
Amélioration du bilan énergétique au sein des cellules du TERRA-Écotron

Auteur : Strivay, Loïc

Promoteur(s) : Longdoz, Bernard; Heinesch, Bernard

Faculté : Gembloux Agro-Bio Tech (GxABT)

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

Année académique : 2019-2020

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/10390>

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.

Amélioration du bilan énergétique au sein des
cellules du TERRA-Écotron

Loïc STRIVAY

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 2019-2020

CO-PROMOTEURS : PR. BERNARD HEINESH & PR. BERNARD LONGDOZ

© 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

Remerciements

Je voudrais tout d'abord adresser toute ma reconnaissance aux deux promoteurs de ce mémoire, Bernard LONGDOZ et Bernard HEINESCH, pour leur encadrement, leur relecture et surtout leurs judicieux conseils, qui ont contribué à enrichir ma réflexion. Leur grande disponibilité et leur dévouement m'ont permis d'amplement surmonter la période de confinement contraignante.

Je tiens également à témoigner toute ma reconnaissance aux personnes suivantes qui ont été d'un grand soutien dans l'élaboration de ce mémoire :

Je remercie l'équipe de techniciens composée d'Alain DEBACQ et Célien FOSTIER qui m'ont été d'une très grande aide pour la partie pratique. Vincent LEEMANS qui a su apporter un regard extérieur tout au long de la réalisation du mémoire. Un grand merci à Ariane FAURES pour avoir eu la patience de répondre à mes innombrables questions. Merci beaucoup à ma maman pour sa relecture et son soutien.

Grâce à vous tous, la réalisation de ce mémoire restera un souvenir et une expérience enrichissante. Pour cela je vous témoigne toute ma gratitude.

Résumé

A ce jour, les activités humaines ont modifié les écosystèmes dans le monde entier et ont généré une crise environnementale majeure. Afin d'améliorer la compréhension des écosystèmes, des enceintes fermées permettant des mesures précises des processus écosystémiques tels que les écotrons fleurissent à travers le monde. Dans le cadre de ce mémoire, la capacité à reproduire un bilan énergétique de l'écotron situé à Gembloux dans le centre de recherche interfacultaire de l'Université Agro-Bio Tech de Gembloux (TERRA) est étudié. Dans un premier temps, l'impact possible qu'aurait l'écotron sur le cycle de développement du blé tendre (*Triticum aestivum*) est étudié via la modélisation de deux scénarios de température basés sur les différences de température mesurées dans l'écotron par rapport à un cas réel mesuré à Lonzée. Dans un deuxième temps, un scénario de trois jours issu des données de la station ICOS de Lonzée est reproduit dans une cellule de l'écotron. Un dispositif expérimental est installé dans l'écotron et permet de quantifier l'ensemble des termes du bilan énergétique. Au terme de ce travail, le calcul des degrés-jours au cours de la modélisation des températures a permis de mettre en évidence une avance phénologique progressive atteignant potentiellement 25 jours pour le scénario le plus fort. L'importance du contrôle de la température de la surface dans l'écotron est donc confirmée. Le dispositif quant à lui a permis d'identifier les faiblesses de l'écotron. Celles-ci sont la production d'une vitesse de vent limitée et fixe, la présence d'un écoulement d'air fixe, SW_{in} limité à la valeur de 480 W m^{-2} , LW_{in} significativement supérieur et un albédo significativement plus faible à humidité équivalente. Au terme de ce travail, l'adaptation des consignes de fonctionnement de l'écotron est envisagée afin de faire correspondre les caractéristiques climatiques d'intérêt à savoir la température de la surface et l'humidité du sol. L'amélioration du dispositif utilisé est également évoquée afin d'améliorer les mesures des flux de chaleur sensible et latente.

Abstract

Human activities have altered ecosystems around the world and have generated a major environmental crisis. In order to improve the understanding of ecosystems, closed enclosures allowing accurate measurements of ecosystem processes such as ecotrons are emerging around the world. In the present thesis, the ability to reproduce an energy balance of the ecotron located in Gembloux in the interfaculty research centre of the Agro-Bio Tech University of Gembloux (TERRA) is studied. Initially, the possible impact that the ecotron would have on the development cycle of soft wheat (*Triticum aestivum*) is studied through the modelling of two temperature scenarios based on the temperature differences measured in the ecotron compared to a real case measured in Lonzée. In a second step, a three-day scenario based on data from the ICOS station in Lonzée is reproduced in a cell of the ecotron. An experimental device is installed in the ecotron and allows to quantify all the terms of the energy balance. At the end of this work, the calculation of degree-days during the temperature modelling revealed a progressive phenological advance reaching potentially 25 days for the high scenario. The importance of surface temperature control in the ecotron is therefore confirmed. For its part, the device enabled the identification of the ecotron's weaknesses. These are the production of a limited and fixed wind speed, the presence of a fixed air flow, SW_{in} limited to the value of 480 W m^{-2} , significantly higher LW_{in} and a significantly lower albedo at equivalent humidity. At the end of this work, the adaptation of the ecotron's instructions is envisaged in order to match the climatic characteristics of interest, i.e. surface temperature and soil moisture. The improvement of the device used is also discussed in order to improve the measurements of sensible and latent heat fluxes.

Table des matières

1	Introduction	1
2	État de l'art	2
2.1	Mise en contexte	2
2.2	Expérimentation écologique en écotron	3
2.3	L'infrastructure TERRA-Écotron	5
2.4	Objectif de l'expérimentation	7
2.5	Bilan énergétique	8
2.5.1	Bilan énergétique d'un système	8
2.5.2	Reproduction d'un bilan énergétique dans l'Ecotron	8
2.6	Conséquence d'une mauvaise reproduction des flux énergétiques sur la phénologie du blé tendre ou froment (<i>Triticum aestivum</i>)	10
2.6.1	Impact global de la température sur la croissance et le rendement des cultures	10
2.6.2	Focus sur le blé tendre (<i>Triticum aestivum</i>)	12
2.6.3	Conséquences précédemment constatées dans l'écotron sur la phénologie du blé tendre	15
3	Matériels et méthodes	16
3.1	Expérimentation	16
3.1.1	Dispositif expérimental	16
3.1.2	Acquisition des données	18
3.1.3	Choix de la période d'étude	18
3.2	Mesures	20
3.2.1	Température de l'air et du sol à 5 cm de profondeur	20
3.2.2	Température à la surface du sol	20
3.2.3	Humidité du sol	21
3.2.4	Vitesse du vent	21
3.2.5	Bilan radiatif	22
3.2.6	Chaleur sensible	23
3.2.7	Chaleur latente	24
3.2.8	Conduction à une profondeur fixe et conduction à la surface	27
3.2.9	Albédo	28
4	Résultats	29
4.1	Caractéristiques physiques	29
4.1.1	Température	29
4.1.2	Vitesse du vent	31
4.1.3	Humidité du sol	33
4.1.4	Émissivité du sol	34
4.1.5	Porosité du sol	35
4.1.6	Albédo	35
4.2	Flux radiatifs	36
4.3	Flux turbulents et conductif	38
4.4	Fermeture du bilan énergétique	42
4.5	Modélisation de l'impact de la température de surface sur la phénologie du blé tendre	44
4.5.1	Simulation des températures en surface	44

4.5.2	Développement phénologique du blé tendre basé sur les degrés-jours reçus . .	45
4.5.3	Comparaison des températures de surface avec les limites biologiques du blé tendre	46
5	Discussion	47
5.1	Le vent	47
5.1.1	Qualité de la reproduction du vent	47
5.1.2	Incertitudes	47
5.2	Radiation nette	48
5.2.1	Qualité de la reproduction de la radiation nette	48
5.2.2	Processus à l'origine d'une radiation nette différente	48
5.2.3	Perspectives	48
5.3	Estimation de la chaleur sensible dans l'écotron	49
5.3.1	Incertitude et perspective	49
5.4	Fermeture du bilan énergétique	49
5.4.1	Qualité des fermetures	49
5.5	Humidité du sol et chaleur latente	50
5.5.1	Biais des mesures	50
5.5.2	Processus à l'origine des flux de chaleur latente différents	50
5.6	La température	51
5.6.1	Qualité de la reproduction des températures	51
5.6.2	Conséquences envisageables de la température reproduite sur des cultures . .	51
5.6.3	Perspectives	52
5.7	Perspectives : synthèse	53
5.7.1	Expérimentation sur sol nu : adapter les consignes	53
5.7.2	Intégration des plantes dans le système écotron	54
6	Conclusions	55
7	Annexes	63
7.1	Code MATLAB utilisé	63

Table des figures

1	Synthèse des avantages et inconvénients des différents types d'expérimentations écologiques (Clobert et al., 2018).	4
2	Représentation schématique d'une cellule du Terra-Ecotron.	5
3	Salle d'environnement contrôlé.	6
4	Climat contenu dans la séquence de trois jours reproduite dans l'écotron.	7
5	Représentation schématique des origines des différents flux pour un écosystème naturel et le Terra-écotron.	9
6	Changements du taux de (a) photosynthèse et respiration et (b) du taux de développement des cultures en fonction de la température (Porter Semenov, 2005).	11
7	Les stades de développement du blé tendre (Bogard, 2011).	13
8	Schéma du dispositif vu de profil : (1) CNR4; (2) Anémomètre sonic; (3) PT100; (4) Heat flux plate; (5) Theta Probe ML2x; (6) CR3000.	17
9	Photo du dispositif expérimental placé dans la CER1 au TERRA-écotron.	17
10	Centrale d'acquisition de mesure rapide CR300 (Campbell Scientific, 2000).	18
11	Capteur de température de surface Pt100 (Harold G. SCHAEVITZ Industries, 2018).	20
12	Capteur d'humidité du sol ML2x (Delta-T Device LTD, 1999).	21
13	Anémomètre à ultrasons R3-50 (Gill instruments).	22
14	Vue de côté et de haut du CNR4.	22
15	Vue du dessus d'une HFP01 (Campbell Scientific, 2020).	27
16	Température (1) de l'air, (2) de la surface du sol et (3) à 5 cm de profondeur à Lonzée (noir) et dans l'écotron pour un sol "humide" (bleu) et un sol "sec" (rouge).	30
17	Rapport entre les températures de la surface dans l'écotron et à Lonzée pour un sol « humide » et un sol « sec ».	30
18	Vitesse du vent absolue (1) horizontale et (2) verticale à Lonzée et dans l'écotron.	31
19	Vitesse de friction U^* à Lonzée et dans l'écotron.	32
20	Résistances aérodynamiques à Lonzée et dans l'écotron.	32
21	Humidité du sol dans les 5 premiers cm à Lonzée et dans l'écotron pour un sol "humide" et un sol "sec".	33
22	Évolution de l'humidité du sol avec la profondeur (0-20 cm) dans l'écotron sur sol « humide » via la méthode expF.	34
23	Emissivité du sol de Lonzée et de l'écotron pour un sol "humide" et un sol "sec".	34
24	Porosité du sol de 0 à 40 cm à Lonzée et dans l'écotron.	35
25	Albédo à Lonzée et dans l'écotron pour un sol "humide" et un sol "sec".	36
26	(1) SWin, (2) SWout, (3) LWin et (4) LWout de Lonzée et de l'écotron pour un sol "humide" et un sol "sec".	37
27	Bilan radiatif (1) à Lonzée et dans l'écotron pour (2) un sol "humide" et (3) un sol "sec" en parallèle avec les températures à la surface des sols.	38
28	(1) Chaleur sensible et (2) chaleur latente à Lonzée et dans l'écotron pour un sol "humide" et un sol "sec".	39
29	Chaleur latente modifiée dans l'écotron pour un sol "humide" et un sol "sec".	40
30	Bowen ratio à Lonzée et dans l'écotron.	40
31	Conduction à Lonzée et dans l'écotron pour un sol "humide" et un sol "sec".	41
32	Bilan des flux turbulents et conductif (1) à Lonzée et dans l'écotron pour (2) un sol "humide" et (3) un sol "sec" en parallèle avec les températures à la surface des sols.	41
33	Somme des flux entrants et sortants (1) à Lonzée et dans l'écotron pour (2) un sol "humide" et (3) un sol "sec".	42

34	Qualité de la fermeture du bilan énergétique soit : Reste/Flux entrants.	43
35	Fermeture du bilan énergétique avec omission du flux H à Lonzée et dans l'écotron pour un sol "humide" et un sol "sec".	43
36	Température de la surface à partir du 10/10/2015 jusqu'au 10/10/2016 à Lonzée et pour les deux scénarios 1.1 et 1.2.	44
37	Cumul des degrés-jours à partir du 10/10/2015 jusqu'au 10/10/2016 théorique, à Lonzée et pour les deux scénarios 1.1 et 1.2. (a) et (b) sont les repères phénologiques suivants : (a) épi émergé et (b) récolte/maturité.	45
38	Température de la surface à partir du 10/10/2015 jusqu'au 10/10/2016 à Lonzée et pour les deux scénarios 1.1 et 1.2. En pointillés sont représentés les repères de températures suivants : (rouge) limites létales, (mauve) limites du développement végétatif, (noir) développement optimal.	46

Liste des tableaux

1	Plage de fonctionnement et précision des différents paramètres contrôlés dans l'Ecotron	6
2	Résumé des moyennes des températures minimales létales (TL _{min}), maximales létales (TL _{max}), de base (T _{min}), optimales (T _{opt}) et maximales (T _{max}) pour divers processus et phases phénologiques chez le blé tendre (Porter et Gawith, 1999). D'une étude à l'autre, ces valeurs peuvent varier de quelques degrés.	14
3	Calendrier phénologique du blé tendre et degrés-jours associés aux stades phénologiques (Libre blanc, 2017 - Agro Paris Tech : « Les céréales », 2001).	15
4	Mesures et capteurs associés	16
5	Hypothèses de modification des caractéristiques principales et des flux après intégration des modifications proposées. Code couleur : Bonne reproduction (vert); mauvaise reproduction avec un impact mineur (orange); mauvaise reproduction avec un impact majeur (rouge)	53

Liste des abréviations

ANN	Artificial neural network
CARE	Cellule d'appui à la recherche et à l'enseignement
CER	Controlled environment room
ExpF	Exponential filter
HFP	Heat flux plate
ICOS	Integrated Carbon Observation System
IRL	Infra rouge lointain
LR	Linear regression
LW	Long wave
PAR	Photosynthetically active radiation
PPFD	Photosynthetic Photon Flux Density
SM	Soil moisture
SW	Short wave
SWC	Soil water content
SWI	Soil water indice

1 Introduction

Les écosystèmes fournissent de nombreux services écologiques essentiels aux sociétés humaines. Certains étant vitaux pour la pérennité de l'Homme. La dépendance à ces services des sociétés humaines et de toute vie sur Terre, démontre que leur bien-être est indissociable de la santé des écosystèmes. Or à ce jour, les activités humaines ont modifié les écosystèmes dans le monde entier et ont généré une crise environnementale majeure. La situation est préoccupante. L'observation des tendances actuelles montrent une biocapacité largement dépassée alors que la demande continue de croître. Cette situation suscite des questions sociétales urgentes sur la meilleure façon de produire des biens tout en garantissant des services écologiques durables. Afin de répondre à ces questions, une meilleure compréhension et prévision de la dynamique des écosystèmes dans le cadre des changements mondiaux est une nécessité.

Afin d'améliorer la compréhension des écosystèmes, la communauté scientifique développe et perfectionne des installations où les écosystèmes sont confinés dans des enceintes permettant simultanément un contrôle multifactoriel des conditions environnementales et des mesures précises des processus écosystémiques. Ce type d'infrastructure est appelé Ecotron. Le concept même de cette approche repose sur une représentation la plus fidèle possible de l'écosystème étudié. La qualité de cette représentation est importante car une connaissance fiable des liens de causalité des processus écologiques est nécessaire pour diminuer l'incertitude des prédictions à plus grande échelle. Le but ultime de ce type d'approche est de réduire l'incertitude et gagner en crédibilité auprès des décideurs quant aux actions à mener pour améliorer la gestion des écosystèmes.

L'Ecotron étudié dans le cadre de ce mémoire se situe à Gembloux dans le centre de recherche interfacultaire de l'Université Agro-Bio Tech de Gembloux, le TERRA. La finalité de cette étude est de pouvoir s'assurer que le bilan énergétique d'un scénario ayant déjà été réellement observé puisse y être correctement reproduit et dans le cas contraire y remédier. Or, des précédentes études ont déjà mis en lumière une température de la surface de l'écosystème dans l'écotron systématiquement supérieure à la température de l'écosystème naturel reproduit. Cette différence indique que le sol et la végétation reçoivent plus d'énergie. Cette quantité supplémentaire d'énergie pourrait alors causer d'importantes différences sur le développement de l'écosystème biaisant les observations.

L'objectif de ce travail est double. Dans un premier temps, un dispositif expérimental permettant de quantifier l'ensemble des termes du bilan énergétique est installé dans l'écotron dans le but d'étudier la reproductibilité d'un bilan énergétique naturel au sein d'une cellule du TERRA-Ecotron. Dans un deuxième temps, l'impact possible qu'aurait l'écotron sur le cycle de développement du blé tendre est étudié via la modélisation de deux scénarios de température basés sur les différences de température constatées lors de la précédente étape.

2 État de l'art

2.1 Mise en contexte

Les écosystèmes fournissent de nombreux services essentiels aux sociétés humaines, notamment des services d'approvisionnement, de régulation des conditions climatiques et des cycles des éléments et de l'eau, socioculturels (Balmford et Bond, 2005; Cardinale et al., 2012). Certains de ces services sont vitaux pour la pérennité de l'espèce humaine tels que la production de l'oxygène contenu dans l'air, la rétention et l'épuration naturelle des eaux, la production de nourriture, la pollinisation ou encore la séquestration naturelle de carbone. La dépendance des sociétés humaines, et de toute vie sur Terre, à ces services démontre que le bien-être humain est indissociable de la santé des écosystèmes (Mainka et al., 2005). Étant donné que la bonne santé d'un écosystème garantit la quantité et la qualité des services qu'il fournit, les perturbations qu'ils subissent auront des conséquences importantes pour la société (Millenium Ecosystem Assessment, 2005).

Or à ce jour, les activités humaines ont modifié les écosystèmes dans le monde entier et ont généré une crise environnementale majeure (Clobert et al., 2018). Parmi les activités humaines qui causent des dommages à l'environnement à l'échelle mondiale, l'augmentation de l'utilisation des écosystèmes liée à l'accroissement de la population, la surconsommation, la surexploitation, la pollution et la déforestation constituent les principales. La crise environnementale générée par ces activités se traduit par l'augmentation de la pollution, le réchauffement climatique et la dégradation des habitats naturels (Vitousek et al., 1997; Pereira et al., 2010). De tels changements ont déclenché des modifications des écosystèmes impactant directement l'être humain tels que l'érosion des sols et la diminution du rendement des cultures, du taux de séquestration de carbone, de la pollinisation, de la qualité de l'air et de la quantité d'eau potable (Rineau et al., 2019; National Geography Society). Ces impacts négatifs peuvent affecter le comportement humain et provoquer des migrations massives, conflits ou pénuries. La situation est préoccupante. L'observation des tendances actuelles montre que la croissance de la demande de nourriture et d'énergie accompagnée d'une concurrence plus forte pour l'utilisation des terres et de l'eau est attendue dans un avenir proche (Howden et al., 2007; Ehrlich et Harte, 2015).

Cette situation suscite des questions sociétales urgentes sur la meilleure façon de produire des biens tout en garantissant des services écosystémiques durables (Clobert et al., 2018). Afin de répondre à ces questions, une meilleure compréhension et prévision de la dynamique des écosystèmes dans le cadre des changements mondiaux est une nécessité. La préservation des écosystèmes agricoles, forestiers, d'eau douce et autres écosystèmes gérés et naturels nécessite l'élaboration de nouvelles approches de gestion et la connaissance des points de basculement environnementaux potentiels. Sans cette compréhension, l'Europe et le reste du monde seront incapables d'évaluer les impacts, de contrôler les risques ou d'utiliser les bénéfices des grands changements prévus dans la structure et le fonctionnement des écosystèmes tels que l'atténuation des gaz à effet de serre et l'adaptation au climat (AnaEE, 2019).

2.2 Expérimentation écologique en écotron

L'expérimentation écologique a permis au cours des dernières décennies d'améliorer la compréhension des écosystèmes. Les écosystèmes sont maintenant reconnus comme des objets intrinsèquement complexes caractérisés par des processus en interaction, une forte hétérogénéité temporelle et spatiale, des dynamiques écologiques rapides, ainsi qu'une grande diversité (Loreau, 2010). L'expérimentation écologique a également mené à un consensus essentiel de la part de la communauté scientifique au sujet des changements en cours. La communauté scientifique s'accorde sur le fait que les changements actuels et à venir sont pour la plupart négatifs, d'origine anthropique, d'une ampleur inquiétante et en accélération (Balmford Bond, 2005).

Néanmoins, la prévision des changements futurs est limitée et incertaine. Le faible niveau de compréhension actuel de la complexité des écosystèmes qui est due à de nombreux effets en cascade, effets de seuil, interactions entre communautés et liens entre l'état de la nature et le bien-être humain ne permet pas d'assurer l'exactitude des prédictions actuelles. Pour vraiment développer la biologie intégrative des écosystèmes et évaluer la portée des changements à venir, il est nécessaire de concevoir de nouvelles approches d'études. Les approches expérimentales avec des écosystèmes pour modèles fournissent les meilleurs moyens d'atteindre ces objectifs (Stewart et al. 2013).

Aujourd'hui, un axe majeur des sciences écologiques est donc la production d'approches quantitatives, testables expérimentalement, reproductibles et permettant de contrôler des systèmes écologiques complexes (Verdier et al., 2014 - Balmford Bond, 2005). L'objectif ultime de ce type d'approche expérimentale est d'acquérir une compréhension fondamentale des processus écologiques pour permettre l'extrapolation des résultats à plus grande échelle (De Boeck et al., 2015). L'approche consiste en la modification de variables pertinentes de l'écosystème. La gamme de la manipulation est souvent choisie pour représenter de futures conditions discrètes (sécheresse, inondation, invasion d'insectes ravageurs, ...) ou chroniques (augmentation des températures, concentration en dioxyde de carbone, changement des paternes de précipitations, ...). Cette approche fournit d'importantes données sur la réponse de l'écosystème face à des perturbations telles que des points de basculement et niveau de sensibilité (Chabbi et al., 2017).

Un des moyens permettant la concrétisation d'une telle approche consiste en la création d'une installation expérimentale où les écosystèmes sont confinés dans des enceintes permettant simultanément un contrôle multifactoriel des conditions environnementales et des mesures précises des processus écosystémiques. Ce type d'infrastructure est appelé Ecotron (Verdier et al., 2014). Un Ecotron possède une série d'unités expérimentales indépendantes adaptées aux comparaisons statistiques des observations entre les groupes de traitement, telles que les différentes conditions climatiques ou les types de sols (Stewart et al. 2013). Le concept même de cette approche repose sur une représentation la plus fidèle possible de l'écosystème étudié. La qualité de cette représentation est importante car une connaissance fiable des liens de causalité des processus écologiques est nécessaire pour diminuer l'incertitude des prédictions à plus grande échelle (Drake et Kramer, 2012). Les inévitables artefacts et les limitations du dispositif peuvent conduire à des interprétations erronées et limiter considérablement les généralisations à des contextes plus larges (De Boeck et al., 2015). Il est primordial d'identifier l'étendue de ces artefacts et les limites d'extrapolation des résultats liées aux traitements imposés, à l'échelle spatiale et temporelle de l'expérimentation.

L'expérimentation en mésocosmes sera toujours un compromis de complexité entre la reproduction expérimentale et la réalité. Longtemps vu comme une raison de décrédibiliser l'étude des écosystèmes via des mésocosmes, la limitation en réalisme et en complexité de ce type d'installation par rapport au monde réel est aujourd'hui perçue comme un moyen d'explorer et tester les mécanismes du vivant. L'utilité de l'approche de l'Ecotron réside dans sa capacité à attribuer des causes aux réponses observées notamment grâce au contrôle indépendant des conditions environnementales. Ainsi, les mésocosmes permettent d'améliorer la compréhension mécaniste des processus écologiques.

Contrairement aux enquêtes traditionnelles sur le terrain, les expériences de manipulation permettent aux chercheurs de tester spécifiquement des hypothèses (De Boeck et al., 2015). Les modèles, mathématiques ou informatiques, développés sur base d'ensembles d'hypothèses peuvent alors être ajustés aux nouvelles compréhensions biologiques. De plus, ces hypothèses constituent le premier obstacle pour les modèles. Si la théorie ne peut pas expliquer les données issues d'un écosystème simplifié tel que l'Ecotron, elle n'aura aucune crédibilité sur le terrain (Benton et al., 2007). Des ponts entre les expérimentations, les modèles, la théorie et les écosystèmes peuvent être établis grâce à cette approche. Un avantage supplémentaire est la possibilité de mener des expériences répétées et répliquées sur les systèmes, la facilité d'expérimentation augmentant à mesure que la taille du système diminue. La répétition et réplification des expériences augmentent la puissance statistique et permettent des tests de théories via des approches stochastiques (Drake et Kramer, 2012).

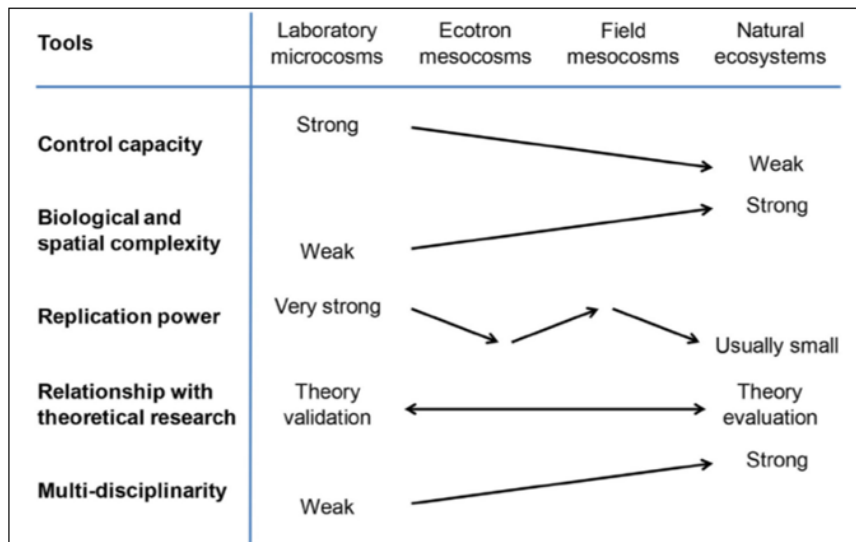


FIGURE 1 – Synthèse des avantages et inconvénients des différents types d'expérimentations écologiques (Clobert et al., 2018).

Le développement et le perfectionnement de ce genre d'approche permettra à l'écologie de réduire l'incertitude, comprendre le comportement des écosystèmes, améliorer la prévisibilité, gagner en crédibilité auprès des décideurs et renforcer la volonté politique (Osmond et al., 2004). Pour cela, des connaissances scientifiques solides pouvant mener à des recommandations de gestion des écosystèmes doivent être établies afin d'appuyer les politiques visant à prévenir ou à atténuer les impacts écologiques des changements environnementaux (Benton et al., 2007).

