduites dans les chambres. Connaître la valeur de la conductance de canopée permet de comprendre dans quelle mesure les échanges sont limités par les stomates en comparaison avec les couches limites et aérodynamiques. En effet, une faible conductance induit une résistance élevée qui va principalement contraindre l'échange. Par conséquent, la reproduction correcte de la g_{ah} de Lonzée dans l'écotron n'est plus aussi nécessaire.

$$g_{s_m} = \frac{g_{ah_m} \times \gamma \times LE}{\delta \times AE + \rho_{air} \times Cp_{air} \times g_{ah_m} \times VPD - (\delta + \gamma) \times LE} \quad (27)$$

Avec γ [kPa/K] la constante psychométrique, AE [W/m^2] la différence entre le rayonnement net et le flux de conduction de chaleur dans le sol, VPD [Pa] est la différence de pression de vapeur et δ [kPa/K] la pente de la courbe de pression de vapeur

Plusieurs filtres en prétraitement sont utilisés afin de calculer g_s . Celle-ci doit être déterminée dans des conditions particulières à partir du flux de transpiration mesuré par EC (Knauer *et al.*, 2018b). La végétation doit être active (transpiration) et donc il est nécessaire de connaître les périodes de présence des feuilles de semis et de récolte. Un filtre sur les précipitations est aussi utilisé pour vérifier qu'il n'a pas plu durant 48h. Ces deux jours certifient que les feuilles sont sèches et que le flux de vapeur d'eau mesuré par EC correspond à la transpiration et qu'il n'inclut pas d'évaporation. Il faut également que le flux de chaleur latente (ou de vapeur d'eau) soit positif ou autrement dit que la plante transpire. Au niveau du bilan d'énergie, il faut veiller à ce que la différence entre le rayonnement net et le flux de chaleur dans le sol soit positif. La température de l'air doit être supérieure à 5°C et l'humidité relative inférieure à 95%. Enfin, il est impératif que le PPFD soit supérieur à 200 $\mu mol/(m^2 \times s)$, tout cela pour que la transpiration soit non négligeable. Le code Matlab ayant servi pour traiter les données est disponible en annexe 7.5.3.

Pour ce travail, la conductance de canopée n'a été évaluée qu'à partir du moment où une surface de feuilles assez importantes était présente. Cela se traduit par une certaine valeur du Green Area Index (GAI) qui correspond à la surface totale d'éléments photosynthétiquement actifs par unité de surface de sol. Plusieurs mesures de GAI effectuées durant le développement de la culture sont repartoriées en annexe 7.4.1. Le premier jour de données correspond au moment où le GAI atteint une valeur de 2. Cette valeur a été choisie de manière arbitraire, sachant qu'un couvert végétal mature peut atteindre un GAI supérieur à 6. Le dernier jour correspond à la dernière mesure de GAI qui présente une diminution non significative. Une baisse du GAI signifie que les végétaux entrent en sénescence. Ces points sont donc volontairement exclus du calcul des différentes conductances. Ainsi, la période de culture retenue pour le calcul de la conductance se situe entre le premier et le dernier jour sélectionnés. Les valeurs de GAI semblent cohérentes à celles obtenues par (Zhang *et al.*, 2002). Cependant, il faut interpoler ces mesures pour avoir une évolution temporelle continue. Une équation du second degré a été ajustée aux valeurs mesurées de GAI grâce à la fonction python polyfit. Cet ajustement est illustré à la figure 7. La courbe semble atteindre un maximum proche de la période de maturité pour ensuite redescendre à des valeurs plus faibles à la sénescence.

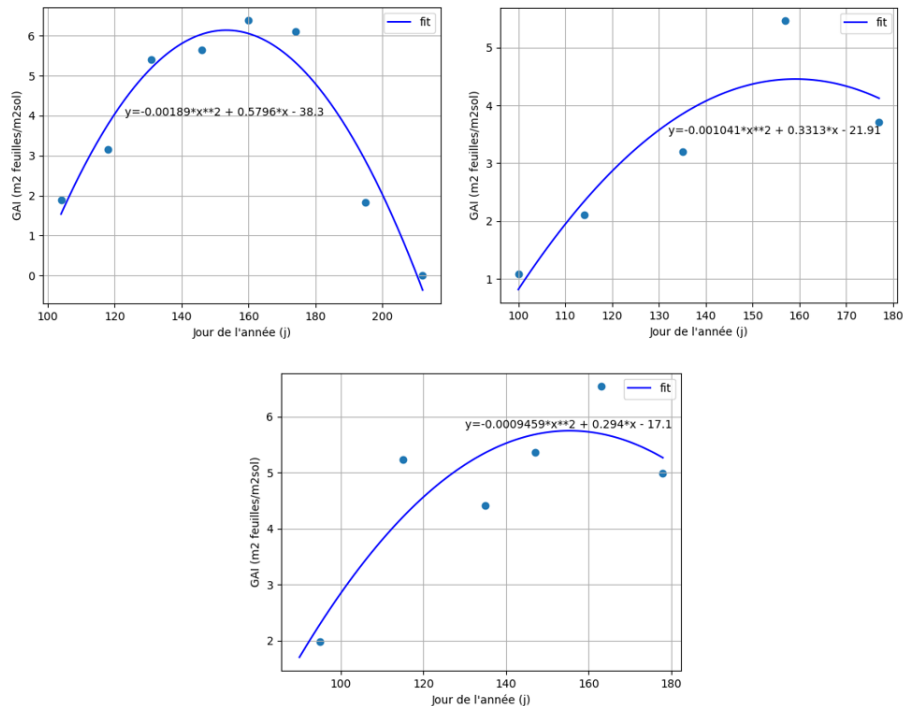


FIGURE 7 – Équation du second degré ajustée au GAI

En plus des filtres énoncés précédemment, une suppression des outliers dans les valeurs de conductance de canopée g_s , a été réalisée. Elle est basée sur la valeur obtenue par une moyenne mobile de 7 jours. Si la différence entre une valeur pour un pas de temps de 30 minutes et la moyenne sur une fenêtre de 7 jours centrée sur cette demi-heure dépasse trois fois l'écart-type, le point calculé est supprimé.

3.9.2 Détermination de g_{ah} à partir de l'Eddy Covariance

Une deuxième méthode a été utilisée pour déterminer g_{ah} et g_s . Cette méthode les calcule directement à partir des données observées à Lonzée. Ils sont symbolisées par g_{ah_EC} et g_{s_EC} . La valeur de g_{ah_EC} , calculée avec l'équation 28, est déduite à partir de la formule du flux de chaleur sensible en recalculant la température de la feuille à partir du rayonnement infrarouge sortant de l'écosystème. La valeur de g_{s_EC} , déterminée avec l'équation 33 (Heinesch et Longdoz), est déduite à partir données précitées, de g_{ah_EC} et du flux de chaleur latente. Pour le calcul de g_{ah_EC} , il faut vérifier que les valeurs de chaleur sensible et de la différence de température entre la feuille et celle de l'air sont toujours significativement différentes de 0. En imposant un flux de chaleur sensible à supérieur à 20 W et en respectant les conditions déjà listées dans le paragraphe précédent pour g_s , et g_{ah} sont toujours supérieures à 0.

$$g_{ah_EC} = \frac{H}{(T_f - T_{air}) \times \rho_{air} \times C_{p_{air}}} \quad (28)$$

Avec T_f la température de la feuille [K], T_{air} la température de l'air [K] et H [W/m^2] le flux de chaleur sensible.

$$LE = (LAI - LAI_{wet}) \times \frac{(e_f^* - e_{air})}{R \times T_{air} \times (r_{ah_EC} + r_{s_EC})} \quad (29)$$

$$LE = LAI \times \frac{(e_f^* - e_{air})}{R \times T_{air} \times (\frac{1}{g_{ah_EC}} + \frac{1}{g_{s_EC}})} \quad (30)$$

$$\frac{1}{g_{ah_EC}} + \frac{1}{g_{s_EC}} = LAI \times \frac{(e_f^* - e_{air})}{LE \times R \times T_{air}} \quad (31)$$

$$\frac{1}{g_{ah_EC}} = LAI \times \frac{(e_f^* - e_{air})}{LE \times R \times T_{air}} - \frac{1}{g_{s_EC}} \quad (32)$$

$$g_{s_EC} = \frac{1}{LAI \times \frac{(e_f^* - e_{air})}{LE \times R \times T_{air}} - \frac{1}{g_{ah_EC}}} \quad (33)$$

Avec R [$J/(mol \times K)$] la constante des gaz parfaits, e_f^* [Pa] la pression de vapeur saturante à la température de la feuille et e_{air} [Pa] la pression de vapeur de l'air. Le flux de chaleur latente (LE) est exprimé en [$mol/(m^2 \times s)$].

Afin de pouvoir comparer les conductances calculées à Lonzée (modélisées et déduites à partir de l'EC) avec les conductances déduites à partir des feuilles artificielles, il est nécessaire de les exprimer dans une unité commune. Pour ce faire, les conductances issues du jeu de données de Lonzée, initialement exprimées par mètre carré de sol, ont été divisées par le GAI afin de les convertir en mètres carrés de surface foliaire.

Pour analyser la dynamique temporelle des valeurs des conductances modélisées, une journée typique moyenne sur les trois périodes de culture (2015, 2017, 2019) a été représentée. Les données de culture de froment d'hiver ont été divisées en deux périodes distinctes, celle de jour (de 10h à 15h30) et celle de nuit (de 22h à 4h30), dans le but de comparer les valeurs des conductances de jour et de nuit. Pour représenter cette dynamique, la fonction `fill_between` a été utilisée, permettant de visualiser la moyenne des conductances bornée par son écart-type. Par ailleurs, pour visualiser la distribution de fréquence des points de g_{ah} , la fonction `violinplot` a été appliquée.

4 Résultats

4.1 Tunnel de vent

4.1.1 Biais sur la mesure

L'objectif est de déterminer si toutes les couches limites des différentes feuilles d'aluminium sont comparables quel que soit la vitesse du vent et que ces feuilles sont donc équivalentes pour les expériences suivantes. On pourra alors les utiliser par couple et/ou placer dans différentes situations sans devoir prendre en compte un biais dû au numéro de la feuille utilisée.

Étant donné que les répliques ont été réalisées à la main, elles ne sont pas exactement identiques. Les propriétés de la surface telles que la rugosité (possibilité d'avoir des aspérités différentes) et la surface exacte d'échange sont spécifiques à chaque feuille. Par conséquent, la conductance de la couche limite peut différer entre les feuilles, ce qui introduit un biais lorsqu'elles sont utilisées par paire (voir section 3.1) ou lorsqu'elles sont placées dans des situations différentes pour étudier leur impact. Dans ces cas, les résultats obtenus seront spécifiques aux deux feuilles utilisées. D'autre part, une incertitude supplémentaire peut venir également de la précision des instruments de mesure (voir section 3.8).

Pour analyser cet éventuel biais, les valeurs obtenues pour les différentes feuilles ont été comparées pour chaque vitesse de vent et sont représentées à la figure 8. Pour une même vitesse de vent, il se peut qu'une des feuilles a été utilisée plusieurs fois. Ceci se remarque par le fait que plus d'un point apparait pour un même numéro de feuille. La méthode des emmeans a été utilisée pour tester si pour une même vitesse de vent, les conductances sont significativement distinctes. Cette méthode révèle une différence significative entre les conductances pour une vitesse de vent de 0,84 m/s, tandis que pour les autres vitesses, il n'y a pas de différence significative. D'ailleurs, la paire 35, pour une vitesse de vent de 0,84 m/s, possède l'erreur maximale. Elle correspond à 19,09 % de la valeur totale. Il semblerait que la tension n'aurait pas été réglée avec autant de précision pour les deux feuilles ce qui se traduit par une différence de la hausse de température en surface qui impacte la mesure de la conductance. Ceci semble être confirmé puisque l'erreur est nettement plus faible pour la deuxième répétition.

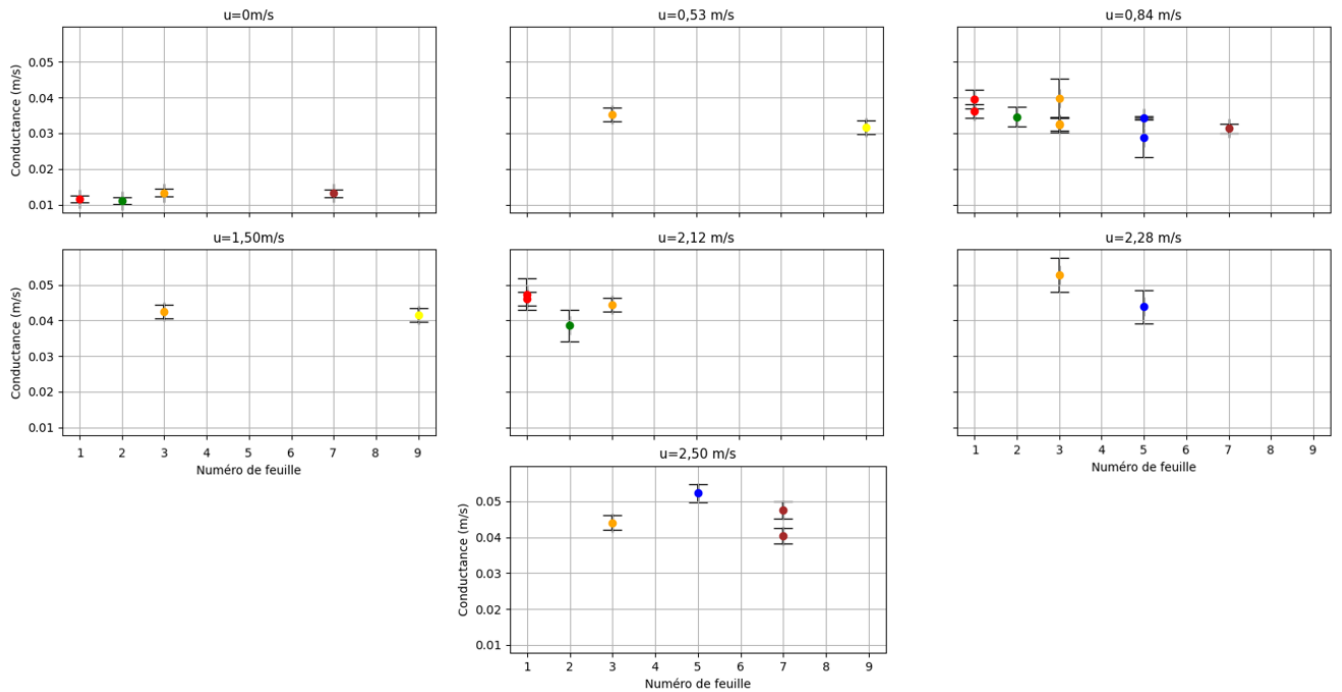


FIGURE 8 – Erreur sur la conductance calculée par vitesse de vent et par feuille

4.1.2 Relation entre la conductance et la vitesse de vent

Les expériences réalisées avec le tunnel de vent ont permis d'établir une relation entre la conductance des feuilles d'aluminium et la vitesse du vent pour connaître les caractéristiques de leur couche limite dans un cas simple. Des mesures prises sur plusieurs feuilles et à différentes vitesses de vent, sont illustrées à la figure 9. La courbe « fit » représente l'ajustement réalisé à partir de l'équation théorique (19). La conductance augmente à mesure que la vitesse du vent s'accroît. Néanmoins, cette croissance devient de plus en plus faible à mesure que la vitesse du vent augmente. Aux vitesses de vent plus élevées, la conductance de la couche limite continue d'augmenter sans atteindre de plateau. Un ordre de grandeur de la conductance de couche limite en écoton, où la vitesse de vent est comprise entre 0 et 0,5 m/s (pas déterminée expérimentalement), est illustré en annexe 7.2.4.

L'équation (34) reprend les valeurs des paramètres de la courbe ajustée, avec un coefficient a de 0,03656 et un coefficient b de 0,267. (Brenner et Jarvis, 1995) ont travaillé sur des feuilles de millet et ont déterminé la conductance de couche limite de la même manière que ce travail (voir section 3.1). La valeur des paramètres a et b obtenues par ces derniers sont respectivement de 0,034 et 0,51. En comparaison, les valeurs des paramètres a et b pour la courbe théorique laminaire sont respectivement de 0,02183 et 0,5, tandis que les valeurs pour la courbe théorique turbulente sont 0,04642 et 0,8. Pour rappel, les courbes théoriques purement laminaires ou turbulentes d'équations (20) et (21) ne sont valables que dans le cas d'une convection forcée et pour une surface plate. Pour des faibles vitesses de vent ($< 0,63$ m/s), la courbe ajustée n'est pas située entre les deux courbes théoriques. La pente plus importante est expliquée par une valeur du paramètre b plus faible que le cas purement laminaire et turbulent. Pour des vitesses de vent supérieures à 0,63 m/s, la courbe ajustée se retrouve entre les deux courbes théoriques. L'écoulement de l'air en sortie du tunnel de vent semble donc transitoire.

$$g_{bh} = 0,03656 \times u^{0,267} \quad (34)$$

Le facteur d'augmentation moyen calculé a une valeur de 1,56. Il a été déterminé en divisant la fonction ajustée par la fonction théorique laminaire (voir section 2.3).

