



**HAL**  
open science

# Mesure et modélisation des bilans d'énergie et de masse (eau) sur des plantes cultivées sous serre : impact d'une restriction hydrique

Hacene Bouhoun Ali

## ► To cite this version:

Hacene Bouhoun Ali. Mesure et modélisation des bilans d'énergie et de masse (eau) sur des plantes cultivées sous serre : impact d'une restriction hydrique. Mécanique des fluides [physics.class-ph]. Agrocampus Ouest, 2016. Français. NNT : 2016NSARD080 . tel-01652206

**HAL Id: tel-01652206**

**<https://theses.hal.science/tel-01652206>**

Submitted on 30 Nov 2017

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITE

BRETAGNE

LOIRE

AGRO  
CAMPUS

OUEST

**Hacene BOUHOUN ALI • 24 novembre 2016**

Thèse AGROCAMPUS OUEST  
sous le label de l'Université Bretagne Loire  
pour obtenir le grade de  
**DOCTEUR D'AGROCAMPUS OUEST**  
Spécialité Mécanique des fluides, énergétique

ÉCOLE DOCTORALE • Végétal, Environnement, Nutrition,  
Agroalimentaire, Mer (VENAM)

LABORATOIRE D'ACCUEIL • UP Environnement Physique  
de la plante Horticole (EPHor)

## Mesure et modélisation des bilans d'énergie et de masse (eau) sur des plantes cultivées sous serre : impact d'une restriction hydrique

**Isabelle CALMET**

Maître de conférences, École Centrale de Nantes / *rapporteur*

**Thierry AMEGLIO**

Directeur de recherche, INRA Site de Crouel / *rapporteur*

**Hervé NICOLAS**

Professeur, AGROCAMPUS OUEST Rennes / *examineur*

**Isabelle COUSIN**

Directrice de recherche, INRA Site d'Orléans / *examinatrice*

**Lydie HUCHE-THELIER**

Ingénieure de recherche, INRA Angers-Nantes / *membre invité*

**Patrice CANNAVO**

Professeur, AGROCAMPUS OUEST Angers / *encadrant*

**Pierre-Emmanuel BOURNET**

Professeur, AGROCAMPUS OUEST Angers / *directeur de thèse*

**Andrée TUZET**

Chargée de recherches, INRA Thiverval-Grignon /  
*co-directrice de thèse*



## **THESE / AGROCAMPUS OUEST**

Sous le label de l'Université de Bretagne Loire  
pour obtenir le diplôme de :

### **DOCTEUR D'AGROCAMPUS OUEST**

Spécialité : Mécanique des fluides, énergétique

**Ecole Doctorale : VENAM**

**Laboratoire d'accueil : UP Environnement Physique de la plante Horticole  
(EPHor)**

Présentée par :

Hacene BOUHOUN ALI

### **MESURE ET MODELISATION DES BILANS D'ENERGIE ET DE MASSE (EAU) SUR DES PLANTES CULTIVEES SOUS SERRE: IMPACT D'UNE RESTRICTION HYDRIQUE**

Soutenue le 24/11/2016 à Angers devant le Jury ci-dessous :

M. Isabelle CALMET, Maître de conférences, Ecole Centrale de Nantes	<i>Rapporteur</i>
M. Thierry AMEGLIO, Directeur de recherche, INRA Site de Crouel	<i>Rapporteur</i>
M. Hervé NICOLAS, Professeur, AGROCAMPUS OUEST, Rennes	<i>Examineur</i>
Mme. Isabelle COUSIN, Directrice de recherche, INRA Site d'Orléans	<i>Examinatrice</i>
Mme. Lydie HUCHE-THELIER, Ingénieure de recherche, INRA, Angers-Nantes	<i>Membre invitée</i>
M. Patrice CANNAVO, Professeur, AGROCAMPUS OUEST, Angers	<i>Encadrant</i>
M. Pierre-Emmanuel BOURNET, Professeur, AGROCAMPUS OUEST, Angers	<i>Directeur de thèse</i>
Mme. Andrée TUZET, Chargée de recherches, INRA, Thiverval-Grignon	<i>Co-directrice de thèse</i>



## Remerciements

*Je voudrais avant tout remercier chacun des membres de Jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait de s'intéresser à ce travail de thèse et d'avoir accepté de l'évaluer.*

*Je tiens à remercier mon directeur de thèse le professeur Pierre-Emmanuel BOURNET d'Agrocampus Ouest, de m'avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de sa grande compétence, de sa rigueur intellectuelle, de son dynamisme, et de son efficacité. Je tiens à remercier vivement Mme Andrée TUZET de l'INRA qui a accepté de codiriger cette thèse pour l'ensemble de ses conseils et pour sa relecture de ce mémoire.*

*Je remercie le professeur Patrice CANNAVO d'Agrocampus Ouest, pour son implication forte dans ce travail, ses remarques avisées et pour son appui à la rédaction de ce mémoire, ainsi que pour le temps qu'il a consacré à encadrer cette recherche pendant ces trois années.*

*Je remercie M. Etienne CHANTOISEAU, M. Christophe MIGEON, et le Professor Sylvain CHARPENTIER pour leurs précieux conseils et remarques scientifiques.*

*Je tiens à remercier M. Dominique LEMESLE, Mme Claudie MAZZEGA et Mme Yvette BARRAUD-ROUSSEL, qui m'ont fourni de l'aide tout au long de la partie expérimentale.*

*Merci à l'équipe de l'unité de recherche EPHor de m'avoir accueilli et intégré à la vie du laboratoire.*

*Cette thèse a bénéficié du soutien financier du ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la Forêt.*

*Un grand merci enfin à mes chers parents, mes frères, mes sœurs, et ma fiancée qui ont toujours cru en moi et pour le soutien et l'aide qu'ils m'ont apportés.*

## Résumé

La réduction de la consommation de l'eau dans les serres agricoles représente un grand intérêt ne serait-ce que pour accroître l'efficacité d'utilisation de l'eau par les cultures et rendre les professionnels du secteur horticole plus compétitifs. La thèse vise à apporter des réponses concernant la gestion optimale de l'eau. Ceci passe par la mise en place d'un modèle capable de prédire les bilans de masse et d'énergie sur l'ensemble du continuum substrat-plante-atmosphère en régimes de confort et de restriction hydrique.

La plupart des modèles de transfert existants se focalisent soit sur le système sol-plante, soit sur le système plante-atmosphère. Ils ont de plus été établis principalement pour les systèmes de grandes cultures, alors que les cultures en pot sous serre possèdent des spécificités liées au confinement tant aérien que racinaire. L'enjeu est de bâtir une approche intégrée du continuum substrat-plante-atmosphère pour modéliser le fonctionnement de plantes cultivées en pots sous serre.

La thèse s'appuie sur une double approche expérimentale et numérique. Une campagne expérimentale a été lancée en 2014 puis en 2015 sous serre et une autre en chambre climatique en 2014, en utilisant l'Impatiens de Nouvelle Guinée comme plante modèle. Il s'agissait d'abord d'élaborer un modèle de la résistance stomatique, élément clef de la transpiration en s'appuyant sur le modèle méthode multiplicatif de Jarvis puis sur la méthode des plans d'expérience en confort et en restriction hydrique. Les données acquises ont permis de caler/valider ces modèles de résistance, qui ont pu être ensuite utilisés pour déterminer la transpiration avec le modèle de Penman Monteith et la méthode dite directe. Ces modèles ont ensuite été intégrés dans un modèle de climat distribué CFD (Computational Fluid Dynamics), qui a été validé avec des données acquises sous serre à l'échelle du couvert végétal, puis à l'échelle de la serre. L'objectif était de tester différents régimes d'irrigation pour identifier le scénario garantissant une consommation raisonnable des ressources en eau tout en maintenant la qualité des productions.

**Mots clés :** Serre, substrat, irrigation, restriction hydrique, CFD, bilans hydrique et énergétique, potentiel hydrique, résistance stomatique, transpiration, plans d'expérience.

## **Abstract**

In greenhouses, reducing water consumption is of high interest, not only to increase water efficiency, but also to maintain competitiveness of the growers. The aim of this thesis is to provide answers regarding the optimal water management. To reach this goal, predictive models water and energy transfers through the substrate-plant-atmosphere are implemented, considering well watered plants and plants under water restriction.

Most existing models of water and energy transfers have been established either on the soil-plants system, or on the plant-atmosphere system. Moreover, such models were mainly developed for open field conditions, although plants grown in pots have specificities linked to the aerial and root confinement. The challenge is therefore to develop an integrated soil-plant-atmosphere model for greenhouse plants grown in pot. The thesis was based on a combined experimental and numerical approach. A field survey was conducted in 2014 and then in 2015 inside a greenhouse, and another one in a growth chamber in 2014. The New Guinea Impatiens was used as a plant model. The stomatal resistance was first modeled, as a key factor impacting the transpiration, by using the multiplicative Jarvis model, and then the design of experiments method for plants under well-watered and water restriction conditions. The collected data was used to calibrate/validate the aforementioned stomatal resistance models; the obtained models could then be tested to evaluate transpiration with the Penman Monteith model and the direct method. Finally, these models were integrated inside a CFD model (Computational Fluid Dynamics), which was validated against experiments first at the canopy scale, and then at the scale of the whole greenhouse. The objective was to test different irrigation scenarios in order to find the best irrigation scenario for reducing the amount of water used.

**Keywords :** Greenhouse, irrigation, substrate, water restriction, CFD, water and energy balance, matric potential, stomatal resistance, transpiration, design of experiments.



## Nomenclature

### Lettres Latines

$AH_a$	: humidité absolue de l'air .....	[ $\text{kg kg}^{-1}$ ]
$AH_l$	: humidité absolue de la feuille .....	[ $\text{kg kg}^{-1}$ ]
$Ca$	: concentration de $\text{CO}_2$ dans l'air.....	[ $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ]
$C_d$	: coefficient de perte de charge (facteur de traînée).....	[ - ]
$C_f$	: coefficient de perte de charge non linéaire .....	[ - ]
$C_{pa}$	: capacité calorifique massique à pression constant de l'air.....	[ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
$C_p$	: capacité calorifique massique à pression constant.....	[ $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ]
CTR	: ratio de cumul de transpiration .....	[ % ]
$D_{m,a}$	: coefficient de diffusion de l'espèce m dans l'air .....	[ $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ]
$D_{ref,j}$	: différence entre le régime d'irrigation j et le régime de référence .....	[ - ]
f	: force massique de flottabilité.....	[ $\text{N kg}^{-1}$ ]
$f_d$	: fraction diffuse du rayonnement .....	[ - ]
g	: accélération de la pesanteur.....	[ $9.81 \text{ m s}^{-2}$ ]
Gr	: nombre de Grashof .....	[ - ]
h	: hauteur de la végétation .....	[m]
$h_s$	: coefficient d'échange de chaleur sensible .....	[ $\text{W K}^{-1} \text{m}^{-3}$ ]
I	: luminance.....	[ $\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-2}$ ]
$I_\lambda$	: luminance monochromatique.....	[ $\text{W sr}^{-1} \text{m}^{-3}$ ]
K	: perméabilité moyenne du milieu poreux .....	[ $\text{m}^2$ ]
k	: énergie cinétique turbulente.....	[ $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ]
$\hat{k}$	: coefficient d'extinction .....	[ - ]
$k_p$	: énergie cinétique turbulente à proximité de la paroi .....	[ $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$ ]
LAD	: densité foliaire .....	[ $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$ ]
$LAI_s$	: indice foliaire .....	[ $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ]
$L_v$	: chaleur latente de vaporisation de l'eau .....	[ $2257 \cdot 10^3 \text{ J kg}^{-1}$ ]
$M_i$	: masse molaire de l'espèce i .....	[ $\text{kg mol}^{-1}$ ]
n	: indice de réfraction .....	[ - ]
Nu	: nombre de Nusselt .....	[ - ]
P	: pression hydrostatique .....	[Pa]
$P_{op}$	: pression opératoire.....	[Pa]

Pr	: nombre de Prandtl.....	[ - ]
$P_{v,a}$	: pression de vapeur de l'air.....	[Pa]
$P_{v,a}^{sat}$	: pression de vapeur saturante à la température de l'air.....	[Pa]
$P_{v,l}^{sat}$	: pression de vapeur saturante à la température de la feuille.....	[Pa]
$Q_l$	: densité de flux de chaleur latente.....	[W m <sup>-3</sup> ]
$Q_s$	: densité de flux de chaleur sensible.....	[W m <sup>-3</sup> ]
R	: constante universelle des gaz parfaits.....	[8.31 J Mol <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> ]
$R_a$	: résistance aérodynamique.....	[s.m <sup>-1</sup> ]
$R_{abs}$	: rayonnement net absorbé.....	[W m <sup>-3</sup> ]
$R_{atm}$	: rayonnement grande longueur d'onde.....	[W m <sup>-2</sup> ]
$R_c$	: résistance stomatique moyenne du couvert.....	[s.m <sup>-1</sup> ]
Re	: nombre de Reynolds.....	[ - ]
$Re_p$	: nombre de Reynolds basé sur la taille typique d'un pore.....	[ - ]
$R_g$	: rayonnement global (courte longueur d'onde).....	[W m <sup>-2</sup> ]
RG	: rayonnement globale en variable codée (i.e. centrée réduite).....	[ - ]
$R_{g_0}$	: rayonnement global sur la surface supérieure du végétal.....	[W m <sup>-2</sup> ]
RH	: humidité relative en variable codée (i.e. centrée réduite).....	[ - ]
RHa	: humidité relative.....	[%]
RHa_out	: humidité relative à l'extérieur de la serre.....	[%]
$R_n$	: rayonnement net total absorbé.....	[W m <sup>-2</sup> ]
$R_s$	: résistance stomatique.....	[s.m <sup>-1</sup> ]
$R_{s_{min}}$	: résistance stomatique minimale.....	[s.m <sup>-1</sup> ]
$S_f$	: surface des feuilles.....	[m <sup>2</sup> ]
$S_h$	: termes source ou puits de chaleur volumique interne.....	[W m <sup>-3</sup> ]
$S_m$	: termes source ou puits dans l'équation des espèces.....	[Kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]
$S_{sh}$	: surface de sol.....	[m <sup>2</sup> ]
T	: température en variable codée (i.e. centrée réduite).....	[ - ]
$T_0$	: température de référence dans les conditions opératoires.....	[K]
$T_a$	: température de l'air.....	[K]
$T_{a\_out}$	: température de l'air à l'extérieur de la serre.....	[K]
$T_l$	: température de la feuille.....	[K]
Tr	: flux de transpiration.....	[W m <sup>-2</sup> ]
$T_{sc}$	: température de l'écran d'ombrage.....	[K]



$T_{sky}$	: température de ciel .....	[K]
$u^+$	: vitesse normalisée .....	[-]
$u_{\infty}$	: vitesse moyenne loin de la paroi .....	[m s <sup>-1</sup> ]
$u_i$	: composante suivant i de la vitesse .....	[m s <sup>-1</sup> ]
$y^+$	: distance normalisée .....	[-]
$V_p$	: volume du pot .....	[m <sup>3</sup> ]
$VPD_0$	: déficit de pression pour lequel $R_s$ est minimale .....	[Pa]
$VPD_a$	: déficit de pression de vapeur air-air .....	[Pa]

### Caractères grecs

$\alpha$	: diffusivité thermique du fluide .....	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\tilde{\alpha}$	: absorptivité .....	[-]
$\hat{\alpha}$	: paramètre de modèle de Van Genuchten .....	[k Pa <sup>-1</sup> ]
$\beta$	: coefficient de dilatation .....	[K <sup>-1</sup> ]
$\gamma$	: constante psychométrique .....	[66 Pa.K <sup>-1</sup> ]
$\Gamma_{\phi}$	: coefficient de diffusion .....	[Kg m <sup>-1</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\Delta$	: gradient de pression de vapeur saturante .....	[Pa K <sup>-1</sup> ]
$\varepsilon$	: taux de dissipation visqueuse .....	[m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> ]
$\varepsilon$	: émissivité du milieu .....	[-]
$\varepsilon_p$	: taux de dissipation visqueuse à proximité de la paroi .....	[m <sup>2</sup> s <sup>-3</sup> ]
$\theta$	: co-latitude (ou angle polaire) .....	[rad]
$\theta_r$	: teneur en eau résiduelle .....	[m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]
$\theta_s$	: teneur en eau à saturation .....	[m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ]
$\lambda$	: conductivité thermique du fluide .....	[W m <sup>-2</sup> K <sup>-1</sup> ]
$\mu$	: viscosité dynamique de l'air .....	[kg s <sup>-1</sup> m <sup>-1</sup> ]
$\nu$	: viscosité cinématique .....	[m <sup>2</sup> s <sup>-1</sup> ]
$\rho$	: masse volumique .....	[kg m <sup>-3</sup> ]
$\rho$	: réflectivité .....	[-]
$\rho_0$	: masse volumique de référence dans les conditions opératoires .....	[kg m <sup>-3</sup> ]
$\rho_a$	: masse volumique de l'air .....	[kg m <sup>-3</sup> ]
$\rho_w$	: masse volumique de l'eau .....	[kg m <sup>-3</sup> ]