2.3 L'infrastructure TERRA-Écotron

Un écotron est un ensemble d'unités expérimentales, aussi appelées CER (controlled environment room), où les écosystèmes sont confinés dans des enceintes permettant simultanément le contrôle et la mesure des conditions environnementales et des processus physico-biologiques (CNRS : « Le principe Ecotron », 2015). L'Écotron utilisé dans ce travail se situe à Gembloux. Il fait partie d'une CARE (Cellule d'Appui à la Recherche et à l'Enseignement) nommée "Environnement Is Life" et est situé dans l'Unité de Recherche inter-facultaire TERRA de l'Université de Liège. Le Terra-Ecotron est composé de six CERs. Dans le cadre de cette étude, une seule cellule est soumise à l'expérimentation. Ce paragraphe consiste en une brève description technique du Terra-écotron. Seul les dispositifs et capteurs essentiels à l'expérimentation réalisée dans le cadre de ce travail de fin d'étude sont mentionnés. Le Terra-écotron est composé de trois parties.

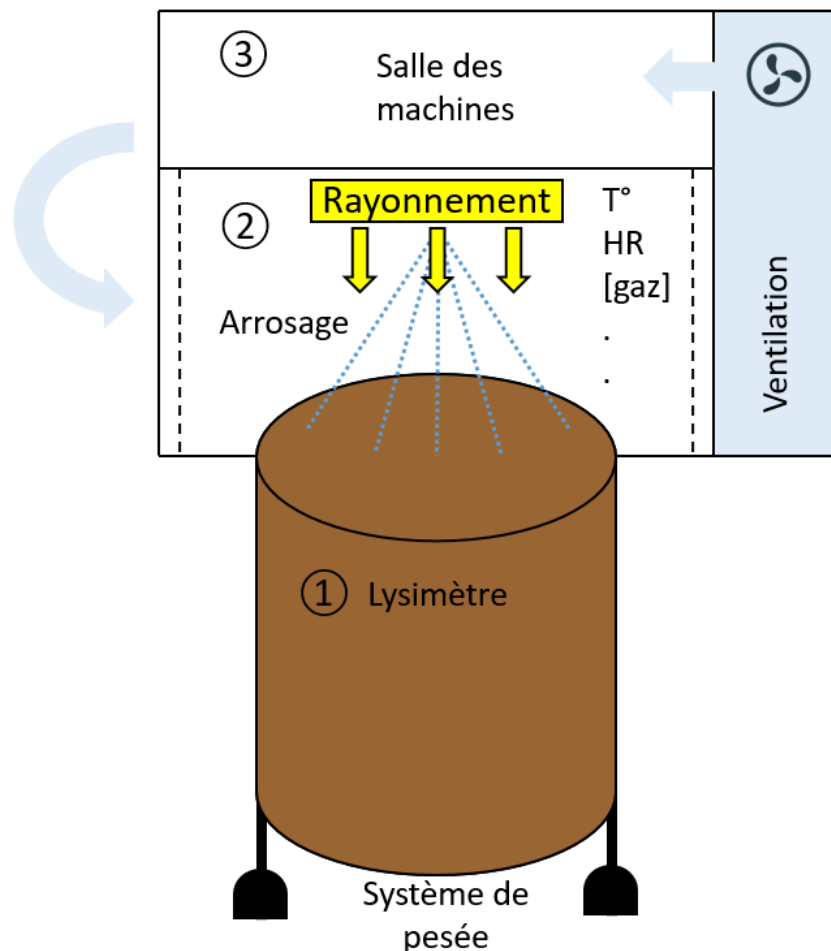


FIGURE 2 – Représentation schématique d'une cellule du Terra-Ecotron.

La partie inférieure comprend un lysimètre et une plaque lysimétrique. Le lysimètre est un réservoir contenant du sol et muni d'un dispositif permettant d'étudier et d'observer l'évolution de l'eau dans un sol. Ses dimensions sont de 1,63 mètre de diamètre et 1,5 mètre de profondeur. La plaque lysimétrique impose un potentiel matriciel à la base de la colonne de sol. Le sol contenu dans le lysimètre est un sol perturbé du site de Liroux (Gembloux) et plus précisément de la parcelle Bordia 2. Le sol installé dans les lysimètres a trois horizons : un horizon révisé au-dessus de la base de la charrue (0 à -27 cm), un horizon de limon brun (-27 cm à -100 cm) et un horizon Bt (-100cm à -150cm). Le type de sol se situe entre Abp0 et Abp1.

La partie centrale est la chambre climatique. Les conditions environnementales sont contrôlées avec une grande précision. Les variations nycthémérales peuvent être reproduites et mesurées en temps réel avec une résolution de 5 minutes. Les variables contrôlées sont l'irradiation solaire (spectre, intensité, photopériode), la température et l'humidité de l'air, les précipitations, la concentration en dioxyde de carbone et en ozone dans l'air, ainsi que la température et le potentiel de la matrice du sol au bas du lysimètre. Le vent quant à lui est fixé à une valeur constante. Le tableau 1 ci-dessous indique les plages de fonctionnement des différentes variables contrôlées et la précision du contrôle.

TABLEAU 1 – Plage de fonctionnement et précision des différents paramètres contrôlés dans l'Eco-tron

Paramètres contrôlés	Plage de fonctionnement	Précision
PPFD (Photosynthetic Photon Flux Density)	0 – 1200	20 mol.m ⁻² .s ⁻¹
Température de l'air	4-40°C	1°C
Humidité de l'air	7-98%	5%
Précipitation	0 ; 0.2-3.5 mm/5 min	± 0.05 mm/5 min
Vent	0.5 m.s ⁻¹	± 0.1 m.s ⁻¹
CO2 [CO2,extérieur]	– 800 ppm	± 10 ppm
O3	10 – 100 ppb	± 5 ppb

Dans la cellule, la végétation dispose d'une hauteur suffisante pour croître jusqu'à 1,5m. Les CERs sont également équipées d'une isolation permettant de reproduire des attaques de pathogènes niveau L2.



FIGURE 3 – Salle d'environnement contrôlé.

La partie supérieure est composée des salles des machines, des salles principales d'entretien et d'acquisition des données.

2.4 Objectif de l'expérimentation

L'objectif de ce type d'installation est d'étudier les réponses d'un écosystème sous différentes contraintes environnementales. Il est donc nécessaire de pouvoir s'assurer qu'un scénario ayant déjà été réellement observé puisse y être correctement reproduit. Pour ce faire, la capacité de l'écotron à reproduire fidèlement un large éventail de conditions atmosphériques et climatiques, leurs variations diurnes, et à dupliquer la croissance de la végétation est à démontrer. Or, des études précédentes ont mis en lumière le problème de la reproduction du bilan énergétique dans les cellules de cet écotron lors, notamment, de la simulation d'une année climatique complète mesurée à Lonzée (Cravatte et al., 2020; Antoine, 2019). La température de la surface de l'écosystème dans l'écotron (sol, feuille, ...) est systématiquement supérieure à la température correspondante dans l'écosystème naturel reproduit. Cette différence indique que le bilan énergétique du sol et la végétation est plus élevé. Cette quantité supplémentaire d'énergie pourrait causer d'importantes différences sur la croissance et le développement de l'écosystème biaisant les observations. La reproduction en écotron du flux net d'énergie réellement échangé par les surfaces de l'écosystème est donc une condition sine qua non pour pouvoir simuler correctement les différents stades phénologiques, processus fonctionnels et la productivité d'une culture. C'est pourquoi, en plus du bilan énergétique, l'impact de la température de la surface sur la croissance et le développement est également investigué dans le cadre de ce travail.

Dans le but d'étudier la reproductibilité d'un bilan énergétique naturel au sein d'une cellule du TERRA-Ecotron, une séquence de trois jours, comprenant deux nuits (une couverte et une dégagée) sur sol nu est identifiée dans le jeu de données de la station ICOS de Lonzée. La reproduction sur sol nu permet d'étudier une situation sans évapotranspiration. L'acquisition d'une compréhension et la correction des flux dans ces circonstances simplifiées sont nécessaires avant de reproduire une situation avec végétation. Les trois jours sont reproduits dans une cellule de l'Ecotron équipée d'un dispositif permettant de quantifier l'ensemble des termes du bilan énergétique dans l'Ecotron. Une comparaison des bilans énergétiques de Lonzée et de l'Ecotron est ensuite effectuée et permet de juger la capacité de l'Ecotron à reproduire un climat naturel.

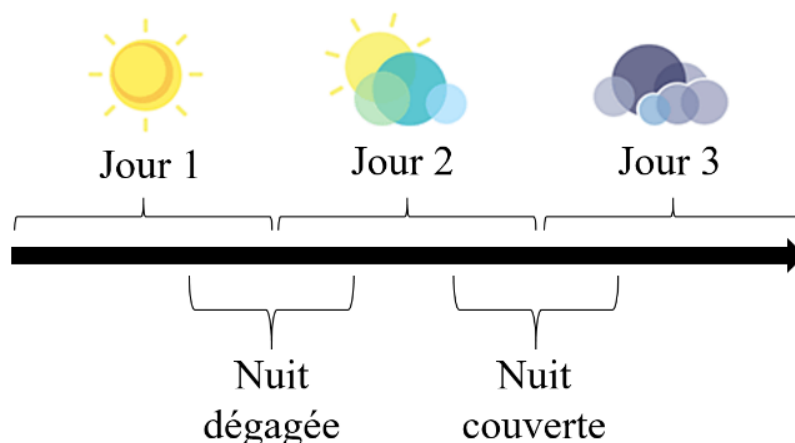


FIGURE 4 – Climat contenu dans la séquence de trois jours reproduite dans l'écotron.

Par la suite, la modélisation de deux scénarios de température basés sur les tendances de différences de température constatées lors de la précédente étape permet d'étudier l'impact possible qu'aurait l'écotron sur le cycle de développement du blé tendre. L'objectif est de déterminer à quel point le bilan énergétique propre à l'écotron influence son écosystème et quelles sont les moyens disponibles pour corriger celui-ci.

2.5 Bilan énergétique

Le fonctionnement des écosystèmes est fortement dépendant de l'énergie qu'ils reçoivent. Cette énergie reçue, en plus de varier, peut également se répartir dans des proportions différentes dans l'écosystème en fonction de nombreux facteurs environnementaux. La caractérisation des flux énergétiques via l'étude du bilan énergétique renseigne sur le fonctionnement de l'écosystème lui-même.

2.5.1 Bilan énergétique d'un système

Le bilan énergétique d'un système décrit la somme de l'énergie entrante et l'énergie qui quitte le système. Lorsque le système considéré est la surface d'un écosystème naturel, le bilan énergétique comprend l'énergie entrante et l'énergie sortante et peut s'écrire sous la forme de l'équation suivante :

$$C_\rho \cdot m \cdot \frac{dT}{dt} = SW_{in} - SW_{out} + LW_{in} - LW_{out} - H - LE - G \quad (1)$$

où, C_ρ est la capacité thermique massique du sol ; m est la masse du sol ; dT est la variation de température ; dt est le pas de temps considéré ; SW_{in} est le rayonnement des ondes courtes émise par le soleil atteignant l'écosystème ; SW_{out} est le rayonnement à ondes courtes réfléchi par la surface de l'écosystème ; LW_{in} est le rayonnement à ondes longues émise par les gaz dans l'atmosphère au-dessus de l'écosystème ; LW_{out} est le rayonnement à ondes longues émis par la surface de l'écosystème ; H est la chaleur sensible transmise entre la surface et l'air par convection ; LE est la chaleur échangée lors par les processus de changements de phase de l'eau et transférée par échange de vapeur d'eau, elle est appelée chaleur latente ; G est la chaleur transmise dans le sol par conduction. La convention de signe prend pour référence la surface de l'écosystème. Les rayonnements (SW_{in} et LW_{in}) sont considérés positifs lorsqu'ils rentrent dans le système et l'opposé pour les autres termes (SW_{out} , LW_{out} , H , LE et G).

2.5.2 Reproduction d'un bilan énergétique dans l'Écotron

L'écotron constitue un écosystème clos dans lequel l'ensemble des flux précédemment cités se retrouvent. Néanmoins, bien que le concept même d'un écotron tende à une représentation fidèle de l'écosystème étudié, les flux d'énergie peuvent avoir de propriétés différentes. La suite de ce chapitre contient une brève description de l'origine et de la nature des différents flux en milieu naturel comparée avec son homologue reproduit dans l'écotron.

En milieu naturel, SW_{in} est produit par le rayonnement solaire. SW_{in} est principalement situé dans la gamme de longueurs d'onde du visible et du proche infra-rouge compris entre 390 nm et 1600 nm (Kopp and Lean, 2011). Dans l'écotron, ce rayonnement est reproduit par un luminaire dont l'intensité reste dans une gamme comprise entre 0 à $2000 \mu mol.m^{-2}.s^{-1}$ soit entre 0 et $1000 W m^{-2}$.

En extérieur, le rayonnement LW_{in} correspond au rayonnement thermique infra-rouge émis par l'atmosphère. Il dépend principalement de l'émissivité et de la température de l'atmosphère influencée par la hauteur et l'intensité de la couverture nuageuse (Sicart et al., 2016). En effet, un ciel où les nuages se trouvent à une altitude basse est plus chaud car la température de l'atmosphère diminue avec l'altitude. Un ciel dégagé par contre, émet via des molécules réparties à très haute altitude. Dans ce cas, le ciel est donc plus froid et émet moins. De plus, la couverture nuageuse varie fortement sur les échelles de temps mensuelles, saisonnières, décennales et climatiques et est difficilement prévisible avec précision (World Meteorological Organization, 2012). Dans l'écotron,

LW_{in} est émis par les parois de l'écotron. Bien qu'inconnue, l'émissivité des parois est constante dans le temps. Leur température peut être approximée à la température de l'air. Or, la température de l'air est contrôlée afin d'égaliser la température mesurée à l'extérieur.

Les flux turbulents H et LE correspondent aux chaleurs transportées par les tourbillons de l'air. Plus précisément, H est un transport de chaleur par agitation lié à la température et LE est lié à la vapeur d'eau. Ils sont donc tous deux contrôlés respectivement par le gradient de température et d'humidité entre la surface et l'air, et par l'intensité du vent et la rugosité de la surface, ces deux derniers facteurs déterminant le niveau de turbulence. Alors que le vent naît sous l'effet des différences de pression dans les écosystèmes naturels, l'origine du vent est radicalement différente dans l'écotron. Il est impossible de reproduire les conditions naturelles de vent dans l'écotron qui est uniquement pourvu d'une ventilation fixe à laquelle on peut éventuellement ajouter des ventilateurs fonctionnant dans une gamme limitée. De plus, si la température de l'air est régulée et peut donc être forcée pour reproduire les conditions extérieures, ce n'est pas le cas de la température de la surface. Le même raisonnement prévaut pour le gradient d'humidité, avec une impossibilité de réguler la pression de vapeur à saturation dans les cavités sous stomatiques où dans les pores du sol.

Le rayonnement SW_{out} résulte de la réflexion de SW_{in} par la surface. LW_{out} se réfère au rayonnement thermique infra-rouge émis par la surface. Tous deux varient en fonction des caractéristiques physiques du sol et de la végétation. Or, les sols en milieu naturel et dans l'écotron ne sont pas similaires. En effet, bien que le sol inséré dans l'écotron soit choisi, il n'est pas de la même origine que le lieu du climat reproduit. L'ensemble des caractéristiques ne sont donc pas parfaitement identiques.

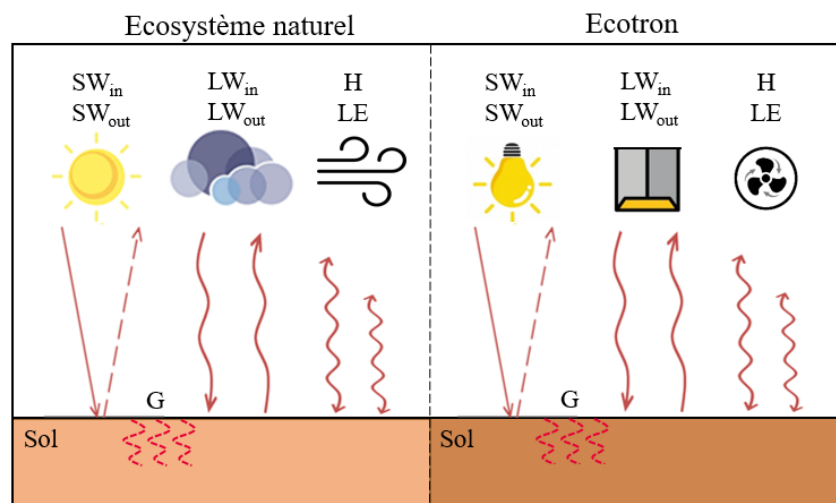


FIGURE 5 – Représentation schématique des origines des différents flux pour un écosystème naturel et le Terra-écotron.

D'autre part, l'ensemble des capteurs de l'écotron et du site extérieur qui sert de référence sont pourvus d'une marge d'incertitude due à leur précision. Toutes ces sources d'inexactitude en cascade sont à l'origine d'éventuelles divergences de certains flux entre l'écosystème naturel et la reproduction au sein de l'écotron.

2.6 Conséquence d'une mauvaise reproduction des flux énergétiques sur la phénologie du blé tendre ou froment (*Triticum aestivum*)

Dans ce chapitre, la phénologie et la croissance du blé tendre et les paramètres responsables de leur évolution temporelle sont examinés afin de comprendre comment ces deux processus peuvent être perturbés par une mauvaise reproduction des différents flux du bilan énergétique dans l'écotron. La phénologie est l'étude du calendrier des événements biologiques et les causes de leur apparition en fonction des paramètres biotiques et abiotiques (Shaykewich, 1995).

2.6.1 Impact global de la température sur la croissance et le rendement des cultures

Le rendement et la qualité des cultures vivrières tel que le blé tendre sont directement affectés par les conditions météorologiques. Les facteurs météorologiques les plus impactants sont la température, les précipitations et la photopériode (Porter Semenov, 2005). Dans cette partie, seul l'effet de la température sur les cultures est développé. En effet, la qualité de la reproduction de l'intensité et de la répartition temporelle des précipitations et de la photopériode est suffisante dans l'écotron.

Le stress thermique dû à l'augmentation de la température est un problème agricole déjà observé dans de nombreuses régions du monde. Des températures transitoires ou constamment élevées provoquent une série de changements anatomiques, physiologiques et biochimiques chez les plantes, qui affectent leur croissance et leur développement et peuvent entraîner une réduction drastique du rendement économique (Wahid et al., 2007). De plus, les températures diurnes et nocturnes affectent toutes les deux la plante (Peet et Willits, 1998). La température affecte les performances des cultures principalement par son impact sur :

- le taux de développement phénologique depuis la germination des graines jusqu'à la maturité de la culture, y compris la satisfaction de l'exigence de froid (vernalisation) ;
- l'initiation et l'expansion des organes végétaux, appelée croissance ;
- la photosynthèse et la respiration (processus liés à la croissance) ;
- la sénescence, la stérilité ou l'avortement des organes végétaux (Wang et al., 2017).

La croissance et le développement des plantes sont deux notions régulièrement employées dans la simulation de la croissance des cultures. Le développement d'une plante correspond à des événements discrets que l'on peut observer à un instant donné, ces transformations étant liées à l'initiation et l'apparition de nouveaux organes et repris sous l'ensemble des stades phénologiques. La croissance se réfère quant à elle à l'augmentation des dimensions de la plante, comme la longueur, la largeur ou encore l'augmentation de poids ou de volume (Delattre, 2016). Contrairement au développement, la croissance est un phénomène difficilement repérable dans le temps (El Hassani et Persoons, 1994 ; M. El Jarroudi, 2005)

La façon dont la température impacte la croissance, le développement et les processus liés sont multiples. Il existe des modèles permettant de caractériser le taux de croissance des plantes en fonction de la température (lorsqu'aucun stress n'est subit) comme la fonction générale suivante (Xu et al., 2004) :

$$r = R_{max} \cdot f(T) \cdot f(P) \cdot f(V) \quad (2)$$

où, r est le taux de croissance quotidien ; R_{max} est le taux de croissance maximum ; et $\check{N}(T)$, $\check{N}(P)$ et $\check{N}(V)$ sont les fonctions de réponse de température, photopériode et vernalisation, respec-

tivement (sans dimension, avec des valeurs entre 0 et 1). La fonction de réponse de la vernalisation, basée sur le nombre de jours vernalisant, n'est utilisée que jusqu'au tallage.

La croissance des cultures et les processus qui y sont liés ne réagissent pas identiquement aux changements des conditions environnementales. Ces mécanismes peuvent réagir de manière non linéaire, comme c'est le cas pour la dépendance à la température de processus importants tels que la photosynthèse et la respiration (Fig. 2), ou de façon linéaire, comme pour les taux de croissance tout au long du cycle de vie d'une culture (Porter Semenov, 2005). Le taux de croissance des plantes peut également augmenter jusqu'à une certaine limite et diminuer ensuite.

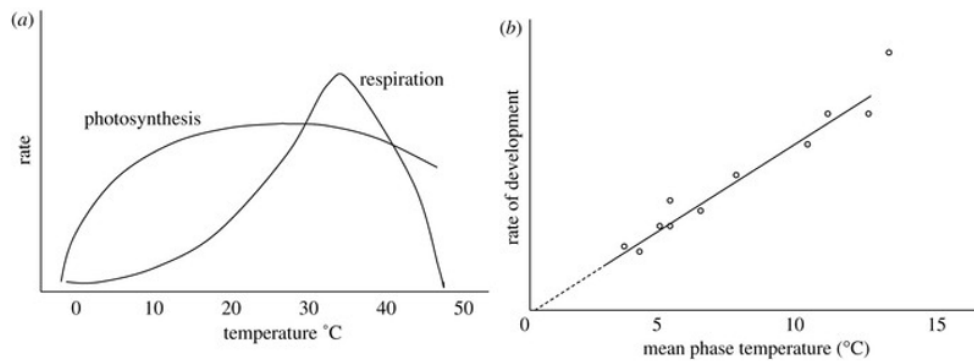


FIGURE 6 – Changements du taux de (a) photosynthèse et respiration et (b) du taux de développement des cultures en fonction de la température (Porter Semenov, 2005).

En plus de ces réponses linéaires et non linéaires, des réponses seuils sont également possibles. Des périodes, même courtes, de températures extrêmes peuvent par exemple avoir d'importants effets de réduction du développement et du rendement sur les principales cultures. Les seuils sont définis comme des températures au-dessus ou en-dessous desquelles des processus primordiaux sont négativement affectés telle que la formation des graines et des fruits (Wheeler et al., 2000). Le niveau de seuil thermique ainsi que les conséquences d'un éventuel dépassement de celui-ci varient considérablement au cours des différents stades de développement de la plante (Slafer Rawson 1995). Par exemple, au début de l'ontogenèse, une température élevée peut ralentir voire inhiber totalement la germination. À des stades ultérieurs, une température élevée peut nuire à la photosynthèse, à la respiration et autres processus liés à la croissance de la plante (Wahid et al., 2007). En effet, l'augmentation de la température tend à réduire la taille des cellules, à fermer les stomates, ce qui réduit la perte d'eau et donc la photosynthèse, modifie les chloroplastes, altère les thylakoïdes, diminue l'activité du RUBISCO et réduit le transport d'électrons entre le PSII et le PSI (Bañon et al., 2004 - Chung et al., 2006 - Salvucci et al., 2001 - Yan et al., 2013). En fin d'ontogenèse, les processus de reproduction sont nettement affectés par les températures élevées pour la plupart des plantes. En effet, dans de telles conditions, les plantes ont tendance à détourner les ressources pour faire face au stress thermique au détriment du développement du système reproductif. Des températures trop basses peuvent également mettre un terme au développement de la plante.

Les réponses des plantes aux températures élevées ou faibles varient selon les espèces végétales (Wollenweber et al., 2003). Par conséquent, ces seuils sont établis pour chaque mécanisme, chaque espèce et pour chacun des stades phénologiques principaux.

Une température seuil de développement se réfère à une valeur de la température moyenne quotidienne à laquelle tout développement cesse. D'autres températures tels que les températures létales et d'activité sont également établies et correspondent respectivement aux limites de survie et limites de croissance de la plante. La gamme délimitée par les limites létales est la plus large, suivie par celles des gammes d'activité et de seuil de développement (Porter Semenov, 2005). Pour chacune de ces températures des valeurs supérieures et inférieures ont été déterminées. Un seuil de développement inférieur également appelé température de base ou zéro de végétation est la température minimale à partir de laquelle une plante se développe. De même, un seuil de développement supérieur est la température au-dessus de laquelle la croissance s'arrête. Des optima de températures sont également identifiés et correspondent à la température à laquelle les processus de croissance et de développement sont les plus élevés. L'optimum thermique de nombreuses plantes se situe entre 20°C et 25°C.

2.6.2 Focus sur le blé tendre (*Triticum aestivum*)

Le blé tendre fait partie des céréales d'hiver. La principale caractéristique des céréales d'hiver est leur nécessité d'une longue période avec des températures basses afin de réaliser leur développement. Ce processus physiologique appelé vernalisation permettra à la plante de former ses épis. Non vernalisées, elles peuvent former des épis et des ébauches florales avec beaucoup de retard par rapport aux plantes vernalisées (Agro Paris Tech : « Les céréales », 2001). Les variétés alternatives (comme As de cœur, Atoupic, Hybred) ont des besoins de vernalisation beaucoup plus modérés et les variétés de printemps (comme Florence Aurore, Granary, Josselin) ont des besoins nuls. Afin de remplir ce besoin de vernalisation, les cultures de céréales d'hiver sont implantées à l'automne. Pour être vernalisante, la moyenne journalière doit toujours demeurer supérieure à la température seuil de base déterminée pour ce stade phénologique. Grâce à leur capacité à résister au froid, ces cultures ne craignent pas le gel (Livre blanc, 2017). En effet, plus une plante annuelle possède une température de base basse aussi appelé zéro de végétation, plus elle peut être semée tôt dans la saison. Ce type de culture est souvent plantée en zone tempérée en extérieur quand les températures sont adéquates. Son optimum pour la vernalisation, variable avec l'espèce et la variété, oscille entre 0°C et + 10°C chez les céréales à paille (Agro Paris Tech : « Les céréales », 2001).

La phénologie du blé comprend de nombreux stades. Parmi les stades principaux, se succèdent la levée, le tallage, la croissance des nœuds, l'épiaison, la floraison, la formation des graines et la maturité. La figure 7 reprend en dessin l'évolution chronologique d'un plant de blé tendre. Ce schéma caractérise également les stades phénologiques via l'échelle de Zadok. Le système de code décimal défini par Zadok et al. en 1974 est largement utilisé pour caractériser les stades de développement des céréales (Delattre, 2016). Il s'agit d'une échelle non linéaire de 0 à 100 (basée sur des stades de développement irrégulièrement espacés) et véhiculant deux informations. L'échelle principale (correspondant au premier chiffre de 0 à 9) renseigne sur une étape clé du développement (exemple : le chiffre 0 représente la germination et le 3 l'élongation de la tige). La seconde échelle (deuxième chiffre) apporte plus de détails sur le développement notamment en ce qui concerne la formation des talles, des feuilles ou encore l'apparition des nœuds.