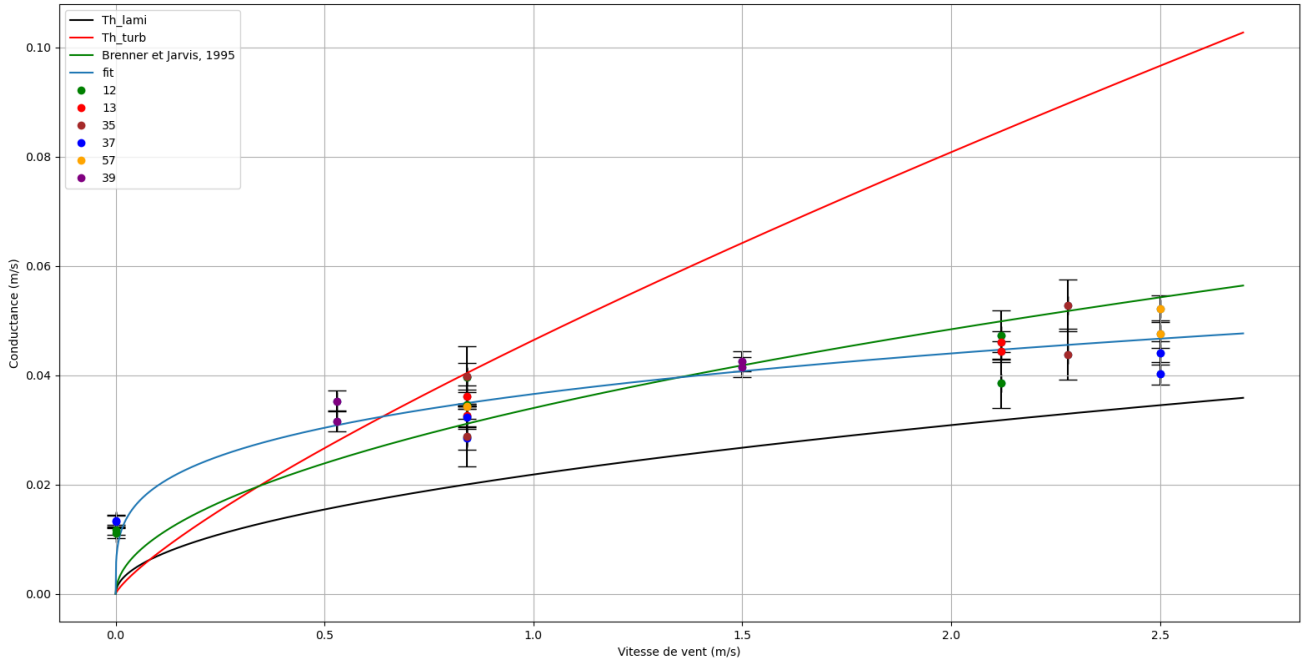


FIGURE 9 – Courbe ajustée sur les points expérimentaux de conductance et courbes théoriques

4.2 Mesures en écotron

4.2.1 Impact de la position

Une étude préliminaire de l'effet de la position dans l'écotron (pour une feuille horizontale et à une hauteur de 45cm) a été réalisée en comparant les valeurs de couche limite de deux couples de feuilles disposées à deux positions différentes (P1 et P2). La figure 10 montre l'impact de la position sur la conductance. La position 2 est représenté par le couple de feuille 11, 12 alors que la position 1 contient les feuilles 3 et 9. Le test de Student a été utilisé pour déterminer si la position avait un impact significatif sur la conductance mesurée. Il s'avère que la différence entre les deux positions est significative (p -valeur=0,004). Cependant, il est important de noter que la feuille 12 présentait une conductance inférieure aux autres feuilles (voir annexe 7.2.4). Cette différence significative est en grande partie due à cette différence entre la feuille 12 et les autres. Pour vérifier cette hypothèse, la p -valeur a été calculée entre la feuille 11 et les feuilles 3 et 9. La p -valeur entre la feuille 11 et 3 est 0,65 et celle entre la feuille 11 et 9 est de 0,11. Par conséquent, la feuille 12 contribue principalement à rejeter l'hypothèse nulle d'égalité des conductances entre les deux positions.

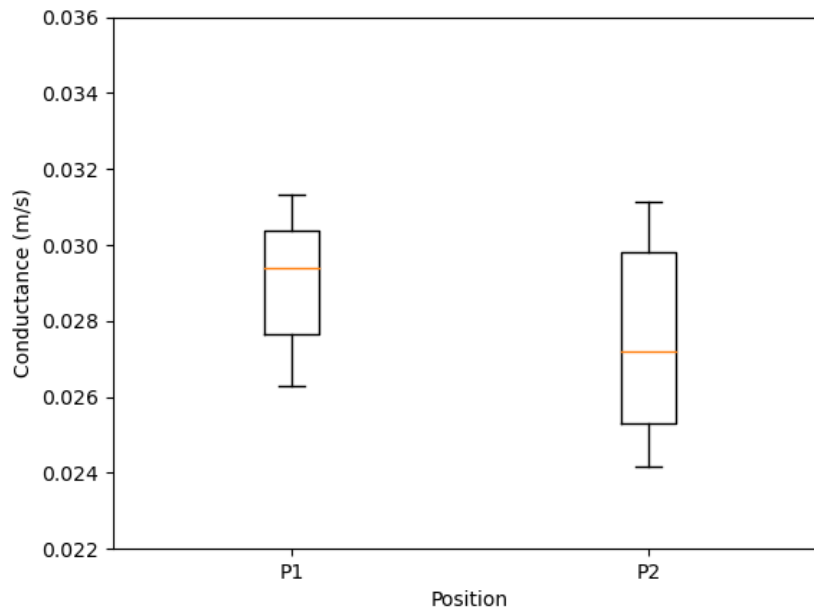


FIGURE 10 – Influence de la position sur la conductance

4.2.2 Impact de l'inclinaison

La figure 11 présente les données de la conductance pour les différentes inclinaisons imposées aux feuilles artificielles en position P1 et P2. Les p -valeurs ont été calculées entre la valeur de conductance des feuilles placées à l'horizontale et celles de feuilles inclinées. Les feuilles ont été orientées vers le haut (45°, 55°, 65° et 75°) pour reproduire au mieux la plage d'angle classique observée dans une culture réelle de froment. Le test de Student indique que l'angle d'inclinaison n'a pas d'effet significatif sur la conductance mesurée pour les deux positions. Les p -valeurs sont reprises dans la table 3.

TABLE 3 – Impact de l'inclinaison sur la conductance

Position	Angle (°)	p-valeur
P1	45	0,075
	55	0,954
	65	0,786
	75	0,940
P2	45	0,116
	55	0,133
	65	0,093
	75	0,757

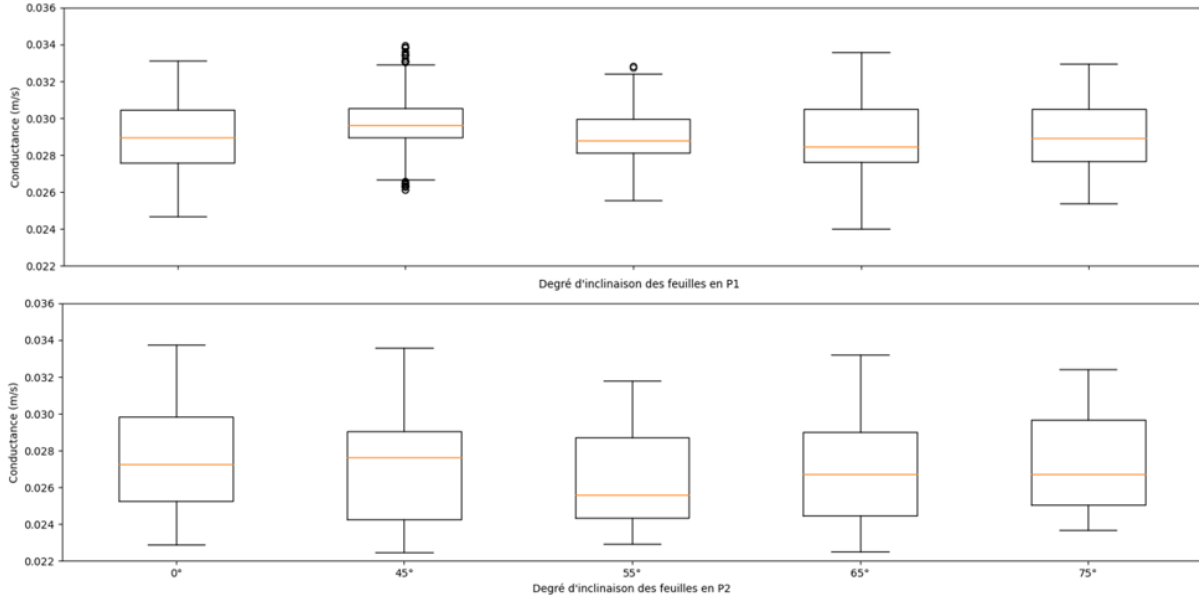


FIGURE 11 – Influence de l'inclinaison sur la conductance

4.3 Conductances modélisées pour le couvert à Lonzée

4.3.1 Dynamique temporelle et comparaison des valeurs des conductances pour une journée type

Les valeurs des conductances (couche limite, aérodynamique, aérodynamique totale qui correspond à la résultante de ces deux dernières, et la conductance de canopée), relatives à Lonzée, sont celles calculées selon les équations présentes dans la section 3.9.1. Elles vont ensuite être comparées aux conductances extrapolées en écotron.

Une représentation de la dynamique journalière de ces différentes conductances a été réalisée en moyennant, pour chaque demi-heure, les valeurs de ces dernières sur la période de culture retenue. Cela a permis d'obtenir une journée type annuelle et ce pour les trois années de culture. Ces journées types sont présentées à la figure 12.

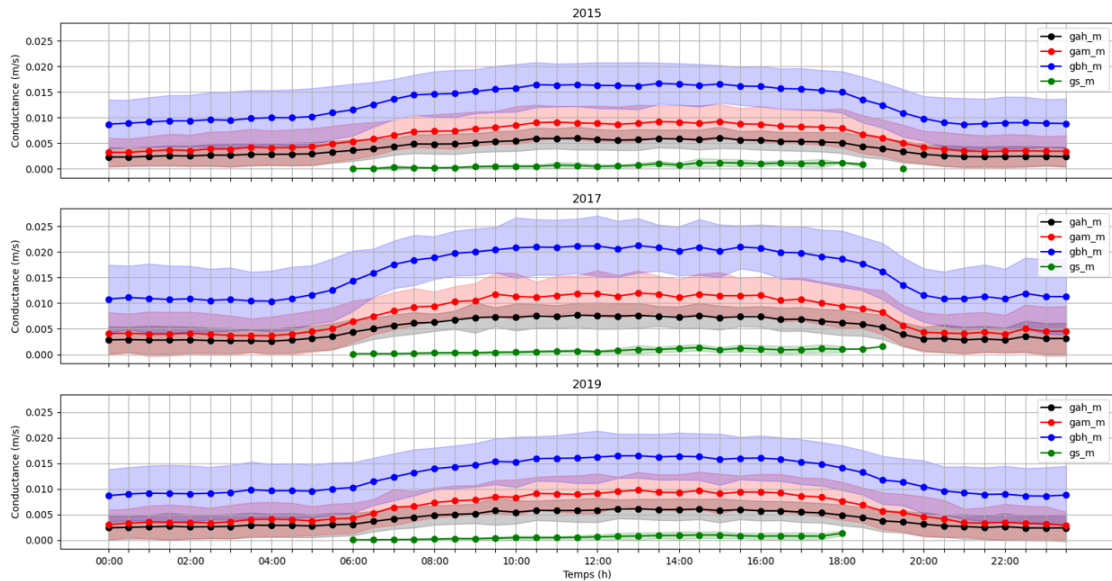


FIGURE 12 – Moyenne journalière des différentes conductances pour les trois années de culture
 g_{bh} est la conductance de couche limite, g_{am} la conductance aérodynamique, g_{ah} la conductance aérodynamique total et g_s la conductance de canopée

La table 4 récapitule les valeurs moyennes et écarts-types des conductances de couche limite, aérodynamique, aérodynamique totale et de canopée pour les périodes diurnes et nocturnes pour chaque période de culture. Les valeurs des conductances sont relativement constantes d’une année à l’autre, bien que de légères variations soient observées. Les conductances calculées en 2017 présentent les valeurs les plus élevées. En revanche, les deux autres années ont des conductances relativement proches.

Les conductances de couche limite, aérodynamique et aérodynamiques totale suivent la même dynamique. Les valeurs des conductances restent très stables pendant la nuit, entre 22h et 5h, ainsi que pendant la journée, entre 10h et 16h. Juste avant le début du jour, une hausse de la conductance est remarquée, suivie d’une stabilisation. Les courbes étant symétriques, une baisse est observée en fin de journée, suivie d’une stabilisation en soirée. Les valeurs minimales sont observées vers minuit.

Il existe un contraste important entre le jour et la nuit. La conductance aérodynamique totale de nuit est en moyenne 2,4 fois plus faible que celle de jour lorsque les valeurs de jour et de nuit sont stabilisées. La conductance de couche limite est supérieure à la conductance aérodynamique. Un facteur moyen de 1,8 les sépare le jour et de 2,6 la nuit.

Une augmentation progressive de la conductance stomatique est observée tout au long de la journée, pour atteindre une valeur maximale en fin de journée (à 18h en 2015 et 2019, et à 19h en 2017). La conductance stomatique reste relativement faible par rapport aux autres conductances.

TABLE 4 – Moyennes et écarts-types des différentes conductances le jour et la nuit pour les trois périodes de culture

Date	Jour (J) ou Nuit (N)	$g_{ah_m_moy}$	$g_{am_m_moy}$	$g_{bh_m_moy}$	$g_{ah_m_std}$	$g_{am_m_std}$	$g_{bh_m_std}$	$g_s_moy^*$
2015	J	$5,769e^{-3}$	$8,925e^{-3}$	$1,631e^{-2}$	$1,964e^{-3}$	$3,371e^{-3}$	$4,201e^{-3}$	$6,552e^{-4}$
2015	N	$2,509e^{-3}$	$3,606e^{-3}$	$9,188e^{-3}$	$1,999e^{-3}$	$4,451e^{-3}$	$5,032e^{-3}$	/
2017	J	$7,438e^{-3}$	$1,156e^{-2}$	$2,083e^{-2}$	$2,293e^{-3}$	$3,893e^{-3}$	$5,182e^{-3}$	$7,348e^{-4}$
2017	N	$2,950e^{-3}$	$4,223e^{-3}$	$1,105e^{-2}$	$2,688e^{-3}$	$4,238e^{-3}$	$6,581e^{-3}$	/
2019	J	$5,850e^{-3}$	$9,214e^{-3}$	$1,606e^{-2}$	$2,075e^{-3}$	$3,497e^{-3}$	$4,585e^{-3}$	$5,814e^{-4}$
2019	N	$2,545e^{-3}$	$3,388e^{-3}$	$8,994e^{-3}$	$2,445e^{-3}$	$3,204e^{-3}$	$5,437e^{-3}$	/

* La moyenne a été calculée pour tous les points de conductance de canopée et pas seulement entre 10h et 15h30.

Pour rappel, les données diurnes font référence aux mesures prises entre 10h et 15h30, tandis que les données nocturnes se réfèrent aux mesures prises entre 22h et 4h30.

4.3.2 Lien avec la vitesse de vent et la vitesse de friction

Afin de comprendre les causes de la dynamique des différentes conductances, l’évolution temporelle de la vitesse de vent ainsi que de la vitesse de friction pour les trois années de culture a été analysée et est représentée à la figure 13. Ce regroupement des trois années de culture du froment est réalisé étant donné que les valeurs des évolutions journalières de la vitesse de vent et de friction sur la période de culture retenue sont semblables entre 2015, 2017 et 2019. Ces valeurs pour les périodes diurnes et nocturnes pour chaque année sont reprises dans la table 5. La vitesse de friction de jour est en moyenne 2,23 fois plus élevée que pendant la nuit. La vitesse de vent de jour est en moyenne 1,79 plus importante que la nuit. La vitesse de vent moyenne ainsi que la turbulence en 2015 sont un peu plus élevées que pour les deux autres années.

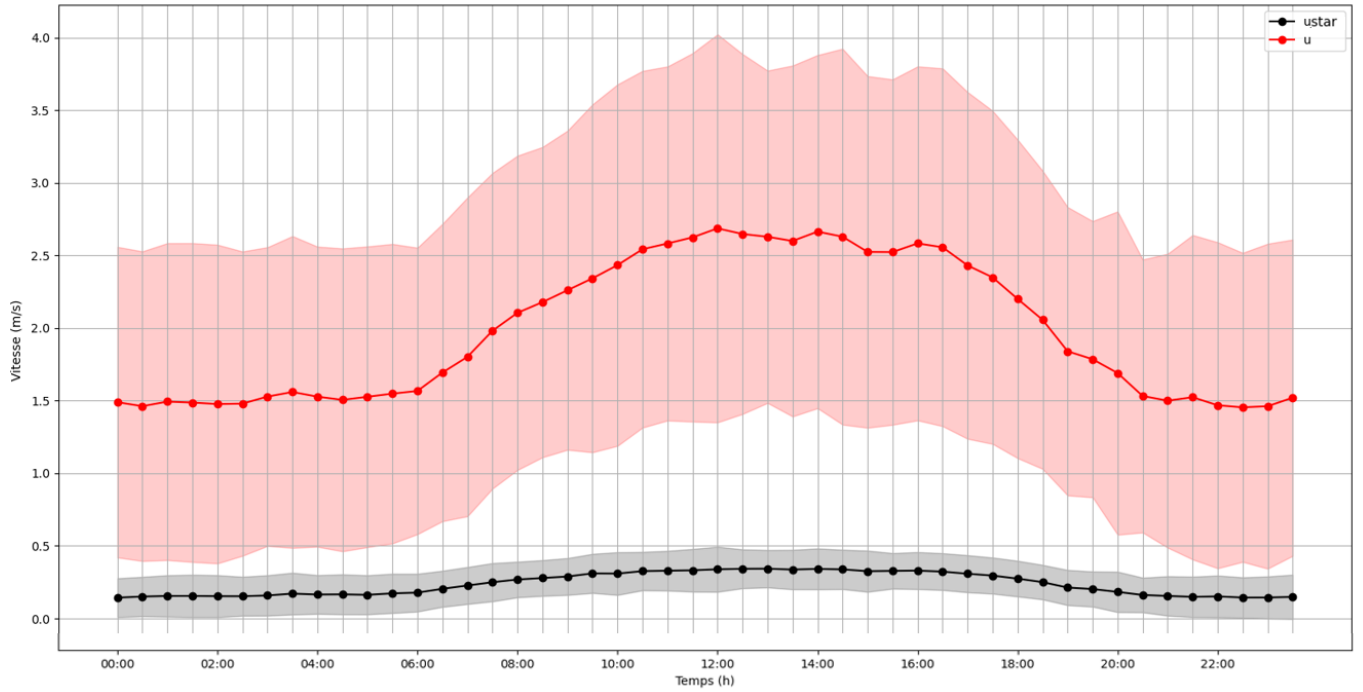


FIGURE 13 – Moyenne journalière de la vitesse de vent et de la vitesse de friction pour les trois années

TABLE 5 – Moyennes et écarts-types de la vitesse de vent et de friction le jour et la nuit pour les trois périodes de culture

Année	Jour (J) ou Nuit (N)	u_{star_moy}	u_moy	u_{star_std}	u_std
2015	J	0,382	3,303	0,143	1,510
	N	0,175	1,845	0,132	1,133
2017	J	0,326	2,613	0,121	1,168
	N	0,139	1,425	0,121	0,941
2019	J	0,332	2,590	0,138	1,233
	N	0,152	1,488	0,142	1,081

4.3.3 Distribution des points de la conductance aérodynamique totale

La distribution de la conductance aérodynamique totale à la figure 14 est une représentation des fréquences de chaque valeur mesurée. Cette distribution permet d'observer les valeurs les plus fréquentes et leur répartition dans l'ensemble des données. La hauteur de la courbe correspondante à une valeur dans la distribution est proportionnelle à sa fréquence d'apparition. Ainsi, plus une valeur est observée, plus la courbe correspondante remonte. La ligne noire représente l'étendue des données tandis que le point blanc est la médiane. Toutes les valeurs sont positives. Cependant, la distribution déborde sur les valeurs négatives car elle utilise une fonction de lissage qui adoucit les courbes et qui peut les allonger.