$\sigma$	: constante de Stefan-Boltzmann .....	[5.67 10 <sup>-8</sup> W m <sup>-2</sup> K <sup>-4</sup> ]
$\sigma_d$	: coefficient de dispersion .....	[ - ]
$\tau$	: transmittance .....	[ - ]
$\tau_w$	: contrainte de cisaillement .....	[Kg m <sup>-1</sup> s <sup>-2</sup> ]
$\Phi$	: longitude (ou angle azimutal) .....	[rad]
$\Phi$	: concentration adimensionnelle de la quantité transportée .....	[ - ]
$\Psi_a$	: potentiel hydrique de l'air .....	[Pa]
$\Psi_l$	: potentiel hydrique de feuille .....	[Pa]
$\Psi_g$	: potentiel gravitationnel .....	[Pa]
$\Psi_o$	: potentiel osmotique.....	[Pa]
$\Psi_p$	: potentiel de pression .....	[Pa]
$\Psi_s$	: potentiel matriciel .....	[Pa]
$\Psi_{sol}$	: potentiel hydrique du sol .....	[Pa]
$\vec{\Omega}$	: vecteur direction de luminance .....	[ - ]
$\vec{\Omega}$	: vecteur direction de diffusion .....	[ - ]
$\hat{\Omega}$	: angle solide .....	[sr]
$\omega_i$	: fraction massique de l'espèce i .....	[kg kg <sup>-1</sup> ]

### Indices

1	: au-dessus du couvert végétal
2	: dans le couvert végétal
3	: au-dessous du couvert végétal
a	: air
avg	: moyenne pondérée par les volumes des mailles
c	: confort hydrique
l	: feuille
r	: restriction hydrique
w	: eau

## Sommaire

Chapitre 1. Introduction .....	25
1-1 Contexte général.....	25
1-2 Problématique.....	26
1-3 La question de la gestion de l'eau en horticulture sous serre.....	28
1-3.1 Transpiration des plantes.....	28
1-3.2 Résistance stomatique .....	29
1-4 Intégration dans des modèles climatiques globaux ou distribués .....	31
1-5 Verrous scientifiques.....	32
1-6 Contexte de la thèse et questionnements scientifiques.....	33
1-7 Structure du mémoire .....	35
Chapitre 2. Les serres et leur fonctionnement écophysiological .....	37
2.1 Les serres de production.....	37
2.1.1 Classification des serres .....	37
2.1.2 Gestion du climat et de l'irrigation .....	38
2.1.2.1 Contrôle de la température .....	38
a. Cas des températures élevées .....	38
b. Cas des températures basses.....	40
2.1.2.2 Contrôle de l'humidité de l'air .....	41
2.1.2.3 Contrôle de la concentration de dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> ).....	42
2.1.2.4 Système d'éclairage.....	43
2.1.2.5 Système d'irrigation .....	43
2.2 Mécanismes biophysiques affectant le climat des serres .....	44
2.2.1 Transferts de masse : air.....	45
2.2.1.1 Effet des forces d'inertie .....	46
2.2.1.2 Effet des forces de flottabilité .....	46
2.2.2 Transferts de masse : vapeur d'eau .....	47
2.2.3 Transferts thermiques .....	48
2.2.3.1 Échanges conductifs .....	48
2.2.3.2 Échanges convectifs .....	48
a. Convection libre .....	49
b. Convection forcée .....	49
c. Convection mixte .....	49
2.2.3.3 Échanges radiatifs .....	49
a. Échanges radiatifs de courtes longueurs d'onde .....	51
b. Échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde .....	52
2.2.4 Focus sur le mécanisme de condensation.....	52
2.3 Caractéristiques des cultures hors-sol en pots.....	54

2.4	Processus spécifiques associés au végétal.....	55
2.4.1	Transfert de masse sol-plante.....	55
2.4.1.1	Potentiel hydrique .....	55
2.4.1.2	Potentiel hydrique du sol.....	55
2.4.1.3	Potentiel hydrique des feuilles .....	56
2.4.1.4	Courbe de rétention en eau.....	56
2.4.1.5	Conductivité hydraulique .....	58
2.4.1.6	Impact du développement racinaire sur les propriétés physiques des substrats .....	59
2.4.2	Interactions du végétal avec le milieu aérien .....	60
2.4.2.1	Action mécanique engendrée par le végétal.....	60
2.4.2.2	Action écophysiological engendrée par le végétal.....	60
a.	Photosynthèse.....	60
b.	Respiration .....	61
c.	Chaleur sensible .....	61
d.	Evapotranspiration .....	62
2.4.2.3	Influence des variables climatiques et du régime d'irrigation sur le fonctionnement transpiratoire des végétaux.....	63
a.	Fonctionnement des stomates.....	63
b.	Influence du rayonnement.....	65
c.	Influence du déficit de pression de vapeur.....	66
d.	Influence de la température .....	66
e.	Influence de la concentration en gaz carbonique .....	67
f.	Influence de la disponibilité en eau.....	67
g.	Influence des espèces .....	68
Chapitre 3. Formalisation mathématique des phénomènes biophysiques mis en jeu en vue d'une intégration dans un modèle de climat distribué..... 71		
3.1	Équations de base du modèle aérodynamique.....	71
3.1.1	Équation de conservation de la masse.....	72
3.1.2	Équation de conservation de la quantité de mouvement .....	72
3.1.3	Équation de conservation de l'énergie .....	74
3.2	Equation de conservation d'espèces (transfert de masse).....	74
3.3	Sous modèle de condensation et couplage avec la conservation d'espèces et de l'énergie.....	75
3.4	Sous modèle radiatif.....	76
3.4.1	Équation de transferts radiatifs.....	76
3.4.2	Absorptivité, réflectivité et transmittance pour une paroi opaque .....	80
3.4.3	Réflectivité, transmittance, et absorptivité pour une paroi semi transparente .....	81
3.4.4	Couplage ETR et équation de conservation de l'énergie.....	83
3.4.5	Modèle aux ordonnées discrètes (DO).....	84
3.5	Discrétisation des équations de transport.....	85

3.5.1	Discrétisation temporelle.....	85
3.5.2	Discrétisation spatiale .....	86
3.5.2.1	Éléments finis vs volumes finis.....	86
3.5.2.2	Méthode des volumes finis.....	86
3.5.2.3	Model DO Quadrature polaire / azimutale.....	90
3.6	Transfert de masse : eau .....	90
3.6.1	Potentiel hydrique d'une solution aqueuse.....	90
3.6.1.1	Potentiel hydrique du sol.....	91
3.6.1.2	Potentiel hydrique de feuille .....	92
3.6.2	Potentiel hydrique de l'air .....	92
3.6.3	Circulation de l'eau et conductivité hydraulique .....	93
3.6.4	Courbe de rétention en eau.....	94
3.6.5	Bilan d'eau substrat-plante.....	95
3.7	Sous modèle de culture-climat et couplage avec les équations de l'énergie et de la conservation de vapeur d'eau .....	96
3.7.1	Effet dynamique (approche milieu poreux) .....	96
3.7.2	Effet physiologique .....	97
3.7.2.1	Source de chaleur sensible .....	99
3.7.2.2	Source de chaleur latente (transpiration).....	99
a.	Modèle de Penman Monteith (PM).....	99
b.	Méthode directe.....	101
c.	Modèles de la résistance stomatique en confort.....	101
d.	Modèles de résistance stomatique en restriction hydrique.....	103
e.	Résistance aérodynamique .....	104
3.8	Étude de la turbulence et du modèle de fermeture (k-ε) .....	105
3.9	Synthèse du système d'équations .....	110
Chapitre 4. Matériels et méthodes.....		113
4.1	Schéma récapitulatif des différentes étapes de projet de la thèse .....	113
4.2	Objectifs des campagnes de mesure.....	116
4.2.1.1	Campagne préliminaire en chambre de culture.....	116
4.2.1.2	Première campagne de mesure dans un compartiment de serre en 2014... 116	
4.2.1.3	Deuxième campagne de mesure dans un compartiment de serre en 2015. 117	
4.2.1.4	Plante modèle utilisée (Impatiens de Nouvelle Guinée) .....	117
4.3	Première étape du projet : campagne de mesure 2014.....	118
4.3.1	Chambre de culture et dispositifs expérimentaux .....	118
4.3.1.1	Mise en œuvre de la méthode des plans d'expériences.....	119
4.3.1.2	Protocole de mesure de la résistance stomatique .....	119
4.3.2	Compartiment de serre horticole : dispositifs expérimentaux de première campagne de mesure 2014 .....	120
4.3.2.1	Système et régime d'irrigation .....	121

4.3.2.2	Capteurs.....	122
a.	Capteurs utilisés à l'extérieur de la serre, dans la serre et dans la partie aérienne du couvert végétal .....	123
b.	Capteurs situés à l'intérieur du compartiment.....	124
c.	Capteurs utilisés au niveau du couvert végétal .....	126
d.	Capteurs utilisés pour caractériser le substrat .....	128
4.4	Deuxième étape du projet : campagne de mesure 2015 .....	129
4.4.1	Dispositifs expérimentaux.....	129
4.4.2	Protocole de mesure de la résistance stomatique .....	129
4.4.3	Protocole de mesure de potentiel hydrique de feuille .....	130
4.4.4	Incertitude de mesure des capteurs.....	131
4.5	Troisième étape du projet : outils numériques de simulation.....	134
4.5.1	Code CFD : ANSYS Fluent .....	134
4.5.2	Introduction d'une routine spécifique : UDF (User Defined Function).....	134
Chapitre 5.	Résultats et discussion.....	139
5.1	Première étape : Modélisation et validation de la résistance stomatique en confort et en restriction hydrique.....	141
5.1.1	Modélisation de la résistance stomatique en confort .....	141
5.1.1.1	Résultats expérimentaux en chambre de culture .....	141
5.1.1.2	Calibration du modèle polynomial en confort.....	142
5.1.1.3	Résultats expérimentaux sous serre et calibration du modèle de Jarvis.....	143
5.1.2	Validation des modèles de résistance stomatique en confort.....	146
5.1.2.1	Modèle polynomial issu des plans d'expériences .....	147
5.1.2.2	Modèle de Jarvis.....	148
5.1.3	Modélisation de la résistance stomatique en restriction hydrique.....	150
5.1.3.1	Résultats expérimentaux sous serre en restriction hydrique et calibration de la fonction de stress et de la courbe de rétention en eau du substrat.....	150
5.1.3.2	Validation des modèles de résistance stomatique en restriction hydrique.	152
5.1.3.3	Modèle polynomial issu des plans d'expériences .....	152
5.1.3.4	Modèle de Jarvis.....	154
5.1.4	Conclusion sur la précision des modèles de résistance stomatique et de transpiration pour les deux régimes d'irrigation .....	155
5.2	Deuxième étape : Modélisation du climat sous serre pour les différents régimes d'irrigation.....	156
5.2.1	Paramètres de modélisation.....	157
5.2.2	Régime instationnaire.....	161
5.2.3	Différents scénarios d'irrigations .....	162
5.2.4	Modélisation du climat sous serre : domaine limité autour du couvert végétal	162
5.2.4.1	Domaine de calcul et maillage .....	162
5.2.4.2	Conditions initiales et aux limites .....	163
5.2.4.3	Performance du modèle pour les deux régimes d'irrigation .....	165

a.	Températures et humidités .....	165
b.	Potentiel matriciel, résistance stomatique et transpiration .....	167
5.2.4.4	Test de différents scénarios d'irrigation .....	169
5.2.5	Modélisation du climat sous serre : domaine complet de toute la serre.....	171
5.2.5.1	Domaine de calcul et maillage .....	171
5.2.5.2	Conditions initiales et aux limites .....	173
5.2.5.3	Ecran d'ombrage .....	174
5.2.5.4	Performance du modèle pour les deux régimes d'irrigation .....	175
a.	Températures et humidités .....	175
b.	Potentiel matriciel .....	182
c.	Résistance stomatique et transpiration .....	183
5.2.5.5	Test des différents scénarios d'irrigation .....	185
Article 1 : Stomatal resistance of New Guinea Impatiens pot plants. Part 1: Model development for well watered plants based on design of experiments.....		
		195
Article 2 : Development of a CFD crop submodel for simulating microclimate and transpiration of ornamental plants grown in a greenhouse under water restriction .....		
		224
Conclusions .....		
		265
Perspectives de ce travail .....		
		271
Références bibliographiques .....		
		273
Annexe 1: CFD simulations of the night-time condensation inside a closed glasshouse: sensitivity analysis to outside external conditions, heating and glass properties.....		
		293
Annexe 2 : CFD Analysis of the Climate inside a Closed Greenhouse at Night Including Condensation and Crop Transpiration.....		
		331
Annexe 3 : Test statistique sur la précision des mesures par le poromètre		
Objectif du test .....		
		345
Annexe 4 : Modelling New Guinea Impatiens Leaf Stomatal Resistance from Experimental Values.....		
		349
Annexe 5 : Modelling the Stomatal Resistance under Water Comfort and Restriction to Assess the Transpiration of a Greenhouse New Guinea Impatiens Crop .....		
		361
Annexe 6 : Stomatal Resistance Modelling using the Full Factorial Design: Application to the New Guinea Impatiens. ....		
		373
Annexe 7 : Article 3, Stomatal resistance of New Guinea Impatiens pot plants. Part 2: Model extension for water restriction and application to irrigation scheduling.....		
		385
Annexe 8 : CFD simulation of greenhouse microclimate and crop transpiration under water restriction.....		
		417
Annexe 9 : CFD analysis of Impatiens crop irrigation scenarios inside a greenhouse .....		
		435
Annexe 10 : Stomatal resistance modelling under water restriction conditions by means of design of experiments: Comparison with the Jarvis method.....		
		453

Annexe 11 : Code de la routine : UDFs (User Defined Function) pour modeliser l'impact du couvert végétal et faire le bilan hydrique dans le continuum substrat-plante ..... 467