2.6 Conséquence d'une mauvaise reproduction des flux énergétiques sur la phénologie du blé tendre ou froment (*Triticum aestivum*)

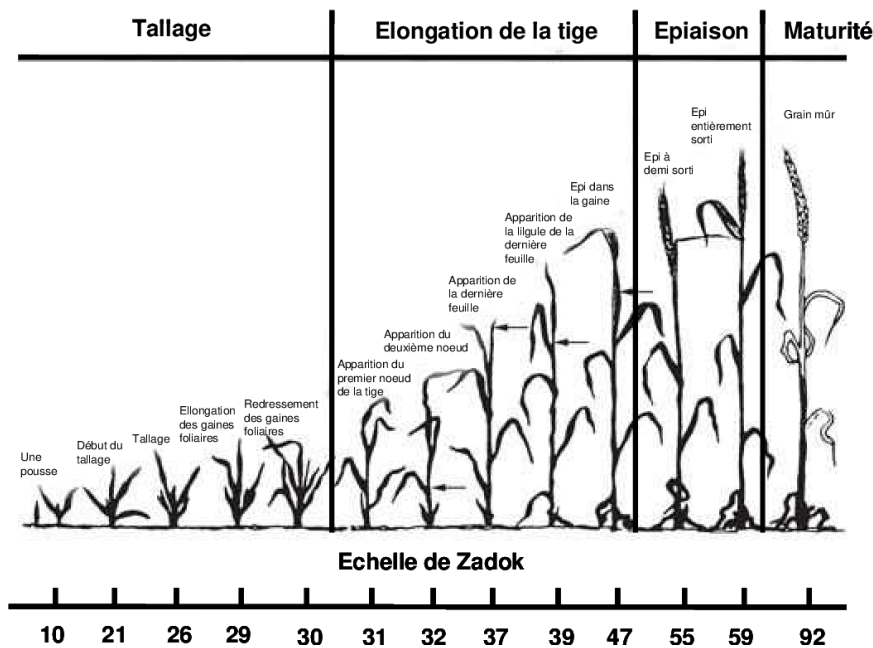


FIGURE 7 – Les stades de développement du blé tendre (Bogard, 2011).

Le tableau 2 synthétise l'ensemble des températures moyennes journalières correspondant aux seuils de développement, létales, limites d'activité de croissance et optimales pour le blé tendre. Au cours de son ontogenèse, le blé trouve son optimum de développement à des températures d'environ 20°C. Deux tendances sont bien distinctes pour ses seuils de températures. Des températures basses durant la première partie de son développement et des températures plus hautes durant la seconde moitié, à partir de l'anthèse. En général, si la température reste en dessous de ses seuils, une augmentation des températures moyennes induira un développement plus rapide de la plante (Calderini et al., 2001). En moyenne, il a été constaté via un modèle que l'augmentation des températures moyennes produit une avancée phénologique de sept jours pour chaque degré Celsius supplémentaire (Sadras et Monzon, 2006).

Le blé tendre ne peut se développer que sous des plages de températures étroites qui, si elles sont dépassées, peuvent endommager le plant. Néanmoins, le blé tendre possède une gamme de survie beaucoup plus large prenant pour valeurs de températures létales -17.2°C et 47.5°C.

2.6 Conséquence d'une mauvaise reproduction des flux énergétiques sur la phénologie du blé tendre ou froment (*Triticum aestivum*)

TABLEAU 2 – Résumé des moyennes des températures minimales létales (TL_{min}), maximales létales (TL_{max}), de base (T_{min}), optimales (T_{opt}) et maximales (T_{max}) pour divers processus et phases phénologiques chez le blé tendre (Porter et Gawith, 1999). D'une étude à l'autre, ces valeurs peuvent varier de quelques degrés.

Processus			Phases phénologiques		
Limites mortelles	TL _{min}	-17.2°C	Semis jusque l'émergence	T _{min}	3.5°C
	TL _{max}	47.5°C		T _{opt}	22°C
Initiation foliaire	T _{min}	-1°C	Vernalisation	T _{max}	32.7°C
	T _{opt}	22°C		T _{min}	-1.3°C
	T _{max}	24°C		T _{opt}	4.9°C
Croissance des pousses	T _{min}	3°C	Epi terminal	T _{max}	15.7°C
	T _{opt}	20.3°C		T _{min}	1.5°C
	T _{max}	20.9°C		T _{opt}	10.6°C
Croissance racinaire	T _{min}	2°C	Anthèse	T _{max}	20°C
	T _{opt}	16.3°C		T _{min}	9.5°C
	T _{max}	25°C		T _{opt}	21°C
			Remplissage des grains	T _{max}	31°C
				T _{min}	9.2°C
				T _{opt}	20.7°C
				T _{max}	35.4°C

La température minimale de développement, aussi appelé zéro de végétation ou température seuil de base permet d'introduire une nouvelle façon de décrire la dépendance du développement à la température, celui des degrés-jours. Le degré-jour de développement est une mesure empirique utilisée pour calculer l'accumulation de chaleur permettant d'estimer la durée d'un développement biologique tel que le développement d'une plante en tenant compte de la température. Ce cumul de températures permet de prédire le moment où un stade de développement important sera atteint. Pour calculer la valeur du nombre de degrés-jours, il faut déterminer une température de base (0°C pour le blé (Shaykewich, 1995)), puis noter les températures maximale et minimale d'une journée. Dès lors, la valeur du degré-jour se calcule via l'équation (Mcmaster Wilhelm, 1997) :

$$DJ = \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base} \quad (3)$$

Si la température moyenne $((T_{max} + T_{min})/2)$ est en dessous de la température de base, nous considérerons que la température moyenne est égale à la température de base (Heurer et al., 1978). Une difficulté est rencontrée lorsque la température maximale dépasse un niveau qui est considéré comme optimum pour les plantes (Delattre, 2016). Dans ce cas, la formule considère que le développement est maximal alors que les plantes ne grandissent pas de la même manière qu'à une température optimum (Shaykewich, 1995). Au-delà de cette température optimum, la vitesse de développement diminue car les plantes, pour supporter ces fortes températures, ferment leurs stomates pour ne pas perdre trop d'eau. Dans ces situations, le développement est alors surestimé.

2.6 Conséquence d'une mauvaise reproduction des flux énergétiques sur la phénologie du blé tendre ou froment (*Triticum aestivum*)

TABLEAU 3 – Calendrier phénologique du blé tendre et degrés-jours associés aux stades phénologiques (Libre blanc, 2017 - Agro Paris Tech : « Les céréales », 2001).

Calendrier des principaux stades phénologiques			
Stade phénologique	Date	Zadok	Degrés jour
Semis	10/10 – 10/01	1	0°C
Levée	-	10	150°C
Début tallage	15/02 – 15/03	21	450°C
Plein tallage	15 – 30 mars	26	550 – 600°C
Fin tallage	10 – 15 avril	30	-
Epi à 1 cm	20 avril	30	750°C
Premier nœud	5 – 10 mai	31	-
Deuxième nœud	12 – 15 mai	32	1300°C
Apparition de la dernière feuille	20 – 25 mai	37	-
Ligule visible	25 mai – 1 juin	39	-
Epi émerge	Début juin	50	-
Epi dégagé	10 -15 juin	58	2000°C
Récolte	Début Aout	99	2800°C

2.6.3 Conséquences précédemment constatées dans l'écotron sur la phénologie du blé tendre

Un travail de fin d'étude réalisé pendant l'année académique 2018-2019 par Maurine Antoine apporte quelques informations sur le développement du blé tendre dans l'écotron. La comparaison du comportement des cultures dans l'Ecotron avec les données enregistrées sur le site expérimental de Loncée met en évidence deux différences majeures : un avancement des stades phénologiques au début du printemps et une maturation plus lente pendant l'été. Il a été observé que le blé croît au même rythme jusqu'au 150e jour. Passé le 150e jour, le blé croît plus rapidement dans l'écotron et atteint l'indice Zadok 39 (ligule visible) environ une semaine avant le blé à Loncée. L'indice Zadok 75 est atteint environ deux semaines avant le blé à Loncée. Ensuite, le développement du blé dans l'Ecotron ralentit, et le blé mûrit en même temps dans l'Ecotron et dans le champ (Antoine, 2019). L'hypothèse alors émise est que la phase de croissance plus rapide du blé dans l'Ecotron serait principalement due à une température de végétation et sol plus élevée (Kimball et al., 1995). Pendant les périodes froides (jusqu'au printemps), la culture de l'Ecotron ne se refroidit pas comme dans le champ et se développerait donc plus rapidement (Brisson et al., 2003). D'autre part, pendant les périodes chaudes de l'été, le faible vent dans l'Ecotron aurait empêché la culture de se refroidir, provoquant un stress thermique qui aurait alors ralenti son développement.

3 Matériels et méthodes

3.1 Expérimentation

3.1.1 Dispositif expérimental

Un dispositif expérimental est pensé et intégré dans une cellule de l'écotron dans lequel le lysimètre contenait un sol nu. Le dispositif est composé d'un ensemble de capteurs permettant de monitorer les grandeurs d'intérêt pour quantifier et analyser la variabilité temporelle des flux du bilan énergétique. Ces grandeurs sont la température de l'air, la température du sol à une profondeur donnée, l'humidité volumique du sol, les 3 composantes de la vitesse du vent, les différents termes du bilan radiatif et le transfert conductif à une profondeur donnée. La figure 8 contient quant à elle le schéma complet du dispositif.

TABLEAU 4 – Mesures et capteurs associés

Mesures directes	Capteurs
Température de l'air ($^{\circ}\text{C}$)	PT1000
Température à 5 cm de profondeur ($^{\circ}\text{C}$)	PT1000
Humidité volumique à la surface du sol ($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)	Theta Probe ML2x de Delta-T Device LTD
Vitesse 3D du vent ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	Anémomètre à ultrasons R3-50 de Gill
Rayonnements : SW, LW (W m^{-2})	CNR4 de Kipp et Zonen
Transfert conductif à 5 cm (W m^{-2})	Heat flux plate de Campbell Scientific

Le CNR4 est constitué de 4 récepteurs de rayonnement : SWin (haut), SWout (bas), LWin (haut) et LWout (bas). Il est placé au-dessus du centre du lysimètre (hauteur de 15 cm) afin de capter la majorité des rayonnements entrant et sortant de la surface du sol. L'angle de vision des capteurs supérieurs du CNR4 est de 180° . Les rayonnements LW émis par le luminaire et les parois au-dessus ou à même hauteur que le CNR4 et le rayonnement SW émis par le luminaire sont respectivement mesurés par le pyrgéomètre et le pyranomètre du CNR4. L'angle de vue du pyranomètre et du pyrgéomètre inférieur du CNR4 est de 150° . La hauteur de 15 cm garantit que le cône de vision de ces capteurs respecte les limites physiques du lysimètre de 0.8 m de rayon. L'anémomètre (figure 13) est retourné afin d'être placé le plus proche possible du sol. Ces valeurs de sorties sont corrigées par une rotation de 180° pour tenir compte de sa position. Le centre du volume de mesure de l'anémomètre est maintenu, à l'aide d'une armature métallique, à 15 cm du sol, soit la hauteur minimale permise par le dispositif.

Le lysimètre contenant le sol est de taille réduite et le placement des capteurs doit être pensé afin de mesurer uniquement les flux échangés par la surface du sol et de limiter au maximum les effets de bords. En ce qui concerne les autres capteurs du dispositif, à savoir la PT1000 (T° du sol), la Theta Probe ML2x (humidité volumique du sol et la « heat flux plate » (densité de flux par conduction dans le sol), ils sont tous placés dans le sol mais à au moins 30 centimètres des parois du lysimètre. Cette distance assure que la zone d'influence des capteurs ne subisse aucune interférence provenant des parois métalliques du lysimètre. La PT100, la Theta Probe ML2x et la « heat flux plate » sont respectivement placées à 3 cm, 0-5 cm et 5 cm de profondeur.

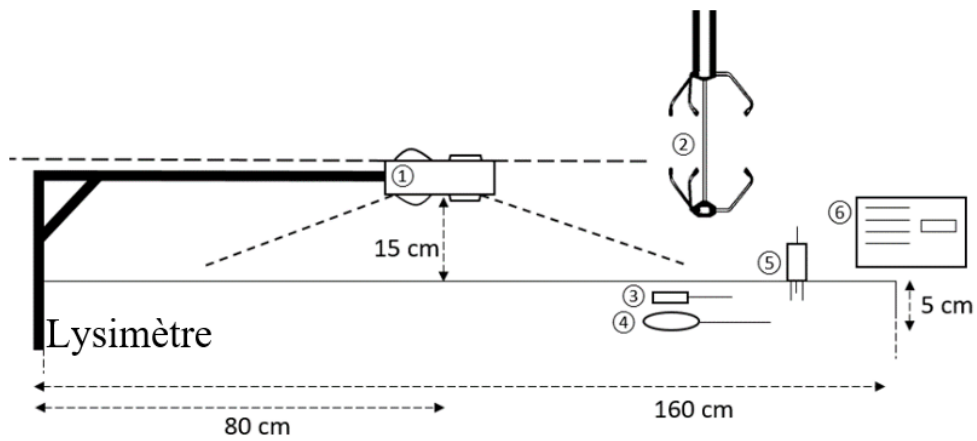


FIGURE 8 – Schéma du dispositif vu de profil : (1) CNR4; (2) Anémomètre sonic; (3) PT100; (4) Heat flux plate; (5) Theta Probe ML2x; (6) CR3000.



FIGURE 9 – Photo du dispositif expérimental placé dans la CER1 au TERRA-écotron.

3.1.2 Acquisition des données

Une centrale d'acquisition des mesures « CR3000 » est utilisée afin de recueillir les données. Le micrologger CR3000 permet de réaliser des dispositifs complexes avec de nombreux capteurs. Il est rapide et assez puissant pour gérer des systèmes d'Eddy covariance ainsi que des systèmes complets de mesure de bilan d'énergie (Campbell Scientific, 2000). La programmation ainsi que l'enregistrement des données des différents capteurs ont été réalisés par Alain Debacq, technicien, via le logiciel "Loggernet". Pour chacune des mesures, les gammes de fréquences sont renseignées aux sections correspondantes.

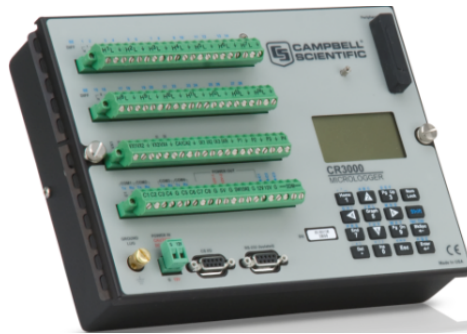


FIGURE 10 – Centrale d'acquisition de mesure rapide CR300 (Campbell Scientific, 2000).

3.1.3 Choix de la période d'étude

Un climat récent est reproduit. Tout d'abord, le scénario à reproduire est identifié dans la base de données météorologique de la station ICOS (Integrated Carbon Observation System) de Lonzée (Gembloux). Le site de Lonzée est un site agricole où est mis en place une rotation froment-pomme de terre-froment-betterave avec un travail du sol « normal », soit un labour de 30 cm (Ligne Manise : « Documentation on Lonzée station », 2019). Ce scénario doit répondre à plusieurs critères :

- La présence d'une nuit couverte et d'une nuit dégagée. En effet, la présence de ces deux nuits spécifiques permet de vérifier l'hypothèse émise que c'est en condition de ciel dégagé la nuit que l'écotron reproduit très mal LW_{in} alors que la nuit couverte peut présenter une situation avec bonne ou une mauvaise reproduction du bilan énergétique. L'observation des longues ondes entrantes (LW_{in}) permet l'identification de telles nuits. Le rayonnement LW_{in} dépend fortement de la couverture nuageuse (Aase et Idso, 1978 ; Muller, 1985 ; Marty et Philipona, 2000). Les rayons à ondes longues émis par la Terre sont partiellement absorbés et réémis par les nuages. Par conséquent, LW_{in} varie positivement avec la quantité et la profondeur optique des nuages, la température moyenne d'émission des nuages corrélée négativement avec leur altitude, ainsi que la teneur en vapeur d'eau (Marty et al., 2002). Suite à une inspection de la base de données de Lonzée, les valeurs de $300 Wm^{-2}$ et $380 Wm^{-2}$ sont respectivement retenues pour la nuit dégagée et la nuit couverte.
- Une température minimale ne dépassant pas $4^{\circ}C$. Une telle température ne peut être reproduite au sein du Terra-écotron, le scénario doit donc avoir en tout temps une température supérieure à cette limite.
- Une absence de pluie. L'absence de pluie permet de limiter les causes de l'évolution de l'humidité du sol à l'évaporation au cours de l'expérimentation et de réduire l'impact de cette évaporation dans le bilan énergétique. Néanmoins, l'humidité du sol dans le lysimètre était inférieure à la valeur de départ renseignée à Lonzée pour les nuits choisies. Une pluie

a donc été programmée dans l'écotron afin de réajuster l'humidité du sol avant la prise de mesures.

- Un sol nu. La reproduction des conditions environnementales mesurées sur un sol nu permet d'étudier le comportement de l'écotron en l'absence de plantes. Les plantes influencent et donc compliquent le bilan énergétique notamment via la transpiration et leur albédo.
- La disponibilité de toutes les données nécessaires à l'expérimentation dans le set de donnée ICOS de Lonzée, certaines données pouvant manquer suite au contrôle de qualité ICOS, un dysfonctionnement ou une mise en révision des appareils.

Le scénario retenu est du 11/09/2018 00 :00 au 14/09/2018 00 :00. Ce scénario contient trois jours consécutifs et deux nuits complètes. La nuit du 11 au 12 septembre 2018 est dégagée tandis que la nuit du 12 au 13 septembre 2018 est couverte. Le Terra-écotron nécessite des consignes toutes les 5 minutes or les données ICOS ne sont disponibles qu'à un intervalle de 30 minutes. Les données de Lonzée sont interpolées linéairement afin d'atteindre la résolution nécessaire au fonctionnement de l'écotron. Les données utilisées sont la température de l'air, l'humidité de l'air, PPFD et la concentration en dioxyde de carbone.

3.2 Mesures

Une description des capteurs utilisés dans l'écotron et des calculs/conversions nécessaires à l'obtention des variables d'intérêt sont proposés ci-dessous. En ce qui concerne la disposition des capteurs, se référer à la section 2.2.2. Ces mesures sont également disponibles pour le site de Lonzée en accord avec les normes ICOS (Ligne Manise : « Documentation on Lonzée station », 2019).

3.2.1 Température de l'air et du sol à 5 cm de profondeur

Les températures de l'air et du sol sont respectivement mesurées via un capteur de température Pt100 et Pt1000. Ces sondes font partie des types de capteurs de température aussi appelés détecteurs de température à résistance qui sont fabriqués à partir de platine. Ces capteurs sont basés sur le fait que la résistance électrique du platine varie selon la température. Ils fonctionnent de façon linéaire entre 0 et 100°C. L'élément Pt100 a une résistance de 100 ohms à 0°C, et il est de loin le capteur le plus utilisé. Le capteur Pt1000 quant à lui a une résistance de 1000 ohms à 0°C et permet d'obtenir une plus grande précision de mesure en limitant la source d'erreur due à l'auto-échauffement (Omega Engineering). Néanmoins, l'impédance multipliée par 10 de la sonde Pt1000 favorise l'apparition de bruit sur la mesure. Les données sont récoltées à une fréquence de 0,5 Hz et des moyennes sont effectuées toutes les 5 minutes.

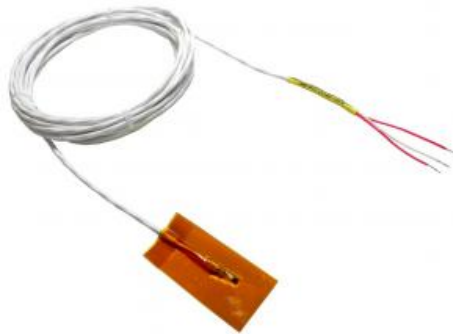


FIGURE 11 – Capteur de température de surface Pt100 (Harold G. SCHAEVITZ Industries, 2018).

3.2.2 Température à la surface du sol

La température à la surface du sol est calculée à partir du rayonnement infrarouge qu'elle émet et mesurée par le pyrgeomètre inférieur du CNR4 (section 2.3.5) et ce grâce à l'équation de Stefan-Boltzmann :

$$T_{surface} = \left(\frac{LW_{emis}}{\sigma \cdot \varepsilon} \right)^{1/4} \quad (4)$$

où, σ est la constante de Stephan-Boltzmann et vaut $5.67 \cdot 10^{-8} (W m^{-2} K^{-4})$ et ε est l'émissivité qui correspond au rapport entre l'énergie radiante émise par une surface et celle émise par un corps noir à la même température. Cette dernière valeur étant la valeur maximale possible, l'émissivité est un nombre compris entre 0 et 1. Si l'émissivité n'est pas bien déterminée, elle peut provoquer une erreur significative dans l'obtention de la température de surface (Mira et al., 2007). Pour cette raison, il est nécessaire de prendre en considération les facteurs qui l'influencent. Ces facteurs sont pour un sol : l'humidité, la rugosité et la densité. Une augmentation globale de l'émissivité en fonction de l'humidité du sol est observée pour tout type de sol (Sanchez et al., 2012 ; Van Bavel et Hillel, 1976). Une formule simplifiée permet de prendre en compte ces trois caractéristiques.

L'émissivité est calculée pour chaque pas de temps en utilisant la formule établie pour un sol travaillé (Chen et al., 1989) :

$$\varepsilon = 0.937 + 0.019 \cdot \sigma_v \quad (5)$$

où, σ_v est la teneur en eau volumique du sol ($m^3 m^{-3}$).

3.2.3 Humidité du sol

La teneur volumique en eau du sol, σ , est le rapport entre le volume d'eau présent et le volume total de l'échantillon. C'est un paramètre sans dimension, exprimé soit en pourcentage (%vol), soit en rapport ($m^3 m^{-3}$). La teneur volumique en eau du sol est mesurée par une Theta Probe ML2x par la méthode de réponse aux changements de la constante diélectrique apparente (White et al., 1994). Ces changements sont convertis en une tension continue proportionnelle à la teneur en humidité du sol (Delta-T Device LTD, 1999). Les données sont récoltées à une fréquence de 0,5 Hz et des moyennes sont effectuées toutes les 5 minutes.



FIGURE 12 – Capteur d'humidité du sol ML2x (Delta-T Device LTD, 1999).

3.2.4 Vitesse du vent

Les trois composantes de la vitesse du vent u , v et w sont mesurées par un anémomètre à ultrasons R3-50. La mesure d'une composante est basée sur la mesure de la durée de déplacement d'une onde ultrasonore entre deux capteurs qui font tous deux offices d'émetteur et de récepteur. Les temps de transit aller et retour sont mesurés et leur différence permet de déduire la vitesse du vent le long de l'axe formé par la paire de capteurs. La fréquence d'acquisition est de 10Hz. Les 3 paires de capteurs sont orthogonales pour fournir les 3 composantes et une rotation permet de déduire les composantes horizontales et verticales.



FIGURE 13 – Anémomètre à ultrasons R3-50 (Gill instruments).

De plus, la vitesse de friction (u^*) est obtenue via le programme EddyPro et la résistance aérodynamique à partir de la moyenne sur deux minutes du module des vitesses selon les axes horizontaux (x et y) et de la vitesse de friction via les formules suivantes :

$$r_{cl} = \frac{U}{(u^*)^2} \quad (6)$$

avec $U = \sqrt{(u^2 + v^2)}$ en (m/s).

3.2.5 Bilan radiatif

Le CNR4 est un radiomètre net à 4 composantes qui mesure le bilan radiatif comprenant les rayonnements entrants solaires ou à ondes courtes (SWin) et infrarouge lointain (IRL) ou à ondes longues (LWin) et les rayonnements sortants à ondes courtes (SWout, rayonnement réfléchi) et à ondes longues (LWout, rayonnement émis par la surface) (Kipp Zonnen, 2007). La gamme spectrale totale mesurée est d'environ 0,3 à 42 micromètres. Cette gamme spectrale couvre à la fois le rayonnement solaire, de 0,3 à 3 micromètres, et le rayonnement infrarouge lointain, de 4,5 à 42 micromètres. Le CNR4 est destiné à une utilisation continue en extérieur. Il est résistant aux intempéries. Le CNR4 se compose d'une paire de pyranomètres, l'un tourné vers le haut, l'autre vers le bas, et d'une paire de pyrgeomètres dans une configuration similaire. La paire de pyranomètres mesure le rayonnement d'ondes courtes et la paire de pyrgeomètres le rayonnement d'ondes longues. Le détecteur d'ondes longues supérieur du CNR4 est doté d'un dôme en forme de ménisque améliorant le champ de vision à près de 180°, contre 150° pour le détecteur du bas. Les 4 capteurs sont intégrés directement dans le corps de l'instrument.

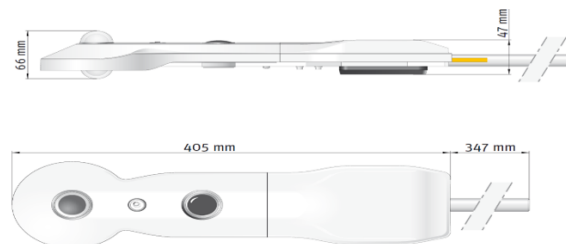


FIGURE 14 – Vue de côté et de haut du CNR4.

Le pyranomètre génère un signal en mV qui est simplement proportionnel au rayonnement

solaire entrant. Le facteur de conversion entre la tension, V , et les watts par mètre carré des SW, est ce qu'on appelle la constante d'étalonnage C (ou sensibilité).

$$SW = \frac{V}{C} \quad (7)$$

Le signal qui est généré par le pyrgéomètre représente l'échange de rayonnement infrarouge lointain (thermique) entre le pyrgéomètre et l'objet auquel il fait face. Cela signifie que pour estimer le rayonnement infrarouge lointain généré par l'objet auquel le pyrgéomètre fait face, généralement le ciel ou le sol, il faut retrancher du signal généré le rayonnement LW émis par le pyrgéomètre. Il faut pour cela connaître sa température, « T ». Un capteur de température, Pt-100, est intégré au boîtier afin de fournir cette température permettant de corriger les relevés d'infrarouge lointain selon l'équation suivante :

$$LW = \frac{V}{C} + \sigma \cdot T^4 \quad (8)$$

où, LW est la densité de flux LW émis par l'objet « vu », V est la tension (mV), C est la sensibilité du capteur, σ est la constante de Stefan-Boltzmann ($5.67 \cdot 10^{-8} \text{W m}^{-2} \text{K}^{-4}$) et T est en Kelvin.

Au final, les densités de flux mesurés sont données en watt par mètre carré. Les données sont récoltées à une fréquence de 0,5 Hz et des moyennes sont effectuées toutes les 5 minutes.