La distribution de la conductance aérodynamique totale de jour est unimodale. En revanche, celle de nuit est bimodale avec un deuxième pic moins prononcé que le premier. En analysant de plus près ce phénomène, il a été constaté que des valeurs les plus élevées de conductance aérodynamique totale apparaissent plus fréquemment dans la plage horaire de 22h à 23h30. Ceci peut être expliqué par les éphémérides. Le soleil se couche plus tard en juin qu'en avril et donc le cycle journalier est décalé. La diminution de la vitesse de vent ainsi que de la turbulence entre les périodes diurnes et nocturnes ne se fait qu'après 22h et la stabilisation des valeurs de la conductance aérodynamique totale vers les valeurs plus faibles n'est peut-être pas encore totalement atteinte à 22h pour le mois de juin. Il existe donc des demi-heures avec des valeurs plus élevées formant le deuxième pic.

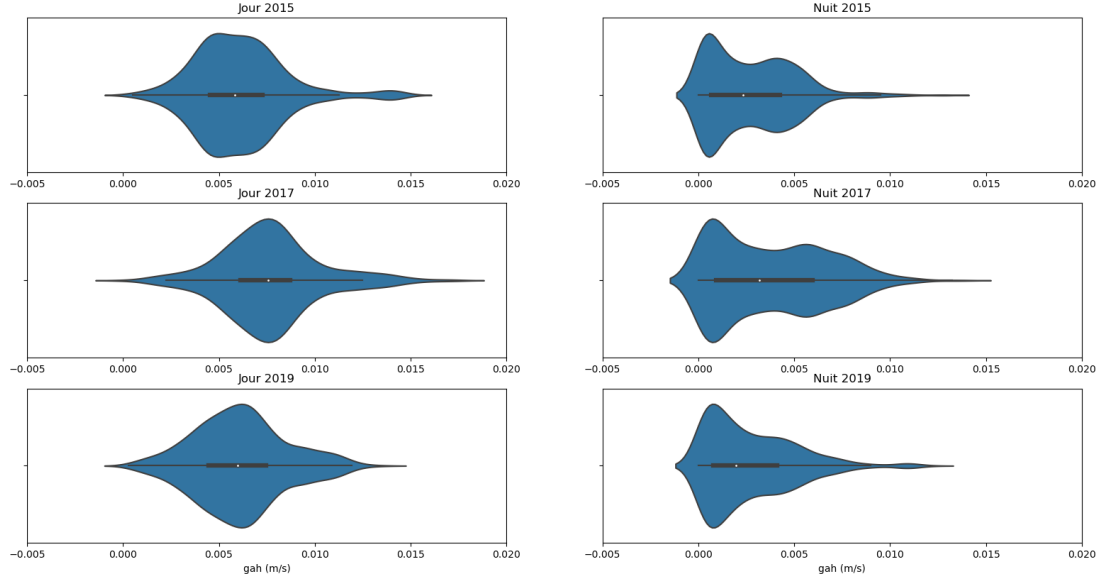


FIGURE 14 – Distribution de g_{ah_m} pour le jour et la nuit lors des trois années de culture

4.4 Conductances mesurées à Lonzée à partir de l'Eddy Covariance

4.4.1 Dynamique temporelle et comparaison avec les conductances modélisées

La conductance aérodynamique totale déduite à partir du flux de chaleur sensible (g_{ah_EC}) à la figure 15 est inférieure à celle modélisée (g_{ah_m}) et ce pour les trois années. Etant donné que g_{ah_EC} est plus faible que g_{ah_m} , la conductance de canopée se rapproche. La dynamique de g_{ah_EC} et g_{ah_m} reste semblable. En effet, une hausse est perceptible au début de la journée, suivi d'une période de stabilisation (proche de 0,004 m/s pour les années 2017 et 2019) et enfin une baisse en fin de journée est observée. Cependant, la dynamique de g_{ah_EC} en 2015 diffère des deux autres années. En effet, sa période de stabilisation n'est pas aussi distinguée qu'en 2017 et 2019. La valeur de g_{ah_EC} est plus faible (valeur maximale de 0,00266 m/s) et diminue bien plus tôt ce qui la rapproche fortement de g_s_m en fin de journée. En ce qui concerne les conductances de canopée, elles sont très similaires car leurs valeurs se chevauchent.

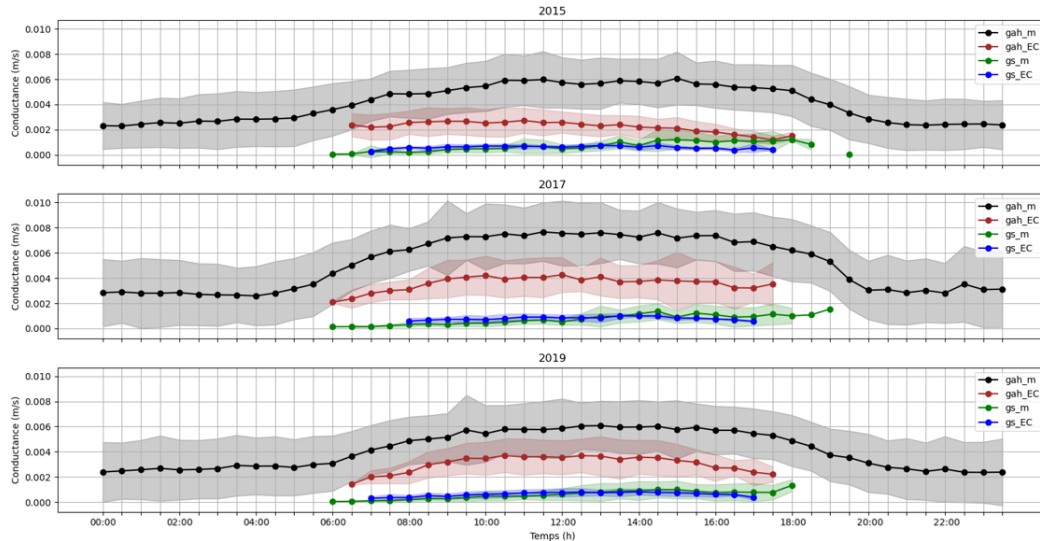


FIGURE 15 – Moyenne journalière de g_{ah_EC} et g_{ah_m} pour les trois années de culture

La table 6 reprend la moyenne et l'écart-type de g_{ah_EC} et le rapport entre les données moyennes de g_{ah_EC} et g_{s_EC} entre 10h et 15h30 pour les trois périodes de culture. La conductance aérodynamique moyenne reste plus importante en 2017. Cependant, contrairement à la modélisation, g_{ah_EC} en 2019 est très proche de celle de 2017 et non de celle de 2015. Le rapport entre g_{ah_m} et g_{ah_EC} entre 10h et 15h30 varie de 1,77 en 2019 à 2,41 en 2015. Le rapport g_{ah_EC} et g_{s_EC} fournit un indice quant à l'importance relative de la contribution des stomates dans le processus d'échange. Si le ratio est égal à 1, cela signifie que les stomates et la conductance aérodynamique totale contribuent de manière équivalente au transfert total. Une valeur supérieure à 1 indique que les stomates bloquent davantage le transfert. Dans ce cas-ci, les stomates entravent grandement le transfert mais les processus de transfert convectifs sont non négligeables.

TABLE 6 – Moyenne et écart-type de g_{ah_EC} et comparaison avec g_{s_EC}

Année	$g_{ah_EC_moy}$	$g_{ah_EC_std}$	$g_{ah_EC_moy}/g_{s_EC_moy}$
2015	$2,394e^{-3}$	$9,41e^{-4}$	$3,57e^0$
2017	$3,952e^{-3}$	$1,553e^{-3}$	$4,58e^0$
2019	$3,297e^{-3}$	$1,198e^{-3}$	$4,51e^0$

4.4.2 Conditions climatiques pour lesquelles la conductance de canopée dépasse ou atteint la conductance aérodynamique totale

Le pourcentage de données où g_{ah_EC} ou g_{ah_m} sont moins de 5 fois supérieurs à g_{s_EC} ou g_{ah_m} est illustré dans la table 7. Cette occurrence représente le pourcentage du temps pour lequel la conductance aérodynamique totale joue un rôle non négligeable dans le transfert.

TABLE 7 – Pourcentage de données pour lesquelles g_{ah_m} ou g_{ah_EC} est moins de cinq fois supérieur à g_{s_m} ou g_{s_EC}

Année	Fréquence (%)
2015	59
2017	40
2019	42

Les moments pour lesquels la g_{s_EC} et g_{s_m} sont supérieurs ou égaux à g_{ah_EC} ou g_{ah_m} ont été répertoriés en annexe 7.4.2. Ce tableau contient également les variables environnementales qui influencent à la fois la conductance aérodynamique totale et la conductance de canopée. L'année 2015 est plus représentée que les autres années (6% des données). Pour les années 2017 et 2019, la conductance de canopée atteint ou dépasse la conductance aérodynamique totale dans 2% des cas. Les stomates jouent donc un rôle essentiel dans la régulation de la transpiration des plantes. Les périodes pendant lesquelles les conditions sont remplies sont principalement regroupées sur des heures/jours consécutifs ou qui se suivent. Pour que la conductance de canopée dépasse la conductance aérodynamique totale, plusieurs conditions reprises dans le paragraphe suivant doivent être remplies.

Lorsque la demande évaporative est trop importante, les stomates ont tendance à se fermer pour éviter une transpiration excessive de la plante. Ils se ferment lorsque le VPD dépasse une valeur critique (Grossiord *et al.*, 2020). Ainsi, pour que la conductance de canopée soit suffisamment élevée, il est important que le VPD ne soit pas trop élevé. De plus, l'ouverture stomatique dépend aussi du PPFD (le stomate s'ouvre quand le rayonnement solaire augmente et que l'appareil photosynthétique s'active de plus en plus), il est donc nécessaire que celui-ci ne soit pas trop faible. Enfin, il faut que la vitesse du vent et le niveau de turbulence ne soient pas excessivement élevés afin d'éviter une augmentation trop importante de la conductance aérodynamique totale et que la conductance stomatique ne soit pas trop petite en comparaison.

En général, les périodes pendant lesquelles les conditions sont remplies sont caractérisées par un PPFD proche ou supérieur à $1000 \mu mol/(m^2 \times s)$, un VPD proche ou supérieur à 1500 Pa et des conditions hydriques favorables. En revanche, pour 2019, lorsque les conditions sont remplies, il arrive que le VPD et le PPFD sont relativement plus faibles.

4.5 Extrapolation de la conductance de couche limite mesurée en écotron à la conductance aérodynamique totale

L'extrapolation de la conductance de couche limite d'une feuille artificielle mesurée en écotron (avec les feuilles artificielles) à la conductance aérodynamique totale est une étape cruciale pour mieux comparer le fonctionnement des écosystèmes dans l'écotron et à l'extérieur. Toutefois, cette extrapolation est sujette à des hypothèses et des limitations.

Comme les concentrations en gaz et la température sont homogènes dans le couvert et dans toute l'air de l'atmosphère de l'écotron, il n'y a pas de conductance de transport de l'air du couvert vers l'atmosphère. La conductance aérodynamique en écotron ($g_{am_ecotron}$) est négligeable, donc la conductance aérodynamique totale en écotron ($g_{ah_ecotron}$) est équivalente à la conductance de couche limite totale en écotron ($g_{bh_ecotron}$).

La première hypothèse de travail est qu'il n'y a pas d'impact de la profondeur à laquelle se trouve la feuille dans le couvert sur la conductance de couche limite. La deuxième est qu'il n'y a pas de dépendance entre la conductance de couche limite et l'angle azimutal et de l'angle d'inclinaison. Il a été démontré à la section 4.2.2 que la conductance de couche limite ne dépendait pas de l'inclinaison. Enfin, il est supposé que la température de toutes les feuilles présentes dans le couvert sont identiques. En bref, il a été considéré que les conductances de couche limite de toutes les feuilles sont égales quelle que soit leur position dans le couvert, leur hauteur, leur angle azimutal et d'inclinaison. Comme toutes les conductances sont en parallèle, il suffit de sommer les conductances de toutes les feuilles pour obtenir la conductance de couche limite totale. La démonstration se trouve en annexe (7.2.5).

4.6 Comparaison de la distribution des points de g_{ah_EC} pour les trois années de culture avec $g_{ah_ecotron}$

Tous les points de g_{ah_EC} ainsi que $g_{ah_ecotron}$ ont été représentés sur la figure 16. Il faut signaler que toutes les distributions présentées n'ont pas le même nombre de points. En 2017, le nombre de demi-heure sur la période de culture retenue est de 488, tandis qu'en 2015 et 2019, il est de 733. L'ensemble des expériences en écotron (pour toutes les inclinaisons et positions des 4 feuilles) ont été réalisées sur 7 jours, ce qui représente 67110 données. Cependant, les périodes d'acquisition diffèrent. Un point équivaut à une demi-heure à Lonzée, tandis qu'en écotron, la conductance est calculée toutes les 5 secondes.

En 2017, la distribution de g_{ah_EC} est plus étendue que les deux autres années. La distribution bimodale de $g_{ah_ecotron}$ s'explique par des valeurs significativement plus faibles observées pour une feuille par rapport aux trois autres (voir section 4.2.1). Le ratio entre $g_{ah_ecotron}$ moyen par feuille et g_{ah_EC} moyen sur les trois années se situe entre 7,03 et 13,09.

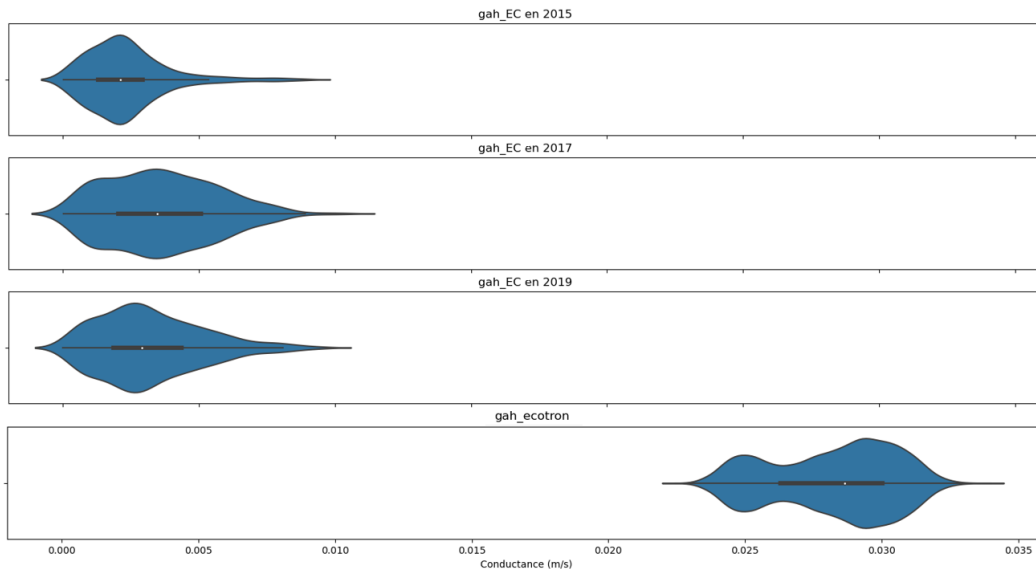


FIGURE 16 – Comparaison de g_{ah_EC} pour les trois années de culture à Lonzée avec $g_{ah_ecotron}$

5 Discussion

5.1 Reproductibilité du comportement d'une feuille réelle

La mesure de conductance de couche limite est rendue possible en posant l'hypothèse selon laquelle la feuille artificielle et les feuilles réelles partagent des caractéristiques similaires en termes d'échange de chaleur sensible avec leur environnement. Une analyse approfondie de cette hypothèse est présentée dans les paragraphes suivants.

L'utilisation d'un revêtement métallique sur les répliques est une source potentielle d'incertitude. En chauffant, puisque la conductivité thermique est importante, la répartition de la chaleur se fait de manière homogène sur son entièreté. Dans le cas d'une feuille réelle, un contraste de température existe entre le centre et les bords de la feuille (Parlange *et al.*, 1971). Cette différence de température est dirigée par deux processus antagonistes (Vogel, 1984). D'une part, le refroidissement par convection est plus efficace au niveau des bords de la feuille où la couche limite est moins épaisse. D'un autre côté, une conduction de chaleur s'établit du centre vers les bords, plus froids. (Kumar et Barthakur, 1971) confirment que les feuilles sont non isothermes. Pour contrecarrer ce contraste, plusieurs auteurs ont réfléchi à de nouvelles pistes d'amélioration. (Stokes *et al.*, 2006) a travaillé avec des matériaux non métalliques tandis que (Daudet *et al.*, 1998; Vogel, 1970) ont eu l'idée de chauffer seulement le centre de la feuille.

L'émissivité de la feuille artificielle dépend du matériau utilisé par sa construction. Cependant, elle est rarement identique à une feuille réelle. Ce problème peut être réglé en augmentant l'émissivité par polissage ou en peignant la surface (Grantz et Vaughn, 1999). Selon (Leuning et Foster, 1990), pour pouvoir comparer le bilan d'énergie des feuilles réelles avec celui des feuilles artificielles, il faut que les deux aient même absorptivité et émissivité. Pour ce travail, comme l'émissivité est prise en compte dans la formule de conductance et a été mesurée, il n'a pas été nécessaire de devoir polir ou couvrir de peinture la surface des répliques.

Aucun aspect de la rugosité de la surface (dentelure, lobes, trichomes, nervation, etc) n'a été représenté dans ce travail. Or, ces paramètres ont une influence sur la mesure de la conductance de couche limite (Haseba, 1974). Pour se rapprocher d'une feuille réelle, (Chen *et al.*, 1988a; Grace *et al.*, 1980) ont réalisé des expériences en représentant certaines aspérités de la surface.

5.2 Biais potentiels sur la mesure de la conductance de couche limite

Les erreurs calculées par paire de feuilles proviennent de trois sources distinctes. Tout d'abord, en raison de leur fabrication artisanale, une partie de l'erreur est spécifique à la forme et à la rugosité de chaque feuille. Ensuite, l'homogénéité du matériel utilisé constitue une deuxième source d'incertitude sur la similarité des feuilles. Enfin, comme nous mesurons les conductances de façon alternative et pas simultanée sur une paire de feuilles, la période de mesure pendant laquelle la conductance est calculée représente également une source d'incertitude. En effet, la conductance n'est pas totalement constante sur sa période de mesure puisque les conditions de vitesse de vent et de turbulence autour de la feuille peuvent varier légèrement.

La puissance injectée dans les feuilles a été ajustée à une valeur élevée (pour avoir une différence de température par rapport à l'air mesurable) mais en la limitant pour éviter l'apparition de la convection naturelle qui s'ajouterait de façon non réaliste à la convection forcée et qui surestime la mesure de la conductance. Cette détermination s'est faite à vitesse de vent faible pour être dans des conditions idéales pour l'apparition de la convection naturelle et donc être certain de rendre son rôle minimum.