## Liste des figures

Figure 1 : Serre multi-chapelles (a) et serre tunnel (b) (source: Von Elsner et al., 2000). .....	38
Figure 2 : Ventilation naturelle par les ouvrants (a) ou les ouvertures (b) (source: Kittas et al., 2012).....	39
Figure 3 : Ecran d'ombrage (source: Kittas et al., 2012). .....	39
Figure 4 : Système de brumisation (source: <a href="http://www.brumstyl.com/brumisateur-serre-7/">http://www.brumstyl.com/brumisateur-serre-7/</a> )	40
Figure 5 : Chauffage aérien au-dessus du couvert végétal (a) et au-dessous du couvert végétal (b) (source: Kittas et al., 2012).....	41
Figure 6: Déshumidificateur utilisé pour le contrôle d'humidité (source: <a href="http://www.nevo-therm.fr/deshumidificateur-de-serres-thermodynamique-giordano">http://www.nevo-therm.fr/deshumidificateur-de-serres-thermodynamique-giordano</a> ).....	42
Figure 7 : Eclairage artificiel dans les serres (source : <a href="http://www.cannapro.co/lighting1.html">http://www.cannapro.co/lighting1.html</a> ). .....	43
Figure 8: Subirrigation pour des plantes cultivées en pot (source: <a href="http://hg-labs.jimdo.com/2014/03/05/les-syst%C3%A8mes-%C3%A0-mar%C3%A9/">http://hg-labs.jimdo.com/2014/03/05/les-syst%C3%A8mes-%C3%A0-mar%C3%A9/</a> ).....	44
Figure 9 : Mécanismes physiques et biologiques mis en jeu dans une serre (source : Morille, 2012).....	45
Figure 10: Spectre de rayonnement électromagnétique (source: <a href="http://www.astrosurf.com/trousnoirs/radiations.html">http://www.astrosurf.com/trousnoirs/radiations.html</a> ). .....	50
Figure 11: Absorption, réflexion et transmission du rayonnement (source: Bouhoun Ali).....	50
Figure 12: Diagramme de l'air humide (Diagramme de Mollier) (source : <a href="http://www.econologie.com/forums/montages-injection-eau/humidite-courbe-de-saturation-de-l-air-et-rh-mollier-t5928.html">http://www.econologie.com/forums/montages-injection-eau/humidite-courbe-de-saturation-de-l-air-et-rh-mollier-t5928.html</a> ). .....	53
Figure 13 : Clé de lecture d'une courbe de rétention en eau d'un substrat horticole (source : <a href="https://wiki.aurea.eu/index.php/Propri%C3%A9t%C3%A9s_physiques_des_substrats">https://wiki.aurea.eu/index.php/Propri%C3%A9t%C3%A9s_physiques_des_substrats</a> ).....	57
Figure 14 : Procédure de la photosynthèse (source : <a href="http://biofaculte.blogspot.fr/2015/03/photosynthese-definition-et-schema.html">http://biofaculte.blogspot.fr/2015/03/photosynthese-definition-et-schema.html</a> ).....	61
Figure 15: Stomates observés par microscope optique (source : <a href="http://hortidact.eklablog.com/le-vegetal-physiologie-osmose-tropismes-symbioses-a57617767">http://hortidact.eklablog.com/le-vegetal-physiologie-osmose-tropismes-symbioses-a57617767</a> ).....	64
Figure 16 : Principaux facteurs environnementaux influençant la conductance stomatique (gs). Les flèches indiquent qu'un élément influe sur la conductance stomatique (gs). + indique une relation positive, et – indique une relation négative. $\psi_{sol}$ : potentiel hydrique du sol; $V_{pd}$ :	

déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air; Ca : concentration en CO <sub>2</sub> de l'air; Q : intensité lumineuse (i.e. variable équivalente au rayonnement); T : température (Source : Damour, 2008).....	65
Figure 17 : Influence du rayonnement solaire sur la résistance stomatique des cultures d'impatiens, les points correspondent aux mesures et la ligne au modèle (source : Kichah et al., 2012).....	65
Figure 18 : Influence du déficit de pression de vapeur sur la conductance stomatique, les symboles (○) correspondent aux mesures pour le blé, et les symboles (●) correspondent aux mesures pour le triticale (source : Motzo et al., 2013).....	66
Figure 19 : Influence de la température sur la résistance stomatique des culture de maïs, les points correspondent aux mesures et la ligne au modèle d'ajustement (source : Aphalo et Jarvis, 1991). ....	67
Figure 20 : Élément émetteur de luminance et angle solide (source : Yunus, 2003).....	76
Figure 21 : Bilan radiatif sur un élément de volume (source : Bouhoun Ali).....	77
Figure 22 : Transferts radiatifs (source : Fluent, 2014).....	78
Figure 23: Absorption, réflexion et transmission du rayonnement (source : Bouhoun Ali)....	79
Figure 24: Variation du coefficient de transmission en fonction de la longueur d'onde (source : <a href="http://www.vaucanson.org/php5/Accueil/index.php/comment-minimiser-les-pertes-d-energie/707-limitation-des-pertes-par-rayonnement">http://www.vaucanson.org/php5/Accueil/index.php/comment-minimiser-les-pertes-d-energie/707-limitation-des-pertes-par-rayonnement</a> ).....	80
Figure 25 : Rayonnement réfléchis spéculaire et diffuse paroi opaque (source : Bouhoun Ali).....	81
Figure 26: Différentes composantes du rayonnement sur une paroi semi transparente (source : Bouhoun Ali).....	82
Figure 27 : Mailles : notations utilisées pour la discrétisation des équations (source : Fluent, 2014). ....	87
Figure 28 : Volume de contrôle entourant le point central P (source : Bouhoun Ali). ....	88
Figure 29: Discrétisation en $\Delta\theta$ et $\Delta\varphi$ d'un octan de l'angle solide $4\pi$ (source : Fluent, 2014). ....	90
Figure 30 : Résistances aux transferts hydriques et le gradient du potentiel hydrique du continuum substrat-plante-atmosphère (source : Bouhoun Ali). ....	94
Figure 31: Bilan d'énergie, résistance aérodynamique et résistance stomatique à l'interface de la feuille (source : Morille, 2012).....	98

Figure 32 : Profil de vitesse obtenu expérimentalement à proximité de la paroi (source : McDonough, 2007). .....	108
Figure 33 : Mailles adjacentes à la paroi et distance $y_1$ (source : Bouhoun Ali). .....	109
Figure 34 : Organigramme récapitulant les différentes étapes du projet de thèse (source : Bouhoun Ali). .....	115
Figure 35 : Plant d'Impatiens de Nouvelle Guinée après 12 semaines de plantation (Source : Serre d'Agrocampus Ouest, 2014). .....	118
Figure 36 : (a) Vue de l'extérieur de la chambre climatique et automate de pilotage (b) vue de l'intérieur de la chambre climatique avec l'instrumentation utilisée (Source : Bouhoun Ali, 2014). .....	119
Figure 37 : Poromètre (a) et tête de mesure du poromètre (b) (source : Bouhoun Ali, 2014). .....	120
Figure 38 : Schéma d'ensemble de la serre (a), et disposition des plantes sur les tablettes (b) (source : Bouhoun Ali). .....	121
Figure 39: Schéma récapitulatif des capteurs utilisés à l'extérieur de la serre, dans la serre et dans la partie aérienne du couvert végétal pour la campagne de mesure 2014 (source : Bouhoun Ali). .....	123
Figure 40 : Pyranomètre : capteur de rayonnement incident de courte longueur d'onde (source : <a href="http://www.kippzonen.fr/News/581/Principe-de-fonctionnement-d-un-pyranometre-a-thermopile">http://www.kippzonen.fr/News/581/Principe-de-fonctionnement-d-un-pyranometre-a-thermopile</a> ). .....	124
Figure 41 : Sonde Vaisala HMP45, illustration de la sonde (a) insérée dans le tubes blanc (b) (Source : Agrocampus Ouest, 2014). .....	124
Figure 42 : Capteurs de vitesse de l'air boule chaude (Source : Agrocampus Ouest, 2014)..	124
Figure 43 : Capteur de rayonnement (CNR1) courte et grande longueur d'onde (Source : Agrocampus Ouest, 2014). .....	125
Figure 44 : Fluxmètre HFP01SC pour mesurer le flux de chaleur et de température du sol (Source : Agrocampus Ouest, 2014). .....	125
Figure 45 : Sonde Pt100 pour mesurer les températures (Source : <a href="https://www.meteocontrol.com/fr/industrial-line/capteurs/capteurs-de-temperature-de-module/">https://www.meteocontrol.com/fr/industrial-line/capteurs/capteurs-de-temperature-de-module/</a> ). .....	126
Figure 46 : Balances pour mesurer la transpiration des plantes en confort et en restriction hydrique (Source : Agrocampus Ouest, 2014). .....	127

Figure 47 : Pyrromètre pour mesurer le rayonnement net (Source : Agrocampus Ouest, 2014).....	127
Figure 48 : Thermocouple fixé sur la feuille pour mesurer sa température (Source : Agrocampus Ouest, 2014). ....	128
Figure 49 : Illustration d'une sonde ECH <sub>2</sub> O (a) et d'un tensiomètre (b) (Source : Agrocampus Ouest, 2014). ....	128
Figure 50 : Schéma récapitulatif des capteurs utilisés dans la partie aérienne du couvert végétal pour la campagne de mesure 2015 (source : Bouhoun Ali).....	129
Figure 51 : Chambre à pression.....	130
Figure 52 : Schéma du principe de fonctionnement de la chambre à pression: À gauche état initial ; à droite sortie de sève lors de la montée en pression (flèches rouges) (Source : Agrocampus Ouest, 2015).....	131
Figure 53 : Routine spécifique au bilan énergétique sur le couvert végétal ; bilan hydrique substrat-plante : les encadrés en ligne discontinue représentent les communications entre la routine et le code Fluent (source : Bouhoun Ali). ....	135
Figure 53 : Organigramme des étapes du travail.....	140
Figure 54: Variation temporelle des variables climatiques (R <sub>g</sub> , RH <sub>a1</sub> , Ta <sub>1</sub> ) 10 semaines après plantation. ....	143
Figure 55 : Variation temporelle des variables climatiques (R <sub>g</sub> , RH <sub>a1</sub> , Ta <sub>1</sub> ) 11 semaines après plantation. ....	144
Figure 56 : Variation temporelle des variables climatiques (R <sub>g</sub> , RH <sub>a1</sub> , Ta <sub>1</sub> ) 14 semaines après plantation. ....	144
Figure 57: Variation temporelle des variables climatiques (R <sub>g</sub> , RH <sub>a1</sub> , Ta <sub>1</sub> ) 16 semaines après plantation. ....	145
Figure 58: Variation temporelle des variables climatiques (R <sub>g</sub> , RH <sub>a1</sub> , Ta <sub>1</sub> ) 12 semaines après plantation. ....	146
Figure 59 : Validation du modèle polynomial de R <sub>s</sub> , 12 semaines après plantation. ....	147
Figure 60: Validation des modèles de la transpiration qui utilisent le modèle polynomial de R <sub>s</sub> , 12 semaines après plantation.....	148
Figure 61 : Validation du modèle de Jarvis, 12 semaines après plantation. ....	149
Figure 62 : Validation des modèles de transpiration qui utilisent le modèle de R <sub>s</sub> Jarvis semaine 12.....	149
Figure 63 : Calibration de la fonction stress .....	150

Figure 64 : Courbe de rétention pour du substrat pour la semaine 12 après plantation. ....	152
Figure 65 : Validation du modèle polynomial semaine 12 .....	153
Figure 66 : Validation des modèles de la transpiration qui utilisent le modèle de Rs polynomial semaine 12.....	153
Figure 67 : Validation du modèle de Jarvis semaine 12 .....	154
Figure 68 : Validation des modèles de transpiration qui utilisent le modèle de Jarvis pour Rs semaine 12.....	154
Figure 69 : Organigramme des étapes de simulation du climat distribué avec le logiciel ANSYS Fluent.....	157
Figure 70 : Evolution temporelle du coefficient d'extinction de couvert végétal avec l'augmentation de restriction hydrique semaine 12 après plantation. ....	159
Figure 71 : Géométrie du domaine limité autour du couvert végétal.....	163
Figure 72 : Maillage du système d'étude .....	163
Figure 73 : Conditions aux limites et positions des résultats des simulations. ....	164
Figure 74: Evolution temporelle des conditions aux limites pour le domaine limité. ....	165
Figure 75 : Température mesurée et simulée de l'air en différents points pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B) : domaine limité.....	166
Figure 76 : Température mesurée et simulée de l'air dans le couvert et au niveau des feuilles pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B) : domaine limité. ....	166
Figure 77 : Humidité relative mesurée et simulée de l'air en différents points du domaine limité pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B). ....	167
Figure 78 : Evolution temporelle du potentiel matriciel mesurée et simulée pour le domaine limité dans le cas de restriction hydrique. ....	168
Figure 79 : Résistance stomatique mesurée et simulée pour les feuilles du bas et les feuilles du haut du couvert végétal : confort (A), restriction hydrique (B) : domaine limité. ....	168
Figure 80 : Transpiration mesurée et simulée pour le domaine limité : confort (A) restriction hydrique (B). ....	169
Figure 81: Géométrie du domaine de calcul complet. ....	172
Figure 82 : Aperçu du maillage du domaine complet et zoom sur le maillage de l'écran.....	172
Figure 83 : Conditions aux limites et positions des résultats des simulations: domaine complet. ....	173
Figure 84: Evolution temporelle des conditions aux limites pour le domaine complet. ....	174

Figure 85 : Température mesurée et simulée de l'air en différents points du domaine complet pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B). .....	175
Figure 86 : Température mesurée et simulée de l'air dans le couvert et au niveau des feuilles pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B) : domaine complet. ....	176
Figure 87 : Température mesurée et simulée de l'écran d'ombrage pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B) : domaine complet.....	176
Figure 88 : Humidité relative mesurée et simulée de l'air en différents points du domaine complet pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B).....	177
Figure 89 : Cartographie des vitesses de l'air à l'intérieur de la serre à 3h. ....	179
Figure 90 : Cartographie des vitesses de l'air à l'intérieur de la serre à 11h. ....	179
Figure 91 : Cartographie des vitesses de l'air à l'intérieur de la serre à 17h. ....	180
Figure 92 : Cartographies des temperature dans la serre d'étude à 12h pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B).....	181
Figure 93 : Cartographies des humidités dans la serre d'étude à 12h pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B).....	182
Figure 94 : Evolution temporelle de potentiel matriciel mesuré et simulé pour le cas de restriction hydrique : domaine complet.....	183
Figure 95 : Résistance stomatique mesurée et simulée pour les feuilles du bas et les feuilles du haut du couvert végétal : confort (A), restriction hydrique (B) : domaine complet.....	184
Figure 96 : Transpiration mesurée et simulée : confort (A), restriction hydrique (B). ....	185
Figure 97 : Température simulée de l'air en différents points du domaine complet et des feuilles pour les différents régimes d'irrigation. ....	187
Figure 98 : Température simulée de l'écran d'ombrage pour les différents régimes d'irrigation : domaine complet. ....	188
Figure 99 : Humidité relative simulée de l'air en différents points du domaine complet pour les différents régimes d'irrigation. ....	188
Figure 100 : Potentiel matriciel simulé pour les différents régimes d'irrigation. ....	189
Figure 101 : Résistance stomatique simulée pour les feuilles du bas et les feuilles du haut du couvert végétal pour les différents régimes d'irrigation. ....	189
Figure 102 : Transpiration pour les différents régimes d'irrigation.....	189
Figure 103 : Cartographies des températures dans la serre d'étude à 12h pour trois régimes d'irrigation : 100 % (A), 70 % (B), et 50 % (C). ....	191

Figure 104 : Cartographies des humidités dans la serre d'étude à 12h pour trois régimes d'irrigation : 100 % (A), 70 % (B), et 50 % (C). .....	192
Figure 105 : Cartographies du flux de transpiration dans le couvert végétal à 12h pour trois régimes d'irrigation : 100 % (A), 70 % (B), et 50 % (C).....	193

### Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques optiques du verre. ....	51
Tableau 2 : Schéma de discrétisation. ....	89
Tableau 3 : Type de régime d'écoulement. ....	106
Tableau 4 : Sondes utilisées pour la tourbe.....	129
Tableau 5 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des capteurs utilisés ainsi leurs incertitudes .....	132
Tableau 6 : Scénarios considérés pour mettre en œuvre le plan factoriel complet .....	141
Tableau 7 : Paramètres utilisés pour ANSYS Fluent. ....	157
Tableau 8 : Propriétés des matériaux utilisés.....	158
Tableau 9: Facteurs de sous-relaxation utilisés pour les simulations.....	161
Tableau 10: Performance des simulations pour les deux régimes d'irrigation pour le domaine limité.....	166
Tableau 11: Ecart des valeurs prédites des variables pour un scénario donné, par rapport au scénario de référence, valeurs des variables climatiques ( $T_a$ , $RH_a$ ), potentiel matriciel, de résistance stomatique, et transpiration. ....	170
Tableau 12: Performance des simulations pour les deux régimes d'irrigation. ....	177
Tableau 13: Résultats des simulations pour différents régimes d'irrigation.....	186





### Chapitre 1. Introduction

#### 1-1 Contexte général

Les systèmes des cultures sous abri « serre » permettent de créer un microclimat artificiel qui permet non seulement de maîtriser les conditions de culture, mais aussi de protéger les plantes vis-à-vis des agresseurs extérieurs (le froid, le vent, la pluie, les insectes, la pollution...). La serre permet ainsi de gérer au mieux les besoins des plantes et favorise la croissance et le développement des cultures. L'agrosystème serre offre beaucoup d'avantages aux horticulteurs dans la mesure où il répond aux exigences des circuits de commercialisation qui requièrent aujourd'hui une haute qualité avec de forts rendements. Il fournit également des conditions de travail plus agréables que le plein air et est devenu pour ces raisons un système de production de masse qui connaît un vrai succès.