Dans le CNR 4, toutes les composantes sont mesurées séparément. La densité de flux de rayonnement net, R_{net} , peut alors être calculée comme :

$$R_{net} = SW_{in} - SW_{out} + LW_{in} - LW_{out} \quad (9)$$

3.2.6 Chaleur sensible

Le programme EddyPro est utilisé afin de calculer les flux turbulents de chaleur sensible à partir des données récoltées par l'anémomètre sonique. L'interface EddyPro permet notamment de calculer des flux corrigés à partir de fichiers bruts. Les données brutes utilisées sont constituées des vitesses de vents et températures de l'air obtenues à une fréquence de 10 Hz par l'anémomètre sonique du dispositif. Les données brutes comprenant l'ensemble de la durée de l'expérimentation, soit trois jours de données est subdivisé en 72 sous-fichiers permettant la lecture par le programme. Dans ce cas, des méta-informations doivent être fournies avant de passer par l'interface graphique d'EddyPro. Le traitement des données nécessite une longue séquence d'opérations comprenant le filtrage des données brutes, l'étalonnage et d'autres algorithmes pour calculer et corriger les flux. Pour de nombreuses étapes de traitement, plusieurs options sont disponibles. Malgré de nombreux efforts, la communauté scientifique n'est pas encore parvenue à un accord définitif sur les meilleures d'entre elles. La mise à disposition de toutes ces options ne peut se faire qu'au prix d'un accroissement de la complexité du logiciel. La solution dans EddyPro consiste à fournir deux voies pour le traitement des données : mode express et mode avancé.

Dans notre cas, le mode avancé est utilisé afin de choisir la manière dont les corrections sont appliquées, et configurer les paramètres. Ce mode bien que plus compliqué que le mode « Express », est plus pertinent pour des données collectées dans des situations qui s'écartent d'un terrain plat et homogène équipé d'au moins trois capteurs. Les paramètres encodés pour la création du projet et les commandes basiques sont :

- RAW file format : ASCII plain text.

- Hauteur de canopée de 0 mètre car le sol est nu.
- File duration : 60 minutes. EddyPro analyse ainsi consécutivement les 72 fichiers créés contenant chacun 60 minutes d'enregistrement.
- Les références de l'anémomètre à ultrasons R3-50 sont également encodées. Sa disposition à 30 cm du sol est également renseignée.
- Raw file date : encodage des colonnes disponibles au sein des fichiers bruts à savoir les trois vitesses de vent et la température.
- Flux averaging interval : un pas de temps de 30 minutes est choisi pour le calcul du flux de chaleur sensible turbulent.

En ce qui concerne les paramètres et corrections avancées pour « Processing options » :

- Fix w boost bug : la correction n'est pas appliquée. Dans la note technique, Gill Instruments explique que les anémomètres affectés sont identifiés en faisant correspondre trois critères. Hors l'anémomètre utilisé ne correspond pas.
- Angle of Attack correction : la correction est appliquée. Lorsque le vent s'approche de l'anémomètre avec un angle d'attaque considérable (c'est-à-dire à un angle qui s'écarte considérablement de l'horizontale), le cadre d'un sonique post-monté (comme Gill R2, R3, WindMaster ou Metek USA-1) déforme le flux, ce qui entraîne des mesures inexactes. La correction est alors appliquée car l'anémomètre utilisé est un anémomètre R3.
- Rotation method : méthode d'ajustement planaire « traditionnelle ». La méthode d'ajustement planaire est basée sur l'évaluation de l'inclinaison de l'anémomètre par rapport aux lignes de courant locales à long terme (Wilczak et al., 2001). Cette méthode est jugée plus appropriée en cas de topographie complexe ou en pente, lorsque la composante verticale moyenne du vent ou les contraintes transversales peuvent en fait différer de zéro.
- Detrend method : moyenne par bloc. Différentes méthodes sont décrites dans la littérature pour extraire les fluctuations turbulentes des données de séries chronologiques. La moyenne par bloc, ou moyenne de Reynolds, est la simple opération de calcul de la valeur moyenne de la variable et de calcul des fluctuations de la turbulence en tant que dérivations individuelles de la moyenne.
- Quality check : coché. Le « quality check » permet d'avoir à disposition un indicateur atteignant la valeur «0» pour les flux de meilleure qualité, «1» pour les flux adaptés à l'analyse générale tels que les budgets annuels et «2» pour les flux qui doivent être éliminés de l'ensemble de données de résultats

En ce qui concerne la partie « Statistical analysis » :

- Tout est coché. Ce sont des tests qui évaluent la qualité des données brutes sur base d'une série de tests statistiques développés par Vickers et Mahrt (1997). C'est un système de flag de qualité (qui peuvent être « soft » ou « hard »). EddyPro ne va pas filtrer les données en fonction des résultats de ces tests, donc les cocher n'affecte pas les flux mêmes.

Et pour finir avec la partie « Spectral Analysis and Corrections », les valeurs avant corrections sont gardées.

3.2.7 Chaleur latente

La chaleur latente correspond à l'énergie utilisée/recueillie lors de l'évaporation/condensation de l'eau contenue/arrivant dans le sol (puisque'il n'y a pas de transpiration vu l'absence de végétation). Cette chaleur latente peut donc être déterminée en multipliant l'enthalpie de vaporisation

par la variation de quantité d'eau dans le lysimètre. Cette dernière doit être calculée sur base de la mesure de l'évolution temporelle de l'humidité du sol des 6 premiers cm (voir section 3.2.3 pour cette mesure, pas d'autres mesures de contenu en eau du sol à des profondeurs plus importantes disponibles). La première étape consiste à extrapoler en profondeur l'humidité du sol mesurée en surface. Des études antérieures ont montré que le profil de la teneur en humidité du sol est souvent assez bien corrélé avec l'humidité du sol de surface (Albergel et al., 2008) sur des périodes postérieures aux précipitations. Plusieurs approches peuvent être utilisées, comme le réseau neuronal artificiel (ANN), la régression linéaire (LR) et le filtre exponentiel (ExpF) (Houser et al., 1998; Walker et al., 2001b; Sabater et al., 2007). Toutes ces méthodes ont eu des performances similaires pour l'extrapolation de l'humidité de surface (0-5 cm) vers l'estimation de l'humidité de la couche près de la surface (0-25 cm) (Zang et al., 2017).

Dans notre cas, la méthode du filtre exponentiel (ExpF) est utilisée. La méthode ExpF est un modèle de simulation du mouvement de l'eau pour calculer la distribution verticale de l'humidité dans le profil du sol. La méthode ExpF prédit la dynamique de l'humidité du sol volumique (SM) sous la surface en utilisant une fonction de filtrage exponentielle de la dynamique de la SM de surface (Albergel et al., 2008). Tout d'abord, la série temporelle de SM mesurée en surface (cm^3/cm^3) est transformée en un indice de tendance des eaux du sol (SWI) compris entre 0 et 1 :

$$SWI_s = \frac{\sigma_s - \sigma_{s,min}}{\sigma_{s,max} - \sigma_{s,min}} \quad (10)$$

où, $\sigma_{s,min}$ et $\sigma_{s,max}$ sont le minimum et le maximum des séries chronologiques de SM collectées (Ford et al., 2014). La méthode ExpF permet ensuite d'estimer le SWI pour la couche proche de la surface (0-25 cm) à partir de la SWI de surface en utilisant :

$$SWI_{m,t_n} = SWI_{m,t_{n-1}} + K_{t_n} \cdot (SWI_{s,t_n} - SWI_{m,t_{n-1}}) \quad (11)$$

où, SWI_{m,t_n} et $SWI_{m,t_{n-1}}$ sont respectivement les valeurs prévues du SWI sous la surface aux temps t_n et t_{n-1} , SWI_{s,t_n} est le SWI de surface observé au temps t_n et K_{t_n} représente le gain au temps t_n . La plage du gain K est de $[0,1]$ et il est calculé par :

$$K_{t_n} = \frac{K_{t_{n-1}}}{K_{t_{n-1}} + e^{\Delta t/T}} \quad (12)$$

où, T représente l'échelle temporelle de la variation de l'humidité du sol (Ceballos et al., 2005) et Δt la durée d'un pas de temps. Normalement, le paramètre T est obtenu par calibration à partir d'un set de données de plusieurs années et peut varier de 1 à 40 jours. Ici, la valeur de un jour est choisi arbitrairement. Ce choix n'aura pas un impact négatif sur l'estimation de la chaleur latente étant donné que la masse du lysimètre est couplée à la méthode utilisée. Dans notre cas, le rapport $\Delta t/T$ vaut donc « 1/288 », correspondant à un intervalle de temps de 5 minutes. L'équation est initialisée avec $SWI_{m,t_n} = SWI_{t_1}$ et $K_{t_1} = 1$.

Il est important de noter que la prévision de l'humidité du sol de la couche en profondeur (SWI_m ; Equation 11) fournit des indices de tendance qui sont des valeurs à l'échelle (Gao et al., 2018). Elle doivent être retransformées en SM en utilisant les valeurs minimale ($\sigma_{i,min}$) et maximale ($\sigma_{i,max}$) des séries chronologiques avec :

$$\sigma_{m,t_n} = SWI_{m,t_n} \cdot (\sigma_{m,max} - \sigma_{m,min}) + \sigma_{m,min} \quad (13)$$

où, σ_{m,t_n} est la valeur de l'humidité du sol prévue en profondeur (m^3/m^3). Cette valeur et les mesures de surface peuvent alors être couplées pour obtenir la quantité totale d'eau dans le sol SWC_{t_n} :

$$SWC_{t_n} = \frac{\sigma_{m,t_n} \cdot d_2 + \sigma_{t_n} \cdot d_1}{d_1 + d_2} \quad (14)$$

où, SWC_{t_n} est le profil prévu de l'humidité du sol au temps t et à la profondeur d_2 . d_1 est la profondeur de la couche de surface soit 0.06m dans notre cas et d_2 la profondeur de la couche inférieure.

Néanmoins, l'utilisation de cette méthode suppose que les conditions d'équilibre hydrostatique sont satisfaites, c'est à dire que l'eau dans le sol ne percole plus par gravitation. Toutefois, cette hypothèse de quasi-équilibre ne se produit que longtemps après les précipitations et n'est probablement pas totalement valable de jour en raison de la grande variabilité des conditions environnementales et donc du bilan hydrique (Jackson et al., 1986). Cette hypothèse n'est donc pas complètement vérifiée dans notre cas. L'équilibre hydrostatique du sol n'est pas entièrement atteint.

Pour remédier à cette incertitude, les résultats d'extrapolation sont couplés aux mesures de variation de la masse de la plaque lysimétrique (faites sur des intervalles de temps de 5 minutes et plus grands que la fréquence souhaitée). La profondeur d_2 prise en compte pour le calcul de la quantité d'eau évaporée est choisie afin de faire correspondre la masse de cette dernière déterminée au cours de la durée totale de l'expérimentation à la différence de masse totale mesurée par la plaque lysimétrique au cours de cette même période. La profondeur ainsi obtenue est de 20 cm.

Une fois cette profondeur obtenue par calibration, les profils modélisés peuvent être utilisés pour calculer le volume total d'eau évaporé. Sur les 20 premiers centimètres, l'épaisseur est divisée en 8 sous-couches. La première est la couche 0–6 cm possédant le SWC de référence mesuré par la sonde d'humidité. Les 14 cm suivants sont répartis en 7 couches de 2 cm. Le volume évaporé pour chacune des couches est calculé via :

$$V_{m,t_n} = \frac{SWC_{m,t_n} - SWC_{m,t_{n-1}}}{100} \cdot L \cdot A \quad (15)$$

où, L est l'épaisseur de la couche m et A est l'aire du lysimètre soit 2 m².

Le volume total évaporé au temps t est donc égal à la somme des volumes évaporés pour chacune des sous-couches :

$$V_{0-20,t_n} = \sum V_{m,t_n} \quad (16)$$

Une moyenne mobile sur 18 données, soit 1h30 est effectuée sur les volumes évaporés précédemment calculés. La moyenne mobile permet d'estomper les fluctuations parasites tout en préservant les tendances principales et le volume total évaporé. La chaleur latente est alors calculée suivant l'équation :

$$LE_{t_n} = \frac{V_{0-20,t_n} \cdot \rho \cdot L_{1\sim 2}}{\Delta t \cdot A} \quad (17)$$

où, ρ est la masse volumique de l'eau (997 kg/m³), $L_{1\sim 2}$ est l'enthalpie de vaporisation de l'eau (2264kJ/kg) et Δt est la durée d'un pas de temps (s).

3.2.8 Conduction à une profondeur fixe et conduction à la surface

Une « heat flux plate » (HFP) fournit les mesures de la densité de flux de chaleur transférée par conduction dans le sol (G_d ; Wm^{-2}) à une profondeur fixe d (Campbell Scientific, 2020). Afin de mesurer cette densité de flux dans notre expérience, une HFP01 fabriquée par Hukseflux (Pays-Bas) est utilisée. La tension de sortie V (mV) mesurée par la thermopile présente dans la HFP01 est directement proportionnelle au gradient de température aux bornes de la HFP01 et donc au flux de chaleur local avec :

$$G_p = \Delta t \cdot \lambda \quad (18)$$

où, ΔT est le gradient de température (K) et λ est la capacité thermique du sol ($Wm^{-1}K^{-1}$).

Pour convertir cette tension mesurée en flux de chaleur, il doit être divisé par la constante d'étalonnage (C) de la plaque selon la formule :

$$G_{5cm} = \frac{V}{C} \quad (19)$$

Au final, les flux mesurés sont donnés en watt par mètre carré. Les données sont récoltées à une fréquence de 0,5 Hz et des moyennes sont effectuées toutes les 5 minutes.



FIGURE 15 – Vue du dessus d'une HFP01 (Campbell Scientific, 2020).

La densité de flux conductif à la surface $G_{surface}$, est calculée en ajoutant le flux mesuré à une profondeur fixe, $d = 5$ cm, à la densité de flux d'énergie stockée dans la couche au-dessus entre 0 et 5 cm (S ; Wm^{-2}) (Campbell Scientific, 2020) :

$$G_{surface} = G_{5cm} + S \quad (20)$$

La HFP01 étant placée à 5 cm de profondeur. Il reste à calculer l'énergie stockée dans les 5 premiers centimètres du sol (S). La capacité thermique du sol et la variation de la température du sol, ΔT , pour chaque pas de temps, Δt , sont nécessaires pour calculer l'énergie stockée (Mermoud, 2006), par l'équation :

$$S = \frac{\Delta T \cdot C_{humide} \cdot d}{\Delta t} \quad (21)$$

où, ΔT est la variation de température moyenne sur la couche ($^{\circ}\text{C}$), C_{humide} est la capacité thermique du sol humide ($\text{Jk}^{-1}\text{m}^{-3}$), d est l'épaisseur de la couche (m) et Δt est le pas de temps (s).

La capacité thermique du sol humide est calculée en moyennant la capacité thermique de la phase solide du sol sec et celle de l'eau contenue dans le sol (moyenne à pondération volumique) à l'instant t selon la formule :

$$C_{humide} = C_{sec} \cdot \rho_{sol} + C_{eau} \cdot \sigma \quad (22)$$

où, C_{sec} est la capacité thermique d'un sol sec, ρ_{sol} est la densité apparente du sol, C_{eau} est la capacité thermique de l'eau et σ est la teneur en eau volumétrique. La capacité thermique de l'air est négligée.

Dans l'écotron, la densité apparente est connue grâce à une campagne de mesure par échantillonnage effectuée en 2017. A Lonzée, des échantillonnages respectant les normes ICOS sont effectués régulièrement. La teneur en eau est déterminée grâce à un capteur d'humidité du sol (section 2.3.3). Une valeur de $500 \text{ kJk}^{-1}\text{m}^{-3}$ pour la capacité thermique du sol sec est une valeur raisonnable pour la plupart des sols limoneux (Bussière et al., 1992). Une valeur de $4600 \text{ kJk}^{-1}\text{m}^{-3}$ pour la capacité thermique de l'eau est utilisée (Mermoud, 2006).

3.2.9 Albédo

Le calcul de l'albédo est le rapport entre le rayonnement solaire réfléchi et incident, mesurés par les deux pyranomètres (regardant respectivement vers le bas et vers le haut, voir section 3.1.1) :

$$Albedo = \frac{SW_{out}}{SW_{in}} \quad (23)$$

Il est donc compris entre 0 et 1. Son calcul est limité aux périodes centrées sur le zénith, les valeurs de rayonnement solaire proches de zéro produisant des résultats erratiques. Il est à noter que l'albédo de surface diminue avec l'augmentation de la teneur en humidité du sol, le sol humide étant plus sombre (Guan et al., 2009).

4 Résultats

Cette partie contient les résultats (mesures du bilan énergétique et de ses déterminants) issus de la station ICOS de Lonzée pour la période de 3 jours (deux nuits) comprise entre le 11/09/2018 00h00 et le 14/09/2018 00h00 et les résultats obtenus via l'expérimentation en écotron. Dans l'écotron, deux périodes distinctes de trois jours/deux nuits sont analysées ; l'une trois jours après la pluie programmée avant l'expérimentation (60 heures), l'autre deux semaines après la pluie (13,5 jours). Les deux périodes sont nommées respectivement « sol humide » et « sol sec ».

4.1 Caractéristiques physiques

Dans cette partie, les caractéristiques physiques et environnementales autres que les flux d'énergie sont présentées. Ces caractéristiques sont la température de l'air, le vent et la caractérisation du sol via sa température, son humidité, son émissivité, sa porosité et son albédo.

4.1.1 Température

A Lonzée, la figure 16-1 indique que la température de l'air diminue progressivement au cours du scénario avec un maximum de 25,9°C en journée lors de la première journée ensoleillée pour finir avec un maximum de 17°C lors de la journée nuageuse. La température de l'air moyenne durant la première nuit (de h = 20h00 à 30h00) est de 16,7°C et de 13,7°C pour la seconde nuit (de h = 44h00 à 54h00). La température de l'air est plus haute pendant la nuit dégagée que la nuit couverte avec une différence moyenne de 3°C. La température de l'air de l'écotron correspond parfaitement à celle de Lonzée, quel que soit le scénario.

La figure 16-2 montre que la température de la surface du sol à Lonzée ne suit pas les mêmes tendances que la température de l'air. La température de la surface maximum atteinte est quasiment identique pour les deux premières journées avec une valeur comprise entre 33,2 - 34,3°C et chute lors de la troisième journée atteignant 24,2°C. Pendant la nuit, la tendance est inversée par rapport à celle de la température de l'air. En effet, le sol en surface est plus chaud durant la deuxième nuit (couverte) de 0,3°C.

En moyenne, la température du sol dans l'écotron est de 22,8°C et de 25,6°C respectivement pour le scénario humide et sec contre 21,1°C à Lonzée. Le sol de l'écotron est donc significativement plus chaud, avec une grande différence entre le scénario humide et sec. En journée, le scénario humide possède une température en surface comparable à celle de Lonzée. La température de la surface du scénario sec est quant à elle significativement plus élevée en journée que le sol de Lonzée. Cette différence évolue progressivement de 6,3°C vers 3,3°C au cours de la séquence. Pendant la nuit, la température de la surface du sol de l'écotron pour le cas sec est en moyenne supérieure de 3,2°C et de 1,5°C respectivement lors de la nuit dégagée et couverte. Pour le cas humide, ces valeurs sont de 5,4°C et 2,8°C. L'importance des différences de températures diminue donc à mesure que la couverture nuageuse s'intensifie. A 5 cm de profondeur, l'importance des fluctuations jour/nuit et des différences diminuent mais les tendances sont conservées.

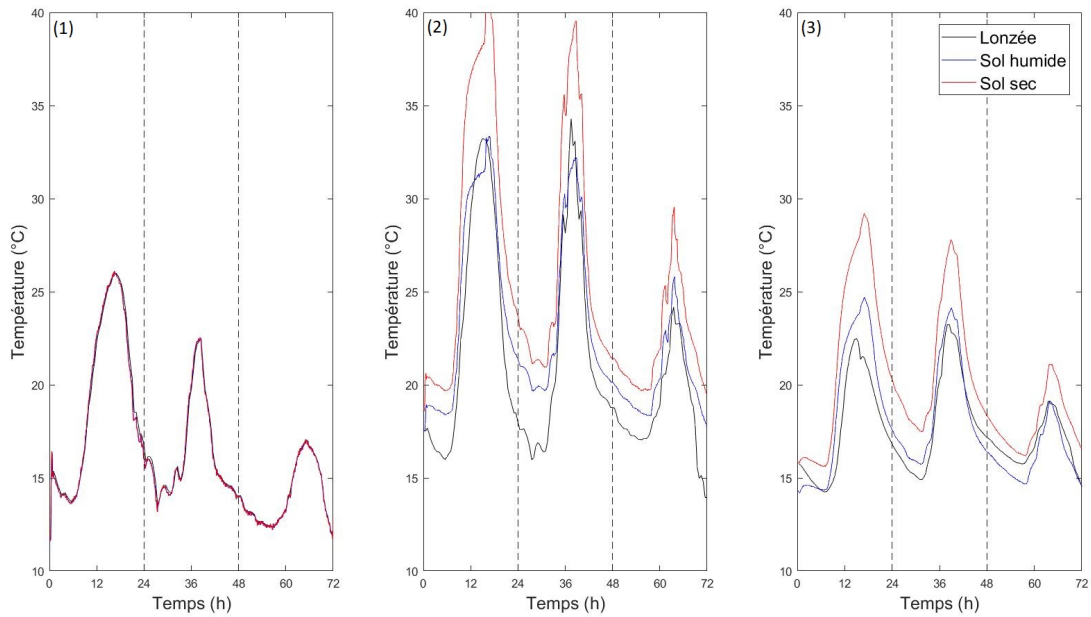


FIGURE 16 – Température (1) de l'air, (2) de la surface du sol et (3) à 5 cm de profondeur à Lonzée (noir) et dans l'écotron pour un sol "humide" (bleu) et un sol "sec" (rouge).

La figure 17 permet de constater que le rapport de la température de surface dans l'écotron par rapport à celle de Lonzée varie de 1,07 à 1,42 pour le sol sec (avec une moyenne de 1,2) et de 0,92 à 1,29 (moyenne de 1,1) pour le sol humide au cours de l'expérimentation. De plus, les tendances sont pratiquement les mêmes pour chacun des deux scénarios. La corrélation de ce rapport entre le scénario humide et le scénario sec est de 0,4.

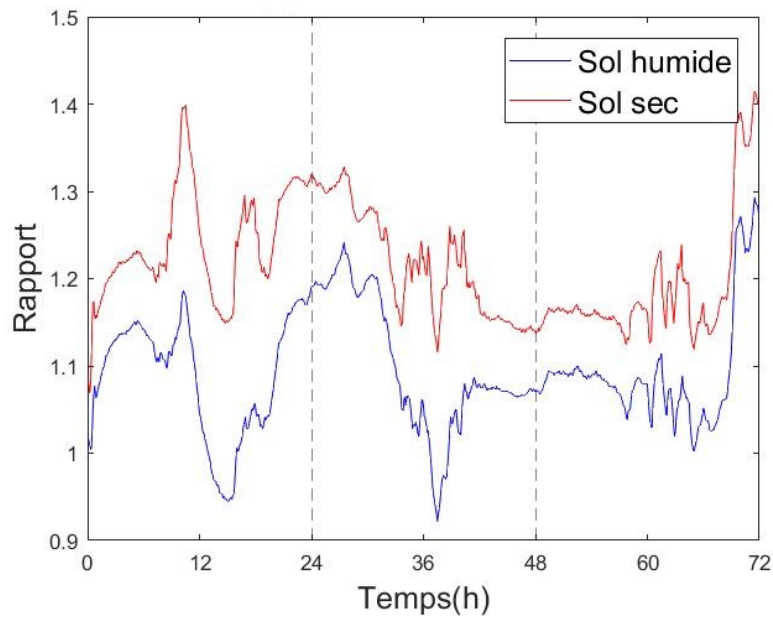


FIGURE 17 – Rapport entre les températures de la surface dans l'écotron et à Lonzée pour un sol « humide » et un sol « sec ».

4.1.2 Vitesse du vent

La figure 18 montre que le vent est irrégulier à Lonzée. La vitesse de vent horizontale peut atteindre 6,61 m/s au cours de la première journée plus venteuse et à pour valeur moyenne 2,8 m/s. La vitesse moyenne absolue verticale à Lonzée est de 0,07 m/s. Dans l'écotron, le vent est stable, unidirectionnel au cours de la période observée. La vitesse moyenne du vent horizontale et verticale dans l'écotron sont respectivement de 0,15 m/s et de 0,08 m/s. La reproduction de vitesse moyenne du vent horizontale et verticale est donc totalement discordante.

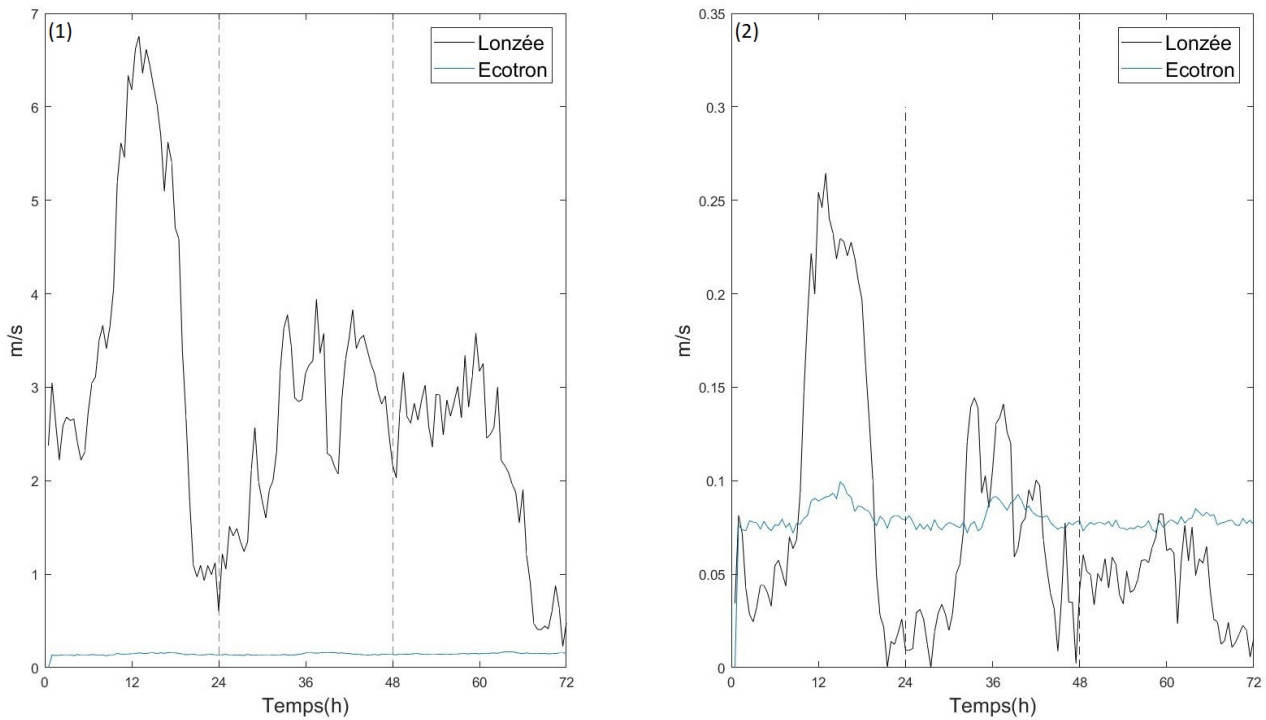


FIGURE 18 – Vitesse du vent absolue (1) horizontale et (2) verticale à Lonzée et dans l'écotron.

La figure 19 montre que la vitesse de friction moyenne U^* est de 0,2 m/s à Lonzée contre 0,05 m/s dans l'écotron. Dans la lignée des vitesses de vent, la vitesse de friction dans l'écotron est également beaucoup plus stable et faible que celle de Lonzée.