Théoriquement, lorsque la vitesse du vent est nulle, seule la convection naturelle permet un transport. Cependant, celle-ci est extrêmement inefficace. Or, pour une vitesse de vent nulle, une conductance significativement différente de 0 a été calculée. Une explication possible est que la surface des feuilles n'est pas parfaitement plate et présente un microrelief. Celui-ci permettrait un transport de chaleur. Il peut induire des perturbations locales du flux d'air et créer des mouvements convectifs qui contribuent à la conductance observée, même en l'absence de vent externe.

La taille et la forme des feuilles ont des caractéristiques qui les éloignent des cas théoriques déjà étudiés. Malgré leur faible épaisseur et des bords effilés relativement fins, la surface des feuilles artificielles n'est pas parfaitement plane. Ces éléments impliquent des perturbations sur le flux qui modifient les processus de transfert au niveau de la couche limite et entraîne des divergences avec les équations théoriques (Wigley et Clark, 1974).

La relation de forme logarithmique qui existe entre la conductance et la vitesse de vent a été démontrée à de nombreuses reprises (Brenner et Jarvis, 1995; Daudet *et al.*, 1998; Domingo *et al.*, 1996; Grace *et al.*, 1980; Grantz et Vaughn, 1999). À plus haute vitesse de vent, la conductance de couche limite continue de croître mais avec une augmentation de plus en plus faible. Plusieurs auteurs, tous se focalisant sur des vitesses inférieures ou légèrement supérieures 1m/s ont conclu que la relation entre la vitesse de vent et la conductance était linéaire (Katsoulas *et al.*, 2007; Kimura *et al.*, 2020; Stokes *et al.*, 2006).

Nos résultats suggèrent que, en raison des particularités des feuilles artificielles mentionnées précédemment, la courbe expérimentale de la conductance de couche limite en fonction de la vitesse du vent (Figure 9) s'écarte des courbes théoriques purement laminaire et turbulente. C'est le cas aux faibles vitesses de vent, où notre courbe devrait se situer entre celles des deux types de convection. De plus, pour des vitesses de vent plus élevées, la courbe expérimentale est bien inférieure à la courbe théorique turbulente alors qu'elle devrait la suivre.

Comme les conditions aux limites des feuilles artificielles ne respectent pas totalement les conditions d'application des formules, un biais est introduit. Cependant, (Brenner et Jarvis, 1995) ont étudié la conductance de couche limite de répliques réalistes de millet en tunnel de vent et en champ. Etant donné que les feuilles de la famille des Poacées sont semblables, les conductances obtenues peuvent être comparées avec les nôtres. Les valeurs de conductances obtenues pour des vitesses de vent semblables sont très proches.

5.3 Extrapolation de la conductance de couche limite de la feuille à la conductance aérodynamique totale dans l'écotron

Afin de consolider les hypothèses d'indépendance de la conductance de couche limite d'une feuille, quel que soit sa position ou son angulation dans l'écotron, et d'utiliser nos données pour l'extrapolation vers une conductance aérodynamique totale, il est impératif de mener des expériences complémentaires. Ces expériences devraient couvrir différentes configurations en termes de positions, d'angles d'inclinaison et azimutaux, afin de confirmer la validité des hypothèses formulées. Parallèlement, il est également essentiel d'étudier l'effet du couvert végétal sur la conductance (est ce que nos expériences avec des feuilles artificielles dans l'écotron sans la présence du couvert peuvent être différentes d'un cas avec couvert?). En examinant diverses combinaisons de ces éléments, il sera possible d'obtenir une vision plus complète et précise de la relation entre la conductance et les caractéristiques de situations des feuilles artificielles par rapport la circulation de l'air.

5.3.1 Effet de la position

Il semblerait que la position n'ait pas d'impact sur la mesure de la conductance de couche limite puisqu'il a été montré que le comportement d'une feuille diffère des autres et il se trouve qu'elle contribue majoritairement à la différence significative calculée. D'autres expériences pourraient confirmer cette affirmation.

L'absence d'effet de la position pourrait s'expliquer par le fait que la vitesse moyenne de l'air dans l'écotron est faible en moyenne quelle que soit sa position. Cependant, il est possible que les valeurs instantanées de la vitesse de vent varient très fortement ce qui explique la turbulence élevée en écotron. Par conséquent, sur des périodes de mesure de 15 min comme nous l'avons fait pour le calcul des conductances, il n'y a pas de grande hétérogénéité dans le champ des vitesses. La détermination de la couche limite en écotron devra donc être vérifiée pour des périodes plus courtes.

5.3.2 Effet de l'inclinaison

Nos mesures ont démontré que l'inclinaison des feuilles artificielles n'impactait pas l'échange de chaleur sensible et latente avec son environnement. Cependant, d'autres études (Chamberlain, 1974; Chen *et al.*, 1988b; Kimura *et al.*, 2020) ont montré que l'angle d'inclinaison augmentait la conductance, bien que cet effet varie en fonction de l'angle lui-même. Cette augmentation de conductance est attribuée à une compression de l'épaisseur de la couche limite due à l'inclinaison vers le haut des feuilles (Schuepp, 1993). Le même article résume les facteurs d'augmentation trouvés dans différentes études, avec des valeurs allant de 1 à 2,5. De nombreux auteurs ont remarqué un transfert de chaleur accru des feuilles artificielles par rapport à la théorie dérivée pour des plaques plates et lisses. (Daudet *et al.*, 1998; Stokes *et al.*, 2006) n'ont quant à eux pas trouvé de différences par rapport aux équations théoriques.

La vérification de l'impact de l'angle azimutal n'a pas été effectuée. Cependant, cet effet est probablement celui qui impacte le moins la conductance dans le cas d'un champ de vitesse très turbulent. Étant donné que la position et l'inclinaison n'ont pas montré d'impact sur la mesure, et compte tenu des contraintes de temps limitées, il a été décidé de ne pas tester son effet.

5.3.3 Effet du couvert

Il est également fondamental d'étudier l'effet du couvert végétal sur la conductance. En effet, il semble évident que le GAI a un impact significatif sur les conditions de turbulence et donc directement sur la conductance mesurée. Cependant, les résultats obtenus à Lonzée ne semblent pas corroborer cette observation. En effet, en 2015 à Lonzée quand le GAI était supérieur en moyenne par rapport aux autres années de froment, la vitesse de friction était plus importante. Cependant, la conductance aérodynamique totale modélisée ou mesurée à partir du flux de chaleur sensible est plus faible que les autres années. De même, la vitesse de friction en 2017 et 2019 sont proches. Cependant, le GAI moyen en 2017 est bien inférieur à 2019 et la conductance aérodynamique totale en 2017 obtenue par modélisation est bien plus élevée que les autres années. Celle calculée à partir du flux de chaleur sensible reste aussi plus importante en 2017. Cependant, le contraste est bien moins évident que pour celle modélisée. On peut en conclure que d'autres facteurs que la turbulence entrent en jeu pour expliquer la variabilité temporelle et que l'étude de cette dernière doit se faire sur des périodes de comparaison plus courtes que sur la période de culture retenue, qui reprend environ 2 mois de données.

Des études antérieures ont permis de réaliser une cartographie détaillée des conditions de circulation du vent dans l'écotron. Elles ont permis de déterminer que la circulation de l'air en écotron est aléatoire et qu'il est difficile de la caractériser de manière claire mais la vitesse de vent est relativement faible en moyenne et la turbulence assez élevée. Cela rend l'étude de la différence avec et sans couvert moins indiquée.

5.3.4 Effet de la conductance aérodynamique

Les formules utilisées pour la modélisation de la conductance aérodynamique se basent sur une décroissance logarithmique du profil de la vitesse de vent avec la hauteur, alors qu'en réalité, la vitesse de vent diminue encore plus rapidement en raison de l'effet de rugosité du couvert végétal. La conductance aérodynamique totale modélisée est donc surestimée. Les valeurs de la conductance aérodynamique totale mesurées à partir du flux de chaleur sensible, plus précises, sont utilisées comme référence. Dans l'écotron, des travaux précédents (Strivay *et al.* (2020), Florian Vanden Brande) ont montré la forte homogénéité des concentrations et températures dans l'air au-dessus du couvert. Il a donc été assumé que la conductance aérodynamique de l'écotron était infinie et que la conductance aérodynamique totale devait être comparée à la conductance équivalente à l'ensemble des conductances de couche limite des feuilles en écotron (que l'on considère identiques quelle que soit la feuille au vu des résultats discutés dans les sections 5.3.1, 5.3.2 et 5.3.3).

5.4 Importance relative des conductances dans le transfert

La majorité du transfert est gouverné par les stomates. En effet, en moyenne, g_{ah_EC} est 3,57 à 4,51 fois plus élevée que g_s_EC (voir section 4.4.1). Lorsque le rapport entre les deux conductances est supérieur à 5, il a été considéré que le rôle de la conductance aérodynamique totale dans le processus d'échange est négligeable. Il apparaît que cela arrive dans 41 à 60 % des cas (voir section 4.4.2). Toutefois, il peut arriver que la conductance de canopée se rapproche et même dépasse la conductance aérodynamique totale. En général, les périodes pendant lesquelles les conditions sont remplies sont caractérisées par un PPFD proche ou supérieur à $1000 \text{ mol}/(m^2 \times s)$, un VPD proche ou supérieur à 1500 Pa et des conditions hydriques favorables. En ce qui concerne les conditions de vent, la vitesse de vent et de friction sont en générale inférieures ou comparables à la moyenne calculée sur la période retenue.

5.5 Comparaison des vitesses de transfert entre les deux sites

L'ensemble des mesures en écotron ont été prises dans des zones très proches du couvert. À Lonzée, les mesures de l'ensemble des variables climatiques, vitesse de vent moyenne et de la vitesse de friction incluses, sont réalisées 2 m au-dessus du couvert. Il existe, dès lors, peu de moyens de comparer directement les circulations d'air entre l'écotron et Lonzée. La vitesse de vent appliquée dans l'écotron n'est pas ajustable. Même si elle pouvait être modulée, la circulation de l'air à l'intérieur de la chambre serait différente de celle en extérieur en raison de ses particularités de conception. Cette différence est difficile à quantifier.

La g_{ah_EC} à Lonzée est environ 10 fois inférieure à $g_{ah_ecotron}$. Plusieurs explications peuvent être apportées pour expliquer cette divergence.

Tout d'abord, le transport dans l'écotron ne se fait peut-être pas de la même manière qu'à l'extérieur à cause de ses particularités de conception. Le volume étant fermé avec une installation qui contient divers capteurs et un flux d'air pulsé qui se rejoint au centre fait que le transport peut différer de Lonzée et dépendre d'autres paramètres non pris en compte dans les mesures. En effet, d'autres paramètres que la vitesse de vent moyenne et de la turbulence ont certainement une influence sur ce transport. Dans notre cas, une mesure directe de l'échange en écotron a été réalisé et est comparée à Lonzée. Cette mesure directe permet de s'affranchir des différences de vitesses de vent et des conditions de turbulence entre les deux sites. En effet, dans la formule de conductance de couche limite en écotron (formule (15)), la vitesse de vent et de friction n'interviennent pas. Dans la chambre de mesure, celles-ci n'ont qu'une influence indirecte sur la température des feuilles.

Ensuite, les techniques de mesure sont différentes. A Lonzée, la mesure repose sur le flux de chaleur sensible qui est obtenu grâce à l'Eddy Covariance alors qu'en écotron, la conductance repose sur une formule déduite à partir d'un changement d'échelle de mesures indirectes à partir de feuilles artificielles. Des différences supplémentaires peuvent provenir de la non fermeture du bilan énergétique de l'Eddy Covariance.

Des explications supplémentaires peuvent être apportées pour expliquer la différence entre les résultats de l'expérimentation qui s'est déroulée dans l'écotron et qui simulait une culture à Lonzée en 2015 et les mesures réellement prises à Lonzée en 2015. La comparaison entre les deux a révélé une différence de transpiration et de croissance entre les plantes de froment d'hiver. Dans notre cas, $g_{ah_ecotron}$ est supérieur à g_{ah_EC} . Ceci est un premier élément qui explique la différence de transpiration entre les deux sites. Une autre est le temps d'application en continu du vent sur la végétation. L'influence d'une vitesse de vent continue et constante n'affecte pas la transpiration de la même manière en fonction de l'échelle temporelle. À court terme (quelques minutes à quelques heures, échelle étudiée dans ce travail), la transpiration est toujours positivement corrélée à la vitesse de vent sauf dans certaines conditions (Huang *et al.*, 2015). En revanche, une application continue sur une période plus longue (plusieurs semaines ou mois, échelle étudié pour l'expérimentation en 2015) de la vitesse de vent sur la culture a un effet inverse sur la transpiration. À plus long terme, les stomates se ferment progressivement pour empêcher la plante de perdre de l'eau de manière excessive.

6 Conclusions et perspectives

Dans cette étude, la conductance de couche limite a été déterminée grâce à la chauffe alternée de deux feuilles artificielles en aluminium dimensionnées sur base d'une feuille réelle de froment d'hiver. Les mesures effectuées en écotron montrent que la position ainsi que l'angle d'inclinaison des feuilles artificielles n'ont pas d'impact significatif sur la conductance de couche limite et donc sur les flux de chaleur sensible et latente. Cependant, des expériences complémentaires doivent être réalisées pour différentes configurations d'angles et de positions pour confirmer la validité des hypothèses d'extrapolation permettant d'obtenir la conductance de couche limite à l'échelle de tout un couvert.

L'objectif de ce travail était de déterminer l'influence de la circulation d'air différente entre Lonzée et l'écotron sur les conductances convectives. Pour ce faire, la somme des conductances de couche limite en écotron a été comparée à la conductance aérodynamique totale à Lonzée, déduite à partir de l'Eddy Covariance. Il s'avère que la conductance résultante en écotron est bien plus élevée qu'à Lonzée. Pour évaluer l'importance relative des différentes conductances dans le transfert, la conductance de canopée a été comparée à la conductance aérodynamique totale. Il s'avère que les stomates jouent un rôle déterminant dans le transfert mais les conductances convectives ne peuvent pas être négligées dans la majorité des cas. Par conséquent, la reproduction correcte de la conductance aérodynamique totale de Lonzée dans l'écotron reste nécessaire dans les conditions évoquées.

Trois axes de recherche pourraient être approfondis afin de fournir des compléments d'information à cette étude.

Premièrement, il serait pertinent d'évaluer l'effet de la rugosité du couvert végétal sur la conductance des feuilles artificielles. Ces dernières seraient donc placées dans un couvert de froment mature. Des expériences similaires pour différentes combinaisons d'angles et de positions seraient menées entre Lonzée et l'écotron. Ces expériences viendraient améliorer la compréhension de l'impact de la structure et rugosité de la canopée sur les processus d'échange.

Ensuite, la calibration des feuilles artificielles avec des feuilles réelles serait un point intéressant à approfondir. L'objectif serait de comparer l'échange de chaleur entre des feuilles réelles ne transpirant pas avec les feuilles artificielles. Pour déterminer la conductance de couche limite des feuilles réelles, il y a plusieurs possibilités. La première est de les chauffer et d'observer la décroissance de température avec une caméra thermique ou un thermocouple. Cependant, il faut connaître très précisément la capacité thermique de la feuille et la chauffer *a priori*. La deuxième solution est de chauffer la feuille avec une puissance continue et connue comme dans le cas des feuilles artificielles. Cependant, il n'est pas impossible que la rugosité de la feuille soit impactée et que la chauffe ne se fasse pas de façon homogène. Pour pallier ces difficultés, il serait préférable d'utiliser un chauffage radiant, qui permet de chauffer la feuille grâce au rayonnement infrarouge. L'échange de chaleur entre la feuille réelle (où la transpiration est bloquée) et son environnement sera comparée avec celui de la feuille artificielle.

Enfin, jusqu'à présent, le comportement du stomate est considéré comme identique entre les plants de froment cultivés à Lonzée et en écotron. Cependant, le comportement des stomates en écotron reste indéterminé car il n'a pas encore été étudié. Afin de pouvoir comparer les différences de transpiration entre les deux sites, il est nécessaire de déterminer la conductance stomatique en écotron. L'utilisation d'un LI-6400 XT¹¹ permettrait de fournir des mesures directes de la conductance stomatique. En combinant les résultats de ce travail de fin d'études avec cette expérience qui constitue à évaluer la conductance stomatique en écotron, des explications supplémentaires pourront être apportées pour expliquer la différence de transpiration entre les deux sites.

11. LI-COR, Lincoln, NE, États-Unis

Références

- Elizabeth A AINSWORTH et Stephen P LONG : What have we learned from 15 years of free-air CO_2 enrichment (FACE)? a meta-analytic review of the responses of photosynthesis, canopy properties and plant production to rising CO_2 . *New phytologist*, 165(2):351–372, 2005. URL <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01224.x>.
- Hela Ben AMARA, Salwa BOUADILA, Hicham FATNASSI, Müslüm ARICI et Amen Allah GUIZANI : Climate assessment of greenhouse equipped with south-oriented PV roofs : An experimental and computational fluid dynamics study. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45:101100, 2021. URL <https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101100>.
- Maurine ANTOINE *et al.* : Study of the impact of climate change on a winter wheat crop (*Triticum aestivum* L.) by ecotron simulation. page 104, 2019. URL <http://hdl.handle.net/2268.2/8434>.
- Marc AUBINET et Bernard LONGDOZ : Cours de physique de l’environnement. page 108, 2019.
- BJ BAILEY : Constraints, limitations and achievements in greenhouse natural ventilation. In *International Conference and British-Israeli Workshop on Greenhouse Techniques towards the 3rd Millennium 534*, pages 21–30, 2000. URL <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2000.534.1>.
- Thierry BOULARD et S WANG : Greenhouse crop transpiration simulation from external climate conditions. *Agricultural and forest meteorology*, 100(1):25–34, 2000. URL [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00082-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00082-9).
- AJ BRENNER et PG JARVIS : A heated leaf replica technique for determination of leaf boundary layer conductance in the field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 72(3-4):261–275, 1995. URL [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)02160-L](https://doi.org/10.1016/0168-1923(94)02160-L).
- AC CHAMBERLAIN : Mass transfer to bean leaves. *Boundary-Layer Meteorology*, 6(3-4):477–486, 1974. URL <https://doi.org/10.1007/BF02137680>.
- J-M CHEN, A IBBETSON et JR MILFORD : Boundary-layer resistances of artificial leaves in turbulent air : I. leaves parallel to the mean flow. *Boundary-Layer Meteorology*, 45:137–156, 1988a. URL <https://doi.org/10.1007/BF00120820>.
- J M CHEN, A IBBETSON et JR MILFORD : Boundary-layer resistances of artificial leaves in turbulent air ii : leaves inclined to the mean flow. *Boundary-Layer Meteorology*, 45:371–390, 1988b. URL <https://doi.org/10.1007/BF00124009>.
- Harold H CLUM : The effect of transpiration and environmental factors on leaf temperatures i. transpiration. *American Journal of Botany*, pages 194–216, 1926. URL <https://www.jstor.org/stable/2435461>.
- Matthew COLLINS, Reto KNUTTI, Julie ARBLASTER, J-L DUFRESNE, Thierry FICHEFET, Pierre FRIEDLINGSTEIN, Xuejie GAO, William J GUTOWSKI, Tim JOHNS, Gerhard KRINNER *et al.* : Long-term climate change : projections, commitments and irreversibility. 2013. URL https://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_Chapter12_FINAL.pdf.
- IR COWAN, GD FARQUHAR et DH JENNINGS : Integration of activity in the higher plant. *Stomatal function in relation to leaf metabolism and environment*. Cambridge Univ Press, Cambridge, pages 471–505, 1977.
- Gaëlle DAMOUR, Thierry SIMONNEAU, Hervé COCHARD et Laurent URBAN : An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant, cell & environment*, 33(9):1419–1438, 2010. URL <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2010.02181.x>.
- FA DAUDET, Xavier LE ROUX, Herve SINOQUET et Boris ADAM : Wind speed and leaf boundary layer conductance variation within tree crown : consequences on leaf-to-atmosphere coupling and tree functions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 97(3):171–185, 1999. URL [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00079-9](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00079-9).
- François-Alain DAUDET, José SILVESTRE, M Isabel FERREIRA, Charles VALANCOGNE et F PRADELLE : Leaf boundary layer conductance in a vineyard in Portugal. *Agricultural and forest meteorology*, 89(3-4):255–267, 1998. URL [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(97\)00078-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(97)00078-6).