Ce succès de l'agrosystème serre est cependant menacé par des évolutions récentes qui fragilisent ses modèles techniques. Parmi celles-ci, on peut citer les fluctuations du coût de l'énergie, la raréfaction des ressources hydriques pour certaines régions ou bien encore les exigences en matière d'environnement et de normes sanitaires et alimentaires. De plus, s'ajoutent à cela les évolutions naturelles telles que l'apparition de bio-agresseurs (mouche blanche ou bien encore Botrytis) (Boulard and Wang, 2002) et les événements induits par le changement climatique global (températures extrêmes par exemple).

Ces contraintes émergentes conduisent les chercheurs à établir dans un premier temps un état des lieux, en vue de définir des méthodologies pour répondre aux enjeux actuels de durabilité. Le premier enjeu est économique, il s'agit de réduire les coûts d'installation (structures) et de fonctionnement (énergie, irrigation) tout en augmentant la quantité et la qualité de la production. Le second est environnemental, et concerne la réduction des intrants (énergie, eau, CO<sub>2</sub>, fertilisants). Le dernier est sociétal, et vise à prendre en compte les attentes du consommateur en termes de qualité.

De nombreux changements ont d'ores et déjà été opérés pour répondre à ces enjeux, tels que le remplacement de la ventilation mécanique forcée consommatrice d'énergie par la ventilation naturelle via les ouvrants, l'adaptation des matériaux de construction pour une meilleure isolation, ou encore la mise en œuvre d'autres systèmes de chauffage et de

déshumidification dans le but de diminuer la consommation de l'énergie. D'autres aménagements existent, tels que l'usage de filets anti-insectes en substitution aux insecticides chimiques, ou encore l'utilisation de techniques d'irrigation économes en eau afin de réduire la consommation des ressources hydriques (goutte-à-goutte par exemple). Ces solutions conduisent à une gestion plus complexe du microclimat sous serre afin de fournir des conditions optimales pour le développement de la plante.

Ainsi, pour améliorer la gestion climatique des serres, il importe de poursuivre les investigations afin (1) de mieux comprendre les différentes interactions entre les mécanismes physiques (transferts de chaleur et de masse) et écophysologiques (i.e. associées au fonctionnement du végétal) sous serre, et (2) de proposer des itinéraires techniques innovants répondant aux enjeux socio-environnementaux. Pour mieux comprendre ces mécanismes, il convient de s'intéresser au système substrat-plante-atmosphère dans sa globalité.

In fine, la maîtrise de l'ensemble de ces **mécanismes physiques et écophysologiques** dans le **continuum substrat-plante-atmosphère**, pourra permettre de proposer des solutions technologiques afin de mieux maîtriser **le microclimat et l'irrigation** notamment.

Dans cette perspective de gestion durable des apports en eau, notre travail de recherche vise à analyser l'impact d'une réduction des apports en eau sur le fonctionnement de l'agrosystème serre tout en garantissant un niveau de qualité optimal des végétaux.

### 1-2 Problématique

Les producteurs sous serre cherchent aujourd'hui de plus en plus à réduire les volumes d'intrants utilisés au cours de la culture. Ces intrants au sens large incluent aussi bien l'énergie que l'eau ou encore les produits phytosanitaires (pesticides). L'eau en particulier requiert une attention particulière, cette ressource étant limitée. En France, 11,9 milliards de m<sup>3</sup> d'eau ont été consommés en 2009 dont 26 % pour l'irrigation (Agences de l'eau - SOeS, 2012). Durant la période estivale notamment, réduire la consommation de l'eau devient un véritable enjeu. Cependant, imposer des restrictions hydriques peut affecter le développement des plantes et leur qualité. Les caractéristiques climatiques ont également un impact important sur le développement des plantes. Parmi

celles-ci, on retrouve la température et l'humidité de l'air, le rayonnement et le CO<sub>2</sub>. En été, les températures élevées favorisent la transpiration des plantes. La consommation d'eau par les plantes augmente avec l'augmentation des quantités d'eau rejetées par transpiration. Plus les températures sont élevées, plus les consommations hydriques seront importantes. Néanmoins, lorsque la température dépasse un certain seuil et dès lors que la disponibilité en eau dans le substrat est réduite, les stomates se ferment car la plante risquerait de se dessécher. La plante stoppe alors sa croissance et risque de dépérir. La transpiration sert à refroidir et maintenir une température supportable pour la plante. Dans le cas d'une restriction hydrique la transpiration diminue à cause de la fermeture des stomates. Cela entraîne une augmentation de la température de la plante, qui peut elle-même dépasser la température de l'air avoisinant, ce qui n'est pas le cas pour une plante en confort hydrique (Hattem et al., 2007; Hsiao et Acevedo, 1974). Ainsi, la prédiction de la transpiration du végétal en conditions de restriction hydrique est un enjeu majeur dès lors que l'on cherche à produire des végétaux de qualité tout en limitant les apports en eau. La question sous-jacente à cette problématique est de savoir comment sont régulés les transferts hydriques dans le continuum substrat-plante-atmosphère en condition de restriction hydrique sous serre.

De cette problématique découlent les questionnements suivants :

- Comment une plante se comporte-t-elle en restriction hydrique, et quels sont les signes de stress de plantes cultivées en pot sous serre ?
- Existe-t-il des modèles qui prennent en compte la globalité du continuum substrat-plante-atmosphère, et qui permettent de modéliser la fermeture des stomates (i.e. résistance stomatique) et la transpiration pour des plantes cultivées en pot sous serre agricole et pour des régimes d'irrigation en confort et en restriction hydrique ?
- Comment les différents régimes d'irrigation influencent-ils les transferts d'eau et d'énergie sous serre ?
- Comment arriver à réduire la consommation d'eau par les plantes tout en garantissant un niveau de qualité des plantes suffisant ?

### 1-3 La question de la gestion de l'eau en horticulture sous serre

#### 1-3.1 Transpiration des plantes

Afin d'appréhender les effets induits par une réduction des apports en eau, il convient d'analyser les mécanismes de circulation de l'eau dans le continuum substrat-plante-atmosphère. L'eau est absorbée par les racines et alimente un flux hydrique continu substrat-plante-atmosphère. Ainsi, le principal mécanisme d'absorption de l'eau à partir du sol défini par Morard (1995) réside dans un appel de l'atmosphère entourant le végétal. Les feuilles étant placées dans un milieu non saturé en vapeur d'eau, le végétal a tendance à combler ce déficit par la transpiration : les cellules épidermiques se déshydratent, ce qui produit un appel d'eau vers les cellules voisines. De proche en proche ce déficit est transmis aux vaisseaux du xylème jusqu'aux racines. Morard (1995) ajoute que la quasi-totalité de l'eau qui pénètre dans le végétal ne fait qu'y transiter : elle est émise par les feuilles directement sous forme de vapeur d'eau. La transpiration s'effectue principalement au niveau des stomates à plus de 90% (Hopkins, 2003), mais aussi de la cuticule (si elle est mince). Ainsi, la transpiration est placée au cœur de la problématique de transfert des flux d'eau dans le continuum substrat-plante-atmosphère. Plusieurs facteurs influencent l'intensité de la transpiration :

- La demande climatique est fonction de l'humidité et la température de l'air ambiant, de la vitesse du vent et de l'intensité d'ensoleillement.
- L'espèce végétale et sa variété.
- Le nombre des stomates de la feuille et leur degré d'ouverture.
- Le régime d'irrigation (type d'irrigation, en restriction ou en confort hydrique).

La compréhension fine des échanges d'eau dans le continuum substrat-plante-atmosphère en restriction hydrique devrait permettre de proposer des solutions pour mieux gérer, voire même minimiser les consommations en eau.

La transpiration des plantes sous serre agricole joue un rôle important dans la définition du microclimat sous serre. Elle a un impact direct sur les bilans hydrique et énergétique, comme démontré par Boulard et Wang (2002) pour les tomates, ou encore par Katsoulas et al. (2001) pour les roses. Beaucoup des modèles de transpiration des plantes sous serre agricole ont été développés et la plupart sont basés sur un bilan d'énergie au niveau de la plante (Katsoulas et Kittas, 2011). Selon Morille et al. (2013) les modèles les plus utilisés en CFD pour des cultures sous serre sont les modèles appelés

« méthode directe », qui calculent directement le flux par la loi de Fick (i.e. flux de vapeur d'eau proportionnel au gradient de concentration) ; le flux est donc fonction de la différence de pression de vapeur entre les feuilles et l'air environnant, de la résistance à l'écoulement d'air et de la résistance stomatique. Le modèle de Penman Monteith est basé quant à lui sur une approche qui combine le calcul des flux de chaleur et de vapeur (donnés par la loi de Fick) à l'équation du bilan d'énergie (i.e. l'énergie radiative disponible au niveau du végétal est égale à la somme des flux convectifs de chaleur et de vapeur. De plus, la méthode directe nécessite la connaissance des températures des feuilles, variable rarement mesurée, alors que le modèle de Penman Monteith requiert la température de l'air, plus facile d'accès. Les deux modèles nécessitent la détermination de la résistance stomatique. La plupart des travaux qui estiment la transpiration des plantes avec l'un ou l'autre de ces deux modèles utilisent donc des sous modèles de la résistance stomatique qui ont été développés initialement pour les grandes cultures (Kichah et al., 2012; Majdoubi et al., 2009).

### 1-3.2 Résistance stomatique

L'adaptation des plantes au changement climatique et à la disponibilité en eau du substrat s'effectue via l'ouverture ou la fermeture des stomates qui peut être appréhendée par la résistance stomatique. La résistance stomatique tire son nom des stomates, orifices de petite taille (de 5 à 30  $\mu\text{m}$  de diamètre) le plus souvent présents sur la face inférieure des feuilles, et permettant l'essentiel des échanges gazeux entre les feuilles et le milieu extérieur. La résistance est alors due au passage de la vapeur d'eau au travers de ces stomates. L'ouverture et la fermeture des stomates permettent le contrôle des rejets de vapeur d'eau. Ces transferts varient en fonction des facteurs environnementaux (rayonnement solaire, température de l'air, disponibilité en eau du substrat, déficit de pression de vapeur, humidité relative, concentration du gaz carbonique, potentiel hydrique de feuille) (Damour et al., 2010 ; Gerosa et al., 2012). Selon Jarvis, (1976); Thorpe et al. (1980), Kaufmann, (1982) ou encore Damour et al. (2010), les déterminants majeurs de la résistance stomatique en confort hydrique sont le rayonnement et le déficit de pression de vapeur (humidité relative). S'y ajoute la disponibilité en eau dans le substrat ou dans la plante dans le cas de restriction hydrique. La modélisation de la résistance stomatique a été largement étudiée au cours des 50

dernières années et améliorée grâce à l'apparition de nouveaux capteurs ou nouvelles techniques qui permettent la mesure directe de la résistance stomatique (poromètre à diffusion ou analyseur d'échanges gazeux). Damour et al. (2010) présentent ainsi 35 modèles de résistance stomatique, la majorité étant toutefois semi-empirique, associant des fonctions d'ajustement à des hypothèses physiologiques. Ces modèles sont déduits soit du modèle multiplicatif empirique de Jarvis (1976), qui est basé sur la réponse de la résistance stomatique à la variation des facteurs environnementaux, soit du modèle de Ball et al. (1987) qui exprime la réponse de la résistance stomatique non pas juste en fonction des facteurs environnementaux, mais aussi en fonction des facteurs physiologiques comme l'activité photosynthétique basée sur l'assimilation du CO<sub>2</sub>.

Dans les cas de restriction hydrique, une manière intuitive fréquemment employée pour adapter les modèles de résistance stomatique consiste à ajouter une fonction qui exprime l'état hydrique du substrat ou de la plante au modèle multiplicatif de Jarvis, (1976) ou de Ball et al. (1987), comme dans les travaux de Li et al. (2012) par exemple.

La plupart des travaux précités ont été réalisés dans le contexte des grandes cultures. Qu'il s'agisse de culture en pots ou de plein champ, la réponse des plantes aux facteurs environnementaux est de l'ordre de quelques minutes (Panković et al., 1999). La différence entre ces deux modes de culture est en revanche beaucoup plus marquée vis-à-vis du stress hydrique. Dans le cas des cultures en pots, la réponse est de l'ordre de quelques heures à quelques jours après une contrainte hydrique, mais elle dépend aussi de la taille du conteneur, de l'espèce végétale, de la quantité du substrat, du climat extérieur et du degré de restriction hydrique. Pour des cultures de plein champ, la réponse des plantes au stress hydrique est de l'ordre de quelques jours à quelques semaines (Panković et al., 1999).

Très peu d'études existent à l'heure actuelle sur la modélisation de la résistance stomatique pour des cultures en pots sous serre agricole en régime de restriction hydrique. Li et al. (2012) ont testé et paramétré en culture sous serre. Quelques modèles de résistance stomatique obtenus initialement pour les grandes cultures, Ils ont obtenu les meilleurs résultats avec le modèle de BWB–Leuning–Yin qui est une version améliorée par Wang and Leuning (1998) et par Yin and Struik (2009) du modèle plante-atmosphère de Ball et al. (1987). Ces résultats ont été obtenus pour des basses concentrations de gaz carbonique dans l'air sous serre agricole (inférieures à 250  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ) et de faibles

plages de variation du rayonnement photosynthétiquement actif (PAR) (inférieures à  $300 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ). D'autres études empiriques ne cherchent pas à modéliser la résistance stomatique, mais plutôt à trouver des explications relatives à la réponse des stomates face au stress hydrique comme les travaux de Čereković et al. (2013) et Bibi et al. (1999). Ceux-ci ont montré en particulier que la résistance stomatique au stress hydrique varie d'une espèce à une autre.

### 1-4 Intégration dans des modèles climatiques globaux ou distribués

Les modèles de la résistance stomatique servent à alimenter des modèles globaux ou dans des modèles distribués (i.e. logiciels de mécanique des fluides numérique de type Computational Fluid Dynamics, CFD) pour l'étude des transferts d'eau afin de simuler le microclimat sous serre.

L'approche globale s'appuie sur des bilans de quantité de mouvement et d'énergie pour caractériser les échanges de masse et d'énergie entre l'intérieur et l'extérieur de la serre à partir de la mesure de différentes variables climatiques en différents points dans la serre et à l'extérieur. Ce type d'approche est surtout utilisé pour étudier les échanges thermiques (Bibi et al., 1999; Mesmoudi et al., 2008). La limite des modèles globaux est la difficulté de trouver un modèle qui converge, le temps de calcul (qui est d'autant plus important que l'on intègre l'ensemble des phénomènes physiques et écophysologiques pour plus de réalisme) et la précision des résultats obtenus qui sont moyennés sur des surfaces ou des volumes. Draoui et al. (2013) prennent en compte la transpiration des plantes et la concentration de  $\text{CO}_2$  dans la modélisation du microclimat sous serre. L'approche globale donne une idée générale des champs de vitesse, température, et humidité, et présuppose que ces champs sont uniformes sur de grandes surfaces (Fitz-Rodríguez et al., 2010). Ces modèles ne prennent pas en compte les détails de la géométrie, ni les avancées scientifiques menées au niveau de la structure de la serre comme les ouvrants et les écrans d'ombrage, ce qui ne permet pas au final de prédire la distribution du microclimat sous serre avec une grande précision. Il est donc primordial d'accéder à une cartographie fine du microclimat distribué dans la serre afin d'optimiser son fonctionnement à moindre coût de calcul, d'où le recours à des approches de climat distribué du type CFD.

Une approche mathématique basée sur la résolution des équations de la mécanique des fluides permet de prendre en compte l'ensemble des phénomènes physiques et écophysologiques. Les scientifiques ont commencé à exploiter ces logiciels pour étudier le microclimat sous serre agricole, dès leur apparition vers les années 1980. Les premières études de CFD se sont intéressées aux problématiques de ventilation comme l'étude de Okushima et al. (1989), Brundrett (1993), ou encore Boulard et Baille (1995) qui ont étudié en 2 dimensions (2D) et en régime stationnaire le microclimat d'une petite serre avec des conditions aux limites simples, sans prendre en compte le transfert d'énergie par rayonnement et l'impact du couvert végétal. Par la suite, les études ont été développées, dans l'objectif d'accroître le réalisme des simulations, en prenant en compte le maximum des phénomènes physiques et écophysologiques. Les travaux en 2D stationnaire de Kichah et al. (2012), en 2D instationnaire de Morille et al. (2012) ou bien encore de Nebbali et al. (2012) en 3D stationnaire intègrent les échanges de chaleur radiatifs et la réponse des plantes. L'objectif de ces travaux était d'étudier l'influence sur le microclimat de la serre de différents paramètres (conditions climatiques, aménagements particuliers comme les écrans d'ombrage ou thermiques, ou bien les filets anti insectes). Les derniers travaux de CFD relatifs aux serres concernent aussi le microclimat sous serre, mais chacun de focalise sur une problématique particulière qui dépend du climat de la région concernée et du type de serre. Par exemple, l'étude de He et al. (2015) en 3D instationnaire avait pour objectif d'étudier les problèmes de ventilation dans une serre multi-chapelles. De même, l'étude de Zhang et al. (2016) en 2D instationnaire avait pour but de caractériser le champ de température d'une serre vide sans couvert végétal avec une infrastructure particulière constituée d'un mélange des matériaux. La plupart des études qui ont intégré l'impact mécanique (i.e. le couvert végétal joue un rôle d'obstacle à l'écoulement d'air) et écophysologique (i.e. les échanges de chaleur latente et de chaleur sensible) du couvert végétal sur le microclimat sous serre sont basés sur l'étude de Boulard et Wang (2002).