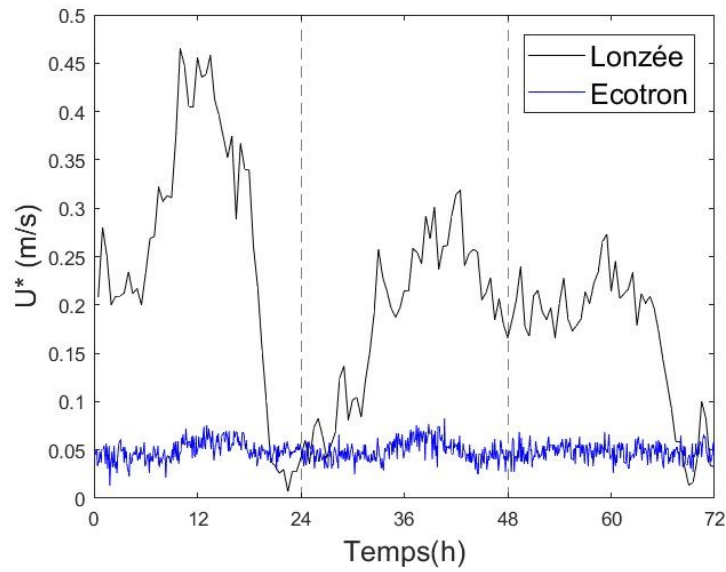


FIGURE 19 – Vitesse de friction U^* à Lonzée et dans l'écotron.

La figure 20 présente des résistances aérodynamiques moyennes de 325 et 78 respectivement à Lonzée et dans l'écotron. Néanmoins, l'importance de cette différence est en grande partie due à deux pics aux heures 23 et 70 à Lonzée. Sans ces pics, la résistance aérodynamique se trouve dans une gamme de valeur apparentée.

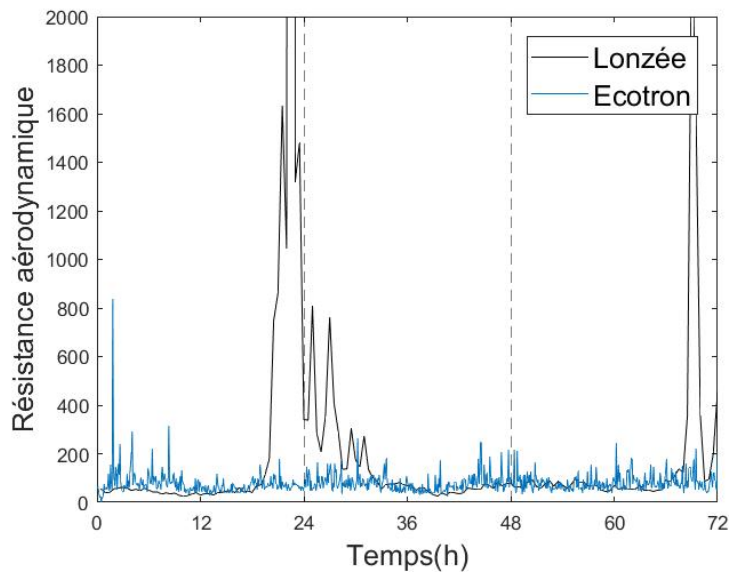


FIGURE 20 – Résistances aérodynamiques à Lonzée et dans l'écotron.

4.1.3 Humidité du sol

La figure 21 présente une humidité des 5 premiers centimètres du sol à Lonzée relativement stable au cours de l'expérimentation. Une pluie de 13 mm avait eu lieu six jours avant la séquence étudiée faisant remonter cette humidité à 29,5%. Au début de la séquence étudiée elle était de 25,8%. Après la période de trois jours, elle a perdu 1,2% pour atteindre la valeur de 24,6%. Les oscillations jour-nuit quant à elles correspondent à un artefact lié à un effet température altérant les mesures fournies par les capteurs d'humidité. Ce point est discuté ultérieurement à la section 5.5.1.

Dans l'écotron, le scénario humide et le scénario sec sont bien distinguables. Le sol du scénario humide débute l'expérimentation avec une humidité de 30,1% et atteint la valeur de 24,6% en fin d'expérience. Une perte de 5,5% est constatée, soit plus de quatre fois plus qu'à Lonzée. L'humidité du sol sec est plus stable, passant de 21,5% à 20,1% au cours des trois jours, diminution comparable à celle de Lonzée mais avec un décalage de 4,4% vers le bas.

Il est intéressant de constater qu'après 36 heures, soit la moitié de l'expérience, l'humidité du sol à Lonzée et dans l'écotron pour un sol humide atteignent des valeurs comparables. Cette similitude permettra de comparer les comportements à Lonzée et sur sol humide en excluant l'humidité du sol comme cause de différence. De plus, des augmentations de l'humidité du sol intra journalières sont particulièrement visibles à Lonzée et au cours du scénario sec.

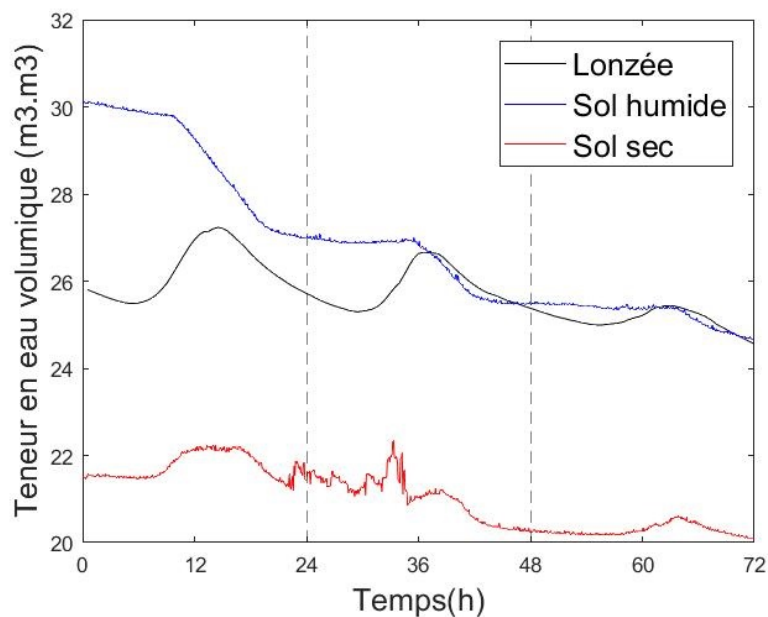


FIGURE 21 – Humidité du sol dans les 5 premiers cm à Lonzée et dans l'écotron pour un sol "humide" et un sol "sec".

La figure 22 montre les courbes de modélisation de l'humidité du sol de l'écotron pour le sol humide aux profondeurs 10, 15 et 20 cm. Ces courbes sont très proches les unes des autres et indiquent donc que la variation de l'humidité diminue avec la profondeur et ce de manière exponentielle.

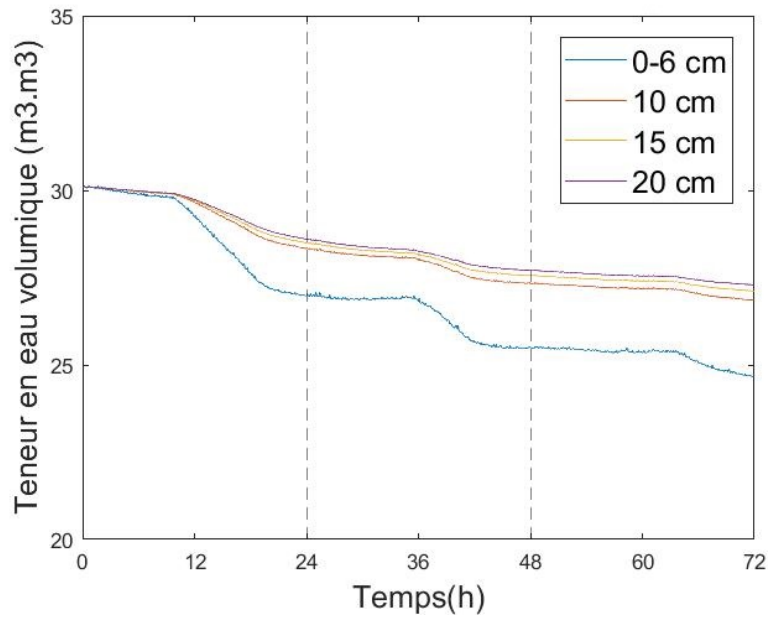


FIGURE 22 – Évolution de l'humidité du sol avec la profondeur (0-20 cm) dans l'écotron sur sol « humide » via la méthode expF.

4.1.4 Émissivité du sol

La figure 23 montre une émissivité des sols comprise entre 0.94 et 0.945 pour l'ensemble des scénarios via l'équation 5.

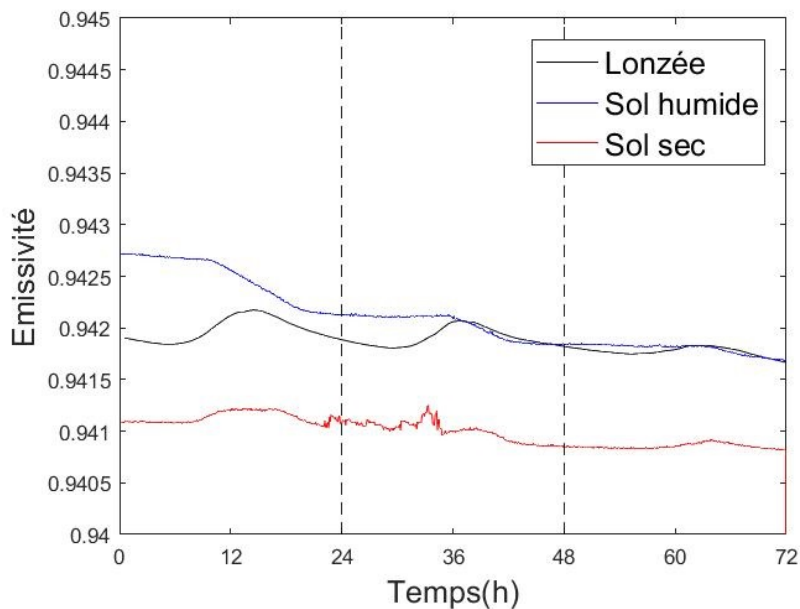


FIGURE 23 – Emissivité du sol de Lonzée et de l'écotron pour un sol "humide" et un sol "sec".

4.1.5 Porosité du sol

La figure 24 présente une diminution graduelle de la porosité du sol à Lonzée avec la profondeur débutant avec la valeur de 55% en surface et atteignant 43% à 40 cm de profondeur. Dans l'écotron, la porosité se situe dans la même gamme de valeur fluctuant entre 50 et 40% sauf en surface où une porosité plus élevée est cependant observée (70%). Cette valeur élevée est certainement due à la méthode d'échantillonnage utilisée. Il est en effet compliqué d'obtenir un échantillon complet en surface lors d'une prise d'échantillonnages par anneau compte tenu des aspérités et hétérogénéités que la surface comporte. Les mesures de porosité en surface peuvent donc être dépendantes de l'appréciation de la personne effectuant l'opération. Or cette personne n'est pas la même à Lonzée et dans l'écotron.

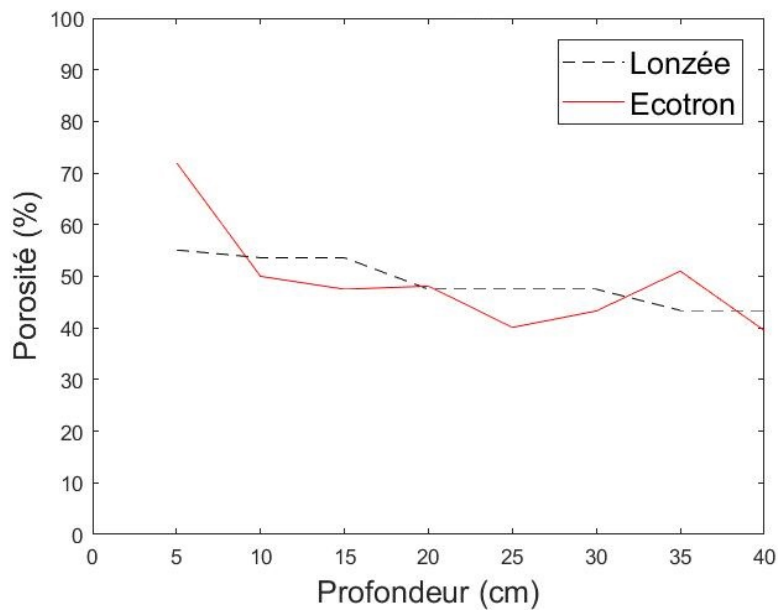


FIGURE 24 – Porosité du sol de 0 à 40 cm à Lonzée et dans l'écotron.

4.1.6 Albédo

Comme précisé en section 3.2.9, seules les valeurs d'albédo compris entre 8h00 et 16h00 sont calculées. La figure 25 montre que les albédos de Lonzée et de l'écotron à humidité équivalente lors de la troisième journée, sont significativement différents, avec une valeur moyenne de 0,19 à Lonzée pour 0,09 dans l'écotron. L'albédo moyen pour le sol humide est de 0,07 contre 0,19 pour le sol sec. Le sol sec atteint donc un albédo similaire à celui de Lonzée en étant plus sec et l'albédo augmente significativement avec la baisse d'humidité du sol (le sol sec est plus clair).

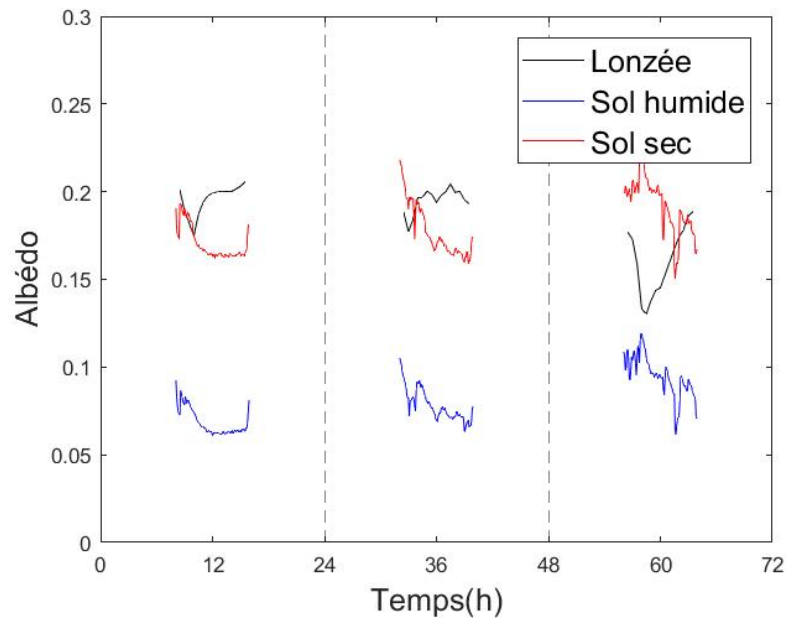


FIGURE 25 – Albédo à Lonzée et dans l'écotron pour un sol "humide" et un sol "sec".

4.2 Flux radiatifs

L'analyse débute par la comparaison de chaque flux radiatif sur le site de Lonzée et dans l'écotron. Ensuite, les bilans radiatifs complets des trois différents scénarios sont comparés.

La figure 26-1 présente une diminution progressive de SW_{in} à Lonzée avec l'intensité de la couverture nuageuse atteignant la valeur maximale de 700 Wm^{-2} pendant la première journée et 321 Wm^{-2} durant la dernière. SW_{in} est pratiquement égale à zéro la nuit. Dans l'écotron, la limite technique maximale d'éclairement possible est atteinte au cours des deux premières journées. Cette limite apparaît aux alentours de 486 Wm^{-2} et 476 Wm^{-2} respectivement pour l'expérimentation humide et sec. De plus, SW_{in} dans l'écotron est légèrement supérieur à zéro la nuit avec une valeur moyenne de 16 Wm^{-2} pour les deux scénarios. Ceci est dû à la manière dont les valeurs consignées ont été obtenues. Le dispositif lumineux permettant de reproduire ces conditions nécessitent des consignes exprimées en PPFD défini comme la quantité du PAR qui arrive effectivement sur la plante. En général, un facteur « 2 » est observé entre PPFD et SW_{in} . Or les valeurs disponibles dans les données ICOS de la station de Lonzée ne sont pas égales à zéro pendant la nuit (à cause d'un capteur mal calibré). Pendant la troisième journée, les SW_{in} ont une intensité semblable atteignant les valeurs moyennes de 105, 103 et 104 Wm^{-2} respectivement à Lonzée, pour le sol humide et le sol sec. SW_{in} est donc correctement reproduit lors de la troisième journée.

La figure 26-2 montre que SW_{out} est égal à zéro la nuit et est plus bas dans l'écotron au cours de l'expérimentation. Néanmoins, SW_{out} à Lonzée et pour le scénario sec atteint des valeurs pratiquement similaires à l'exception des périodes pour lesquelles la limitation technique de l'éclairement est atteinte comme c'est le cas pour la troisième journée avec une différence des moyennes de 4% contre 54% pour le scénario humide.

Contrairement aux deux précédents flux, la figure 26-3 montre que LW_{in} est supérieur durant la deuxième moitié de la séquence observée à Lonzée. Un plateau à 379 Wm^{-2} est observable de

l'heure 34 à l'heure 69, période durant laquelle la couverture nuageuse est importante. LWin à Lonzée est constamment inférieur à LWin dans l'écotron. La différence entre LWin à Lonzée et dans l'écotron est plus importante durant la première journée atteignant la valeur de 134 Wm^{-2} pour une différence moyenne de 70 Wm^{-2} durant l'entièreté de l'expérience. Dans l'écotron, LWin est similaire pour les deux cas étudiés. LWin dans l'écotron est fortement corrélé à la température de l'air avec une valeur de 0,99 contre 0,32 à Lonzée.

La figure 26-4 montre que LWout est le flux radiatif le moins dissemblable entre les différents scénarios. Des valeurs moyennes de 401, 410 et 426 Wm^{-2} sont obtenues à Lonzée et dans l'écotron pour la séquence humide et sec respectivement. LWout est donc supérieur dans l'écotron et ce principalement lors du scénario sec. Cela est expliqué par la température à la surface du sol de l'écotron plus élevée que celle de la surface du sol de Lonzée (voir Figure 16-1).

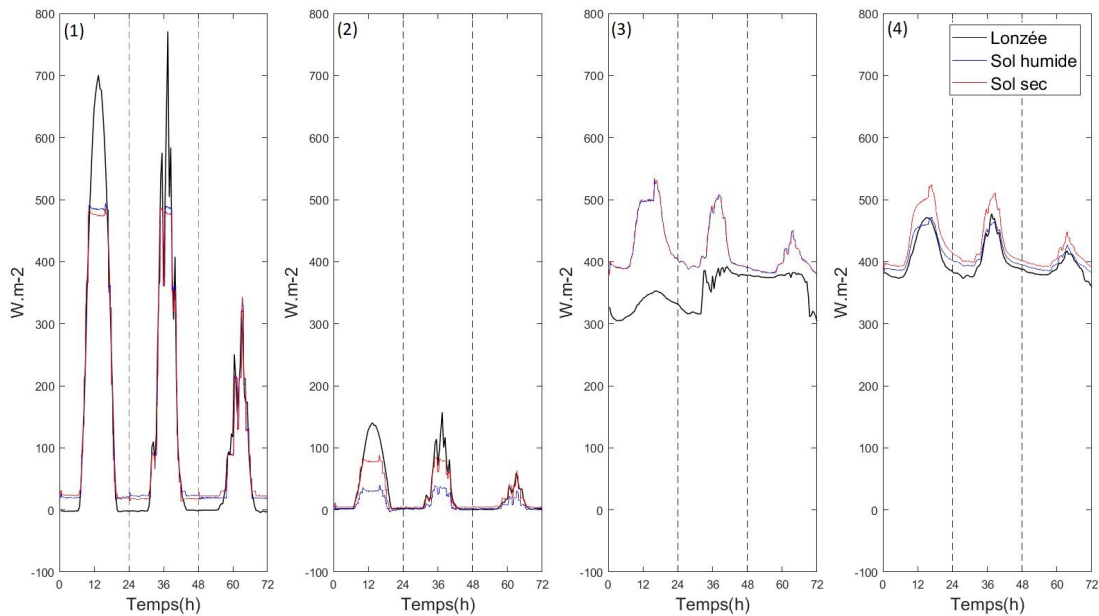


FIGURE 26 – (1) SWin, (2) SWout, (3) LWin et (4) LWout de Lonzée et de l'écotron pour un sol "humide" et un sol "sec".

La figure 27 contient des valeurs moyennes de 65, 135 et 105 Wm^{-2} pour la radiation nette (valeur positive égale gain) à Lonzée et dans l'écotron pour la séquence humide et sec respectivement. La radiation nette est donc en moyenne deux fois supérieure dans l'écotron pour le sol humide que celle de Lonzée. Cependant, au cours de la troisième journée, nuageuse, les différences de radiation nette sont légèrement atténuées. Les valeurs moyennes sont respectivement de 68, 99 et 80 Wm^{-2} à Lonzée et pour le scénario humide et sec. Lors de la première nuit, soit la nuit dégagée, la radiation nette moyenne tend vers zéro dans l'écotron alors qu'elle est significativement négative à Lonzée avec une valeur moyenne de -61 Wm^{-2} . Durant la deuxième nuit, la radiation nette avoisine la valeur de zéro pour l'ensemble des trois scénarios.

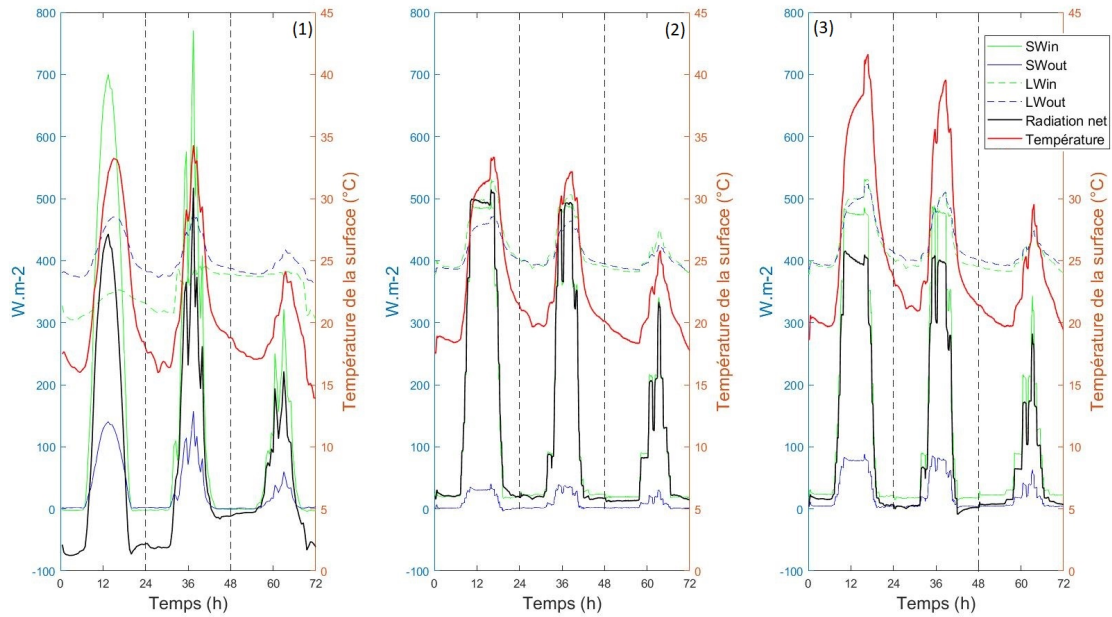


FIGURE 27 – Bilan radiatif (1) à Lonzée et dans l'écotron pour (2) un sol "humide" et (3) un sol "sec" en parallèle avec les températures à la surface des sols.

4.3 Flux turbulents et conductif

Maintenant que les flux radiatifs ont été présentés, les flux turbulents et conductif sont étudiés afin de compléter le bilan énergétique qui sera réalisé par la somme de tous les flux. La chaleur sensible n'est calculée que pour le scénario humide. Sur ce graphique, la chaleur sensible calculée pour le sol humide est utilisée pour le sol sec afin de limiter l'erreur d'interprétation des résultats bien que la méthode d'Eddy covariance aurait certainement donné des résultats sensiblement différents. Les conclusions apportées ne seront pas impactées par cette simplification étant donné la remise en question ultérieure de la méthode permettant d'approcher la valeur du flux de chaleur sensible.

La figure 28-1 montre que la densité de flux de chaleur sensible est similaire pour les deux premières journées à Lonzée avec une valeur moyenne de 95 et 100 Wm^{-2} . La troisième journée possède quant à elle une valeur moyenne significativement plus basse égale à 54 Wm^{-2} . Pendant la nuit, la chaleur sensible est faiblement négative lors de la première nuit et proche de zéro durant la seconde. Dans l'écotron, la chaleur sensible calculée grâce à la méthode d'Eddy covariance est très significativement inférieure à celle de Lonzée. Sa valeur moyenne est de 29 et 25 Wm^{-2} pour les deux premières journées et de 19 Wm^{-2} lors de la dernière.

La figure 28-2 présente une densité de flux de chaleur latente (LE) à Lonzée nulle la nuit et évoluant progressivement de 20 Wm^{-2} en moyenne lors de la première journée à 9 Wm^{-2} lors des deux derniers jours. Dans l'écotron, la chaleur latente est remarquablement différente entre le scénario humide et le scénario sec. Avec des conditions d'humidité du sol plus élevées au départ, le flux de chaleur latente est très significativement supérieur que la chaleur latente mesurée à Lonzée. La chaleur latente pour le scénario humide décroît progressivement de 146 à 31 Wm^{-2} en moyenne sur la journée au cours de la période observée. Le calcul de la chaleur latente pour un sol sec ne décèle aucune tendance intra journalière, le flux calculé est instable et irrégulier. La valeur moyenne

de LE pour l'ensemble de la période est de 8 Wm^{-2} à Lonzée, d'ordre de grandeur comparable avec le sol sec (13 Wm^{-2}) pour le sol sec et quatre fois plus grand que pour le sol humide (64 Wm^{-2}). D'autre part, l'évaporation est également présente la nuit dans l'écotron avec une valeur moyenne de 35 Wm^{-2} lors du scénario humide. Il est également intéressant de constater qu'au sein de l'écotron, le pic de chaleur latente journalier perdure au minimum 1 heure supplémentaire que le flux de chaleur latente à Lonzée.