- William J DAVIES et Jianhua ZHANG : Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Annual review of plant biology*, 42(1):55–76, 1991. URL <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.42.060191.000415>.
- Thijs DEFRAEYE, Bert BLOCKEN et Jan CARMELIET : Cfd analysis of convective heat transfer at the surfaces of a cube immersed in a turbulent boundary layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 53(1-3):297–308, 2010. URL <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.09.029>.
- Thijs DEFRAEYE, Pieter VERBOVEN, Quang Tri HO et Bart NICOLAI : Convective heat and mass exchange predictions at leaf surfaces : Applications, methods and perspectives. *Computers and Electronics in Agriculture*, 96:180–201, 2013. URL <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.05.008>.
- Michael DIXON et J GRACE : Effect of wind on the transpiration of young trees. *Annals of Botany*, 53(6):811–819, 1984. URL <https://www.jstor.org/stable/42761559>.
- MICHAEL DIXON et JOHN GRACE : Natural convection from leaves at realistic grashof numbers. *Plant, Cell & Environment*, 6(8):665–670, 1983. URL <https://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11589240>.
- F DOMINGO, PR VAN GARDINGEN et AJ BRENNER : Leaf boundary layer conductance of two native species in southeast spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, 81(3-4):179–199, 1996. URL [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(95\)02326-7](https://doi.org/10.1016/0168-1923(95)02326-7).
- GD FARQUHAR : Feedforward responses of stomata to humidity. *Australian Journal of Plant Physiology*, 5(6):787–800, 1978. URL <https://doi.org/10.1071/PP9780787>.
- Graham D FARQUHAR et Thomas D SHARKEY : Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual review of plant physiology*, 33(1):317–345, 1982. URL <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.33.060182.001533>.
- PJ FRANKS, IR COWAN et GD FARQUHAR : The apparent feedforward response of stomata to air vapour pressure deficit : information revealed by different experimental procedures with two rainforest trees. *Plant, Cell & Environment*, 20(1):142–145, 1997. URL <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1997.d01-14.x>.
- David M GATES, EC TIBBALS et Frank KREITH : Radiation and convection for ponderosa pine. *American Journal of Botany*, 52(1):66–71, 1965. URL <https://www.jstor.org/stable/2439976>.
- JC GÁZQUEZ, JC LÓPEZ, E BAEZA, JJ PÉREZ-PARRA, Ma D FERNANDEZ, A BAILLE et Ma GONZALEZ-REAL : Effects of vapour pressure deficit and radiation on the transpiration rate of a greenhouse sweet pepper crop. In *International Workshop on Greenhouse Environmental Control and Crop Production in Semi-Arid Regions 797*, pages 259–265, 2008. URL <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2008.797.36>.
- J GRACE : Plant response to wind, 204 pp. *Academic Press, London*, 1977. URL [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(88\)90008-4](https://doi.org/10.1016/0167-8809(88)90008-4).
- J GRACE, FE FASEHUN et M DIXON : Boundary layer conductance of the leaves of some tropical timber trees. *Plant, Cell & Environment*, 3(6):443–450, 1980. URL <https://doi.org/10.1111/1365-3040.ep11586917>.
- J GRACE et JULIA WILSON : The boundary layer over a populus leaf. *Journal of Experimental Botany*, 27(2):231–241, 1976. URL <https://www.jstor.org/stable/23689246>.
- John GRACE : 3. plant response to wind. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 22:71–88, 1988. URL [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(88\)90008-4](https://doi.org/10.1016/0167-8809(88)90008-4).
- David A GRANTZ et David L VAUGHN : Vertical profiles of boundary layer conductance and wind speed in a cotton canopy measured with heated brass surrogate leaves. *Agricultural and Forest Meteorology*, 97(3):187–197, 1999. URL [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(99\)00078-7](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(99)00078-7).
- Charlotte GROSSIORD, Thomas N BUCKLEY, Lucas A CERNUSAK, Kimberly A NOVICK, Benjamin POULTER, Rolf TW SIEGWOLF, John S SPERRY et Nate G MCDOWELL : Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 226(6):1550–1566, 2020. URL <https://doi.org/10.1111/nph.16485>.
- MV GUTIÉRREZ, FC MEINZER et DA GRANTZ : Regulation of transpiration in coffee hedgerows : covariation of environmental variables and apparent responses of stomata to wind and humidity. *Plant, Cell & Environment*, 17(12):1305–1313, 1994. URL <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1994.tb00532.x>.

- Tetsuya HASEBA : Mass transfer across the boundary layer on plant leaves. (1) preliminary study of water-vapor transfer from a leaf-like flat plate with separated evaporation sources. *Journal of Agricultural Meteorology*, 30 (2):45–55, 1974. URL <https://doi.org/10.2480/agrmet.30.45>.
- Xiaogang HE, Ming PAN, Zhongwang WEI, Eric F WOOD et Justin SHEFFIELD : A global drought and flood catalogue from 1950 to 2016. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 101(5):E508–E535, 2020. URL <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-18-0269.1>.
- Bernard HEINESCH et Bernard LONGDOZ : Cours d’échanges écosystèmes - atmosphère, sous changements climatiques.
- Cheng-Wei HUANG, Chia-Ren CHU, Cheng-I HSIEH, Sari PALMROTH et Gabriel G KATUL : Wind-induced leaf transpiration. *Advances in Water Resources*, 86:240–255, 2015. URL <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2015.10.009>.
- N KATSOULAS, A BAILLE et C KITTAS : Leaf boundary layer conductance in ventilated greenhouses : an experimental approach. *Agricultural and forest meteorology*, 144(3-4):180–192, 2007. URL <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2007.03.003>.
- Kensuke KIMURA, Daisuke YASUTAKE, Atsushi YAMANAMI et Masaharu KITANO : Spatial examination of leaf-boundary-layer conductance using artificial leaves for assessment of light airflow within a plant canopy under different controlled greenhouse conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 280:107773, 2020. URL <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2019.107773>.
- M KITANO et H EGUCHI : Dynamic analysis of stomatal responses by an improved method of leaf heat balance. *Environmental and experimental botany*, 29(2):175–185, 1989. URL [https://doi.org/10.1016/0098-8472\(89\)90050-6](https://doi.org/10.1016/0098-8472(89)90050-6).
- C KITTAS, Thierry BOULARD et G PAPADAKIS : Natural ventilation of a greenhouse with ridge and side openings : sensitivity to temperature and wind effects. *Transactions of the ASAE*, 40(2):415–425, 1997. URL <https://doi.org/10.13031/2013.21268>.
- Jürgen KNAUER, Tarek S EL-MADANY, Sönke ZAEHLE et Mirco MIGLIAVACCA : Bigleaf—an r package for the calculation of physical and physiological ecosystem properties from eddy covariance data. *PloS one*, 13(8):e0201114, 2018a. URL <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0201114>.
- Jürgen KNAUER, Sönke ZAEHLE, Belinda E MEDLYN, Markus REICHSTEIN, Christopher A WILLIAMS, Mirco MIGLIAVACCA, Martin G DE KAUWE, Christiane WERNER, Claudia KEITEL, Pasi KOLARI *et al.* : Towards physiologically meaningful water-use efficiency estimates from eddy covariance data. *Global Change Biology*, 24 (2):694–710, 2018b. URL <https://doi.org/10.1111/gcb.13893>.
- F KREITH : Principles of heat transfer, 3rd edn. *New York*, page 665, 1973.
- Frank KREITH et Raj M MANGLIK : *Principles of heat transfer*. Cengage learning, 2016. ISBN 978-1-305-38710-2.
- Pieter Jan Cornelis KUIPER : *The effects of environmental factors on the transpiration of leaves, with special reference to stomatal light response*. Thèse de doctorat, Veenman, 1961. URL <https://edepot.wur.nl/184838>.
- A KUMAR et N BARTHAKUR : Convective heat transfer measurements of plants in a wind tunnel. *Boundary-Layer Meteorology*, 2(2):218–227, 1971. URL <https://doi.org/10.1007/BF00192131>.
- Zbigniew W KUNDZEWICZ : Climate change impacts on the hydrological cycle. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 8 (2-4):195–203, 2008. URL <https://doi.org/10.2478/v10104-009-0015-y>.
- Hans LAMBERS, Francis Stuart CHAPIN, Thijs Leendert PONS *et al.* : *Plant physiological ecology*, volume 2. Springer, 2008. URL <https://doi.org/10.1007/978-0-387-78341-3>.
- JJ LANDSBERG et GB JAMES : Wind profiles in plant canopies : studies on an analytical model. *Journal of Applied Ecology*, pages 729–741, 1971. URL <https://doi.org/10.2307/2402680>.
- JJ LANDSBERG et MM LUDLOW : A technique for determining resistance to mass transfer through the boundary layers of plants with complex structure. *Journal of Applied Ecology*, pages 187–192, 1970. URL <https://doi.org/10.2307/2401619>.

- R LEUNING : Leaf energy balances : developments and applications. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 324(1223):191–206, 1989. URL <https://doi.org/10.1098/rstb.1989.0044>.
- R LEUNING et IJ FOSTER : Estimation of transpiration by single trees : comparison of a ventilated chamber, leaf energy budgets and a combination equation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 51(1):63–86, 1990. URL [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(90\)90042-5](https://doi.org/10.1016/0168-1923(90)90042-5).
- Sebastian LEUZINGER, Yiqi LUO, Claus BEIER, Wouter DIELEMAN, Sara VICCA et Christian KÖRNER : Do global change experiments overestimate impacts on terrestrial ecosystems ? *Trends in ecology & evolution*, 26(5):236–241, 2011. URL <https://doi.org/10.1016/j.tree.2011.02.011>.
- Lester MACHTA : Mauna loa and global trends in air quality. *Bulletin of the american Meteorological Society*, 53(5):402–420, 1972. URL [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1972\)053<0402:MLAGTI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1972)053<0402:MLAGTI>2.0.CO;2).
- Robert S MELLOR, Frank B SALISBURY et Klaus RASCHKE : Leaf temperatures in controlled environments. *Planta*, 61:56–72, 1964. URL <https://doi.org/10.1007/BF01895390>.
- John L MONTEITH : Evaporation and environment. In *Symposia of the society for experimental biology*, volume 19, pages 205–234. Cambridge University Press (CUP) Cambridge, 1965. URL <https://doi.org/10.1177/003072706900600214>.
- A MUKHERJI, P THORNE, WWL CHEUNG, SL CONNORS, M GARSCHAGEN, O GEDEN, B HAYWARD, NP SIMPSON, E TOTIN, K BLOK *et al.* : Synthesis report of the ipcc six th assessment report (ar6). *United Nations*, 2023. URL <https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-cycle/>.
- Viliam NOVÁK et Jozef VIDOVIČ : Transpiration and nutrient uptake dynamics in maize (*zea mays* l.). *Ecological Modelling*, 166(1-2):99–107, 2003. URL [https://doi.org/10.1016/S0304-3800\(03\)00102-9](https://doi.org/10.1016/S0304-3800(03)00102-9).
- G PAPADAKIS, M MERMIER, JF MENESES et Thierry BOULARD : Measurement and analysis of air exchange rates in a greenhouse with continuous roof and side openings. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 63(3):219–227, 1996. URL <https://doi.org/10.1006/jaer.1996.0023>.
- DF PARKHURST, PR DUNCAN, DM GATES et F KREITH : Wind-tunnel modelling of convection of heat between air and broad leaves of plants. *Agricultural Meteorology*, 5(1):33–47, 1968. URL [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(68\)90021-6](https://doi.org/10.1016/0002-1571(68)90021-6).
- Jean-Yves PARLANGE, Paul E WAGGONER et Gary H HEICHEL : Boundary layer resistance and temperature distribution on still and flapping leaves : I. theory and laboratory experiments. *Plant Physiology*, 48(4):437–442, 1971. URL <https://doi.org/10.1104/pp.48.4.437>.
- Ludwig PRANDTL : Über flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner reibung. *Verhandl. 3rd Int. Math. Kongr. Heidelberg (1904), Leipzig*, 1905. URL https://doi.org/10.1007/978-3-662-11836-8_43.
- Klaus RASCHKE : Heat transfer between the plant and the environment. *Annual Review of Plant Physiology*, 11(1):111–126, 1960. URL <https://doi.org/10.1146/annurev.pp.11.060160.000551>.
- Víctor Resco de DIOS, Rubén DÍAZ-SIERRA, Michael L GOULDEN, Craig VM BARTON, Matthias M BOER, Arthur GESSLER, Juan Pedro FERRIO, Sebastian PFAUTSCH et David T TISSUE : Woody clockworks : circadian regulation of night-time water use in eucalyptus globulus. *New Phytologist*, 200(3):743–752, 2013. URL <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/nph.12382>.
- Frank R RIJSBERMAN : Water scarcity : fact or fiction ? *Agricultural water management*, 80(1-3):5–22, 2006. URL <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.07.001>.
- Francois RINEAU, Robert MALINA, Natalie BEENAERTS, Natascha ARNAUTS, Richard D BARDGETT, Matty P BERG, Annelies BOEREMA, Liesbeth BRUCKERS, Jan CLERINX, Edouard L DAVIN *et al.* : Towards more predictive and interdisciplinary climate change ecosystem experiments. *Nature climate change*, 9(11):809–816, 2019. URL <https://doi.org/10.1038/s41558-019-0609-3>.
- Brett R SCHEFFERS, Luc DE MEESTER, Tom CL BRIDGE, Ary A HOFFMANN, John M PANDOLFI, Richard T CORLETT, Stuart HM BUTCHART, Paul PEARCE-KELLY, Kit M KOVACS, David DUDGEON *et al.* : The broad footprint of climate change from genes to biomes to people. *Science*, 354(6313):aaf7671, 2016. URL <http://dx.doi.org/10.1126/science.aaf7671>.

- Peter H SCHUEPP : Heat and moisture transfer from flat surfaces in intermittent flow : a laboratory study. *Agricultural Meteorology*, 22(3-4):351–366, 1980. URL [https://doi.org/10.1016/0002-1571\(80\)90012-6](https://doi.org/10.1016/0002-1571(80)90012-6).
- PH SCHUEPP : Tansley review no. 59. leaf boundary layers. *New Phytologist*, pages 477–507, 1993. URL <https://www.jstor.org/stable/2558258>.
- Michio SHIBAYAMA : Radiometric estimation of canopy leaf inclination angles of various crop species using multi-band polarization and reflectance. *Plant production science*, 9(2):156–160, 2006. URL <https://doi.org/10.1626/pps.9.156>.
- Michio SHIBAYAMA et Yoshiaki WATANABE : Estimating the mean leaf inclination angle of wheat canopies using reflected polarized light. *Plant production science*, 10(3):329–342, 2007. URL <https://doi.org/10.1626/pps.10.329>.
- Ken-ichiro SHIMAZAKI, Michio DOI, Sarah M ASSMANN et Toshinori KINOSHITA : Light regulation of stomatal movement. *Annu. Rev. Plant Biol.*, 58:219–247, 2007. URL <https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.57.032905.105434>.
- Cecilia STANGHELLINI : *Transpiration of greenhouse crops : an aid to climate management*. Wageningen University and Research, 1987. URL <https://edepot.wur.nl/202121>.
- Victoria J STOKES, Michael D MORECROFT et James IL MORISON : Boundary layer conductance for contrasting leaf shapes in a deciduous broadleaved forest canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*, 139(1-2):40–54, 2006. URL <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.05.011>.
- Loïc STRIVAY *et al.* : Amélioration du bilan énergétique au sein des cellules du terra-écotron. page 74, 2020. URL <http://hdl.handle.net/2268.2/10390>.
- Daniel TANURO : *L'impossible capitalisme vert*. La Découverte, 2015. ISBN 9782707173232.
- AS THOM : The exchange of momentum, mass, and heat between an artificial leaf and the airflow in a wind-tunnel. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 94(399):44–55, 1968. URL <https://doi.org/10.1002/qj.49709439906>.
- MR THORPE et DR BUTLER : Heat transfer coefficients for leaves on orchard apple trees. *Boundary-Layer Meteorology*, 12:61–73, 1977. URL <https://doi.org/10.1007/BF00116398>.
- Edward Camp TIBBALS, Ellen K CARR, David M GATES et Frank KREITH : Radiation and convection in conifers. *American Journal of Botany*, 51(5):529–538, 1964. URL <https://doi.org/10.1002/j.1537-2197.1964.tb06666.x>.
- MT TYREE et P YIANOULIS : The site of water evaporation from sub-stomatal cavities, liquid path resistances and hydroactive stomatal closure. *Annals of Botany*, 46(2):175–193, 1980. URL <https://www.jstor.org/stable/42757334>.
- Steven VOGEL : Convective cooling at low airspeeds and the shapes of broad leaves. *Journal of Experimental Botany*, 21(1):91–101, 1970. URL <https://doi.org/10.1093/jxb/21.1.91>.
- Steven VOGEL : The lateral thermal conductivity of leaves. *Canadian journal of botany*, 62(4):741–744, 1984. URL <https://doi.org/10.1139/b84-108>.
- G WIGLEY et JA CLARK : Heat transport coefficients for constant energy flux models of broad leaves. *Boundary-Layer Meteorology*, 7:139–150, 1974. URL <https://doi.org/10.1007/BF00227909>.
- WT WILLIAMS et FA AMER : Transpiration from wilting leaves. *Journal of Experimental Botany*, 8(1):1–19, 1957. URL <https://www.jstor.org/stable/23686321>.
- Chan Yul YOO, Heather E PENCE, Paul M HASEGAWA et Michael V MICKELBART : Regulation of transpiration to improve crop water use. *Critical Reviews in Plant Science*, 28(6):410–431, 2009. URL <https://doi.org/10.1080/07352680903173175>.
- Yongqiang ZHANG, Changming LIU, Yanjun SHEN, A KONDOH, Changyuan TANG, T TANAKA et J SHIMADA : Measurement of evapotranspiration in a winter wheat field. *Hydrological Processes*, 16(14):2805–2817, 2002. URL <https://doi.org/10.1002/hyp.1072>.