### 1-5 Verrous scientifiques

Selon Damour et al. (2010), les modèles de résistance stomatique, qui constituent l'élément clé de la transpiration, restent encore à améliorer. La plupart des modèles de résistance stomatique identifiés dans la littérature sont basés sur les approches de Jarvis



(1976) et de Ball et al. (1987) qui sont des modèles initialement développés dans le cas des cultures en plein champ. Peu de travaux existent pour des plantes cultivées en pot sous serre. Peu de travaux également concernent les situations de restriction hydrique. Il existe de nombreux modèles de transfert de l'eau qui se focalisent soit sur le système substrat -plante, soit sur le système plante-atmosphère, mais **très peu font l'objet de réel couplage entre les deux systèmes**. De tels modèles ont également été établis principalement dans les systèmes de grandes cultures (Tuzet et al., 2003).

De plus à notre connaissance, aucun modèle de CFD portant sur l'étude du microclimat sous serre n'intègre les transferts de l'eau dans le continuum substrat-plante-atmosphère. La prise en compte de ces transferts nécessite de les caractériser et de développer une routine spécifique afin de l'intégrer dans un modèle CFD pour simuler l'état hydrique du substrat et les transferts substrat-plante. L'influence des plantes en restriction hydrique sur le microclimat sous serre agricole reste aussi à caractériser. Jusqu'à présent, tous les travaux de CFD qui intègrent l'influence du couvert végétal sur le microclimat sous serre ont été menés pour des régimes d'irrigation en confort. Le test des différents régimes d'irrigation avec le logiciel CFD pourrait permettre à terme d'apporter des éléments de réponse pour réduire la consommation des intrants sous serre, l'eau en particulier, tout en maintenant la qualité de la production.

### 1-6 Contexte de la thèse et questionnements scientifiques

La thèse a été réalisée au sein de l'unité de recherche EPHor (Environnement Physique de la plante Horticole) d'Agrocampus Ouest, Campus d'Angers en partenariat avec l'UMR INRA ECOSYS (Écologie fonctionnelle et écotoxicologie des agroécosystèmes, anciennement EGC). Elle a été financée par le Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt, et s'inscrit dans la continuité des travaux réalisés par l'unité, notamment des thèses qui portaient sur la modélisation du microclimat sous serre agricole. Ces thèses ont apporté des éléments de compréhension sur le fonctionnement climatique des serres : la thèse de Ould Khaoua, (2006) a porté sur la modélisation de l'aération naturelle, qui doit être privilégiée face à l'aération forcée consommatrice de l'énergie. Les travaux d'A. Kichah (2012) concernaient plus particulièrement l'interaction du végétal avec le microclimat intérieur d'une serre agricole selon une approche localisée autour du végétal. Enfin, la thèse de B. Morille

(2013), s'est focalisée sur le fonctionnement des végétaux, les questions énergétiques et les problèmes de condensation. Depuis 2011, un projet intégrateur (SUbstrat-Plante-ATmosphère-sous Serre, SUPLATS) associant les compétences de sciences du sol et de bioclimatologie de l'unité EPHor a été mis en place afin de lier les connaissances scientifiques entre les relations substrat-plante d'une part et les relations plante-atmosphère d'autre part. Ce projet vise une compréhension plus fine des échanges de chaleur et de masse dans le continuum substrat-plante-atmosphère. L'objectif du projet SUPLATS est de répondre essentiellement aux questions suivantes :

- Quels sont les impacts conjoints de l'irrigation/stress hydrique et du climat sur le développement du végétal ?
- Quel est l'effet de l'enracinement et/ou des propriétés physiques du substrat sur le fonctionnement éco-physiologique du végétal (transpiration) lorsque celui-ci est soumis à divers régimes d'irrigation (en particulier de l'inconfort ou du stress hydrique) ?
- Quelle gestion climatique de la serre est la plus adaptée pour optimiser la croissance aérienne et/ou la croissance racinaire ?
- Peut-on déboucher sur un système de culture véritablement économe des intrants (eau énergie, CO<sub>2</sub>) ?

Les travaux menés dans le cadre de la présente thèse s'inscrivent dans ce projet qui reste un projet large et qui mobilisera différentes compétences humaines sur plusieurs années encore. Il est envisagé d'apporter des éléments de réponse aux deux premières questions précitées, en abordant conjointement le compartiment aérien et le compartiment racinaire. L'idée est de parvenir à une compréhension fine des transferts d'eau dans le continuum substrat-plante-atmosphère sous serre dans son ensemble ainsi que des échanges énergétiques du fait qu'ils sont liés (Rico-Garcia et al., 2006). Dans cette optique, une étude de l'influence des différents régimes d'irrigation (confort, et restriction hydrique) sur le comportement des plantes peut apporter des réponses en plus. Cette compréhension fine des échanges d'eau et d'énergie passe d'abord par une compréhension des phénomènes physiques et éco-physiologiques qui surviennent dans le continuum substrat-plante-atmosphère sous serre. Pour aborder ce travail, nous nous sommes appuyés sur une double approche associant expérimentation et modélisation.

Le volet expérimental a été conduit dans une serre en verre de type Venlo et dans une chambre de culture avec une culture ornementale, *l'Impatiens* de Nouvelle-Guinée. On s'est intéressé plus précisément à la réponse des plantes au changement de régime d'irrigation (confort et restriction hydrique). Cette réponse a été analysée en termes de quantification des transferts de masse (eau) et d'énergie dans le continuum substrat-plante-atmosphère.

Dans un deuxième temps, un sous modèle spécifique a été développé dans le modèle de microclimat distribué mis en œuvre par l'unité afin de simuler les transferts d'eau et d'énergie dans le continuum substrat-plante-atmosphère ainsi que la réponse physique et écophysologique des plantes à un changement de régime d'irrigation. Ce modèle est inclus dans l'outil numérique basé sur une approche mécaniste (logiciels CFD : ANSYS Fluent 15) de modélisation du microclimat sous serre. Il a permis de tester différents scénarios d'irrigation et aussi d'analyser leur impact sur le microclimat sous serre. L'objectif était de tester différents régimes d'irrigation afin d'identifier le meilleur scénario permettant à de réduire la consommation en eau des plantes tout en les maintenant dans de bonnes conditions de développement.

### 1-7 Structure du mémoire

Ce mémoire s'articule autour de 6 chapitres :

Le chapitre 2 présente les principaux mécanismes biophysiques gouvernant les échanges de masse et de chaleur dans le continuum substrat-plante-atmosphère sous serre. Il aborde successivement le fonctionnement climatique des serres, le fonctionnement du substrat (du point de vue hydrique principalement) et les interactions du végétal avec le climat.

Le chapitre 3 aborde les formulations mathématiques (i.e. équations mathématiques) des principaux phénomènes biophysiques présentés dans le deuxième chapitre. Ces équations mathématiques sont utilisées par la suite dans les travaux de modélisation du microclimat sous serre agricole pour des plantes en considérant deux régimes d'irrigation : confort et restriction hydrique.

Le chapitre 4 porte sur la méthodologie expérimentale et modélisatrice mise en place dans le cadre de cette thèse.

Le chapitre 5 regroupe l'ensemble des résultats obtenus et propose une discussion sur la portée du travail réalisé dans cette thèse.

Enfin, le 6<sup>ème</sup> et dernier chapitre présente les principales conclusions et formule des perspectives pertinentes pour les futurs travaux de recherche.

### Chapitre 2. Les serres et leur fonctionnement écophysologique

#### 2.1 Les serres de production

La serre agricole, ou culture sous abris constitue un milieu confiné. Elle est utilisée pour la production de végétaux horticoles (légumes et plantes ornementales) et arboricoles (arbres fruitiers ou d'ornements). Son rôle est de garantir un environnement favorable aux plantes. Elle protège en effet les plantes contre les aléas climatiques qui pourraient être défavorables à leur développement : le vent, les températures extrêmes (le froid en particulier), la pluie, la neige, le rayonnement solaire excessif, les insectes, ou encore les maladies. Le système de culture sous abris crée un microclimat idéal au voisinage des plantes, qui diffère sensiblement de celui qui prévaut à l'extérieur de la serre. Ce microclimat presque entièrement contrôlé permet ainsi de cultiver la plupart des végétaux dans n'importe quel endroit et durant toute l'année (Von Elsner et al., 2000).

##### 2.1.1 Classification des serres

Il existe différents types des serres, ayant chacun leurs avantages en fonction de l'usage escompté. En général il n'y a pas un seul type de serre qui peut être considéré comme le meilleur pour un usage donné. Les serres disponibles sur le marché se distinguent par la forme et les matériaux de construction utilisés, et elles sont conçues pour répondre aux besoins spécifiques des cultures. Ces besoins dépendent du type de culture et des conditions climatiques extérieures. Les serres tunnels (Fig. 1a), en plastique, sont préférées pour les cultures à faible valeur ajoutée (i.e. maraîchage), elles présentent une structure légère, et facile à installer mais leur couverture doit être remplacée périodiquement. En France, ce sont les serres le plus utilisées sur le pourtour méditerranéen. Les serres multi-chapelles (Fig.1b), en verre ou en double paroi plastique gonflable, sont plutôt utilisées pour les cultures à forte valeur ajoutée (e.g. plantes ornementales, tomates, concombres). Ces serres représentent un investissement beaucoup plus lourd mais ont une durée de vie bien supérieure : environ 15 ans pour les serres en verre contre 5 ans pour les serre en plastique (Sevila et Dauple, 1990). Toutefois, cette durée de vie reste très variable selon les investissements réalisés. Ces serres peuvent être utilisées pour des cultures intensives en toute saison. Elles présentent aussi les meilleures performances du point de vue thermique (isolation). Ce type de serres est surtout présent

dans les régions du nord de l'Europe (Peet et Welles, 2005) où les températures sont relativement basses et le rayonnement est très faible. Parmi les serres multi-chapelles commercialisées, on peut citer la serre de type Venlo, en verre, qui est la plus utilisée pour les cultures ornementales.

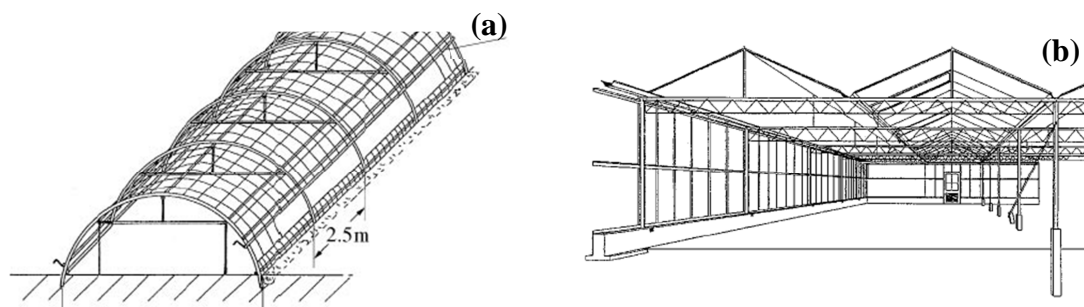


Figure 1 : Serre multi-chapelles (a) et serre tunnel (b) (source: Von Elsner et al., 2000).

### 2.1.2 Gestion du climat et de l'irrigation

La régulation du climat et la gestion de l'irrigation sont essentielles pour produire des végétaux de qualité. Pour cela, la serre est munie de nombreux équipements et capteurs. Des dispositifs électroniques intègrent les variables climatiques (température, humidité, rayonnement, vent, concentration en CO<sub>2</sub>) extérieures et intérieures. Ces dispositifs permettent de contrôler automatiquement le climat de la serre en jouant sur l'aération, le chauffage et l'irrigation.

#### 2.1.2.1 Contrôle de la température

Dans le but de garantir une température optimale pour le développement et la qualité des plantes, il est nécessaire de mettre en place un système de contrôle des températures permettant de faire face au changement des températures entre la période hivernale où les températures sont basses et la période estivale où les températures sont élevées.

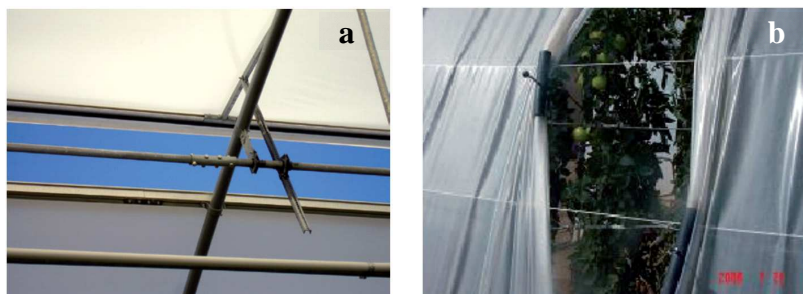
##### a. Cas des températures élevées

Réduire les températures pendant la période estivale est une préoccupation majeure surtout lors d'épisodes de forte chaleur. Ceci peut être réalisé par :

- **Contrôle de la ventilation**

La ventilation naturelle est assurée par des ouvrants et/ou des ouvertures (Fig. 2a et 2b). C'est la façon la plus simple, la moins coûteuse et la plus efficace pour diminuer l'excès de température à l'intérieur de la serre. L'échange avec de l'air extérieur plus

froid permet de réduire la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la serre.



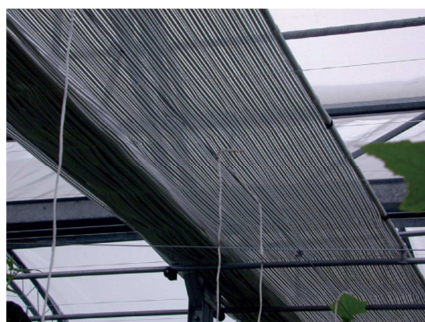
**Figure 2 :** Ventilation naturelle par les ouvrants (a) ou les ouvertures (b) (source: Kittas et al., 2012).

- **Utilisation d'écrans d'ombrage**

Réduire le rayonnement solaire transmis dans la serre en période estivale reste une solution qui permet de diminuer la température à l'intérieur de la serre. Cette réduction de la transmission du rayonnement peut être assurée à l'aide des systèmes d'ombrage. L'ombre est obtenue par différentes méthodes, soit par l'utilisation d'écrans d'ombrage positionnés au-dessus du couvert végétal (Fig. 3), soit par le blanchiment de la toiture de la serre par l'application de chaux ou d'une peinture spécifique.

Les écrans d'ombrage sont des toiles tissées de bandes de polyester et de bandes d'aluminium. Cet assemblage des deux matières confère à cette trame des fonctions d'ombrage et d'isolation. La toile est portée sur toute la surface de la serre, l'ouverture et la fermeture étant régulées automatiquement à l'aide de sondes de température. Ces écrans sont d'une grande efficacité pour réguler la température dans les serres.

Le blanchiment de la toiture, très pratiqué dans les pays méditerranéens, est moins coûteux. Néanmoins, l'utilisation d'écrans d'ombrage tend à se généraliser car ce dispositif s'avère très efficace (Cohen et al., 2005).



**Figure 3 :** Ecran d'ombrage (source: Kittas et al., 2012).



- **Refroidissement par évaporation**

Des systèmes de brumisation (Fig. 4) peuvent être utilisés pour garder une température optimale à proximité des plantes. Le principe de ces systèmes est basé sur la conversion de l'énergie sensible en énergie latente tout en absorbant l'excès de chaleur.



Figure 4 : Système de brumisation (source: <http://www.brumstyl.com/brumisateur-serre-7/>).