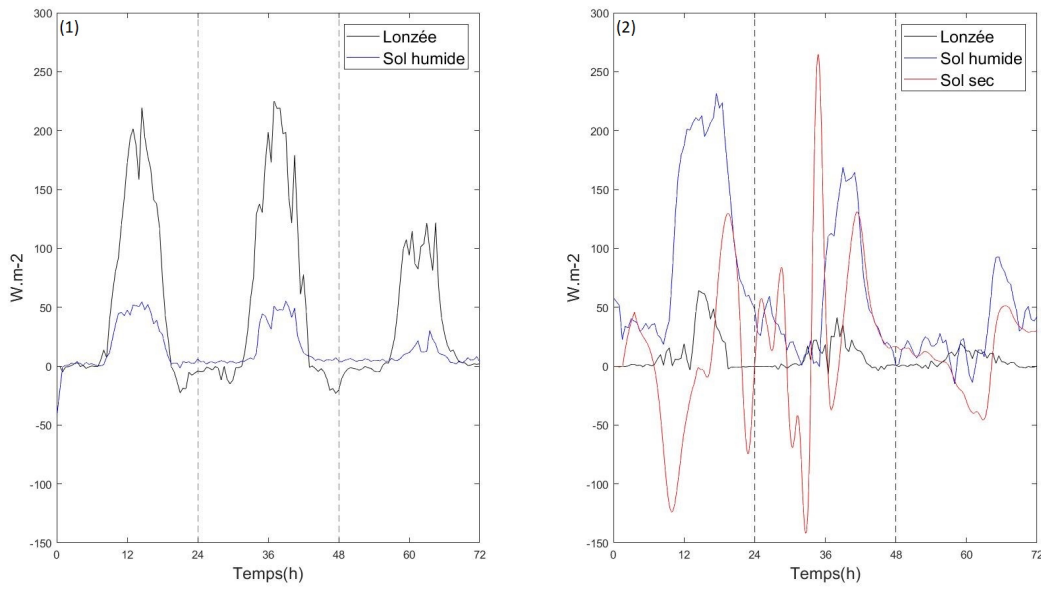


FIGURE 28 – (1) Chaleur sensible et (2) chaleur latente à Lonzée et dans l'écotron pour un sol "humide" et un sol "sec".

Suite aux deux constatations précédentes concernant le déphasage temporel d'une heure de LE dans l'écotron et à l'instabilité du flux de chaleur latente uniquement pour le scénario sec, deux corrections sont apportées aux flux de chaleur latente précédemment calculés. Ces corrections permettent d'atténuer l'erreur liée au biais des mesures d'humidité du sol dû à la température de la sonde discutée à la section 4.1.3. La figure 29 reprend les nouvelles densités de flux de chaleur latente obtenues après un retrait d'une heure effectué sur la chaleur latente dans l'écotron. Une moyenne mobile sur 12 heures est également intégrée pour le flux de chaleur latente sur sol sec. Les nouveaux résultats sont utilisés lorsque les flux de chaleur latente sont évoqués au sein des graphiques à venir.

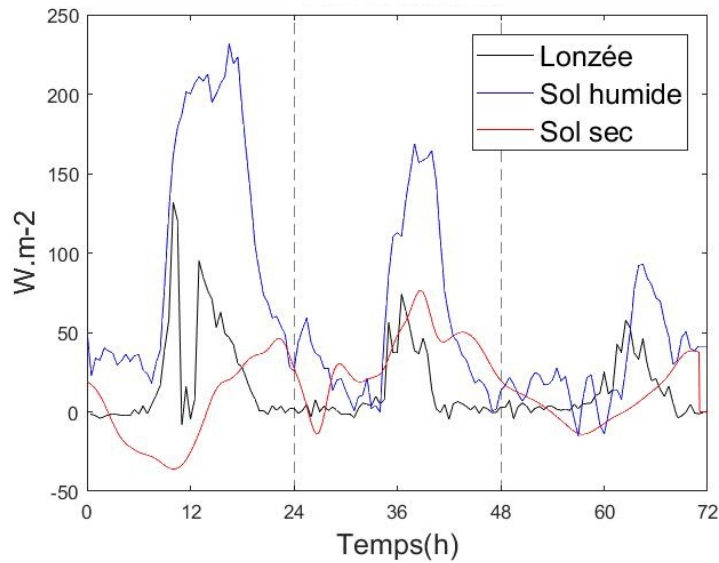


FIGURE 29 – Chaleur latente modifiée dans l'écotron pour un sol "humide" et un sol "sec".

Le rapport de Bowen est obtenu via le rapport de H sur LE et est notamment utilisé pour caractériser les échanges dans la couche limite. La figure 30 présente un rapport de Bowen très élevé et irrégulier à Lonzée lors de la première journée. Une valeur moyenne de 6,4 est obtenue pour les deux journées suivantes. Dans l'écotron, le rapport de Bowen est quasiment nul tout au long de l'expérience. Seul un pic à la valeur de 2 est visible au cours de la dernière journée.

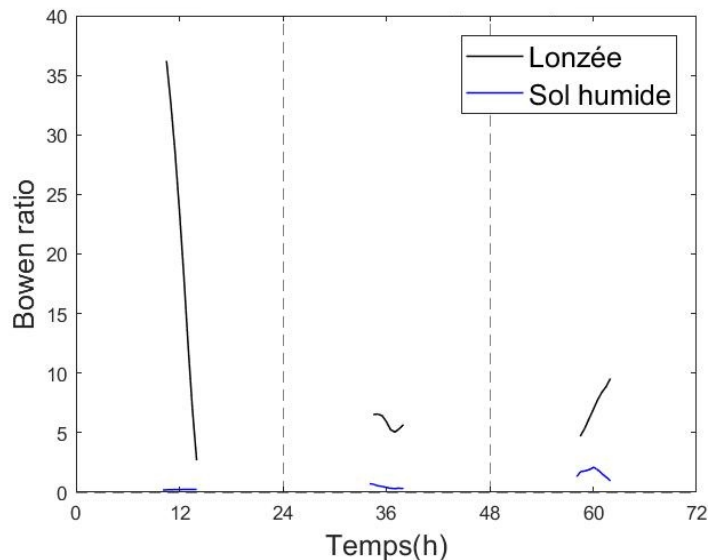


FIGURE 30 – Bowen ratio à Lonzée et dans l'écotron.

La figure 31 présente des tendances des flux conductifs de surface similaires pour l'ensemble des scénarios étudiés. Néanmoins de légères différences sont visibles. Du plus petit au plus grand, la conduction à Lonzée, sur le sol humide et sur le sol sec possède une valeur moyenne de -0.6 , 5 et 14 Wm^{-2} au cours de la séquence observée. Pendant la nuit, la conduction est négative avec une valeur moyenne approximative de -25 Wm^{-2} pour les trois scénarios.

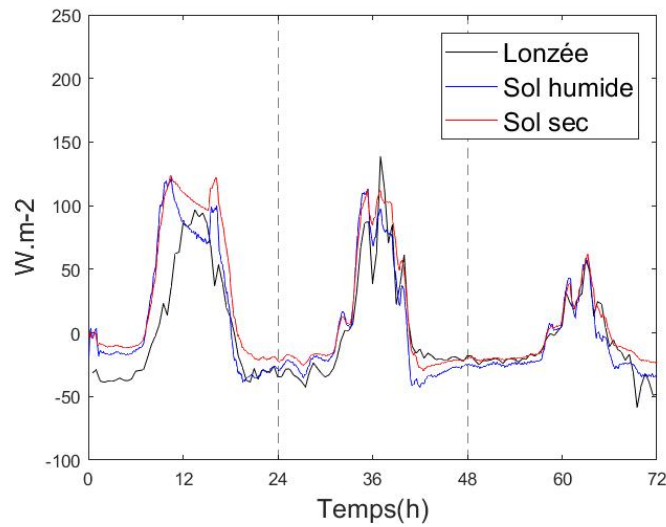


FIGURE 31 – Conduction à Lonzée et dans l'écotron pour un sol "humide" et un sol "sec".

Les figures 32 montrent que la somme des densités de flux diffère d'un scénario à l'autre. Des valeurs moyennes de 45, 83 et 43 Wm^{-2} sont obtenues à Lonzée et dans l'écotron pour la séquence humide et sec respectivement. En moyenne, la somme de H, LE et G est donc équivalente à Lonzée et pour le sol sec alors qu'elle est pratiquement deux fois supérieure pour le sol humide. Néanmoins, des différences persistent entre Lonzée et le sol sec. La plage de variation est plus importante à Lonzée atteignant des valeurs négatives comprises entre $-20 Wm^{-2}$ et $-80 Wm^{-2}$ la nuit et des valeurs élevées en journée. Sur le sol sec, les variations sont beaucoup moins importantes et la somme des flux turbulents et conductif est nulle la nuit.

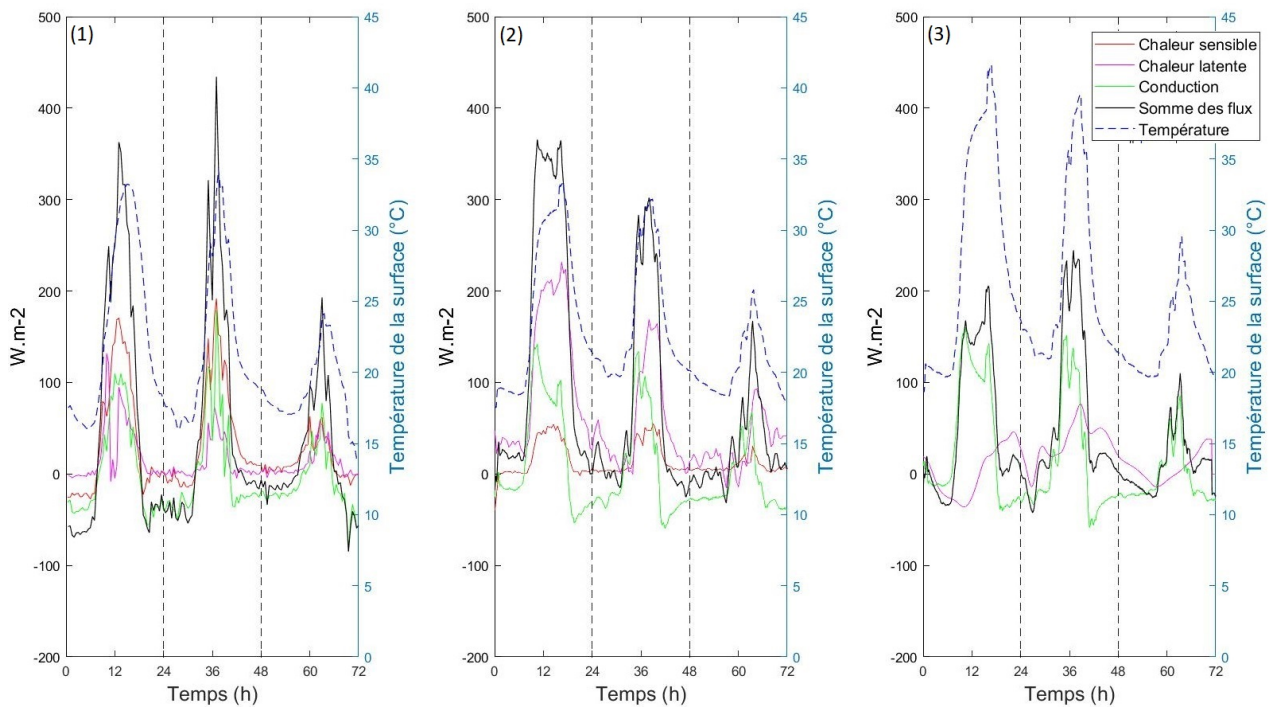


FIGURE 32 – Bilan des flux turbulents et conductif (1) à Lonzée et dans l'écotron pour (2) un sol "humide" et (3) un sol "sec" en parallèle avec les températures à la surface des sols.

4.4 Fermeture du bilan énergétique

Les figures 33 présentent des valeurs moyennes de 495, 556 et 555 Wm^{-2} pour les flux entrants à Lonzée et dans l'écotron pour la séquence humide et sec respectivement. Le total des flux entrants est donc en moyenne inférieure de 60 Wm^{-2} à Lonzée et équivalente pour les deux scénarios étudiés dans l'écotron. Les flux sortants suivent la même tendance avec des moyennes de 475, 503 et 492 Wm^{-2} . La différence est cependant moins importante. La fermeture du bilan énergétique de Lonzée est imparfaite. Le reste moyen est de 20 Wm^{-2} . Néanmoins, à mesure que les flux entrants et sortants diminuent, la valeur du reste tend vers zéro. Dans l'écotron, la même tendance est observée bien que la valeur moyenne du reste soit plus élevée de 44 Wm^{-2} pour le sol humide et de 52 Wm^{-2} pour le sol sec.

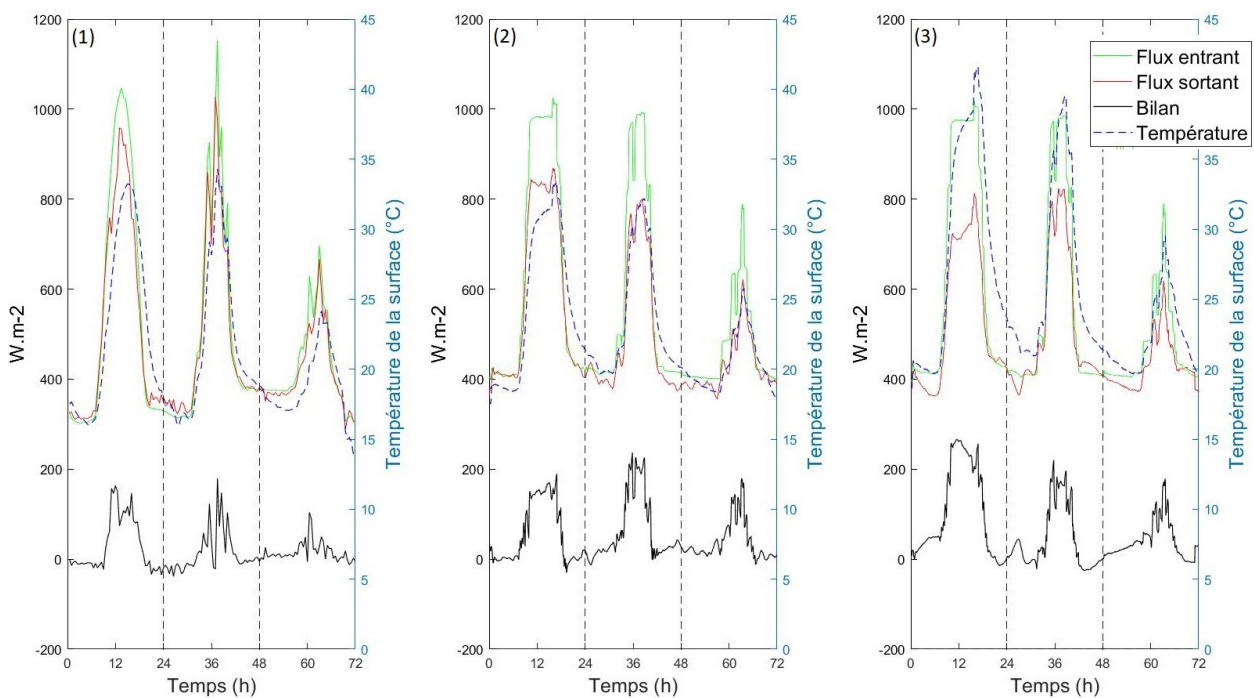


FIGURE 33 – Somme des flux entrants et sortants (1) à Lonzée et dans l'écotron pour (2) un sol "humide" et (3) un sol "sec".

La figure 34 montre que le reste représente 0.5% de la somme des flux entrants en moyenne à Lonzée. Néanmoins, cette valeur oscille entre valeurs positives et négatives. De plus, la qualité de la fermeture du bilan diminue à mesure que les sommes des flux entrants ou sortants augmentent le jour. La moyenne en journée évolue donc progressivement de 11% à 3% au fil de l'expérimentation et atteint la valeur de 20%. La nuit par contre la fermeture est négative avec une valeur moyenne de -5%. Dans l'écotron, la qualité de la fermeture est moins bonne. En moyenne, le reste représente 8% de la somme des flux entrants pour le sol humide et le sol sec. L'importance relative du reste atteint des valeurs beaucoup plus élevées, jusqu'à 30%. En journée, le reste atteint régulièrement la valeur de 25% lorsque la qualité de la fermeture est mauvaise.

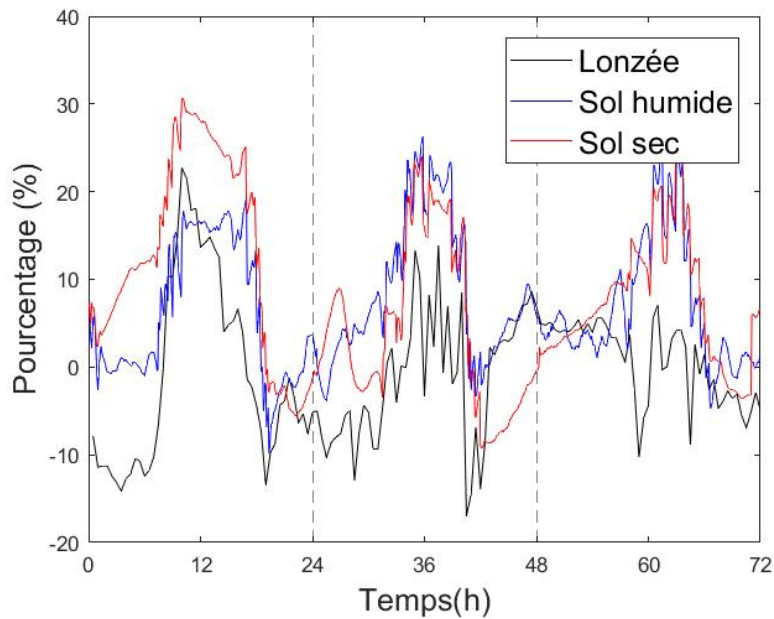


FIGURE 34 – Qualité de la fermeture du bilan énergétique soit : Reste/Flux entrants.

La figure 35 est obtenue via la comparaison des restes du bilan énergétique pour les deux scénarios au sein de l'écotron en omettant délibérément la prise en compte de la chaleur sensible calculée précédemment car sa mesure est sujette à caution. La valeur moyenne de cette densité de flux restante prend la valeur de 66 et 76 Wm^{-2} respectivement pour le sol humide et le sol sec. Pour le scénario humide, les valeurs en journée du flux restant évoluent progressivement en passant jour après jour par les valeurs de 130, 121 et 67 Wm^{-2} contre 202, 107 et 73 Wm^{-2} . La différence la plus marquée a donc lieu lors du premier jour alors que les flux restants lors du dernier jour sont quasiment identiques.

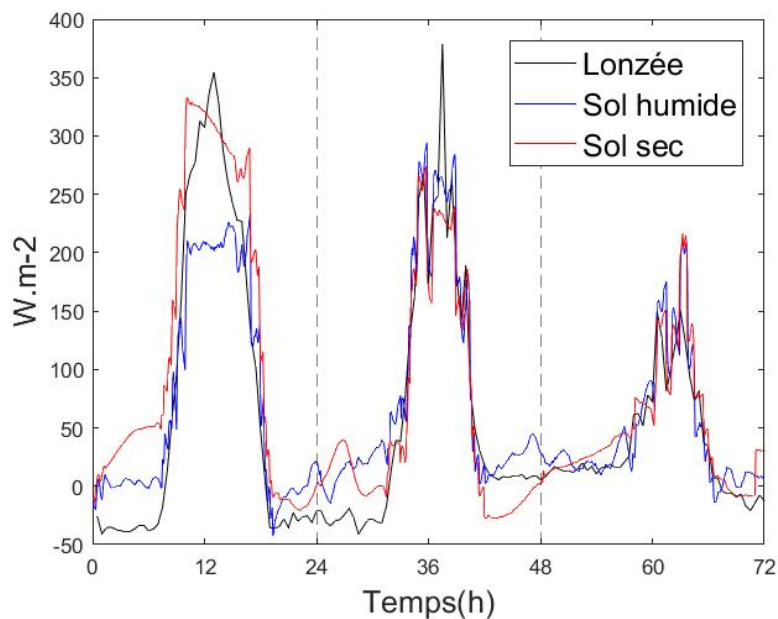


FIGURE 35 – Fermeture du bilan énergétique avec omission du flux H à Lonzée et dans l'écotron pour un sol "humide" et un sol "sec".

4.5 Modélisation de l'impact de la température de surface sur la phénologie du blé tendre

Dans cette partie, les observations précédentes sur la température à la surface du sol sont utilisées afin d'obtenir des prédictions sur l'impact éventuel que pourrait avoir le bilan énergétique de l'écotron sur une culture de blé tendre. Il a été constaté sur la figure 16-2 que le rapport des températures à la surface du sol dans l'écotron par rapport à celles de Lonzée pouvait varier entre 1,1 et 1,2 en moyenne en fonction des scénarios étudiés. Deux scénarios sont donc reproduits en multipliant la température de la canopée de Lonzée par les coefficients 1,1 et 1,2. Ces scénarios sont respectivement appelés Rapport 1.1 et Rapport 1.2. Il s'agit d'une première approche simplifiée éloignée de la réalité. Pour être plus réaliste, il faudrait réaliser un scénario avec un rapport évoluant au cours du temps entre des valeurs comprises dans la plage de valeur mesurée, soit entre 1,07 et 1,42 pour le sol sec et 0,92 et 1,29 pour le sol humide..

Afin d'obtenir ces scénarios, les valeurs de la température de la canopée mesurée à la station de Lonzée durant la période du 10/10/2015 au 10/10/2016 sont utilisés. La date du 10 octobre constitue une date raisonnable pour le semis du blé tendre et représente donc le début de la culture.

4.5.1 Simulation des températures en surface

Le graphique 36 montre que les températures moyennes observées au cours de l'année pour chacun des scénarios sont de 10°C, 11°C et 12°C respectivement pour Lonzée, le scénario 1.1 et le scénario 1.2. En été, lorsque les températures sont maximales, l'écart entre Lonzée et le scénario 1.2 peut atteindre 7,1°C. Les maxima de température atteints pour les valeurs à la demi-heure sont de 35.5°C, 39.1°C et 42.7°C respectivement pour Lonzée, le scénario 1.1 et le scénario 1.2.

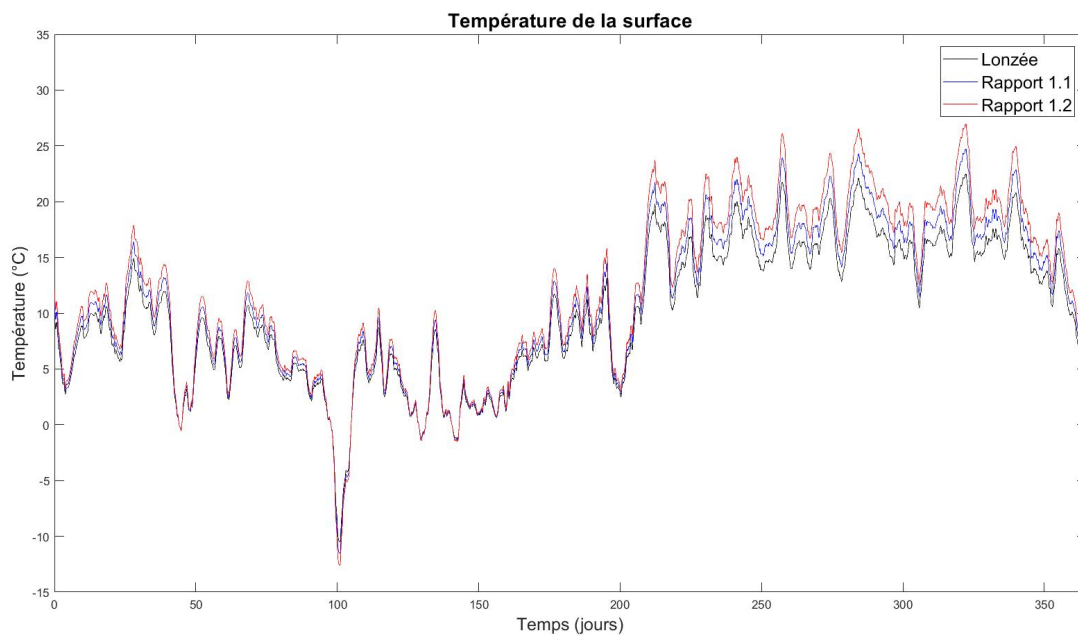


FIGURE 36 – Température de la surface à partir du 10/10/2015 jusqu'au 10/10/2016 à Lonzée et pour les deux scénarios 1.1 et 1.2.

4.5.2 Développement phénologique du blé tendre basé sur les degrés-jours reçus

La figure 37 montre l'évolution du cumul des degrés-jours au cours de la séquence étudiée. La courbe théorique est obtenue à partir du tableau 2 dans lequel le calendrier phénologique est couplé aux degrés-jours associés à chacun des stades. La date de récolte est fixée le 5 août.

Sur cette figure, les degrés-jours de Lonzée et des scénarios 1.1 1.2 présentent une avance marquée par rapport à la courbe théorique durant la première partie de la modélisation. Ensuite, la progression des degrés-jours pour les différents scénarios se rapprochent de la courbe théorique. Les stades phénologiques de l'épi émergé et de la récolte sont pratiquement atteints en même temps à Lonzée que pour la courbe théorique. L'écart en degrés-jours entre les trois scénarios de Lonzée, 1.1 et 1.2 se creusent au cours de la modélisation. Le stade de l'épi émergé est atteint 7 jours en avance pour le scénario 1.1 et 18 jours pour le scénario 1.2. Le stade final de la récolte est quant à lui atteint 14 jours et 25 jours en avance respectivement pour le scénario 1.1 et 1.2.

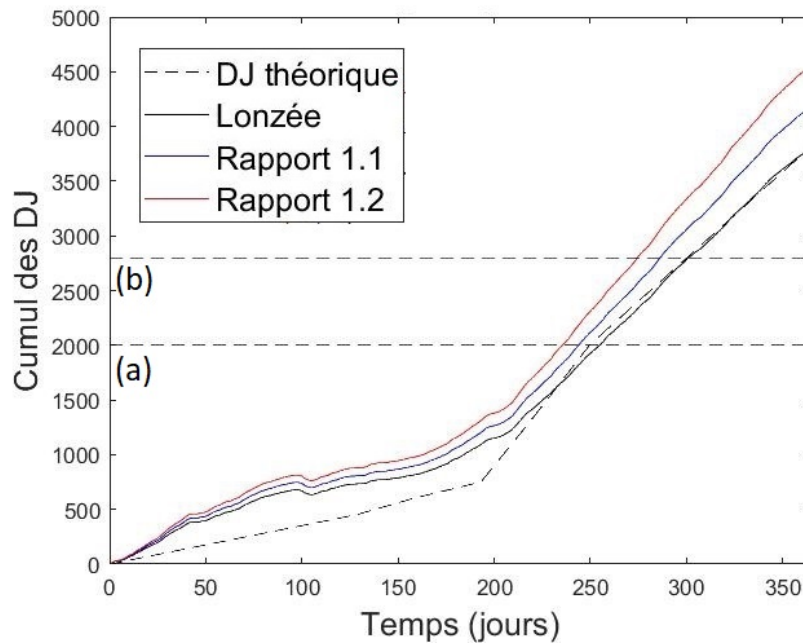


FIGURE 37 – Cumul des degrés-jours à partir du 10/10/2015 jusqu'au 10/10/2016 théorique, à Lonzée et pour les deux scénarios 1.1 et 1.2. (a) et (b) sont les repères phénologiques suivants : (a) épi émergé et (b) récolte/maturité.