7 Annexes

7.1 Laboratoire

7.1.1 Conception des feuilles artificielles

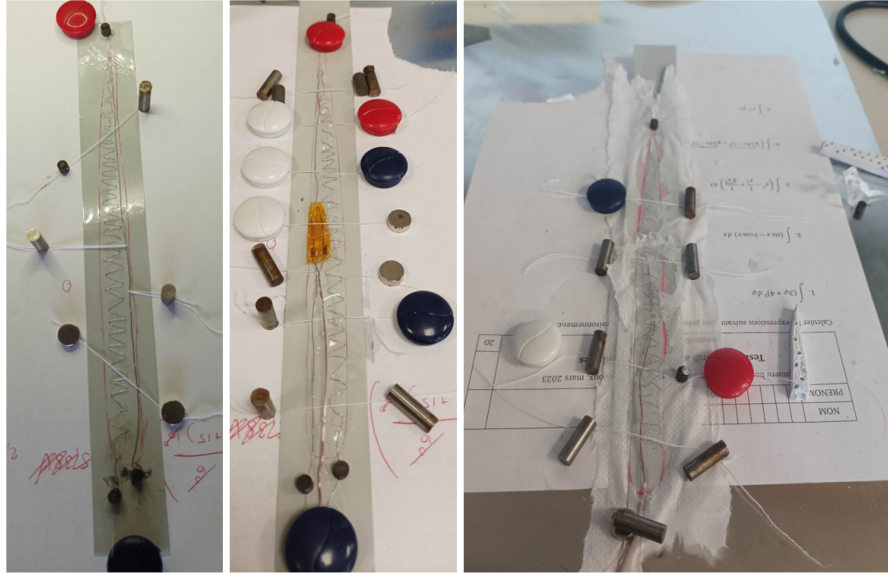


FIGURE 17 – Réalisation des feuilles artificielles

La première étape consiste à tracer le contour de la feuille sur le côté recouvert de peinture. Ensuite, la résistance chauffante est positionnée dans le gabarit et maintenue en place à l'aide d'aimants. Après avoir inséré le thermocouple au centre, une feuille de cellulose est déposée par-dessus. Ensuite, la seconde moitié de l'aluminium est collée, et la feuille est découpée selon le contour tracé.

7.1.2 Paire de feuilles



FIGURE 18 – Feuilles placées côte à côte

7.1.3 Impression 3D du système de support

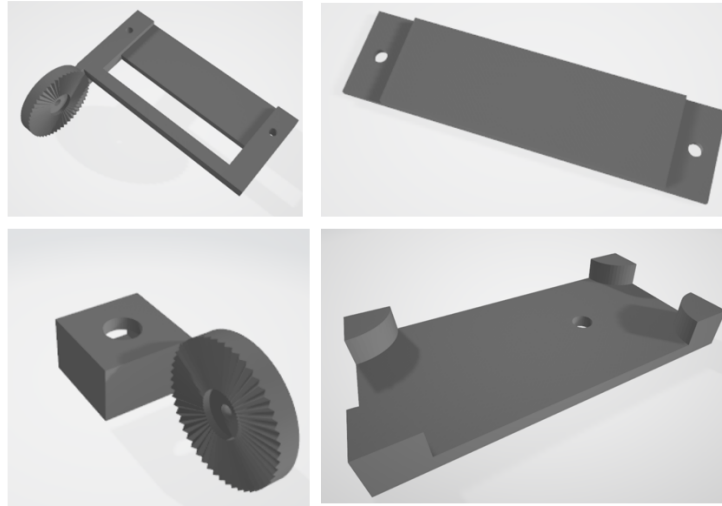


FIGURE 19 – Pièces de support

De gauche à droite et de bas en haut, on a : a) Le support de maintien sert de surface sur laquelle les feuilles artificielles se reposent ; b) cette pièce est utilisée pour presser le bord inférieur des feuilles contre le support de maintien à l'aide de deux vis serrées aux extrémités ; c) la roulette permet de modifier l'angle d'inclinaison des feuilles et la partie qui l'accompagne permet d'insérer une tige filetée ; d) le pied permet de maintenir le tout en équilibre.

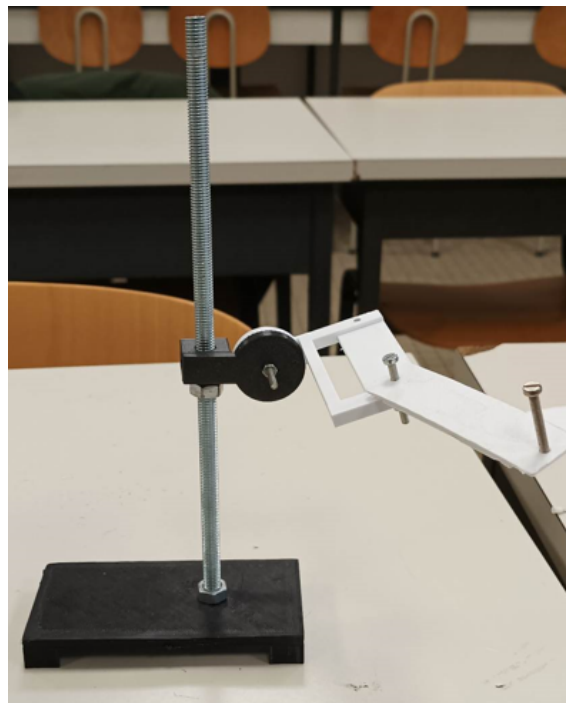


FIGURE 20 – Dispositif de support complet

Les pièces imprimées en 3D ont été modélisées à l'aide du logiciel Autodesk Fusion 360, puis fabriquées avec une imprimante Ender 3 (Creality). Le gcode a été généré à l'aide du logiciel Cura Ultimaker 4.13.0. La tige filetée a un diamètre de 8 mm et une longueur de 1 m.

7.1.4 Réalisation des pistes

1) Logiciel et impression

Le typon a été réalisé avec le logiciel Autodesk Eagle. Un schéma électrique avec le nombre de pistes désiré peut être dessiné. Une fois créé, le typon est imprimé sur un transparent.

2) Insolation

Une plaque en époxy est découpée au format du typon. Il faut placer la partie encrée du typon du côté de la résine. Celle-ci est modifiée pendant la phase d'insolation. La vitre de l'insoleuse est placée sur le typon du côté vierge. Ensuite, il faut régler le temps d'exposition aux UV. Les zones exposées aux UV seront enlevées lors de la révélation alors que les zones non exposées resteront intactes. Après l'insolation, on peut apercevoir le tracé des pistes.

3) Révélation

Cette étape nécessite l'usage de produits chimiques. Tout d'abord, il faut réchauffer légèrement le révélateur de soude caustique. Ensuite, le circuit est plongé dans cette solution. Les pistes apparaissent distinctement après des mouvements de va et vient. Il est nécessaire de poursuivre le frotage de la platine afin d'obtenir un cuivre bien brillant entre les pistes. Ensuite, il convient de rincer la platine avec de l'eau et de la laisser sécher.

4) Gravure

La dernière étape est la gravure. Il faut chauffer du perchlorure à 45°C et ensuite y plonger la platine. Il faut remuer le mélange jusqu'à ce que tout le cuivre soit enlevé. Il ne reste plus qu'à rincer abondamment et puis passer un coup d'acétone pour enlever les traces de résine résiduelles sur les pistes.

5) Perçage

Une perceuse à main a été utilisée pour trouser les pistes aux endroits voulus. Ensuite les différents câbles reliant le typon au multiplexeur y ont été soudés avec de l'étain. De l'autre côté du typon, un bornier permet d'insérer les câbles de la feuille et de faire la jonction avec le système d'acquisition.

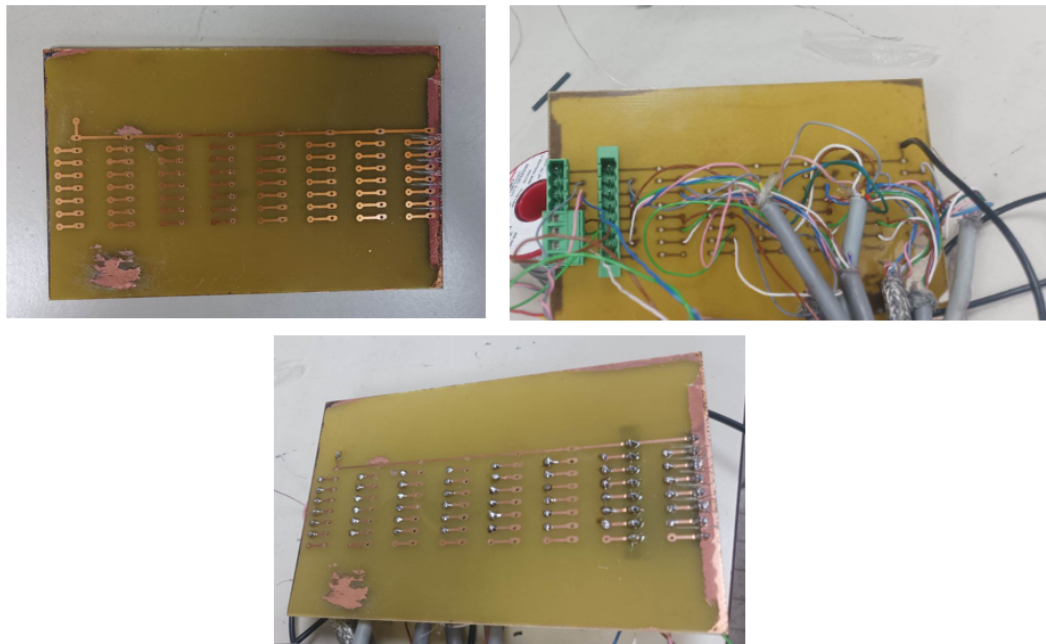


FIGURE 21 – Typon

La création de pistes sur le typon (pièce rectangulaire) permet d'établir une connexion électrique entre les câbles connectés au multiplexeur et les câbles des feuilles artificielles, dont les extrémités dénudées, sont serrées dans un bornier.

7.1.5 Dispositif d'acquisition et de traitement des données

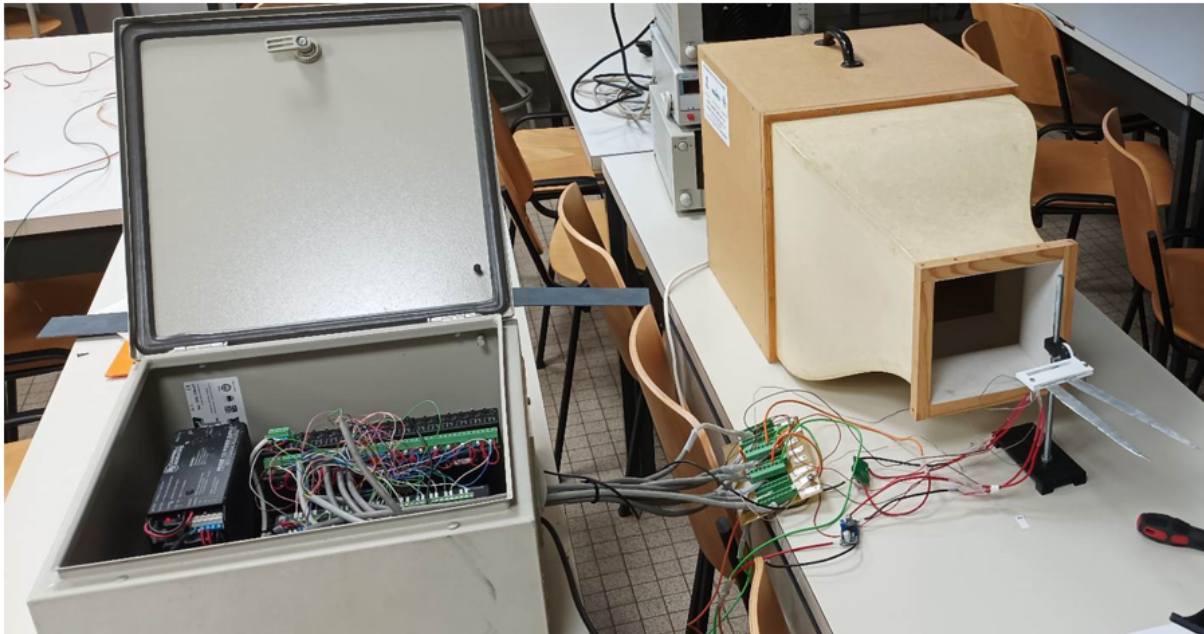


FIGURE 22 – Dispositif d'acquisition et de traitement des données

Le dispositif d'acquisition est inséré à l'intérieur d'une boîte en acier. La communication électrique entre le multiplexeur et les feuilles artificielles est établie grâce à la création des pistes sur le typon.

7.1.6 Tunnel de vent



FIGURE 23 – Tunnel de vent

Tunnel de vent pris de face et de dos. Le mouvement de rotation des hélices génère le vent.

7.1.7 Amélioration du dispositif

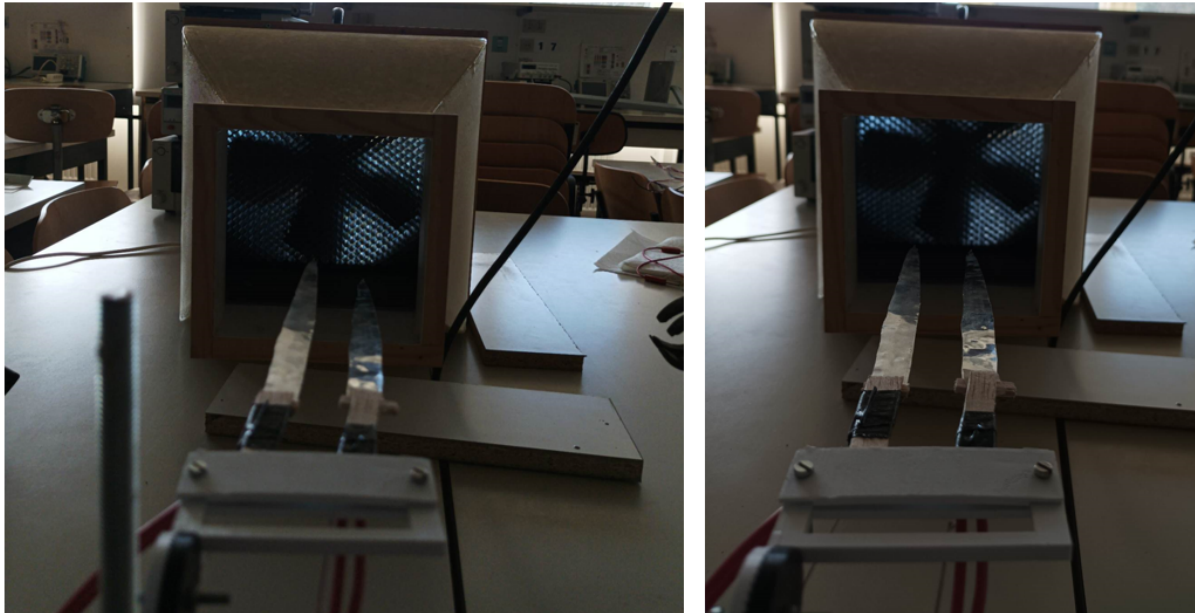


FIGURE 24 – Ajustement du système

Les feuilles sont placées parallèlement au flux généré par le tunnel de vent. Les extrémités sont recouvertes de balsa pour empêcher la conduction.

7.1.8 Réalisation de la boîte en aluminium



FIGURE 25 – Détermination de l'émissivité

La boîte est entièrement recouverte d'aluminium sur ses six faces. La feuille artificielle est insérée dans un trou sur un des côtés de la boîte.

7.1.9 Démonstration du calcul de l'émissivité

$$LW_m = LW_f + LW_r \quad (35)$$

$$LW_m = \epsilon_{al} \times \theta \times T_f^4 + (1 - \epsilon_{al}) \times \epsilon_{al} \times \theta \times T_{air}^4 \quad (36)$$

$$LW_m = \epsilon_{al} \times \theta \times T_f^4 + \epsilon_{al} \times \theta \times T_{air}^4 - \epsilon_{al}^2 \times \theta \times T_{air}^4 \quad (37)$$

$$T_m^4 = \epsilon_{al} \times (T_f^4 + T_{air}^4) - \epsilon_{al}^2 \times T_{air}^4 \quad (38)$$

$$0 = \epsilon_{al} \times (T_f^4 + T_{air}^4) - \epsilon_{al}^2 \times T_{air}^4 - T_m^4 \quad (39)$$

$$0 = -T_{air}^4 \times \epsilon_{al}^2 + (T_f^4 + T_{air}^4) \times \epsilon_{al} - T_m^4 \quad (40)$$

Avec LW_f , LW_r et LW_m les rayonnements infrarouges de la feuille artificielle, réfléti et mesuré par la caméra thermique. Pour déterminer l'émissivité, il faut résoudre l'équation du second degré.