**b. Cas des températures basses**

Plusieurs dispositifs sont également utilisés pour contrecarrer des températures basses (en période hivernale ou en mi-saison) qui pourraient être préjudiciables au développement des végétaux.

- **Utilisation du Chauffage**

En période hivernale, l'ensoleillement n'est pas suffisant pour générer une température de l'air suffisante à l'intérieur de la serre. Le chauffage est alors utilisé pour augmenter les températures à l'intérieur de la serre. Le dispositif classique comporte une chaudière (positionnée en dehors de l'enceinte de la serre) et des tuyaux d'eau chaude répartis à l'intérieur de la serre. Ces tuyaux sont aériens, ils sont situés le long des parois au-dessus du couvert (Fig. 5a), sous les tablettes (Fig. 5b) ou bien encore dans la végétation. Ces tuyaux peuvent être fixes ou mobiles. Ils sont parfois encastrés dans le sol. Par période de grand froid, des aérothermes (gainés de soufflage) peuvent également être actionnés ponctuellement.





**Figure 5 : Chauffage aérien au-dessus du couvert végétal (a) et au-dessous du couvert végétal (b)**  
(source: Kittas et al., 2012).

- **Emploi d'écrans thermiques**

En période hivernale, des écrans thermiques peuvent être utilisés durant la nuit. Ils permettent de diminuer les déperditions thermiques par rayonnement survenant la nuit au niveau du toit de la serre. Ils permettent aussi de limiter le volume d'air autour du couvert végétal, ce qui demande moins de chauffage pour atteindre des températures optimales dans ce volume réduit.

#### 2.1.2.2 Contrôle de l'humidité de l'air

Une humidité de l'air excessive peut occasionner de la condensation au niveau des parois de la serre et des végétaux. La condensation est considérée comme le vecteur principal de maladies fongiques (Bartzanas et al., 2004; Boulard et al., 2008; Roy et al., 2006). Différentes méthodes et systèmes peuvent être utilisés afin de réduire l'humidité à l'intérieur de la serre. Une technique simple est basée sur l'utilisation des systèmes de ventilation et/ou de chauffage. Grâce à la ventilation, l'air humide dans la serre est remplacé par l'air extérieur relativement sec. En période estivale, la ventilation suffit pour réduire l'humidité. Mais en période hivernale, la ventilation concourt aussi à la réduction des températures, ce qui n'est pas souhaitable, l'air chaud à l'intérieur de la serre étant remplacé par l'air froid venant de l'extérieur. La méthode la plus fréquemment utilisée consiste alors à chauffer la serre, mais cette méthode est particulièrement énergivore. Une deuxième méthode couramment utilisée, est l'usage de déshumidificateurs (Fig. 6) à l'intérieur de la serre pour absorber l'excès de l'humidité. Cette méthode est également fortement consommatrice en énergie.

Cependant, une humidité trop faible peut mener les cultures à un état de stress hydrique. Ce problème est fréquent en période estivale. L'utilisation de brumisateurs

permet alors d'augmenter l'humidité et de fournir des conditions optimales pour les plantes.



**Figure 6: Déshumidificateur utilisé pour le contrôle d'humidité** (source: <http://www.nevo-therm.fr/deshumidificateur-de-serres-thermodynamique-giordano>).

### 2.1.2.3 Contrôle de la concentration de dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>)

À l'intérieur d'une serre, la concentration en CO<sub>2</sub> descend au-dessous du niveau de la concentration atmosphérique (qui contient environ 0,038 % ou 350 μmol mol<sup>-1</sup> de CO<sub>2</sub> (Morot-Gaudry et al., 2009) dès lors que la consommation de CO<sub>2</sub> par la photosynthèse est supérieure aux apports de CO<sub>2</sub> (Katsoulas et Kittas, 2008) provenant de l'extérieur. Une diminution de la concentration de CO<sub>2</sub> limite l'activité photosynthétique et par conséquent la production de biomasse (Nederhoff, 1994). Une ventilation optimale ou bien l'enrichissement en CO<sub>2</sub> surtout dans le cas des serres fermées peuvent compenser le déficit de CO<sub>2</sub>. L'enrichissement en CO<sub>2</sub> est beaucoup utilisé dans les pays d'Europe du Nord, afin d'augmenter l'activité photosynthétique des cultures, plus particulièrement lorsque le rayonnement est faible en hiver notamment. Selon Nederhoff (1994), un enrichissement en CO<sub>2</sub> entre 700- 900 μmol mol<sup>-1</sup> peut aider à accroître le rendement et la qualité de plusieurs espèces de plantes. L'enrichissement de la serre en CO<sub>2</sub> peut être réalisé par récupération du dioxyde de carbone présent dans les fumées de la chaudière au gaz naturel. Cette technique est peu coûteuse car elle permet de valoriser le CO<sub>2</sub> produit par combustion. Cet enrichissement peut également être opéré depuis un réservoir de CO<sub>2</sub> pur liquide maintenu sous pression avant d'être détendu puis injecté dans la serre. L'utilisation d'une telle cuve de stockage est simple et sans nocivité mais le coût reste cependant élevé.

#### 2.1.2.4 Système d'éclairage

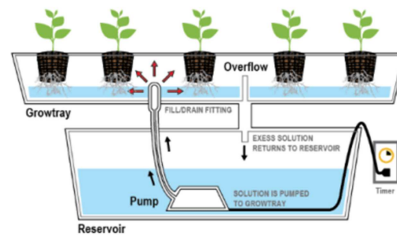
L'éclairage d'appoint (Fig. 7) est utilisé en hiver surtout dans les pays d'Europe du nord où les éclairages naturels et/ou les durées de jour sont faibles. Cet éclairage artificiel permet d'obtenir des niveaux d'éclairement suffisants pour les plantes. Il augmente l'activité photosynthétique et permet de produire des végétaux de meilleure qualité et avec un bon rendement (Moe et al., 2005).



Figure 7 : Eclairage artificiel dans les serres (source : <http://www.cannapro.co/lighting1.html>).

#### 2.1.2.5 Système d'irrigation

Les systèmes les plus utilisés pour l'irrigation dans les serres agricoles sont : l'irrigation goutte-à-goutte, l'irrigation par des asperseurs et la subirrigation (Lemaire, 2003). Le choix du type d'irrigation dépend essentiellement de l'espèce végétale et de la capacité d'investissement. En maraîchage, les systèmes de goutte à goutte et l'irrigation par asperseurs sont largement répandus. En culture ornementale, les systèmes de goutte-à-goutte ainsi que la subirrigation sont les plus utilisés. La subirrigation (Fig. 8) est souvent utilisée pour des plantes cultivées en pot, elle consiste à submerger la base des pots dans l'eau fertilisée. Contrairement aux autres types d'irrigation, l'eau apportée par subirrigation pénètre à partir du bas du pot et monte dans le substrat par le principe de capillarité. Cette technique favorise une distribution plus homogène de l'eau sur l'ensemble du substrat, en évitant notamment les risques d'écoulement le long des parois du pot, si le substrat est trop sec.



**Figure 8: Subirrigation pour des plantes cultivées en pot** (source: <http://hg-labs.jimdo.com/2014/03/05/les-syst%C3%A8mes-%C3%A0-mar%C3%A9/>).

La gestion automatisée de l'irrigation est de plus en plus utilisée car elle permet une meilleure efficacité d'utilisation de l'eau. Elle s'appuie sur deux types de contrôle (Lemaire, 2003) :

- Le contrôle basé sur l'enregistrement des variables climatiques (température, humidité, rayonnement) qui permettent de définir la demande des plantes en eau,
- Le contrôle effectué à partir de la mesure de l'humidité du substrat mesurée par différents capteurs comme les tensiomètres.

## 2.2 Mécanismes biophysiques affectant le climat des serres

Les serres de production horticole constituent un système biologique et énergétique complexe dans lequel un grand nombre de mécanismes physiques interviennent et interagissent (Fig. 9) :

- Transfert de masse d'air et de vapeur d'eau avec ou sans changement de phase (condensation et évaporation) et absorption de l'eau liquide par les racines du végétal.
- Transfert de chaleur par rayonnement, convection et conduction.

A ces mécanismes physiques se couple le comportement du végétal qui interagit avec l'air de la serre de deux manières :

- Via une interaction mécanique : le végétal exerce une résistance au déplacement de l'air qui se traduit par des pertes de charge plus importantes.
- Via une interaction écophysologique : du fait de sa température différente de celle de l'air, le végétal est le siège de transferts de chaleur par convection. Il est également source d'un dégagement de vapeur d'eau par transpiration.

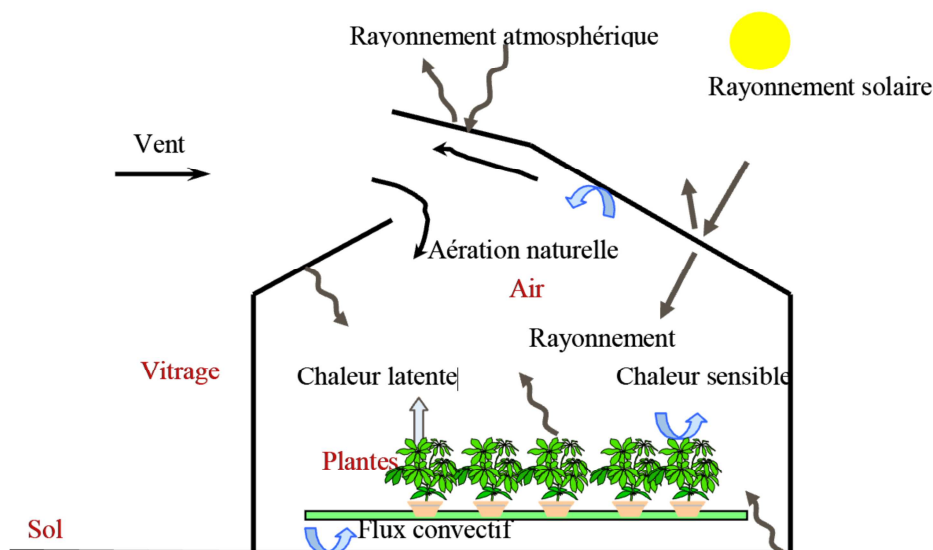


Figure 9 : Mécanismes physiques et biologiques mis en jeu dans une serre (source : Morille, 2012).

### 2.2.1 Transferts de masse : air

Les transferts d'air entre l'intérieur et l'extérieur de la serre impactent significativement les bilans d'énergie, de vapeur d'eau, de dioxyde de carbone et d'oxygène sous serre (Bartzanas et al., 2004), et ils interviennent indirectement sur le fonctionnement physiologique des plantes (i.e. la transpiration et la photosynthèse) (Boulard et Baille, 1999). En effet, la ventilation explique l'essentiel de la distribution des flux d'air, de la vapeur d'eau et de l'hétérogénéité du climat sous serres. Selon les objectifs de climatisation, l'aération peut être forcée ou naturelle.

L'aération forcée est réalisée au moyen des ventilateurs qui permettent de forcer l'air à circuler à l'intérieur de la serre, notamment quand il n'y a pas assez de vent ou si la serre s'aère mal. L'inconvénient principal de ce dispositif est la consommation importante d'énergie, notamment en période estivale (Wacquant, 2000).

L'aération naturelle, qui présente l'avantage de réduire les coûts en énergie et en maintenance (Bournet et al., 2007), est réalisée au moyen d'ouvrants sur la toiture et/ou sur les faces latérales de la serre. Selon Katsoulas et al. (2006) et Ould Khaoua et al. (2006), l'aération naturelle est influencée par les paramètres géométriques de la serre (hauteur, longueur, et forme de la serre); le mode de gestion des ouvrants; les aménagements particuliers réalisés à l'intérieur de la serre (présence d'écran thermique

ou d'écran d'ombrage, présence de filets d'insectes); et les conditions météorologiques externes dont la vitesse et l'orientation du vent.

Deux mécanismes mettent en mouvement l'air dans la serre :

- Les forces d'inertie générées par le vent extérieur (ou par des ventilateurs), qui mettent en action les masses d'air dans la serre et créent des zones de surpression ou de dépression.
- Les forces de flottabilité qui correspondent à la poussée d'Archimède, et qui consistent en un mouvement de l'air induit par les gradients de densité de l'air, qui eux-mêmes sont induits par les différences de température. Plus l'air est chaud, plus il est léger et plus il monte sous l'effet de gravité.

### 2.2.1.1 Effet des forces d'inertie

L'aération engendrée par les forces d'inertie est liée aux conditions climatiques externes, notamment à la vitesse du vent (Boulard et Baille, 1995). Elle consiste en un échange d'air entre l'intérieur et l'extérieur de la serre. A l'extérieur, lorsque la vitesse du vent est de l'ordre de quelques mètres par seconde, à l'intérieur elle dépasse rarement les  $0.5 \text{ m.s}^{-1}$  (Day et Bailey, 1999). Plus généralement et quelle que soit la serre, on constate que la vitesse de l'air à l'intérieur de la serre ne dépasse que rarement 20% de la vitesse à l'extérieur de la serre (Bartzanas et al., 2004; Mistriotis et al., 1997b). Même dans le cas des serres en verre fermées, des échanges d'air ont lieu entre l'intérieur et l'extérieur de la serre. Ils sont principalement la conséquence de la perméabilité et des fuites plus ou moins importantes au niveau des parois de la serre (Baptista et al., 1999).

### 2.2.1.2 Effet des forces de flottabilité

Bien qu'en général le vent extérieur constitue le moteur de l'aération de la serre, la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur de la serre peut également jouer un rôle important, notamment quand le vent extérieur est faible et/ou lorsque la serre est fermée (Baptista et al., 1999). En effet, l'hétérogénéité des températures induit une hétérogénéité de la distribution des densités de l'air. Il existe des écarts de température entre les différentes surfaces à l'intérieur de la serre (paroi, sol, plantes,...) et l'air. Ces différences induisent un réchauffement (ou un refroidissement) de l'air, et donc des



gradients de masse volumique entre l'air à proximité de ces surfaces et l'air du reste de la serre. Ce phénomène est aussi connu sous le nom d'effet « cheminée ».

Des études ont montré que les forces de flottabilité jouent un rôle important dès que la vitesse de l'air à l'intérieur de la serre est inférieure à  $0.5 \text{ m.s}^{-1}$  (Mistriotis et al., 1997b). Dans une serre fermée le vent n'influe que sur les fuites. La vitesse de l'air est alors relativement faible ( $<0.1 \text{ m.s}^{-1}$ , Wang et al., 1999). Les forces de flottabilité deviennent ainsi le principal moteur des mouvements internes de l'air.

### 2.2.2 Transferts de masse : vapeur d'eau

En plus des phénomènes précédemment décrits, s'ajoutent d'autres échanges qui sont principalement induits par la présence du végétal dans la serre. Il s'agit du transfert d'éléments constituant l'air de la serre : la vapeur d'eau notamment. Cet élément est considéré en priorité puisqu'il influe sur les rendements quantitatifs et qualitatifs des cultures. La quantité d'eau contenue dans l'air sous forme de vapeur d'eau exerce une influence sur la transpiration des cultures et joue sur le risque de condensation (Bouhoun Ali et al., 2014). L'eau liquide dans le sol ou substrat est absorbée par les racines, circule dans les tissus du végétal jusqu'à ses feuilles où elle est évacuée par les stomates. A ce moment-là, l'eau liquide est transformée en vapeur d'eau et quitte les feuilles par transpiration. La transpiration représente une source importante de vapeur d'eau dans l'air. Il résulte de ce phénomène une humidité plus élevée à proximité du végétal que dans le reste de la serre. Pour une serre ouverte, les vitesses de l'air sont plus élevées que pour une serre fermée et cette humidité est chassée de la serre. L'aération permet donc de renouveler l'air à proximité du végétal, ce qui maintient un gradient de pression de vapeur d'eau important entre le végétal et l'air. La transpiration est d'autant plus importante que ce gradient est élevé (Fletcher et al., 2007). Ce transfert de vapeur d'eau grâce au mouvement de l'air favorise donc les pertes hydriques du végétal. Ce transport de vapeur d'eau peut néanmoins avoir lieu lorsque la vitesse de l'air est faible du simple fait de l'existence de gradients de concentration de vapeur d'eau dans l'air. En effet, en présence de différence de concentration de vapeur d'eau, des phénomènes de diffusion tendent à réduire les hétérogénéités. Ce transfert a lieu depuis les zones les plus humides (proches du végétal) vers les zones présentant les concentrations de vapeur d'eau les plus

faibles ; en particulier, vers les parois lorsqu'il y a condensation, puisque le phénomène de condensation permet de soustraire de la vapeur d'eau à l'air.