4.5.3 Comparaison des températures de surface avec les limites biologiques du blé tendre

La figure 38 montre que les températures de la surface du sol ne dépassent jamais les températures létales du blé tendre fixées à $-17,2^{\circ}\text{C}$ et $47,5^{\circ}\text{C}$. La température inférieure du développement végétatif du blé tendre est dépassée régulièrement durant la première moitié de l'année sans différences notables entre les différents scénarios. A partir du jour 134, la température optimale est d'environ 21°C jusqu'à la fin de la saison. Or les températures moyennes durant cette période se rapprochent de cette température optimale en fonction de la force du scénario. En effet, les températures moyennes pour cette période sont respectivement de $12,5^{\circ}\text{C}$, $13,8^{\circ}\text{C}$ et $15,1^{\circ}\text{C}$ à Lonzée et pour le scénario 1.1 et 1.2.

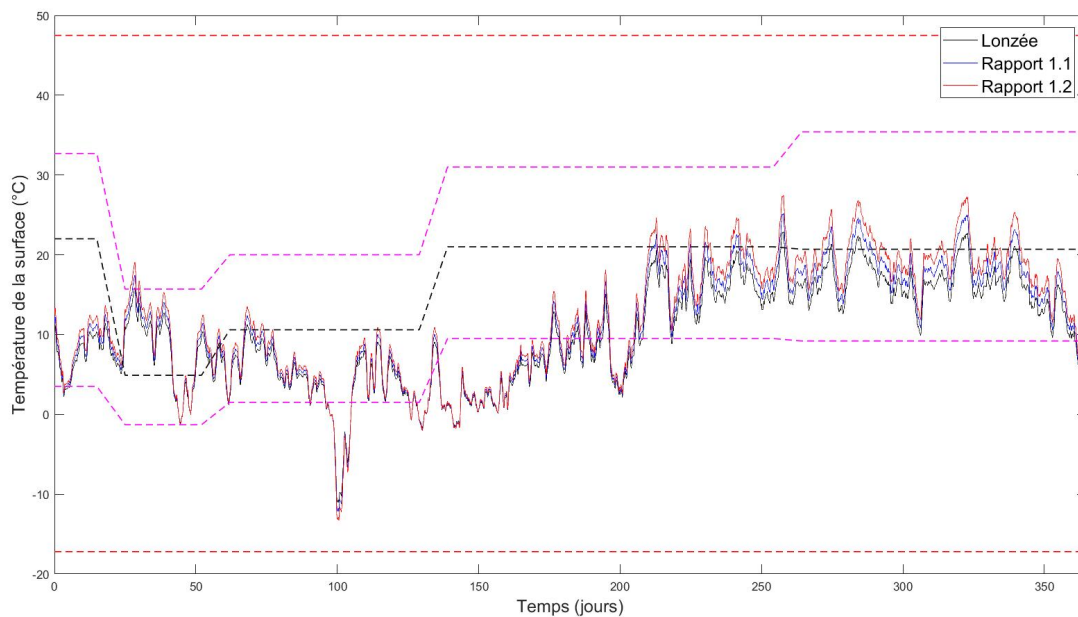


FIGURE 38 – Température de la surface à partir du 10/10/2015 jusqu'au 10/10/2016 à Lonzée et pour les deux scénarios 1.1 et 1.2. En pointillés sont représentés les repères de températures suivants : (rouge) limites létales, (mauve) limites du développement végétatif, (noir) développement optimal.

5 Discussion

Ce chapitre contient une discussion autour de la capacité de l'écotron à reproduire fidèlement un large éventail de conditions atmosphériques et climatiques, leurs variations diurnes, et à soutenir une croissance végétative identique au scénario observé en conditions naturelles (Lonzée). Dans chacune des parties, les points forts et les faiblesses liés à la capacité de l'écotron à reproduire chacun des paramètres environnementaux et flux sont discutés. Les conséquences d'une mauvaise reproduction, les incertitudes sur les mesures et des perspectives à venir sont également évoquées.

5.1 Le vent

5.1.1 Qualité de la reproduction du vent

La distribution des vitesses imposées par le dispositif de vent étant différente de Lonzée, il est évident que le vent n'est pas représentatif des conditions naturelles mesurées. Le système d'aération présent dans l'écotron produit une vitesse de vent soutenue et régulière. En effet, les consignes du taux de renouvellement d'air encodées dans l'écotron et le sens de l'écoulement de l'air sont fixes. La valeur positive de la vitesse de vent verticale traduit la présence d'un écoulement vers le haut, en raison de la configuration soufflerie/évacuation (voir figure 2).

De plus, l'observation de la résistance aérodynamique présente une grande différence entre Lonzée et l'écotron. En effet, une résistance moyenne 4 fois plus faible est mesurée dans l'écotron bien que par temps calme, les résistances s'apparentent. Les conditions de vent imposées/rencontrées dans l'écotron ne permettent donc pas des échanges réalistes car ils affectent notamment les flux H et LE.

Pour finir, en raison des conditions produites par la configuration soufflerie/évacuation, la présence de termes advectifs non-négligeables est soupçonnée. Il se pourrait alors que le calcul du flux turbulent ne représente plus convenablement l'échange. Or mesurer les termes advectifs est difficile.

5.1.2 Incertitudes

Le vent mesuré n'est pas extrapolable à l'ensemble de la cellule de l'écotron. Les mesures obtenues par l'anémomètre sont des mesures ponctuelles. Une campagne de mesures ultérieure avec de multiples anémomètres soniques pourrait permettre d'obtenir une représentation plus fidèle de l'hétérogénéité de la ventilation au sein de l'écotron. De plus, une reproduction fidèle de la résistance aérodynamique est irréaliste. Néanmoins, la détermination de la résistance verticale et horizontale exacte présente dans l'écotron grâce à ce dispositif d'anémomètres s'avérerait utile pour caractériser H et LE automatiquement. A terme, cette démarche pourrait permettre de prendre des décisions pour corriger l'écart à la réalité.

5.2 Radiation nette

5.2.1 Qualité de la reproduction de la radiation nette

La radiation nette est en moyenne deux fois plus élevée en gain dans l'écotron qu'à Lonzée. Ce phénomène est particulièrement évident lorsque les conditions reproduites correspondent à une nuit dégagée. Le flux net est alors proche de zéro pour l'écotron alors qu'il est significativement négatif (perte pour l'écosystème) à Lonzée. Cette observation est d'une ampleur telle que même en journée, la radiation nette est plus élevée dans l'écotron (plus de gain) et ce malgré un SW_{in} n'atteignant pas la valeur consigne.

5.2.2 Processus à l'origine d'une radiation nette différente

Ce phénomène a deux origines. La principale est attribuable à la différence de LW_{in} liée à la différence de température des surfaces émettrices. En extérieur, il s'agit des masses d'air, plus la couverture nuageuse est importante, plus les masses d'air concernées sont basses donc chaudes. Dans l'écotron, LW_{in} est fixé par la température des parois de la chambre et celle-ci est fortement influencée par la température de l'air dans la chambre. A titre d'exemple, par temps dégagé, la corrélation entre LW_{in} et la température de l'air dans l'écotron était de 0,99 alors qu'elle était de 0,32 à l'extérieur. Les deux valeurs de LW_{in} ont donc tendance à converger lorsqu'une période nuageuse est reproduite mais à diverger par ciel clair car l'effet des parois engendre un rayonnement LW_{in} constamment supérieur à celui émis par le ciel de Lonzée.

La seconde cause à l'origine d'une radiation nette plus élevée dans l'écotron est un SW_{out} plus faible lié à une valeur d'albédo inférieure à humidité équivalente. Mise à part les conditions d'humidité, l'albédo d'un sol nu est influencé par plusieurs variables dont la texture, la rugosité et la couleur du sol déterminé notamment par la présence de concrétions calcaires à la surface du sol et la teneur en fer et en matière organique (Fontes et Fimbres, 1953). Les processus à l'origine de l'albédo du sol sont multiples et complexes. Par exemple, les composés de fer faiblement cristallisés ont un pouvoir plus fort de réflectance spectrale que ses homologues cristallisés (Karmanova, 1981). De plus, à mesure que la rugosité de la surface augmente, la réflectance de la surface diminue (Potter et al., 1987). Il est donc difficile de reproduire à l'identique l'ensemble de ces facteurs et processus dans l'écotron. Enfin, l'albédo est fortement dépendant de l'humidité. Il est connu que l'albédo augmente lorsque la teneur en eau diminue (Van der Heide et Koolen, 1980), des albédos variant du simple au double ont par exemple été observés lors de l'assèchement de sols limoneux (Idso et al., 1975). L'humidité du sol étant différente dans l'écotron et à Lonzée, cela entraîne également des différences d'albédo. L'albédo plus faible dans l'écotron engendre donc un gain d'énergie supérieur pour le sol de l'écotron. Néanmoins, un autre phénomène vient contrebalancer partiellement l'effet de l'albédo sur SW_{net} . La valeur du flux SW_{in} plus faible dans l'écotron en journée à cause de la limite technique du dispositif diminue le gain d'énergie de l'écotron. Néanmoins, bien que le maintien d'un PAR similaire à l'extérieur soit primordial afin de préserver une activité photosynthétique conforme, l'activité photosynthétique sature au-dessus d'une certaine valeur de PAR. La limitation du PAR dans l'écotron a donc théoriquement un faible impact sur la photosynthèse.

5.2.3 Perspectives

Pour ces raisons, il serait pertinent de caractériser précisément l'évolution de l'albédo des sols de Lonzée et de l'écotron en fonction de l'humidité des sols. A Lonzée, cette opération est réalisable via les relevés de LW_{out} et d'humidité du sol en surface fournis par la station ICOS. Dans l'écotron, l'expérimentation consisterait en la mise en place du dispositif utilisé dans le cadre de ce travail

et l'établissement d'un scénario où les conditions environnementales sont fixes. Une pluie sera également programmée avant le début de l'expérimentation afin d'amener le sol à sa capacité au champ et laisser le contenu en eau descendre jusqu'au point de flétrissement. Ainsi, une relation permettant de déterminer l'albédo en fonction de l'humidité pourra être déterminée au fur et à mesure que l'eau quittera le sol par évaporation.

5.3 Estimation de la chaleur sensible dans l'écotron

5.3.1 Incertitude et perspective

L'incertitude portée sur l'estimation, réalisée via le programme EddyPro, de la densité de flux de chaleur sensible H dans l'écotron est grande. En effet, EddyPro ne permet de calculer que la composante verticale et turbulente de H or cette partie ne représente certainement pas l'entièreté de l'échange à cause de la présence potentielle d'une composante du flux de chaleur sensible par advection liée à la ventilation permanente induisant un débit d'air constant traversant l'écosystème. La présence d'une composante turbulente horizontale est aussi probable. Afin de chiffrer ces composantes inconnues du flux, la cartographie de l'évolution temporelle à haute fréquence des vitesses du vent et des gradients de températures (via plusieurs anémomètres soniques) permettrait d'estimer toutes les composantes de H traversant un volume de contrôle correspondant à l'écosystème.

Une modification de H dans l'écotron pour atteindre un rapport de Bowen identique à celui de Lonzée ne permettrait pas de tenir compte des hypothétiques composantes de H non mesurées. En effet, bien que le rapport de Bowen déterminé dans le cas humide de l'écotron est bien nettement inférieur à celui de Lonzée, cette observation ne peut être attribuée avec certitude à la sous-estimation de la chaleur sensible. Le rapport de Bowen est affecté par 5 éléments environnementaux : le rapport des résistances entre l'atmosphère et les pores du sol, l'humidité relative atmosphérique, la stabilité atmosphérique, l'humidité du sol et la température de l'environnement (Zhuojia et Pielke, 1995). Comme plusieurs de ces éléments ne sont pas reproduits fidèlement, il est donc normal d'observer des rapports différents dans l'écotron et à Lonzée. De plus, un rapport de Bowen tendant vers zéro à mesure que l'humidité du sol s'approche de la capacité au champ a déjà été observé lors de précédentes études (Gu et al., 2006). Les faibles valeurs du rapport de Bowen calculées pour le sol humide dans l'écotron pourraient alors être expliquées par ce phénomène et masquer une erreur d'estimation de la chaleur sensible.

5.4 Fermeture du bilan énergétique

5.4.1 Qualité des fermetures

La vérification de la fermeture du bilan énergétique est un test de qualité souvent utilisé. Dans le cadre de ce travail il est cependant étudié pour l'écotron plutôt que sur le site de Lonzée. La non-fermeture du bilan d'énergie sur les stations de tours à flux est en effet la norme plutôt que l'exception et fait l'objet de recherches poussées. La cause la plus souvent invoquée est une hétérogénéité de la surface sur des échelles de 100 à 10 km autour de la station, qui génère des flux advectifs qui ne peuvent pas être mesurés sur l'échelle de temps habituelle de la demi-heure par la méthode de covariance de turbulence (Aubinet et al., 2012).

Dans l'écotron, ces problèmes liés à des structures atmosphériques à large échelle ne peuvent pas être invoqués. La fermeture n'est cependant pas atteinte. L'hypothèse que nous avançons est

que la non-fermeture du bilan vient principalement d'une mauvaise estimation du flux de chaleur sensible. En effet, les résidus du bilan sont corrélés à l'évolution des gradients de températures, moteurs du flux de chaleur sensible (voir figure 33). Le gradient de température entre l'air et la surface est ainsi plus (moins) élevé pour le sol sec (humide), situation où le résidu est plus (moins) important.

De plus, à ce stade et même si des limitations persistent sans doute sur la mesure de chacun des flux à cause de la configuration des enceintes de l'écotron et des différences entre l'écosystème réel et celui reconstitué, il est raisonnable d'affirmer que les méthodes pour déterminer l'ensemble des autres flux constituant le bilan énergétique sont correctes tandis que nous avons pointé des problèmes méthodologiques sur notre estimation des flux de chaleur sensible (section 5.3.1).

5.5 Humidité du sol et chaleur latente

5.5.1 Biais des mesures

Les données d'humidité de Lonzée présentent un biais lié aux capteurs utilisés. Les fluctuations intra-journalières de 1,5% d'humidité apparaissant en l'absence de pluie n'ont pas lieu d'être. Normalement, l'humidité du sol n'augmente que suite à une pluie. Ces fluctuations sont dues à un manque de compensation des variations de température pour les capteurs d'humidité Sentek utilisés sur le site de la station ICOS de Lonzée. Ce phénomène est également présent dans l'écotron. Ce biais n'impacte en aucun cas la perte totale d'humidité mesurée d'un jour à l'autre et les valeurs moyennes de la chaleur latente quotidiennes car elles tiennent uniquement compte de la masse évaporée journalière. Seule la dynamique d'évaporation intra journalière est affectée. Ce biais atténue voire annule la perte d'humidité en début de journée et l'accroît en fin de journée. Pour le cas sec, les tendances liées au biais des mesures observées sont les mêmes que celles de Lonzée mais d'amplitude restreinte car la variation d'humidité est beaucoup plus faible que dans le cas humide. Une recalibration des capteurs en fonction de la température pourrait être envisagée et permettrait d'augmenter grandement la précision de l'estimation de l'évaporation instantanée.

5.5.2 Processus à l'origine des flux de chaleur latente différents

En général, l'évaporation dépend de la température du sol, du vent, de la pression atmosphérique, de l'humidité de l'air, de la qualité et de la profondeur de l'eau dans le sol, du type et de la nature du sol et enfin de la forme de la surface exposée. Le sol dans l'écotron évapore beaucoup plus d'eau que celui de Lonzée à humidité équivalente. Cette différence pourrait avoir deux origines :

- Un apport d'énergie différent faisant varier l'énergie disponible pour l'évaporation.
- Des caractéristiques de sol variables liées à une structuration ou une capacité au champ différente entre les deux sols à cause d'une porosité et/ou perméabilité distinctes.

La première piste évoquée est un apport d'énergie sur le sol plus important dans l'écotron. L'observation de l'équation du bilan énergétique à la surface pour le calcul de l'évapotranspiration renseigne les facteurs influençant directement l'évaporation. L'équation du bilan énergétique est intégrée sur une période de 24 heures, ce qui suppose que le flux de chaleur par conduction dans le sol est négligeable. En effet, l'évolution temporelle de ce flux est proche d'une sinusoïdale autour de zéro et de période = 1 jour, sa moyenne journalière est donc proche de 0. L'équation du bilan énergétique (équation 1) peut alors être réécrite :

$$LE = R_{net} - H \quad (24)$$

La comparaison des radiations nettes à Lonzée et dans l'écotron pour le cas humide présente bien une différence importante. La radiation nette dans l'écotron y était deux fois plus élevée (en gain) et pourrait par conséquent constituer un premier élément de réponse en ce qui concerne l'évaporation plus élevée. Néanmoins, dans l'écotron H possède des composantes non présentes dans la réalité. En effet, le gradient de température différent dans l'écotron à cause d'une température de la surface supérieure ainsi que des conditions de vents irréalistes ne permettent pas de reproduire correctement ce flux. En outre, le dispositif implémenté dans l'écotron dans le cadre de cette expérimentation ne permet pas de mesurer ce flux. Pour toutes ces raisons, il est difficile de conclure sur l'impact de H sur l'évaporation.

En ce qui concerne la deuxième piste évoquée, l'évaporation réelle d'un sol peut être approximée de la manière suivante (Saxton et al., 1986) :

$$\lambda E_{réelle} = f(\sigma) \cdot \lambda E_{potentielle} \quad (25)$$

où, $f(\sigma)$ la fonction d'humidité du sol est définie par :

$$f(\sigma) = \frac{M}{\text{Capacité au champ}} \quad (26)$$

où, M est la teneur en eau volumique du sol à une profondeur de 20 cm. Cette expression traduit le fait que lorsque que l'humidité du sol diminue, la quantité évaporée diminue également car les forces de capillarité plus faibles s'opposent au départ de l'eau et l'énergie nécessaire pour l'extraire est d'autant plus grande. Une capacité au champ supérieure à Lonzée y justifierait une évaporation plus faible. Or les observations de la porosité et de l'humidité quelques heures après une forte pluie, correspondant à l'humidité maximale, ne présentent pas de différences significatives entre les sols de Lonzée et de l'écotron. La différence d'évaporation est donc partiellement expliquée par la première piste, à savoir un apport d'énergie plus élevé suite à des valeurs de R_{net} et H différentes dans l'écotron.

5.6 La température

5.6.1 Qualité de la reproduction des températures

Si la capacité de l'écotron à reproduire une température de l'air demandée est avérée, la reproduction de la température du sol n'est pas satisfaisante, celle-ci étant toujours supérieure à celle en champ. De plus, l'augmentation de la température du sol constatée dans l'écotron n'est pas aléatoire. Les différences avec Lonzée sont plus importantes dans le cas du sol sec car lors de ce scénario, l'humidité du sol est beaucoup moins bien contrôlée par rapport à la réalité. La capacité du sol à évacuer de la chaleur par évaporation est donc un facteur important pour l'augmentation de la température du sol. Par conséquent, le contrôle de l'humidité du sol est un élément essentiel dans l'exercice de reproduction de conditions environnementales identiques.

5.6.2 Conséquences envisageables de la température reproduite sur des cultures

La modélisation du développement du blé tendre sous différents scénarios de température à la surface (température à Lonzée augmentée de respectivement 10 et 20%) met en évidence l'amplitude des conséquences d'une température à la surface mal reproduite. L'avance phénologique constatée en début de saison n'est pas attribuable à l'effet écotron car cette avance est aussi visible sur les données brutes de Lonzée. L'avance phénologique modélisée est deux fois supérieure aux

7 jours par degré Celsius supplémentaire prédit par Sadras et Monzon en 2006. En effet, l'avance phénologique des scénarios 1.1 et 1.2 augmente au fur à mesure de la saison pour atteindre 14 et 25 jours au moment de la récolte. La modélisation ne concorde pas avec les observations effectuées sur expérimentation où bien qu'une avance de deux semaines avait été constatée au jour 220, la maturité avait été atteinte en même temps dans l'écotron qu'à Lonzée (Antoine, 2019).

L'approche utilisée est grandement simplifiée et ne permet donc que de donner une idée de l'importance théorique de la température de la surface sur la phénologie du blé tendre. Les limites de la modélisation sont :

- L'évolution phénologique en fonction du cumul des degrés-jours se fait dans la pratique avec la température de l'air (souvent la seule disponible). Cependant, ce qui impacte les processus est la température ressentie par les organes en transformation. Dans ce travail nous avons utilisé la température du sol pour représenter celle-ci de façon générale mais il serait plus précis de déterminer et d'utiliser ces températures d'organe mais la relation de l'évolution de la température du sol dans l'écotron en fonction de la couverture végétale n'est pas connue.
- Un rapport de température constant est utilisé pour la modélisation au cours de l'année alors qu'au sein même d'une journée, une variabilité est constatée. De plus, les valeurs moyennes de coefficient utilisées excluent les extrêmes. Au cours de l'expérimentation, il arrive que le coefficient atteigne une valeur de 1,4. Il n'est donc pas exclu que d'importants pics de chaleur puissent en réalité dépasser la limite de température létale du blé tendre et tuer les cultures mises en place.

La principale conclusion apportée par ce modèle est l'importance du contrôle de la température de la surface dans l'écotron.

5.6.3 Perspectives

Au terme de cette discussion sur l'évolution et l'impact de la température du sol sur les cultures dans l'écotron, des recommandations et perspectives apparaissent pertinentes. Afin d'améliorer le contrôle du développement des cultures dans l'écotron au cours de prochaines expérimentations, il pourrait être envisageable de :

- Modifier la température de l'air dans l'écotron afin de faire correspondre la température de la surface du sol à la réalité.
- Modifier l'intensité des pluies afin de faire correspondre l'humidité du sol à la réalité.

En pratique, le capteur utilisé pour déterminer la consigne de la température de l'air dans l'écotron devrait être placé/remplacé au niveau du sol afin que ce soit cette température de la surface qui soit à l'origine de la régulation du climat. La consigne encodée pour ce capteur ne serait donc plus la température de l'air à reproduire mais bien la température de la surface du sol mesurée en extérieur ou obtenue directement via les mesures de LWout. Ainsi, l'écotron ajusterait lui-même sa ventilation afin de faire correspondre les températures à la surface du sol. La température de l'air ne serait donc plus spécialement similaire. A cette régulation pourrait être couplée une régulation de l'humidité du sol par le contrôle des précipitations. Des capteurs d'humidité du sol permettraient d'ajuster l'intensité des pluies. Des pluies continues de faible intensité programmées jusqu'à égalisation des humidités des sols pourraient être appliquées en prélude des expérimentations puis une différence seuil de 5% d'humidité du sol par rapport au scénario à suivre pourrait par exemple être envisageable comme déclencheur de la pluie.

5.7 Perspectives : synthèse

Cette partie contient des propositions d'expérimentations et approches permettant d'augmenter la compréhension du bilan énergétique au sein de l'écotron. Le but de ces expérimentations est d'aboutir à des modifications de la façon de faire fonctionner l'écotron qui permettent d'améliorer la concordance entre réalité et reproduction du fonctionnement de l'écosystème et qui soient techniquement réalistes et applicables en routine. Cette partie contient deux propositions.

5.7.1 Expérimentation sur sol nu : adapter les consignes

Cette proposition combine des pistes déjà évoquées au cours de la discussion. Néanmoins, il est également envisageable d'intégrer ces modifications l'une après l'autre afin d'étudier leur effet indépendamment. Il s'agit de :

- Modifier la température de l'air dans l'écotron afin de faire correspondre la température de la surface du sol à la réalité.
- Modifier l'intensité des pluies afin de faire correspondre l'humidité du sol à la réalité.

L'impact de telles modifications sur le bilan serait important et pourrait être testé avec le dispositif précédemment utilisé. Les hypothèses émises quant aux résultats attendus sont repris dans le tableau suivant :

TABLEAU 5 – Hypothèses de modification des caractéristiques principales et des flux après intégration des modifications proposées. Code couleur : Bonne reproduction (vert) ; mauvaise reproduction avec un impact mineur (orange) ; mauvaise reproduction avec un impact majeur (rouge)

Caractéristiques	Avant modification	Après modifications
Température de l'air	Ecotron = Lonzée	Ecotron < Lonzée
Température du sol	Ecotron >> Lonzée	Ecotron = Lonzée
Humidité de l'air	Ecotron = Lonzée	Ecotron = Lonzée
Volume des pluies	Ecotron = Lonzée	Ecotron > Lonzée
Humidité du sol	Ecotron < Lonzée	Ecotron = Lonzée
Vent	Ecotron << Lonzée	Ecotron << Lonzée
Albédo	Ecotron << Lonzée	Ecotron < Lonzée
Flux	Avant modification	Après modifications
SWnet	Ecotron ≠ Lonzée	Ecotron ≠ Lonzée
LWin	Ecotron >> Lonzée	Ecotron > Lonzée
LWout	Ecotron > Lonzée	Ecotron = Lonzée
H	Gradient d'humidité et gradient de température différent	Gradient d'humidité similaire mais gradient de température dépendra de la température de l'air – Difficilement prédictible
LE		
G	Ecotron > Lonzée	Ecotron = Lonzée

Les problèmes incontournables et d'une importance majeure restent le respect de la reproduction des températures, de l'humidité à la surface, des caractéristiques du vent, la différence d'albédo et la limite du lumineux à 480 W m^{-2} . Ces éléments font que la répartition entre les différents flux d'énergie (la chaleur sensible et latente, R_{net}) sont difficilement reproductibles. Cependant, il peut être ajouté à ce tableau que la bonne reproduction de l'humidité limitera la disparité des albédos et in fine de SWout améliorant la reproduction du bilan énergétique. Malgré certaines différences toujours présentes, les nouvelles mesures mises en place devraient permettre de fournir les conditions environnementales nécessaires à une reproduction conforme du développement des plantes.

5.7.2 Intégration des plantes dans le système écotron

L'objectif final de ce travail et sa continuité est d'aboutir à un système permettant la reproduction des conditions environnementales en présence de végétaux. Il est donc nécessaire de tester l'efficacité des solutions envisagées en présence de végétaux car leur présence modifie grandement bon nombre des paramètres mesurés : albédo, chaleur latente, température de la surface, émissivité, ... Pour ce faire, deux approches sont possibles. La première, plus simple, consiste en la pose de végétaux en pot à l'extérieur et la mesure des flux via le dispositif précédemment utilisé (en considérant que les problèmes méthodologiques aient été réglés). Ensuite ces mêmes végétaux sont placés dans l'écotron où les mêmes conditions environnementales sont reproduites afin de mesurer à nouveau le bilan. La deuxième est plus compliquée et longue à être mise en place. Un cycle végétatif complet d'un écosystème pourrait être réalisé dans l'écotron. Les avancées ou retards phénologiques potentiels pourraient ainsi être mesurés. Les solutions précédemment envisagées pourraient ainsi être testées. Une cellule témoin dans laquelle aucun changement du fonctionnement de l'écotron n'aurait été implémenté couplé à une cellule dans lesquelles un/des changement(s) sont implémentés permettrait de constater leur efficacité sur la phénologie des végétaux.

6 Conclusions

L'objectif de l'étude dans laquelle ce travail s'insère est double. Le but est de déterminer à quel point le bilan énergétique propre à l'écotron influence son écosystème et quels sont les moyens disponibles pour adapter les différents termes du bilan afin d'améliorer la reproductibilité de la croissance des végétaux par rapport aux conditions en plein champ. Dans un premier temps, l'impact possible qu'aurait l'écotron sur le cycle de développement du blé tendre est étudié via la modélisation de deux scénarios simplifiés de température augmentée par des coefficients réalistes de 1,1 et 1,2. Le calcul des degrés-jours présente une avance phénologique progressive atteignant 25 jours pour le scénario le plus fort. L'importance du contrôle de la température de la surface dans l'écotron est donc primordiale.