7.2 Écotron

7.2.1 Circulation de l'air

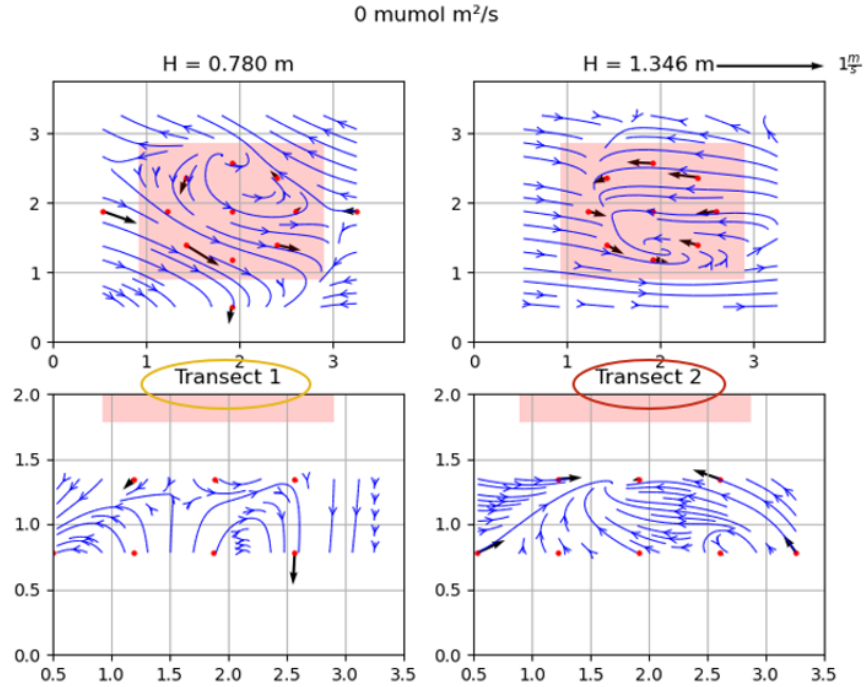


FIGURE 26 – Circulation de l'air en écotron

De nombreuses informations apparaissent sur cette figure. Les positions des anémomètres soniques sont indiquées par des points rouges. Les vecteurs noirs représentent la moyenne des mesures effectuées sur une heure. Le panneau lumineux est délimité par le cadre rouge. Les flèches bleues représentent un champ de vecteurs extrapolé à partir des valeurs mesurées. Les mesures ont été réalisées à trois niveaux d'intensité lumineuse ($0, 600$ et $1200 \mu\text{mol} \times \text{m}^2/\text{s}$). On se trouve dans le cas où le panneau lumineux est fermé ($0 \mu\text{mol} \times \text{m}^2/\text{s}$). Le graphique en haut à gauche présente une vue aérienne de la circulation de l'air à la première hauteur ($0,78$ m au-dessus du sol), tandis que celui en haut à droite représente une vue aérienne à la deuxième hauteur ($1,346$ m). La longueur du vecteur noir en haut de cette figure équivaut à une vitesse de vent de 1 m/s . L'axe x sur les graphiques du haut correspond au côté de la porte d'entrée. En bas à gauche, on observe une vue transversale des vitesses au centre, avec la porte située à gauche et le fond à droite. En bas à droite, on a une vue perpendiculaire à la précédente, où les parois perforées se trouvent à gauche et à droite.

7.2.2 Feuilles artificielles

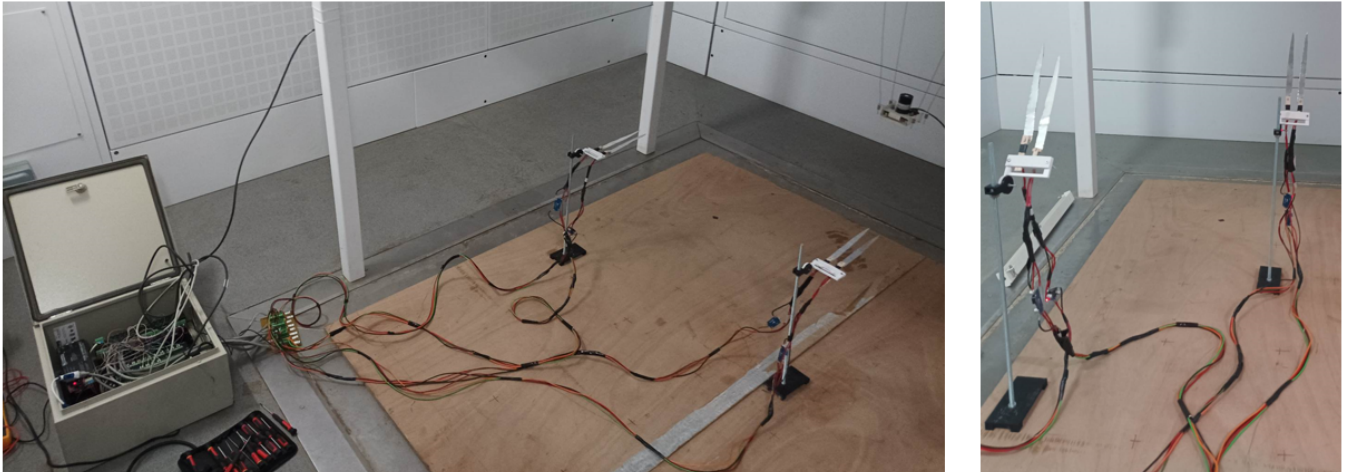


FIGURE 27 – Placement des feuilles artificielles en écotron

7.2.3 Positionnement

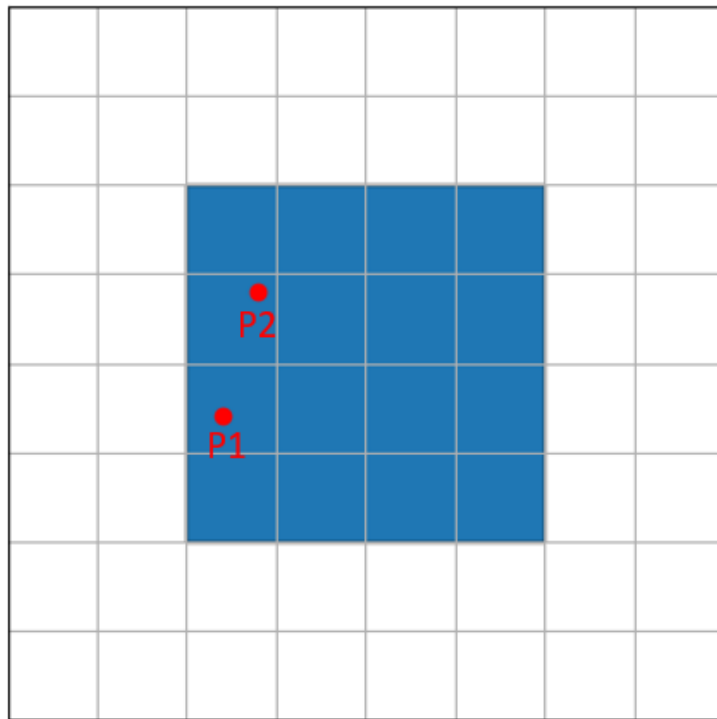


FIGURE 28 – Positionnement des feuilles artificielles en écotron

La face du bas est le côté de la porte d'entrée et le carré bleu représente la place occupée par le lysimètre. Les feuilles 3 et 9 occupent la position 1 alors que les feuilles 11 et 12 occupent la position 2.

7.2.4 Conductances des feuilles

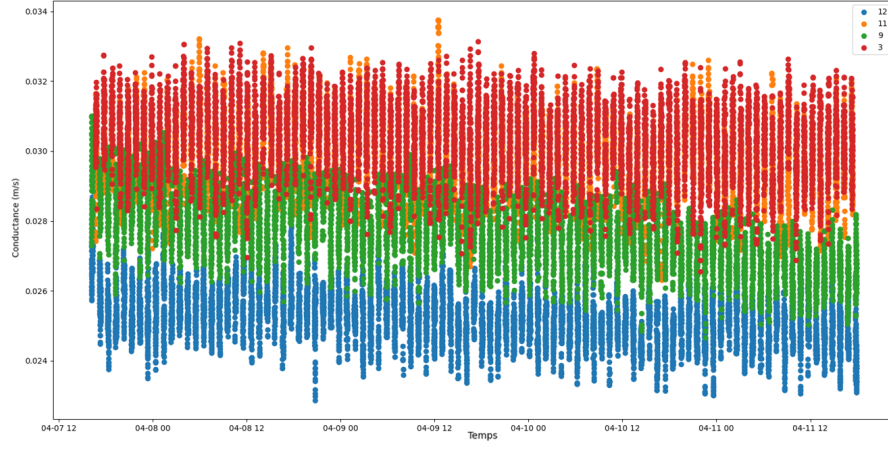


FIGURE 29 – Conductances pour deux couples de feuilles placées à l’horizontale en écotron

Les conductances de couche limite calculées restent assez stables à travers le temps.

7.2.5 Extrapolation

$$g_{ah_ecotron} = g_{bh1} + g_{bh2} \dots + g_{bhn} \quad (41)$$

$$g_{ah_ecotron} = \frac{g_{bh1}/f1}{S_f} + \frac{g_{bh2}/f2}{S_f} \dots + \frac{g_{bhn}/fn}{S_f} \quad (42)$$

$$g_{ah_ecotron} = \frac{g_{bh}/f}{S_f} \times LAI \quad (43)$$

7.3 Représentation comparative des résistances s'opposant au transfert en écotron et à Lonzée

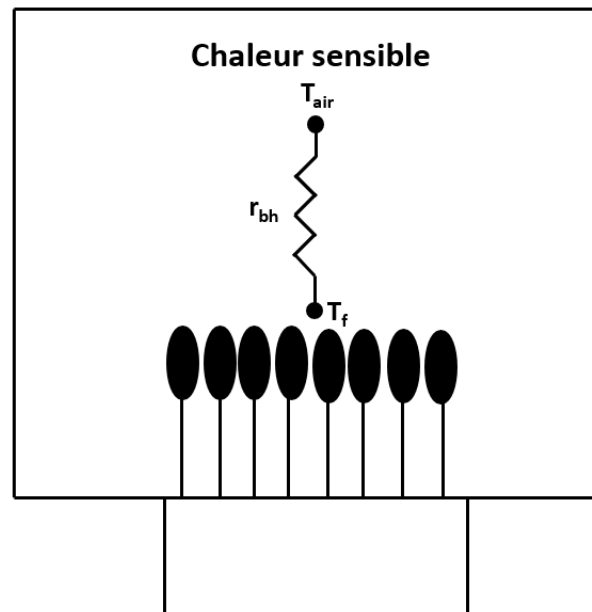


FIGURE 30 – Résistances au transfert en écotron

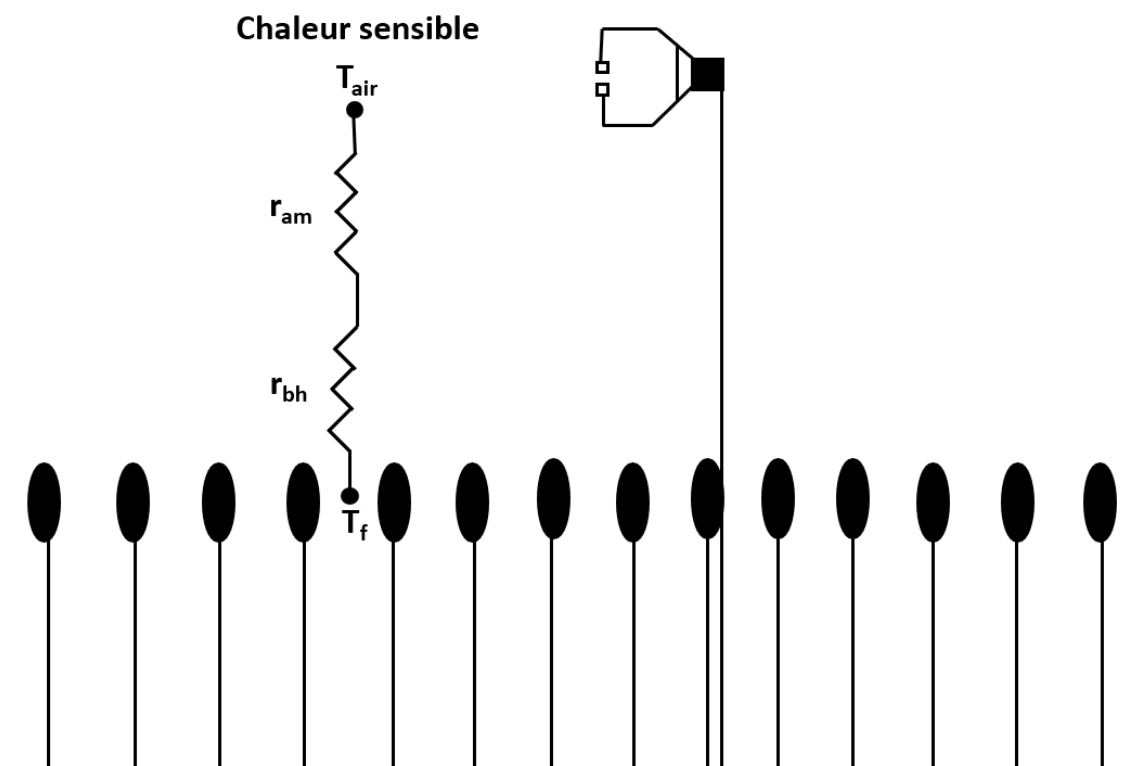


FIGURE 31 – Résistances au transfert à Lonzée

7.4 Lonzée

7.4.1 Mesures effectuées sur le froment d'hiver

TABLE 8 – Mesures de GAI

Année	Date	GAI (m^2 feuilles/ m^2 sol)	Période retenue	GAI moyen sur la période retenue (m^2 feuilles/ m^2 sol)
2015	14/4	1,89	17/4 au 23/6	5,12
	28/4	3,16		
	11/5	5,40		
	26/5	5,65		
	9/6	6,38		
	23/6	6,11		
	14/7	1,84		
	31/7	0		
2017	10/4	1,09	21/4 au 6/6	3,61
	24/4	2,11		
	15/5	3,20		
	6/6	5,46		
	26/6	3,71		
2019	5/4	1,98	5/4 au 12/6	4,72
	25/4	5,23		
	15/5	4,41		
	27/5	5,36		
	12/6	6,54		
	27/6	4,99		

7.4.2 Moments pour lesquels la conductance de canopée dépasse ou atteint la conductance aérodynamique totale

TABLE 9 – Paramètres météo pour lesquels g_s_EC ou g_s_m atteint ou dépasse g_{ah_EC} ou g_{ah_m}

Date	PPFD ($\mu mol/(m^2 \times s)$)	SWC (%)	VPD (Pa)	u_{star} (m/s)	u (m/s)
8/5/15 11 :00	1680	36,75	1930	0,34	0,19
8/5/15 14 :30	1296	36,91	1818	0,20	1,77
22/5/15 13 :30	952	27,89	1828	0,18	1,15
22/5/15 14 :00	968	27,86	1734	0,11	0,76
22/5/15 17 :00	1113	27,59	1843	0,25	1,58
22/5/15 17 :30	832	27,53	1726	0,17	1,02
24/5/15 16 :00	1327	26,53	2171	0,22	1,84
26/5/15 13 :00	1015	25,20	1744	0,23	1,63
26/5/15 15 :00	749	25,04	1448	0,28	1,63
30/5/15 15 :00	964	22,89	1281	0,43	3,78
11/5/17 14 :30	975	26,99	1841	0,45	3,66
16/5/17 13 :30	1065	26,15	2065	0,30	1,78
12/4/19 13 :00	490	28,25	666	0,37	3,54
12/4/19 14 :30	458	28,22	657	0,42	3,93
12/4/19 15 :00	578	28,37	686	0,43	3,76
13/4/19 17 :00	406	27,49	615	0,38	3,64
19/4/19 14 :00	1397	26,91	1983	0,30	2,71
25/5/19 15 :00	1425	30,92	1213	0,03	0,65

7.5 Codes

7.5.1 Code CRBasic

```
'CR1000 Series Datalogger
'Declare Constants
'Declare Public Variables

Public PTemp,Batt_volt,i,TA_1_1_2, TA_IU_1_1_2,AirTC
Public Thermo(8)
Alias Thermo(1) = S1G ' S1G pour support numero 1 feuille de gauche
Alias Thermo(2) = S1D
Alias Thermo(3) = S2G
Alias Thermo(4) = S2D
Alias Thermo(5) = S3G
Alias Thermo(6) = S3D
Alias Thermo(7) = S4G
Alias Thermo(8) = S4D

Public Vleaf(8)
Alias Vleaf(1) = VRT1G ' Voltage régulateur de tension du support 1 gauche
Alias Vleaf(2) = VRT1D
Alias Vleaf(3) = VRT2G
Alias Vleaf(4) = VRT2D
Alias Vleaf(5) = VRT3G
Alias Vleaf(6) = VRT3D
Alias Vleaf(7) = VRT4G
Alias Vleaf(8) = VRT4D

'Gestion des relais
Public Relais
Dim SiteValve(8) As Long ' relais SDM-CD16AC
Dim SiteValve2(9) As Long
Dim Time_ht = 5 'temps de chauffe
Units Time_ht = min
Dim Time_stbl = 5 'temps de refroidissement
Units Time_stbl = min

'Define Data Tables.
DataTable (Table,1,-1) ' Set table size to of records, or -1 to autoallocate.
DataInterval (0,5,Sec,10)
Minimum (1,Batt_volt,FP2,False,False)
Sample (1,PTemp,FP2)
Sample (1,S1G,FP2) ' feuille gauche support 1
Sample (1,S1D,FP2) ' feuille droite support 1
Sample (1,S2G,FP2) ' feuille gauche support 2
Sample (1,S2D,FP2) ' feuille droite support 2
Sample (1,S3G,FP2) ' feuille gauche support 3
Sample (1,S3D,FP2) ' feuille droite support 3
Sample (1,S4G,FP2) ' feuille gauche support 4
Sample (1,S4D,FP2) ' feuille droite support 4
Sample (1,VRT1G,FP2) ' Regulateur de tension gauche du support 1
Sample (1,VRT1D,FP2) ' Regulateur de tension droit du support 1
Sample (1,VRT2G,FP2) ' Regulateur de tension gauche du support 2
Sample (1,VRT2D,FP2) ' Regulateur de tension droit du support 2
Sample (1,VRT3G,FP2) ' Regulateur de tension gauche du support 3
Sample (1,VRT3D,FP2) ' Regulateur de tension droit du support 3
```

```

Sample (1,VRT4G,FP2) 'Regulateur de tension gauche du support 4
Sample (1,VRT4D,FP2) 'Regulateur de tension droit du support 4
Sample (1,Relais,FP2) 'indique quels relais sont actif
Sample (1,TA_1_1_2, FP2)

EndTable

'Define Subroutines
'Sub
'EnterSub instructions here
'EndSub

'Main Program
BeginProg

'Load TGA Sample Selection Manifold SDM-CD16 Settings

SiteValve(1) = B0000000001010101 ' Alimentation regulateurs des supports feuille gauche
SiteValve(2) = B0000000001010101 ' Alimentation regulateurs des supports feuille droite
SiteValve2(9) = B0000000000000000 ' Aucun regulateur alimentes

Scan (5,Sec,0,0)
PanelTemp (PTemp,60)
Battery (Batt_volt)
VoltSe (AirTC,1,mV2500,13,0,0,_50Hz,1,0)
TA_IU_1_1_2 = AirTC
TA_1_1_2 = (AirTC*0.14)-80 ' voir table 7-4 de la doc page 14

'Commande et mesure multipexeur

PortSet(5,1) 'Turn AM16/32 Multiplexer connect sur port C5 et DIFF1 de la CR1000
Delay(0,20,mSec)

'Mesure des thermocouples
For i=1 To 8
PulsePort(6,20000)
VoltDiff (Thermo(i),1,mV2_5,1,1,20000,_50Hz,1,0) 'DIFF 1 a 80

Next i

'Tension regulateur
For i=1 To 8
PulsePort(6,20000)
VoltDiff (Vleaf(i),1,mV5000,1,1,20000,_50Hz,1,0) 'DIFF 9 a 16

Next i

PortSet(5,0)

CallTable Table

NextScan

SlowSequence 'Slow sequence 1
Scan (1,Min,3,0)
SDMCD16AC (SiteValve(1),1,1) 'activation regulateur gauche