### 2.2.3 Transferts thermiques

Ces transferts peuvent s'effectuer selon trois modes différents : par conduction convection et rayonnement.

#### 2.2.3.1 Échanges conductifs

La conduction est un mode de transfert de chaleur sans déplacement de matière provoqué par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux. L'effet macroscopique observable est une uniformisation des températures du système. Cependant si certaines zones sont maintenues à température constante par apport de chaleur (source de chaleur) ou évacuation de chaleur (puits de chaleur), il s'établit un transfert continu de la chaleur de la région chaude vers la région froide.

Dans les serres, les échanges de chaleur par conduction concernent essentiellement les transferts thermiques dans le sol et à travers les parois.

#### 2.2.3.2 Échanges convectifs

La convection correspond au transport d'énergie thermique par un fluide en mouvement (i.e. par déplacement des molécules). Dans une serre, les échanges convectifs se produisent entre l'air et les parois, entre l'air et le couvert végétal, et entre l'air et le sol. Le coefficient d'échanges convectifs qui caractérise le transfert d'énergie dépend de ce différentiel de températures et/ou de la vitesse du fluide. Ainsi, trois modes de convection se distinguent selon le type de la serre, les conditions extérieures, et le mode de ventilation (Roy et al., 2002). La convection peut être libre (naturelle), forcée ou mixte; et les écoulements associés sont laminaires ou turbulents. Le régime d'un écoulement convectif peut être déterminé à partir des valeurs de nombres adimensionnels tels que le nombre de Reynolds (convection forcée), le nombre de Grashof (convection naturelle) ou encore le nombre de Richardson (convection mixte) (Monteith et Unsworth, 2013). Selon Bournet et Boulard (2010), pour des vitesses de l'air à l'intérieur de la serre inférieures à  $0.5 \text{ m.s}^{-1}$  la convection libre est généralement prépondérante ; pour des vitesses supérieures à  $2 \text{ m.s}^{-1}$  c'est plutôt la convection forcée, et pour des vitesses



comprises entre  $0.5$  et  $2 \text{ m.s}^{-1}$  les deux types de convection co-existent (i.e. convection mixte).

### a. Convection libre

La convection est dite libre (ou naturelle) lorsque les forces de flottabilité sont prépondérantes devant les forces d'inertie. C'est donc dans ce cas que le différentiel thermique est prépondérant devant la vitesse du fluide dans le calcul du coefficient d'échange.

Les coefficients d'échanges sont alors déterminés à partir de corrélations basées sur le nombre de Grashof (Stanghellini, 1993; Roy et al., 2002).

### b. Convection forcée

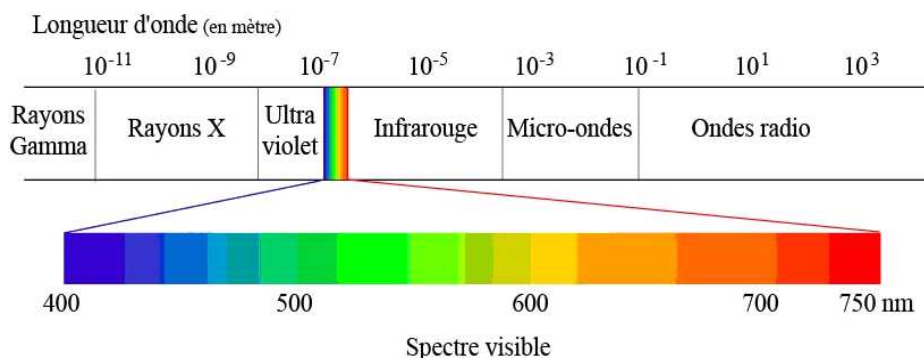
La convection forcée se produit lorsque le déplacement de l'air est principalement induit par les forces d'inertie : c'est le cas dans les serres ouvertes bien ventilées. La vitesse du fluide devient prépondérante devant la différence de température dans le calcul du coefficient d'échanges convectifs (Papadakis et al., 1992 ; Bartzanas et al., 2004).

### c. Convection mixte

La convection mixte est un régime intermédiaire dans lequel les deux modes de convection précédemment cités coexistent et leur intensité est du même ordre de grandeur. La convection mixte est le mode de transfert convectif prépondérant entre les parois de la toiture de la serre et l'air extérieur (Papadakis et al., 1992). Le coefficient d'échange dans ce cas est fonction de la différence de température et de la vitesse du fluide (Stanghellini, 1993; Roy et al., 2002).

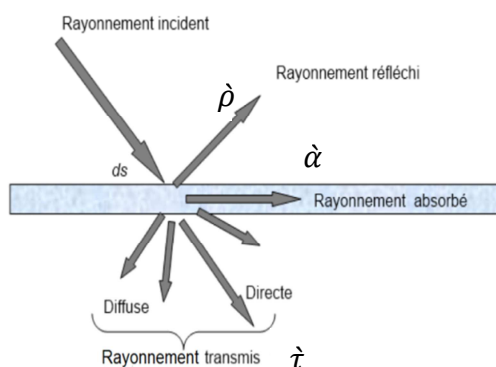
#### 2.2.3.3 Échanges radiatifs

Tous les corps ayant une température supérieure à  $-273 \text{ °C}$  (0 absolu) émettent de l'énergie à leur surface. Ceci se traduit par des oscillations rapides du champ électromagnétique. Ces oscillations correspondent à des ondes électromagnétiques (Guyot, 1999). La gamme de longueurs d'onde (ou de fréquences) concernée est très vaste et correspond à ce que l'on appelle le spectre de rayonnement électromagnétique (Fig. 10).



**Figure 10: Spectre de rayonnement électromagnétique**  
(source: <http://www.astrosurf.com/trousnoirs/radiations.html>).

Lorsqu'un rayonnement atteint une surface donnée, une fraction du rayonnement incident est réfléchi, c'est-à-dire renvoyée sans avoir pénétré dans la paroi, une autre fraction est absorbée dans la masse du récepteur, constituant un apport énergétique pour ce dernier, et une troisième fraction peut être transmise (Fig. 11).



**Figure 11: Absorption, réflexion et transmission du rayonnement** (source: Bouhoun Ali).

Ces trois grandeurs sont liées par la relation :  $\alpha + \rho + \tau = 1$  ou  $\alpha$  désigne l'absorptivité,  $\rho$  la réflectivité et  $\tau$  la transmittance.

Il convient de distinguer le rayonnement de courte longueur d'onde (entre 0  $\mu\text{m}$  et 3  $\mu\text{m}$ ) et de grande longueur d'onde (entre 3  $\mu\text{m}$  et 100  $\mu\text{m}$ ), le verre étant opaque aux grandes longueurs d'onde. Les propriétés optiques du verre sont les suivantes (Tab.1) (Bournet et al., 2007):

**Tableau 1: Caractéristiques optiques du verre.**

Bande de longueur d'onde ( $\mu\text{m}$ )	Absorption $\alpha$	Réflexion $\rho$	Transmission $\tau$
[0,3]	0,15	0,1	0,75
]3,100]	0,9	0,1	0

### a. Échanges radiatifs de courtes longueurs d'onde

Le rayonnement solaire couvre le domaine des courtes longueurs d'onde [0-3  $\mu\text{m}$ ]. Au niveau du sol (surface de la Terre), le rayonnement solaire a deux composantes :

- Le rayonnement solaire direct, a une direction de propagation privilégiée et il est défini par le flux énergétique transmis dans un angle solide limité au disque solaire.
- Le rayonnement solaire diffus pour lequel l'approximation d'une distribution uniforme sur la voûte céleste est réaliste. Il est donc traité comme un rayonnement provenant du ciel.

Le rayonnement global est le flux correspondant à la somme de ces deux composantes parvenant sur une surface horizontale. Une grande partie du rayonnement solaire est transmise à travers les parois de la serre, et plus particulièrement dans la gamme des longueurs d'onde comprises entre 0,4 et 0,7  $\mu\text{m}$ , qui intervient dans le processus de photosynthèse (Rayonnement photosynthétiquement actif) (Kempkes et al., 2008). La fraction de rayonnement transmise dépend des conditions d'éclairement, du type de serre considéré, de son orientation, du matériau de couverture, et des écrans thermiques ou d'ombrage (Castilla, 2013; Wilfried et al., 2013). Pour une serre de type Venlo (verre) la fraction transmise est de l'ordre de 70 à 80% (Ould Khaoua, 2006). Le reste de rayonnement est absorbé (environ  $\alpha = 0,15$  pour un simple vitrage et 0,25 pour un double vitrage) et/ou réfléchi ( $\rho$  varie entre 0,1 et 0,25 en moyenne) par la paroi et les différents éléments structuraux (Baille, 1999). De plus, une partie du rayonnement absorbé est restituée à l'air extérieur et à l'air intérieur de la serre sous forme de chaleur sensible ou réémise sous forme d'infrarouge c'est-à-dire dans les grandes longueurs d'onde (Mistriotis et al., 1997a; Baille, 1999). Le couvert végétal absorbe l'énergie solaire transmise par la couverture de la serre ainsi que celle réfléchie par la surface du sol (Wang, 1998). La fraction de rayonnement photosynthétiquement actif est de l'ordre

de 50% du rayonnement solaire incident (Monteith, 1972). Il convient de choisir un matériau de couverture le plus transparent possible dans le spectre du visible afin de favoriser la photosynthèse. Le sol absorbe une bonne partie de l'énergie solaire qui lui parvient et l'énergie absorbée est soit restituée sous forme de chaleur sensible et/ou latente, soit stockée dans les couches profondes par conduction.

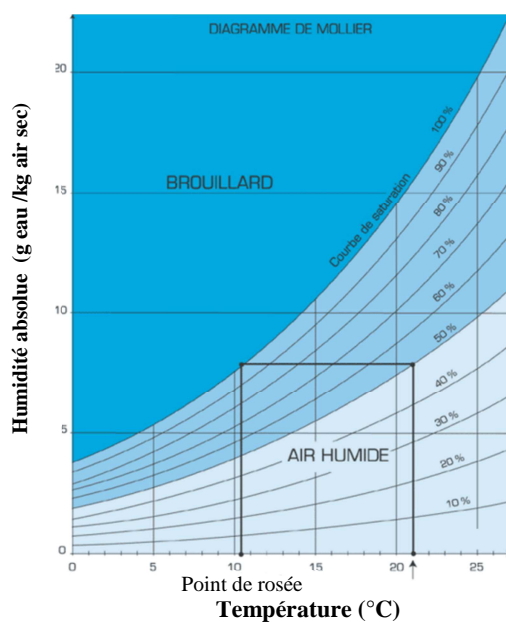
### **b. Échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde**

Les échanges radiatifs de grandes longueurs d'onde ont lieu entre l'atmosphère, le sol, les plantes, les parois et le milieu extérieur dans la bande de longueurs d'onde de 3  $\mu\text{m}$  à 100  $\mu\text{m}$  ; ils interviennent dans l'effet de serre. Le rayonnement atmosphérique grandes longueurs d'onde qui parvient sur la serre dépend des conditions climatiques extérieures : température, humidité et nébulosité (Choi et al., 2008). Un ciel couvert conserve mieux la chaleur qu'un ciel clair. L'effet de serre résulte quant à lui de la différence de comportement du verre vis-à-vis du rayonnement grandes longueurs d'onde et du rayonnement courtes longueurs d'onde (Tab. 1). Le verre transmet le rayonnement solaire mais arrête (absorbe) le rayonnement grandes longueurs d'onde émis par les éléments présents dans la serre. Il s'échauffe et rayonne comme un corps noir vers l'intérieur de la serre, entraînant une hausse de température dans la serre. Les propriétés optiques des matériaux de couverture pouvant varier de manière importante, il est crucial de choisir un matériau le plus transparent possible aux courtes longueurs d'onde et le plus opaque possible aux grandes longueurs d'onde, si une température élevée est souhaitée (cas des périodes hivernales en région de climat continental). Au contraire, si une élévation de la température de la serre n'est pas désirable (cas des périodes estivales en région de climat méditerranéen), un matériau de couverture plus transparent au rayonnement grandes longueurs d'onde est préférable (Kempkes et al., 2008).

#### **2.2.4 Focus sur le mécanisme de condensation**

C'est le phénomène inverse de l'évaporation. L'eau passe de l'état gazeux à l'état liquide en libérant de l'énergie. La condensation interagit donc avec les bilans hydrique et énergétique (Piscia et al., 2012). La condensation se traduit par une diminution de la pression partielle de la vapeur d'eau dans l'air et par une augmentation de la température

de la paroi recevant l'énergie dégagée par la condensation de la vapeur d'eau. La condensation ne survient que si la pression partielle de vapeur d'eau atteint la pression de vapeur saturante qui correspond à une humidité relative de 100%. Par exemple pour une humidité absolue d'air constante à 21 °C, si cet air est refroidi à 11 °C, alors son humidité relative augmente jusqu'à atteindre 100% c'est-à-dire le point de rosée qui provoque la condensation (Fig. 12).



**Figure 12: Diagramme de l'air humide (Diagramme de Mollier)**

(source : <http://www.econologie.com/forums/montages-injection-eau/humidite-courbe-de-saturation-de-l-air-et-rh-mollier-t5928.html>).

Dans une serre, il est préférable d'éviter la condensation pour deux raisons principales:

- La formation d'un film ou des gouttes d'eau sur les parois de la serre réduit sensiblement la transmission du rayonnement (Pieters et Deltour, 1999).
- L'apparition d'eau libre sur les feuilles des plantes, ou les gouttelettes qui se produisent sur les parois et qui tombent sur la végétation favorisent le développement de certaines maladies fongiques (e.g. le botrytis) (Kittas et Bartzanas, 2007).

### 2.3 Caractéristiques des cultures hors-sol en pots

Les cultures hors sol en horticulture ornementale et maraîchère se sont principalement développées à partir des années 80 en France et en Europe (Morard, 1995). Les cultures hors sol sont de manière générale des cultures de végétaux qui effectuent leur cycle complet de production sans que leur système racinaire n'ait été en contact avec le sol. Afin de remplacer le sol, des substrats inertes chimiquement et biologiquement sont utilisés et permettent un bon ancrage, une bonne aération des racines, ainsi qu'un contrôle optimal des apports en éléments nutritifs. Ce système permet à la plante de se développer dans des conditions agronomiques optimales, tout en s'affranchissant des sols contaminés ou encore salés. Cette optimisation culturale permet des augmentations significatives de rendement, de précocité et de qualité des productions. Les cultures hors sol permettent de faire des économies en eau ainsi qu'en engrais en utilisant un système d'irrigation avec recyclage. Cependant, cette pratique de culture reste très sophistiquée et coûteuse avec un besoin de haute technicité dans la gestion des cultures (bien connaître la culture en question ainsi que ses besoins). Les risques d'accidents sont plus élevés que pour des cultures en sol, surtout la conduite hydrominérale, qui peut pénaliser la croissance de la plante (excès ou manque d'eau).

Ainsi la gestion de l'irrigation pour une culture hors sol est relativement différente d'une culture en plein champ. La gestion de l'irrigation doit être relativement précise, car un excès ou un manque d'eau peut fortement pénaliser les plantes (Boulard et al., 1991). Ce type de culture se caractérise par un potentiel de production plus important que les cultures en plein champ, un rapport « partie aérienne / racinaire » plus élevé, ainsi qu'un faible volume de substrat à disposition des racines. De ce fait, les besoins en eau sont très importants sur un pas de temps très court et un espace limité (Lemaire, 2003).

Afin d'éviter tout stress en eau et en oxygène associés à une irrigation excédentaire, les pratiques professionnelles se basent encore aujourd'hui sur l'emploi de substrats à porosité très grossière facilitant ainsi le drainage (Lemaire, 2003). De plus, ces pratiques posent le problème de l'impact des cultures hors sols sur l'environnement (rejet de solutions nutritives, consommation excédentaire d'eau...) surtout dans les cas où l'eau d'irrigation n'est pas recyclée.

### 2.4 Processus spécifiques associés au végétal

#### 2.4.1 Transfert de masse sol-plante

L'appréhension des transferts sol-plante passe par la quantification d'un certain nombre de grandeurs permettant de caractériser le substrat: potentiel hydrique, courbe de rétention d'eau (lien entre potentiel hydrique et teneur en eau), conductivité hydraulique qui sont présentées dans ce paragraphe. L'impact spécifique de la présence du végétal (des racines en particulier) sur les propriétés du substrat est également analysé.