Dans un deuxième temps, la reproductibilité d'un bilan énergétique naturel (température du sol et flux d'énergie) au sein d'une cellule du TERRA-Ecotron est étudiée. Pour ce faire, un dispositif expérimental permettant de quantifier l'ensemble des termes du bilan énergétique est installé dans l'écotron. La comparaison des flux à Lonzeé et dans l'écotron mesurés sur une séquence reproduite de trois jours, comprenant deux nuits typées (une couverte et une dégagée) sur sol nu a permis d'identifier les faiblesses de l'écotron dans l'exercice de reproduction d'un climat réel. Les faiblesses de l'écotron sont :

- La production d'une vitesse de vent limitée à 0,15 m/s et fixe ;
- Présence d'un écoulement d'air fixe vers le haut en raison de la configuration soufflerie/évacuation ;
- Une intensité de SW_{in} limitée à la valeur de 480 W m^{-2} ;
- Une valeur de LW_{in} significativement supérieure à cause de la température et l'émissivité des parois ;
- Un albédo deux fois plus faible à humidité équivalente.

Tous ces éléments combinés modifient l'ensemble du bilan énergétique et rendent donc impossible le maintien de la température de surface similaire à la situation en champ. De plus, ces faiblesses sont très difficilement corrigeables directement. Par conséquent, il est essentiel d'envisager l'adaptation des consignes de fonctionnement de l'écotron afin de faire correspondre les caractéristiques climatiques d'intérêt à savoir la température de la surface et l'humidité du sol. L'approche proposée dans le cadre de ce mémoire combine l'ajustement de la température de l'air et de l'intensité des pluies dans le but de fournir les conditions environnementales nécessaires à une reproduction conforme du développement des plantes.

Pour finir, cette étude montre que la présence potentielle d'une composante du flux de chaleur sensible par advection liée à la ventilation et d'une composante turbulente horizontale rendent difficile l'estimation de la chaleur sensible exacte dans l'écotron. L'amélioration du dispositif utilisé via des anémomètres soniques supplémentaires est donc également conseillé.

Références

- [Aase and Idso, 1978] Aase, J. K. and Idso, S. B. (1978). A comparison of two formula types for calculating long-wave radiation from the atmosphere. *Water Resources Research*, 14(4) :623–625.
- [Abad Chabbi, 2017] Abad Chabbi, H. W. L. (2017). *Terrestrial Ecosystem Research Infrastructures : Challenges and Opportunities*.
- [AgroParisTech, 2001] AgroParisTech (2001). Les céréales. Technical report.
- [Albergel et al., 2008] Albergel, Rüdiger, Pellarin, Calvet, Fritz, Froissard, Petitpa, Piguët, and Martin (2008). From near-surface to root zone soil moisture using an exponential filter : an assessment of the method based on in-situ observations and model simulations. *Hydrology and Earth System Sciences*.
- [Antoine, 2019] Antoine, M. (2019). Study of the Impact of Climate Change on a Winter Wheat Crop (*Triticum Aestivum* L .) By Ecotron Simulation.
- [Atkinson, 2017] Atkinson, J. (2017). What is Earth’s Energy Budget ? Five Questions with a Guy Who Knows.
- [Aubinet and Leuning, 2012] Aubinet, M. and Leuning, R. (2012). The Eddy Covariance Method. In *Eddy Covariance*, pages 1–19. Springer Netherlands.
- [Bailey, 1990] Bailey, J. (1990). The potential value of remotely sensed data in the assessment of evapotranspiration and evaporation. *Remote Sensing Reviews*, 4(2) :349–377.
- [Balmford and Bond, 2005a] Balmford, A. and Bond, W. (2005a). Trends in the state of nature and their implications for human well-being. *Ecology Letters*, 8(11) :1218–1234.
- [Balmford and Bond, 2005b] Balmford, A. and Bond, W. (2005b). Trends in the state of nature and their implications for human well-being. *Ecology Letters*, 8(11) :1218–1234.
- [Bañon et al., 2004] Bañon, S., Fernandez, J. A., Franco, J. A., Torrecillas, A., Alarcón, J. J., and Sánchez-Blanco, M. J. (2004). Effects of water stress and night temperature preconditioning on water relations and morphological and anatomical changes of *Lotus creticus* plants. *Scientia Horticulturae*, 101(3) :333–342.
- [Benton et al., 2007] Benton, T. G., Solan, M., Travis, J. M., and Sait, S. M. (2007). Microcosm experiments can inform global ecological problems. *Trends in Ecology and Evolution*, 22(10) :516–521.
- [Bogard, 2011] Bogard, M. D.-G. S. (2011). Analyse génétique et écophysologique de l’écart à la relation teneur en protéines - rendement en grains chez le blé tendre (*Triticum aestivum* L.). Technical report.
- [Boland, 2019] Boland, F. (2019). Analyse pluriannuelle des mécanismes influençant la qualité d’emesure par covariance de turbulence de flux énergétique d’un agroécosystème dynamique : cas d’une grande culture à Lonzée en Hesbaye.
- [Brisson et al., 2003] Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussièrre, F., Cabidoche, Y. M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillère, J. P., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., and Sinoquet, H. (2003). An overview of the crop model STICS. In *European Journal of Agronomy*, volume 18, pages 309–332.
- [Bussièrre et al., 1992] Bussièrre, F., Cellier, P., and Dorigny, A. (1992). Estimation de la conductivité thermique d’un sol in situ, à l’aide d’une sonde à choc thermique. Technical report.
- [Bye et al., 2014] Bye, J. A., Wolff, J. O., and Lettmann, K. A. (2014). On the variability of the Charnock constant and the functional dependence of the drag coefficient on wind speed : Part II-Observations. *Ocean Dynamics*, 64(7) :969–974.

- [Calderini et al., 2001] Calderini, D. F., Savin, R., Abeledo, L. G., Reynolds, M. P., and Slafer, G. A. (2001). The importance of the period immediately preceding anthesis for grain weight determination in wheat. In *Euphytica*, volume 119, pages 199–204. Springer.
- [Campbell Scientific, 2000] Campbell Scientific (2000). Operator ' S Manual : CR3000. Technical report.
- [Campbell Scientific, 2002] Campbell Scientific (2002). Manual : HFP01 Soil Heat Flux Plate. Technical report.
- [Cardinale et al., 2012] Cardinale, B. J., Duffy, J. E., Gonzalez, A., Hooper, D. U., Perrings, C., Venail, P., Narwani, A., MacE, G. M., Tilman, D., Wardle, D. A., Kinzig, A. P., Daily, G. C., Loreau, M., Grace, J. B., Larigauderie, A., Srivastava, D. S., and Naeem, S. (2012). Biodiversity loss and its impact on humanity.
- [Caselles and Delegido, 1987] Caselles, V. and Delegido, J. (1987). A simple model to estimate the daily value of the regional maximum evapotranspiration from satellite temperature and albedo images. *International Journal of Remote Sensing*, 8(8) :1151–1162.
- [Ceballos et al., 2005] Ceballos, A., Scipal, K., Wagner, W., and Martínez-Fernández, J. (2005). Validation of ERS scatterometer-derived soil moisture data in the central part of the Duero Basin, Spain. *Hydrological Processes*, 19(8) :1549–1566.
- [Chen, J. M., B. J. Yang and Zhang, 1989] Chen, J. M., B. J. Yang and Zhang, R. H. (1989). Soil thermal emissivity as affected by its water content and surface treatment. In *Soil Sci.*, pages 433–435.
- [Chung et al., 2006] Chung, D. W., Pružinská, A., Hörtensteiner, S., and Ort, D. R. (2006). The role of pheophorbide a oxygenase expression and activity in the canola green seed problem. *Plant Physiology*, 142(1) :88–97.
- [Clobert et al., 2018] Clobert, J., Chanzy, A., Le Galliard, J-F., Chabbi, A., Greiveldinger, L., Caquet, T., Loreau, M., Mougin, C., Pichot, C., Roy, J., and Saint-André, L. (2018). How to Integrate Experimental Research Approaches in Ecological and Environmental Studies : AnaEE France as an Example. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 6(APR) :43.
- [CNRS, 2018] CNRS (2018). Le principe Ecotron.
- [Cravatte et al., 2020] Cravatte, C., François, P., Martin, V. d. A., and Florian, V. B. (2020). Etudes des échanges d'énergie et d'eau dans les cellules de l'écotronN.
- [Delattre, 2016] Delattre, R. (2016). *Contribution à l'ajustement du phyllotherme utilisé dans les modèles de croissance du blé et de l'orge*. PhD thesis.
- [Dellta-T Device Ltd, 1999] Dellta-T Device Ltd (1999). ThetaProbe soil moisture sensor manualL : Type ML2x. Technical report.
- [Drake and Kramer, 2012] Drake, J. M. and Kramer, A. M. (2012). Mechanistic analogy : How microcosms explain nature. *Theoretical Ecology*, 5(3) :433–444.
- [Ehrlich and Harte, 2015] Ehrlich, P. R. and Harte, J. (2015). Opinion : To feed the world in 2050 will require a global revolution. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(48) :14743–14744.
- [El Jarroudi, 2005] El Jarroudi, M. (2005). Evaluation des paramètres épidémiologiques des principales maladies cryptogamiques affectant les feuilles du blé d'hiver au Grand-Duché de Luxembourg : calibration et validation d'un modèle de prévision.
- [Fontes and Adan Fimbres, 1953] Fontes and Adan Fimbres (1953). Soil Albedo in Relation to Soil Color, Moisture and Roughness. Technical report, The University of Arizona, Arizona.

- [Ford et al., 2014] Ford, T. W., Harris, E., and Quiring, S. M. (2014). Estimating root zone soil moisture using near-surface observations from SMOS. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(1) :139–154.
- [Gao et al., 2018] Gao, X., Li, H., Zhao, X., Ma, W., and Wu, P. (2018). Identifying a suitable revegetation technique for soil restoration on water-limited and degraded land : Considering both deep soil moisture deficit and soil organic carbon sequestration. *Geoderma*, 319 :61–69.
- [Gate, 1995] Gate, P. (1995). *Ecophysiologie du blé*. Tec & Doc Lavoisier, Paris.
- [Gill Instruments, 2017] Gill Instruments (2017). User Manual : 3 Axis Ultrasonic Anemometers. Technical report.
- [Granjou and Walker, 2016] Granjou, C. and Walker, J. (2016). Promises that matter : Reconfiguring ecology in the ecotrons. *Science and Technology Studies*, 29(3) :49–67.
- [Graser and Van Bavel, 1982] Graser, E. A. and Van Bavel, C. H. (1982). The effect of soil moisture upon soil albedo. *Agricultural Meteorology*, 27(1-2) :17–26.
- [Gu et al., 2006] Gu, L., Meyers, T., Pallardy, S. G., Hanson, P. J., Yang, B., Heuer, M., Hosman, K. P., Riggs, J. S., Sluss, D., and Wullschleger, S. D. (2006). Direct and indirect effects of atmospheric conditions and soil moisture on surface energy partitioning revealed by a prolonged drought at a temperate forest site. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 111(16).
- [Guan et al., 2009] Guan, X., Huang, J., Guo, N., Bi, J., and Wang, G. (2009). Variability of soil moisture and its relationship with surface albedo and soil thermal parameters over the Loess Plateau. *Advances in Atmospheric Sciences*, 26(4) :692–700.
- [Harold G., 2018] Harold G. (2018). Surface Mount Stick-On RTD. Technical report.
- [Hassani, 1995] Hassani, T. A. E. (1995). *Agronomie moderne : bases physiologiques et agronomiques de la production végétale : ouvrage collectif*. Hatier ; AUPELF-UREF, Paris ; [Montreuil] ; [Paris].
- [Hassika and Berbigier, 1998] Hassika, P. and Berbigier, P. (1998). Annual cycle of photosynthetically active radiation in maritime pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 90(3) :157–171.
- [Heurer et al., 1978] Heurer, G. R., Heermann, D. F., Mckee, T. B., and Benci, J. F. (1978). Predicting Winter Wheat Phenology Using Temperature and Photoperiod. Technical report.
- [Howden et al., 2007] Howden, S. M., Soussana, J. F., Tubiello, F. N., Chhetri, N., Dunlop, M., and Meinke, H. (2007). Adapting agriculture to climate change.
- [Imukova et al., 2016] Imukova, K., Ingwersen, J., Hevart, M., and Streck, T. (2016). Energy balance closure on a winter wheat stand : comparing the eddy covariance technique with the soil water balance method. *Biogeosciences*, 13(1) :63–75.
- [Jackson, 1986] Jackson, T. J. (1986). Soil Water Modeling and Remote Sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, GE-24(1) :37–46.
- [Karmanova, 2020] Karmanova, L. (2020). Effect of various iron compounds on the spectral reflectance and color of soils. *Soviet Soil Science*.
- [Kimball et al., 1995] Kimball, B. A., Pinter, P. J., Garcia, R. L., Lamorte, R. L., Wall, G. W., Hunsaker, D. J., Wechsung, G., Wechsung, F., and Kartschall, T. (1995). Productivity and water use of wheat under free-air CO₂ enrichment. *Global Change Biology*, 1(6) :429–442.
- [Kipp & Zonnen, 2009] Kipp & Zonnen (2009). Instruction Manual : CNR4 Radiometer.
- [Klute, 1986] Klute, A. (1986). Methods of soil analysis Part 1, Second Edition. Technical report.

- [Kopp and Lean, 2011] Kopp, G. and Lean, J. L. (2011). A new, lower value of total solar irradiance : Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letters*, 38(1) :n/a–n/a.
- [KUHN, 1963] KUHN, P. M. (1963). Measured effective long-wave emissivity of clouds. *Monthly Weather Review*, 91(10) :635–640.
- [Leemans et al., 2012] Leemans, V., Dumont, B., Destain, M.-F., Aubinet, M., Oger, R., and Delaplace, P. (2012). Comparison of the effects of the thermal radiation from the sky or from an Ecotron walls on the crop temperature. Technical report.
- [Lepage and Bourgeois, 2012] Lepage, M.-P. and Bourgeois, G. (2012). *Modèles bioclimatiques pour la prédiction de la phénologie, de la croissance, du rendement et de la qualité des cultures*.
- [Ligne and Manise, 2019] Ligne, A. D. and Manise, T. (2019). Documentation on Loncée station. Technical report.
- [Loreau, 2010] Loreau, M. (2010). *From Populations to Ecosystems : Theoretical Foundations for a New Ecological*.
- [Marty and Philipona, 2000] Marty, C. and Philipona, R. (2000). The clear-sky index to separate clear-sky from cloudy-sky situations in climate research. *Geophysical Research Letters*, 27(17) :2649–2652.
- [Marty et al., 2002] Marty, C., Philipona, R., Fröhlich, C., and Ohmura, A. (2002). Altitude dependence of surface radiation fluxes and cloud forcing in the alps : Results from the alpine surface radiation budget network. *Theoretical and Applied Climatology*, 72(3-4) :137–155.
- [Mauder and Foken, 2006] Mauder, M. and Foken, T. (2006). Impact of post-field data processing on eddy covariance flux estimates and energy balance closure. *Meteorologische Zeitschrift*, 15(6) :597–609.
- [McMaster and Wilhelm, 1997] McMaster, G. S. and Wilhelm, W. W. (1997). Growing degree-days : One equation, two interpretations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 87(4) :291–300.
- [Mermoud, 2006] Mermoud, A. (2006). Cours de physique du sol - Régime thermique du sol. Technical report.
- [Millenium Ecosystem assessment, 2005] Millenium Ecosystem assessment (2005). Ecosystems and Human Well-being : Synthesis. Technical report.
- [Mira et al., 2007] Mira, M., Valor, E., Boluda, R., Caselles, V., and Coll, C. (2007). Influence of soil water content on the thermal infrared emissivity of bare soils : Implication for land surface temperature determination. *Journal of Geophysical Research*, 112(F4) :F04003.
- [Müller, 1985] Müller, H. (1985). On the radiation budget in the alps. *Journal of Climatology*, 5(4) :445–462.
- [NASA, 2009] NASA (2009). Climat et budget énergétique de la Terre.
- [National Geographic Society, 2019] National Geographic Society (2019). Human Impacts on the Environment.
- [Oliva and Courgey, 2012] Oliva, J.-p. and Courgey, S. (2012). *L’isolation thermique écologique*.
- [Omega Engineering,] Omega Engineering. Qu’est-ce qu’une sonde pt100 ?
- [Osmond et al., 2004] Osmond, B., Ananyev, G., Berry, J., Langdon, C., Kolber, Z., Lin, G., Monson, R., Nichol, C., Rascher, U., Schurr, U., Smith, S., and Yakir, D. (2004). Changing the way we think about global change research : scaling up in experimental ecosystem science. *Global Change Biology*, 10(4) :393–407.

- [Pereira et al., 2010] Pereira, H. M., Leadley, P. W., Proença, V., Alkemade, R., Scharlemann, J. P., Fernandez-Manjarrés, J. F., Araújo, M. B., Balvanera, P., Biggs, R., Cheung, W. W., Chini, L., Cooper, H. D., Gilman, E. L., Guénette, S., Hurtt, G. C., Huntington, H. P., Mace, G. M., Oberdorff, T., Revenga, C., Rodrigues, P., Scholes, R. J., Sumaila, U. R., and Walpole, M. (2010). Scenarios for global biodiversity in the 21st century.
- [Porter and Gawith, 1999] Porter, J. R. and Gawith, M. (1999). Temperatures and the growth and development of wheat : A review.
- [Porter and Semenov, 2005] Porter, J. R. and Semenov, M. A. (2005). Crop responses to climatic variation. *Philosophical Transactions of the Royal Society B : Biological Sciences*, 360(1463) :2021–2035.
- [Potter et al., 1987] Potter, K. N., Horton, R., and Cruse, R. M. (1987). Soil Surface Roughness Effects on Radiation Reflectance and Soil Heat Flux. *Soil Science Society of America Journal*, 51(4) :855–860.
- [Quéno, 2017] Quéno, L. (2017). *Apport de prévisions météorologiques à l'échelle kilométrique pour la modélisation du manteau neigeux en montagne*. PhD thesis, Université de Toulouse.
- [Rineau et al., 2019] Rineau, F., Malina, R., Beenaerts, N., Arnauts, N., Bardgett, R. D., Berg, M. P., Boerema, A., Bruckers, L., Clerinx, J., Davin, E. L., De Boeck, H. J., De Dobbelaer, T., Dondini, M., De Laender, F., Ellers, J., Franken, O., Gilbert, L., Gudmundsson, L., Janssens, I. A., Johnson, D., Lizin, S., Longdoz, B., Meire, P., Meremans, D., Milbau, A., Moretti, M., Nijs, I., Nobel, A., Pop, I. S., Puetz, T., Reyns, W., Roy, J., Schuetz, J., Seneviratne, S. I., Smith, P., Solmi, F., Staes, J., Thiery, W., Thijs, S., Vanderkelen, I., Van Landuyt, W., Verbruggen, E., Witters, N., Zscheischler, J., and Vangronsveld, J. (2019). Towards more predictive and interdisciplinary climate change ecosystem experiments. *Nature Climate Change*, 9(11) :809–816.
- [Sabater et al., 2007] Sabater, J. M., Jarlan, L., Calvet, J.-C., Bouyssel, F., and De Rosnay, P. (2007). From Near-Surface to Root-Zone Soil Moisture Using Different Assimilation Techniques. *Journal of Hydrometeorology*, 8(2) :194–206.
- [Sadras and Monzon, 2006] Sadras, V. O. and Monzon, J. P. (2006). Modelled wheat phenology captures rising temperature trends : Shortened time to flowering and maturity in Australia and Argentina. *Field Crops Research*, 99(2-3) :136–146.
- [Salvucci et al., 2001] Salvucci, M. E., Osteryoung, K. W., Crafts-Brandner, S. J., and Vierling, E. (2001). Exceptional sensitivity of Rubisco activase to thermal denaturation in vitro and in vivo. *Plant Physiology*, 127(3) :1053–1064.
- [Sánchez et al., 2012] Sánchez, J. M., French, A. N., Mira, M., Hunsaker, D., Thorp, K., Valor, E., and Caselles, V. (2012). Field thermal infrared emissivity dependence on soil moisture. In *IAHS-AISH Publication*, volume 352, pages 50–53.
- [Saxton et al., 1986] Saxton, K. E., Rawls, W. J., Romberger, J. S., and Papendick, R. I. (1986). Estimating Generalized Soil-water Characteristics from Texture. *Soil Science Society of America Journal*, 50(4) :1031–1036.
- [Sicart et al., 2016] Sicart, J. E., Espinoza, J. C., Quéno, L., and Medina, M. (2016). Radiative properties of clouds over a tropical Bolivian glacier : seasonal variations and relationship with regional atmospheric circulation. *International Journal of Climatology*, 36(8) :3116–3128.
- [Slafer and Rawson, 1995] Slafer, G. A. and Rawson, H. M. (1995). Base and optimum temperatures vary with genotype and stage of development in wheat. *Plant, Cell and Environment*, 18(6) :671–679.

- [Sobrino et al., 2009] Sobrino, J. A., Mattar, C., Pardo, P., Jiménez-Muñoz, J. C., Hook, S. J., Baldridge, A., and Ibañez, R. (2009). Soil emissivity and reflectance spectra measurements. Technical report.
- [Stewart et al., 2013] Stewart, R. I., Dossena, M., Bohan, D. A., Jeppesen, E., Kordas, R. L., Ledger, M. E., Meerhoff, M., Moss, B., Mulder, C., Shurin, J. B., Suttle, B., Thompson, R., Trimmer, M., and Woodward, G. (2013). Mesocosm Experiments as a Tool for Ecological Climate-Change Research. In *Advances in Ecological Research*, volume 48, pages 71–181. Academic Press Inc.
- [Sue Mainka, Jeffrey A. MacNeely, Bill Jackson, 2005] Sue Mainka, Jeffrey A. MacNeely, Bill Jackson, D. D. (2005). La nature dont nous dépendons : les services écosystémiques soutiennent les moyens d’existence. Technical report.
- [Trenberth and E., 1997] Trenberth, J. T. K. and E., K. (1997). Earth’s Annual Global Mean Energy Budget. Technical report, National Center for Atmospheric Research, Colorado.
- [Université de Liège, 2017] Université de Liège (2017). Livre Blanc Céréales - Principaux stades repères de la végétation en céréales. Technical report.
- [Van Bavel, C. H. M. and Hillel, 1976] Van Bavel, C. H. M. and Hillel, D. (1976). Calculating potential and actual evaporation from a bare soil surface by simulation of concurrent flow of water and heat.
- [van der Heide and Koolen, 1980] van der Heide, G. and Koolen, A. (1980). Soil surface albedo and multispectral reflectance of short-wave radiation as a function of degree of soil slaking. *Netherlands Journal of Agricultural Science*, 28(4) :252–258.
- [Verdier et al., 2014] Verdier, B., Jouanneau, I., Simonnet, B., Rabin, C., Van Dooren, T. J., Delpierre, N., Clobert, J., Abbadie, L., Ferrière, R., and Le Galliard, J. F. (2014). Climate and atmosphere simulator for experiments on ecological systems in changing environments. *Environmental Science and Technology*, 48(15) :8744–8753.
- [Vickers and Mahrt, 1997] Vickers, D. and Mahrt, L. (1997). Quality Control and Flux Sampling Problems for Tower and Aircraft Data. Technical report.
- [Vitousek et al., 1997] Vitousek, P. M., Mooney, H. A., Lubchenco, J., and Melillo, J. M. (1997). Human domination of Earth’s ecosystems. *Science*, 277(5325) :494–499.
- [Wahid et al., 2007] Wahid, A., Gelani, S., Ashraf, M., and Foolad, M. R. (2007). Heat tolerance in plants : An overview.
- [Walker et al., 2001] Walker, J. P., Willgoose, G. R., and Kalma, J. D. (2001). One-dimensional soil moisture profile retrieval by assimilation of near-surface observations : A comparison of retrieval algorithms. *Advances in Water Resources*, 24(6) :631–650.
- [Wang et al., 2017] Wang, E., Martre, P., Zhao, Z., Ewert, F., Maiorano, A., Rötter, R. P., Kimball, B. A., Ottman, M. J., Wall, G. W., White, J. W., Reynolds, M. P., Alderman, P. D., Aggarwal, P. K., Anothai, J., Basso, B., Biernath, C., Cammarano, D., Challinor, A. J., De Sanctis, G., Doltra, J., Fereres, E., Garcia-Vila, M., Gayler, S., Hoogenboom, G., Hunt, L. A., Izaurralde, R. C., Jabloun, M., Jones, C. D., Kersebaum, K. C., Koehler, A.-K., Liu, L., Müller, C., Naresh Kumar, S., Nendel, C., Olesen, J. E., Palosuo, T., Priesack, E., Eyshi Rezaei, E., Ripoche, D., Ruane, A. C., Semenov, M. A., Shcherbak, I., Stöckle, C., Stratonovitch, P., Streck, T., Supit, I., Tao, F., Thorburn, P., Waha, K., Wallach, D., Wang, Z., Wolf, J., Zhu, Y., and Asseng, S. (2017). The uncertainty of crop yield projections is reduced by improved temperature response functions. 3 :17102.
- [Wheeler et al., 2000] Wheeler, T. R., Craufurd, P. Q., Ellis, R. H., Porter, J. R., and Vara Prasad, P. V. (2000). Temperature variability and the yield of annual crops. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 82(1-3) :159–167.

- [White et al., 1994] White, I., Knight, J., Zegelin, S., and Topp, G. (1994). Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil water content. Technical report.
- [Wilczak et al., 2001] Wilczak, J. M., Oncley, S. P., and Stage, S. A. (2001). Sonice anemometer tilt correction algorithms. Technical report.
- [Willits and Peet, 1998] Willits, D. H. and Peet, M. M. (1998). The effect of night temperature on greenhouse grown tomato yields in warm climates. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92(3) :191–202.
- [Wollenweber et al., 2003] Wollenweber, B., Porter, J. R., and Schellberg, J. (2003). Lack of interaction between extreme high-temperature events at vegetative and reproductive growth stages in wheat. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 189(3) :142–150.
- [World Meteorological Organization, 2012] World Meteorological Organization (2012). Recommended Methods for Evaluating Cloud and Related Parameters. Technical report.
- [Xue et al., 2004] Xue, Q., Weiss, A., and Baenziger, P. S. (2004). Predicting phenological development in winter wheat. *Climate Research*, 25(3) :243–252.
- [Yan et al., 2013] Yan, K., Chen, P., Shao, H., Shao, C., Zhao, S., and Brestic, M. (2013). Dissection of Photosynthetic Electron Transport Process in Sweet Sorghum under Heat Stress. *PLoS ONE*, 8(5) :e62100.
- [Zadoks et al., 1974] Zadoks, J. C., Chang, T. T., and Konzak, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14(6) :415–421.
- [Zhang et al., 2017] Zhang, N., Quiring, S., Ochsner, T., and Ford, T. (2017). Comparison of Three Methods for Vertical Extrapolation of Soil Moisture in Oklahoma. *Vadose Zone Journal*, 16(10) :vzj2017.04.0085.
- [Zhuojia and Pielke, 1995] Zhuojia, Y. and Pielke, R. A. (1995). A Parameterization of Bowen Ratio with Respect to Soil Moisture Availability. Technical Report 4.