```

```

Relais = 1357 'relais 1 et 3 et 6 et 7 d'actif
Delay (1,Time_ht,Min)
SDMCD16AC (SiteValve2(9),1,1) 'arret alimentation
Relais = 0
Delay (1,Time_stbl,Min)
SDMCD16AC (SiteValve(2),1,1) 'activation regulateur droit
Relais = 2468 'relais 2 et 4 et 6 et 8 d'actif
Delay (1,Time_ht,Min)
SDMCD16AC (SiteValve2(9),1,1) 'arret alimentation
Relais = 0
Delay (1,Time_stbl,Min)
NextScan

EndProg

```

7.5.2 Code pour le traitement de données des feuilles artificielles

```

import pandas as pd
import numpy as np
from datetime import timedelta

# Importer le fichier
data = pd.read_csv('CR1000Table.dat', skiprows = 1)

# Variables
data = data.drop([0,1])
data['TIMESTAMP'] = pd.read_csv(data['TIMESTAMP'], yearfirst = True)
nw_data = pd.DataFrame()
nw_data['time'] = data['TIMESTAMP']
nw_data['S1G'] = pd.to_numeric(data['S1G'])
nw_data['S1D'] = pd.to_numeric(data['S1D'])
nw_data['VRT1G'] = pd.to_numeric(data['VRT1G'])
nw_data['VRT1D'] = pd.to_numeric(data['VRT1D'])
nw_data['Relais'] = pd.to_numeric(data['Relais'])
nw_data['PTemp'] = pd.to_numeric(data['PTemp'])
nw_data['TA_1_1_2'] = pd.to_numeric(data['TA_1_1_2'])

# Calcul de la puissance
nw_data['PW_G'] = ((nw_data['VRT1G']/1000)**2)/(12.606*2.158e-3)
nw_data['PW_D'] = ((nw_data['VRT1D']/1000)**2)/(9.87*2.158e-3)

# Détermination de la température de la feuille def thermo_T(V) :
c0=0
c1=2.5928e+1
c2=-7.602961e-1
c3=4.637791e-2
c4=-2.165394e-3
t1=c0+c1*V+c2*V**2+c3*V**3+c4*V**4
return t1

def therm_T(V) :
c0=0
c1=2.5928e+1
c2=-7.602961e-1
c3=4.637791e-2
c4=-2.165394e-3

```

```

t2=c0+c1*V+c2*V**2+c3*V**3+c4*V**4
return t2

nw_data['T_G'] = thermo_T(nw_data['S1G']+0.04*nw_data['PTemp']-0.01)
nw_data['T_D'] = therm_T(nw_data['S1D']+0.04*nw_data['PTemp']-0.01)

# Coeur du traitement de données : ne garder que la phase de stabilisation
nw_data['flag'] = np.zeros(len(nw_data))
nw_data['flag2'] = np.zeros(len(nw_data))
k = 0
for i in range(len(nw_data)) :
    if nw_data['Relais'].iloc[i] == 1357 :
        nw_data['flag'].iloc[i] = 1
    if nw_data['flag'].iloc[i-1] == 4 :
        k+=1
    elif nw_data['Relais'].iloc[i] == 2468 :
        nw_data['flag'].iloc[i] = 3
    elif nw_data['Relais'].iloc[i] == 0 :
        if nw_data['flag'].iloc[i-1] == 1 :
            nw_data['flag'].iloc[i] = 2
        elif nw_data['flag'].iloc[i-1] == 3 :
            nw_data['flag'].iloc[i] = 4
    else :
        nw_data['flag'].iloc[i] = nw_data['flag'].iloc[i-1]
        nw_data['flag2'].iloc[i] = k

gp = nw_data.groupby('flag2')

nw_sb1 = pd.DataFrame()
nw_sb2 = pd.DataFrame()
offset = 0
std_offset = 0
for key, sb in gp :
    sb_gp = sb.groupby('flag')
    for key2, ssb in sb_gp :
        if key2 == 1 :
            init = ssb['time'].iloc[0]
            test = ssb[ssb['time']>= init+timedelta(minutes = 5/3)]
            test['offset'] = np.ones(len(test))*offset
            test['std_offset'] = np.ones(len(test))*std_offset
            nw_sb1 = pd.concat([nw_sb1, test])
        elif key2 == 2 :
            test = ssb[ssb['time']>= init+timedelta(minutes = 5/3)]
            offset = (test['T_G']-test['T_D']).mean()
            std_offset = (test['T_G']-test['T_D']).std()
        elif key2 == 3 :
            init = ssb['time'].iloc[0]
            test = ssb[ssb['time']>= init+timedelta(minutes = 5/3)]
            test['offset'] = np.ones(len(test))*offset
            test['std_offset'] = np.ones(len(test))*std_offset
            nw_sb2 = pd.concat([nw_sb2, test])
        elif key2 == 4 :
            test = ssb[ssb['time']>= init+timedelta(minutes = 5/3)]
            offset = (test['T_G']-test['T_D']).mean()
            std_offset = (test['T_G']-test['T_D']).std()

# Calcul d'offset

```

```

nw_sb1['T_G2'] = nw_sb1['T_G']
nw_sb1['T_D2'] = nw_sb1['T_D'] + nw_sb1['offset']
nw_sb2['T_G2'] = nw_sb2['T_G']
nw_sb2['T_D2'] = nw_sb2['T_D'] + nw_sb2['offset']

# Calcul de la conductance
rhoa = 1.2 kg/m³
capa = 1.256e3 kJm-3K
cst1 = rhoa*capa
cst2 = 0.395*5.67e-8

nw_sb1['g'] = (cst2*((nw_sb1['T_G2'] + 273.15)**4 - (nw_sb1['T_D2'] + 273.15)**4) + nw_sb1['PW_G']) / (cst1*(nw_sb1['T_G2'] - nw_sb1['T_D2']))
nw_sb2['g'] = (cst2*((nw_sb2['T_D2'] + 273.15)**4 - (nw_sb2['T_G2'] + 273.15)**4) + nw_sb2['PW_D']) / (cst1*(nw_sb2['T_D2'] - nw_sb2['T_G2']))

# Calcul de la moyenne et de l'écart-type
print(nw_sb1['g'].mean())
print(len(nw_sb1['g']))
print(nw_sb2['g'].mean())
print(len(nw_sb2['g']))
g_std = pd.concat([nw_sb1['g'], nw_sb2['g']])
print((g_std).std())

```

7.5.3 Code Matlab ayant servi pour extraire les différentes conductances à Loncée

```

# RUN LONZEE clear all close all
# Importer le fichier
addpath('C:\Users\portable\Documents\MasterSTE\MA2\Q2\Lonzee\Codes')
workdir = sprintf('C:\\Users\\portable\\Documents\\MasterSTE\\MA2\\Q2\\Lonzee\\Codes');
cd (workdir)

# Boucle pour prendre les trois années
annee = [2015 2017 2019];
n_annee = length(annee);

# Importer les fichiers automatiquement
workdir1 = sprintf('C:\\Users\\portable\\Documents\\MasterSTE\\MA2\\Q2\\textbackslash\\Lonzee\\Excel,%s', year);
cd (workdir1)

# 2015
if year == 2015
    opts = spreadsheetImportOptions("NumVariables", 98);
    # Feuille de calcul et ses dimensions
    opts.Sheet = "BE-Lon_L2_1501-1512";
    opts.DataRange = "A2:CT17519";

    # Spécifier les colonnes d'intérêt
    opts.VariableNames = ["TIMESTAMP_START", "TIMESTAMP_END", "CO2_1_1_1", "H2O_1_1_1", "MO_LENGTH_1_1_1", "ZL_1_1_1", "FC_1_1_1", "FC_SSITC_TEST_1_1_1", "H_1_1_1", "H_SSITC_TEST_1_1_1", "LE_1_1_1", "LE_SSITC_TEST_1_1_1", "TAU_1_1_1", "TAU_SSITC_TEST_1_1_1", "USTAR_1_1_1", "FETCH_MAX_1_1_1", "FETCH_90_1_1_1", "U_SIGMA_1_1_1", "V_SIGMA_1_1_1", "W_SIGMA_1_1_1", "T_SONIC_1_1_1", "T_SONIC_SIGMA_1_1_1", "SC_1_1_1", "SH_1_1_1", "SLE_1_1_1", "WD_1_1_1", "WS_1_1_1", "P_1_1_1", "P_1_1_2", "PA_1_1_1", "SW_IN_1_1_1", "SW_OUT_1_1_1", "LW_IN_1_1_1", "LW_OUT_1_1_1", "SW_IN_1_1_2", "SW_OUT_1_1_2", "LW_IN_1_1_2", "LW_OUT_1_1_2"];

```



```

for i=1:length(TIMESTAMP_CP)
if isnan(TIMESTAMP_CP(i,1))==0
TIMESTAMP_CP2i,1=sprintf('%10.0f',TIMESTAMP_CP(i,1)); year_CPi,1=append(TIMESTAMP_CP2i, 1(1,1),
TIMESTAMP_CP2i, 1(1,2),TIMESTAMP_CP2i, 1(1,3),TIMESTAMP_CP2i, 1(1,4));
day_CPi,1 = append(TIMESTAMP_CP2i, 1(1,7),TIMESTAMP_CP2i, 1(1,8));
month_CPi,1=append(TIMESTAMP_CP2i, 1(1,5),TIMESTAMP_CP2i, 1(1,6));
hour_CPi,1=append(TIMESTAMP_CP2i, 1(1,9),TIMESTAMP_CP2i, 1(1,10));
minutes_CPi,1=append(TIMESTAMP_CP2i, 1(1,11),TIMESTAMP_CP2i, 1(1,12));
else
year_ECi,1=year;
end
end
DoY = floor(275 * str2double(month_CP)./ 9) - (floor((str2double(month_CP) + 9)./ 12)
(1 + floor((str2double(year_CP) - 4*floor(str2double(year_CP)/4) + 2)./ 3)))+str2double(day_CP)-30;
HH_CP=str2double(hour_CP)+str2double(minutes_CP)./60;
DoY(length(DoY),1)=365;

#Suppression des jours year_CP_str=str2double(year_CP);
for i=1:length(year_CP)
if year_CP_str(i,1) ==year
tbl_i,: =NaN;
else

end
end

ustar = tbl.USTAR_1_1_1;
Ta=tbl.TA_1_1_1;
ws=tbl.WS_1_1_1;
Pa=tbl.PA_1_1_1;
Rn=tbl.SW_IN_1_1_1-tbl.SW_OUT_1_1_1+tbl.LW_IN_1_1_1-tbl.LW_OUT_1_1_1;
G=tbl.G_1_1_1;
RH=tbl.RH_1_1_1;
LE=tbl.LE_1_1_1;
PPFD=tbl.PPFD_IN_1_1_1;
P=tbl.P_1_1_1;

#2019

elseif year==2019
# Feuille de calcul et ses dimensions
opts = spreadsheetImportOptions("NumVariables", 99); opts.Sheet = "BE-Lon_L2_1901-1912"; opts.DataRange
= "A2:CU17521";
# Spécifier les colonnes d'intérêt
opts.VariableNames = ["TIMESTAMP_START","TIMESTAMP_END","CO2_1_1_1", "H2O_1_1_1", "MO_LENGTH_1_1_1",
"ZL_1_1_1", "FC_1_1_1","FC_SSITC_TEST_1_1_1", "H_1_1_1", "H_SSITC_TEST_1_1_1", "LE_1_1_1",
"LE_SSITC_TEST_1_1_1","TAU_1_1_1", "TAU_SSITC_TEST_1_1_1", "USTAR_1_1_1", "FETCH_MAX_1_1_1",
"FETCH_90_1_1_1", "U_SIGMA_1_1_1", "V_SIGMA_1_1_1", "W_SIGMA_1_1_1", "T_SONIC_1_1_1",
"T_SONIC_SIGMA_1_1_1", "SC_1_1_1", "SH_1_1_1", "SLE_1_1_1", "WD_1_1_1", "WS_1_1_1", "P_1_1_1", "P_1_1_2",
"PA_1_1_1", "SW_IN_1_1_1", "SW_OUT_1_1_1", "LW_IN_1_1_1", "LW_OUT_1_1_1", "SW_IN_1_1_2", "SW_OUT_1_1_2",
"LW_IN_1_1_2", "LW_OUT_1_1_2", "PPFD_IN_1_1_1", "PPFD_IN_1_1_2", "PPFD_DIF_1_1_1", "PPFD_OUT_1_1_1",
"TA_1_1_1", "TA_1_2_1", "TA_1_3_1", "TA_1_1_2", "RH_1_1_1", "RH_1_2_1", "RH_1_3_1", "RH_1_1_2", "TS_1_1_1",
"TS_1_2_1", "TS_1_3_1", "TS_1_4_1", "TS_1_5_1", "SWC_1_1_1", "SWC_1_2_1", "SWC_1_3_1", "SWC_1_4_1",
"TS_1_1_2", "TS_1_2_2", "TS_1_3_2", "TS_1_4_2", "TS_1_5_2", "SWC_1_1_2", "SWC_1_2_2", "SWC_1_3_2",
"SWC_1_4_2", "TS_2_1_1", "TS_2_2_1", "TS_2_3_1", "TS_2_4_1", "TS_2_5_1", "SWC_2_1_1", "SWC_2_2_1",
"SWC_2_3_1", "SWC_2_4_1", "TS_3_1_1", "TS_3_2_1", "TS_3_3_1", "TS_3_4_1", "TS_3_5_1", "SWC_3_1_1",

```



```

RH=tbl.RH_1_1_1;
LE=tbl.LE_1_1_1;
PPFD=tbl.PPFD_IN_1_1_1;
P=tbl.P_1_1_1;

# Paramètres de l'équation de PM
gamma=0.0622; #KPa/K
cp=1005; #J/K.kg
rho=1.225; #kg/m3
lambda=2.5*106; #latent heat of vaporization (J/kg)
R=8.314; #Pa/K/mol
# es=0.61078.*exp((17.269.*T)./(273.3+T));
# delta=es.*((17.268)./(273.15+T)).*(1-(T./(273.15+T))); #kPa/K
Tk=Ta+273.15;

# Calcul des conductances # Modèle de Thom
gbh=(6.2.*ustar.**-0.667).**(-1); # couche limite m/s
gam=(ustar).**2./ws; # aérodynamique m/s
#Gtot=1/Rtot=1/(Ram+Rbh)=1/(u/ustar**2 + 6,2ustar**-0,667)
#gah=gam+gbh; #m/s
gah=(ws./ustar.^2+6.2.*ustar.**-0.667) #1./(ws./ustar.^2+6.2.*ustar.**-0.667)
gam_mol=gam.*1000.*Pa./(R.*Tk); #mol.m-2.s-1
gbh_mol=gam.*1000.*Pa./(R.*Tk); #mol.m-2.s-1
gah_mol=gam_mol+gbh_mol; #mol.m-2.s-1

# Vecteur de pluie à exclure

if year==2015
te=107;# Jour pour lequel GAI>2
th=214; #Jour de récolte
elseif year==2017
te=111;
th=211;
elseif year==2019
te=95;
th=213;
end

tf=th-te+1; #Période de dvp
t=1:1:tf;
t=t.';

# Création d'un filtre de pluie
# Détermination des jours de précipitation

P_c=zeros(365,1);
for j=DoY(1,1):DoY(length(DoY),1)
P_c(j)=sum(P(DoY==j),'omitnan') ;
end

P_exc=zeros(365,1); #jours où il n'a pas plu
index1=zeros(365,1); #stocker les jours à enlever +24h
index2=zeros(365,1); #stocker les jours à enlever +48h
index0=zeros(365,1); #stocker les jours à enlever
for i=1:365
if P_c(i) ==0

```

```

index0(i)=i; #
index1(i)=i+1; #24h
index2(i)=i+2; #48h
end
index0(index0==0)=[];
index1(index1==0)=[];
index2(index2==0)=[];
index=vertcat(index0,index1,index2);
index=sort(index);

if (isempty(find(index == i)))
P_exc(i)=NaN;
else
P_exc(i)=0;
end
end

#Passer de P_exc à P_exc 30 (30' data)
P30=zeros(length(DoY),1);
for i=1:length(DoY)
for j=te:th
if (DoY(i)==j)
P30(i)=P_exc(j-te+1);
end
end
end

# Conductance de canopée
AE=Rn-G;
esat_Tcan=0.61094.*exp((17.625.*(Ta))./(Ta+237.3)); #kPa
ea=esat_Tcan.*RH;
delta=ea.*4098./((237.3+273.15+Ta).**2);#kPa/K
VPD=esat_Tcan.*(1-RH./100);

# Conductance de canopée PM
gs=zeros(length(DoY),1);
gs=((gah.*gamma.*LE)./(delta.*(AE)+(rho.*cp.*gah.*VPD)-(delta+gamma).*LE));#m/s #ecosystem conductance
to H2O

# Filtre sur gs
gs(AE<0)=NaN; #filtres venant de Knauer "toward a ...."
gs(LE<0)=NaN;
gs(RH>95)=NaN;
gs(PPFD<200)=NaN;
gs(gs<0)=NaN;
#gs(abs(std_res)>3)=NaN;#EBC filtre
gs(P30 ==0)=NaN;
idx_gs=isnan(gs);
# gs=gs.*1000.*Pa./(R.*Tk); #from m/s to mol m-2 s-1

gs(DoY<te | DoY>th)=NaN; #DOY avec LAI minimun (tmin) et DoY=récolte (tmax))
#gs(gs>1)=NaN; #unrealistic values
gs=filloutliers(gs,NaN,'movmed',336); #méthode moyenne mobile sur les outliers

# Calcul de moy et std
gs_m=zeros(365,1);

```

```

gs_m_std=zeros(365,1);
gah_m=zeros(365,1);
gah_m_std=zeros(365,1);
gam_m=zeros(365,1);
gam_m_std=zeros(365,1);
gbh_m=zeros(365,1);
gbh_m_std=zeros(365,1);

for j=DoY(1,1):DoY(length(DoY),1)
gs_m(j)=mean(gs(DoY==j),'omitnan');
gs_m_std(j)=std(gs(DoY==j),'omitnan');

gah_m(j)=mean(gah(DoY==j),'omitnan');
gah_m_std(j)=std(gah(DoY==j),'omitnan');

gam_m(j)=mean(gam(DoY==j),'omitnan');
gam_m_std(j)=std(gam(DoY==j),'omitnan');

gbh_m(j)=mean(gbh(DoY==j),'omitnan');
gbh_m_std(j)=std(gbh(DoY==j),'omitnan');
end

```