##### 2.4.1.1 Potentiel hydrique

D'un point de vue thermodynamique le potentiel hydrique est défini comme le travail qu'il faudrait fournir à une unité de masse d'eau située en un point du système pour la faire passer de l'état de l'eau liée à un état de référence, correspondant à celui de l'eau libre à la même température et pression atmosphérique. Le potentiel hydrique est toujours donné par une valeur négative, car il faut fournir de l'énergie au système pour extraire de l'eau. Le travail qu'il faut fournir s'exprime en  $J.m^{-3}$  i.e.  $N.m^{-2}$  ce qui équivaut à une pression exprimée en Pa ou d'autres unités de pression (Guyot, 1999). Le potentiel hydrique est utilisé comme variable pour quantifier l'état hydrique du sol (i.e. potentiel hydrique du sol) ou pour définir l'état hydrique de feuille (i.e. potentiel hydrique de la feuille). Les potentiels hydriques du sol et des feuilles sont les deux grandeurs les plus utilisées pour donner une idée générale sur l'état hydrique du sol ou des plantes. Il est aussi possible de définir l'état hydrique des racines ou de la plante avec le potentiel hydrique des racines ou de la plante, respectivement.

##### 2.4.1.2 Potentiel hydrique du sol

Le potentiel hydrique du sol exprime l'état énergétique de l'eau dans les pores du sol. Il était utilisé initialement pour définir le déplacement de l'eau entre différents points du sol ou bien pour estimer le flux d'eau (i.e. le flux d'eau qui est dû au gradient de potentiel hydrique entre deux points différents du sol). Le potentiel hydrique dans les pores du sol varie énormément, pouvant avoir des valeurs positives dans le cas d'un sol saturé en eau ou des valeurs très négatives selon le degré de restriction hydrique dans le sol sec (Livingston and Topp, 1993). Le potentiel du sol non saturé est la somme de deux potentiels : le potentiel matriciel et le potentiel osmotique (Eamus, 2006). Le potentiel

matriciel représente les forces exercées par le sol et peut être estimé soit directement par la mesure de la pression de l'eau dans le sol (e.g. via un tensiomètre), soit indirectement via la mesure d'une propriété liée au potentiel matriciel du sol (e.g. humidité du sol). Le potentiel osmotique indique la quantité de solutés dissous dans le sol, il peut être évalué indirectement à partir de la mesure d'une propriété liée au potentiel osmotique du sol (e.g. conductivité électrique).

### **2.4.1.3 Potentiel hydrique des feuilles**

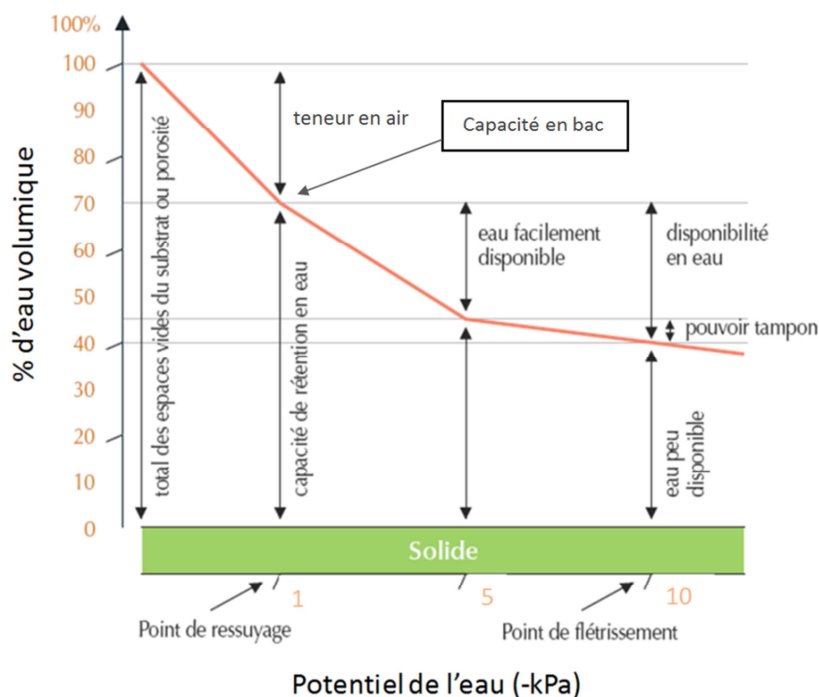
Cette grandeur définit l'état de l'eau dans la feuille, en effet lorsque le potentiel devient de plus en plus négatif, la teneur en eau de la feuille diminue. Une mesure de cette grandeur est souvent utilisée afin d'avoir une valeur de référence en confort hydrique et ainsi de prévoir l'apparition de la contrainte hydrique chez la plante. À l'aube, quand la transpiration est presque négligeable, il n'y a pas de circulation de l'eau. Le potentiel de feuille est alors à sa valeur maximale et est en équilibre avec le potentiel du sol, ce potentiel est connu sous le nom du potentiel de base (Keane, 2000). Il est considéré comme étant un bon indicateur de l'équilibre d'eau dans le continuum sol-plante. Le potentiel total de feuille est la somme du potentiel osmotique, du potentiel de turgescence et du potentiel de gravité (Eamus, 2006). Le potentiel osmotique est dû aux solutés dissous dans les tissus de la feuille. Notamment, une augmentation de la concentration des sels dans les cellules de la feuille provoque une diminution de potentiel osmotique (Eamus, 2006; Keane, 2000). Le potentiel de turgescence est engendré par les pressions de turgescences exercées par les cellules de la feuille. Le potentiel de gravité est provoqué par les forces de gravité.

### **2.4.1.4 Courbe de rétention en eau**

Les fonctions physiques les plus importantes d'un substrat sont, outre la capacité d'ancrage racinaire, les capacités à fournir suffisamment d'eau et d'oxygène à la plante, dans des proportions compatibles (risque d'effet d'anoxie ou d'hypoxie en cas d'excès d'eau ou risque de flétrissement en cas de manque d'eau). L'établissement de courbes de rétention en eau se base sur la mesure de la distribution des volumes d'eau et d'air dans les porosités du substrat pour différents niveaux de potentiels hydriques matriciels.



À partir de ces courbes de rétention en eau (Fig. 13), il est possible de définir les caractéristiques physiques du matériau:



**Figure 13 : Clé de lecture d'une courbe de rétention en eau d'un substrat horticole**  
(source : [https://wiki.aurea.eu/index.php/Propri%C3%A9t%C3%A9s\\_physiques\\_des\\_substrats](https://wiki.aurea.eu/index.php/Propri%C3%A9t%C3%A9s_physiques_des_substrats)).

La porosité totale (0 kPa) correspond au volume de l'ensemble des vides disponibles pour l'eau ou pour l'air par rapport au volume total du substrat.

L'aération du substrat (-1 kPa) ou la capacité en air, fait référence à la porosité la plus grossière où l'eau est très peu ou pas retenue, ce volume est donc rapidement occupé par de l'air.

La capacité en bac (équivalente à la notion de capacité au champ pour un sol) représente la teneur en eau moyenne maximale que peut retenir un substrat contenu dans un « bac de culture » après saturation complète et ressuyage libre (White, 1964; Rivière, 1980; Lemaire, 2003). Bien que la répartition de l'eau et donc la valeur du potentiel de l'eau ne soient pas homogènes en tout point dans le pot, on considère généralement que la capacité en bac correspond à une teneur en eau pour un potentiel de l'eau égal à -1 kPa. Cette valeur de potentiel correspond aux conditions optimales de culture en culture hors-sol en termes de quantité et de flux hydriques depuis le substrat vers la plante (Rivière et al., 1991).

La disponibilité en eau correspond à l'eau disponible dans la porosité du substrat pour des forces de rétention compatibles avec les capacités d'absorption racinaire, c'est-à-dire pour une gamme de potentiels hydriques comprise entre -1 et -10 kPa.

Le pouvoir tampon du potentiel hydrique représente l'aptitude du substrat à libérer de l'eau à un potentiel de -5 à -10 kPa. C'est dans cet intervalle que la plante s'adapte physiologiquement à la diminution progressive du potentiel hydrique lors d'un processus de dessiccation.

L'aération du substrat est une caractéristique primordiale dans un support de culture (Anstett et Pasquier, 1980). Cette phase gazeuse permet l'apport d'oxygène au niveau du système racinaire et l'évacuation du gaz carbonique produit par la respiration des racines et des microorganismes. Il convient néanmoins d'ajouter que l'état de l'aération des racines dépend aussi à un instant donné de l'équilibre entre les besoins en oxygène au niveau de la rhizosphère qui dépendent notamment du stade de végétation concerné (Gras, 1987). De plus, il faut tenir compte du dioxyde de carbone produit par la respiration des racines, et la décomposition de la matière organique par les microorganismes qui, mal évacué, va diminuer la quantité réelle d'oxygène disponible (Morard, 1995).

La quantité d'eau considérée comme utilisable pour les plantes est appelée disponibilité en eau (De Boodt et Verdonck, 1971; Rivière, 1980). Ce concept est analogue à celui de réserve facilement utilisable employé pour les sols, mais avec des références de potentiel sensiblement différentes. L'objectif de l'irrigation est en effet de maintenir l'humidité du substrat entre deux limites. La disponibilité en eau correspond à la différence de teneur en eau à deux potentiels extrêmes: la teneur en eau à -1 kPa, limite d'humidité maximale et la teneur en eau à -10 kPa, limite d'humidité minimale de confort hydrique de la plante où il est nécessaire de déclencher l'irrigation au risque sinon de provoquer une initiation du stress hydrique de la plante (même s'il n'y a pas de signe évident de flétrissement).

### 2.4.1.5 Conductivité hydraulique

Si les variations du potentiel de l'eau dans le sol sont les moteurs des écoulements, leur intensité est aussi déterminée par la capacité du sol à se laisser traverser par l'eau, c'est-à-dire par sa conductivité hydraulique. La conductivité hydraulique (vitesse

d'infiltration) est une manifestation de l'effet de résistance à l'écoulement d'un liquide dans un milieu poreux, selon la loi de Darcy (Darcy et al., 1856). Cette perte de vitesse est due aux forces de frottements engendrées lors de l'écoulement. La texture et la structure du substrat sont les principaux facteurs qui influencent le plus cette perméabilité.

En milieu saturé, la conductivité hydraulique atteint une valeur maximale (pour un milieu et une direction d'écoulement donnés): la conductivité hydraulique à saturation. En conditions non saturées, la conductivité hydraulique et le potentiel hydrique diminuent à mesure que l'on s'éloigne de la saturation. Lorsque le sol se dessèche, les pores larges se vident en premier, si bien que la section totale d'écoulement diminue de même que la vitesse moyenne, suite à la disparition des zones de vitesses relativement élevées situées au centre des pores. L'eau se voit contrainte de circuler le long des films d'hydratation qui épousent les contours des parois des pores vides ou, en plus grande quantité, dans le réseau formé par les pores de diamètre plus faible et encore pleins. Dans les deux cas, la longueur du cheminement parcouru et de ce fait la tortuosité est accrue. Par l'augmentation de la tortuosité et la diminution des vitesses, la conductivité hydraulique diminue alors également rapidement.

### **2.4.1.6 Impact du développement racinaire sur les propriétés physiques des substrats**

Dans le cas de cultures hors sol, le volume racinaire influence fortement le comportement physique des supports de cultures en raison d'un volume limité de substrat exploitable. Le système racinaire peut occuper 5.2 à 6.3% du volume du substrat chez le rosier (Cannavo et Michel, 2013) et jusqu'à 10 % d'après Lemaire (2003) selon l'espèce considérée. Le volume racinaire occupe une fraction importante des vides et provoque une diminution du volume de porosité disponible pour l'eau et l'air (Lemaire, 2003). Les racines jouent un rôle structurant en augmentant la stabilité physique du substrat, en limitant l'effet de tassement grâce à l'exploitation des macroporosités du substrat (Rivière, 1992).

Le système racinaire se développe d'abord dans les macroporosités du substrat, afin de privilégier les apports d'oxygène et évacuer le CO<sub>2</sub> issu de la respiration. Cette croissance a pour conséquence de diminuer le volume des macroporosités. Ceci explique

les résultats de Fonteno (1996) qui constate une augmentation du rapport microporosité/macroporosité avec pour conséquence une diminution de la teneur en air du substrat et une augmentation de la rétention en eau dans les microporosités. Cannavo et al. (2011) confirment cette tendance avec une diminution de 7,1 % de la porosité totale, une augmentation de 29% de la rétention en eau et une diminution de 40% de la teneur en air à -1 kPa en fin d'un cycle de culture de 196 jours d'impatiens de Nouvelle Guinée. La croissance racinaire provoque une diminution de la tortuosité, les racines déplacent des particules lors de leur élongation et réorganisent l'espace poral. Ceci facilite le passage des flux hydriques et gazeux dans le substrat (Nkongolo et Caron, 1999). Certains auteurs observent une diminution de la conductivité hydraulique au cours du temps, comme Cannavo et al. (2011), d'autres observent une conductivité hydraulique inchangée comme Allaire-Leung et al. (1999). Ces différences peuvent s'expliquer par le régime d'irrigation appliqué et ses conséquences sur le substrat (mouillabilité, hystérèse, phénomène de retrait...). Elles peuvent influencer sur les propriétés dynamiques du substrat et sur la croissance racinaire.

### 2.4.2 Interactions du végétal avec le milieu aérien

#### 2.4.2.1 Action mécanique engendrée par le végétal

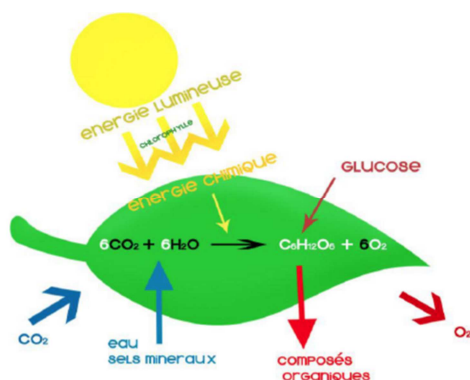
Le couvert végétal constitue un obstacle à l'écoulement de l'air, induisant ainsi des pertes de charge. Le modèle traditionnellement utilisé pour intégrer l'influence aérodynamique du couvert végétal sur l'écoulement d'air est celui assimilant les plantes à un milieu poreux (Darcy-Forchheimer). Un milieu poreux est un matériau constitué d'une matrice solide, supposée rigide parcourue par un réseau de pores interconnectés (induisant une perte de pression). La porosité est alors définie comme le rapport entre le volume des pores et le volume total occupé par le milieu, et la force de traînée engendrée par les plantes peut en être déduite.

#### 2.4.2.2 Action écophysologique engendrée par le végétal

##### a. Photosynthèse

La photosynthèse est un processus de conversion d'énergie radiative en énergie chimique, transportable et réutilisable. Elle repose sur la transformation de l'oxyde de

carbone et de l'hydrogène à faible énergie potentielle chimique, en hydrates de carbone à énergie potentielle chimique élevée (Fig. 14).



**Figure 14 : Principe de la photosynthèse** (source :<http://biofaculte.blogspot.fr/2015/03/photosynthese-definition-et-schema.html>).

### b. Respiration

La respiration des plantes est un processus biologique effectué par les plantes vertes, c'est en quelque sorte le phénomène inverse de la photosynthèse. Pendant la respiration, les plantes absorbent les molécules d'oxygène pour créer de l'eau, du dioxyde de carbone, et de l'énergie, qui contribuent à la croissance de la plante. Contrairement à la photosynthèse qui se déroule juste en présence de lumière, la respiration est permanente. Cependant, le bilan de ces deux phénomènes en termes de flux de dioxyde de carbone n'est pas équilibré. La photosynthèse reste prépondérante, sinon il y'aurait pas de production de biomasse végétale. Le flux de dioxyde de carbone par an utilisé par la photosynthèse représente presque le double du flux du dioxyde de carbone rejeté par respiration (Fouquart, 2003).

### c. Chaleur sensible

Les échanges de chaleur sensible s'effectuent entre les feuilles des végétaux et l'air environnant. Le flux de chaleur échangé par convection, aussi appelé flux de chaleur sensible, résulte de la différence de température entre les feuilles et l'air. Cet échange est un moyen biophysique pour la plante, de se refroidir ou de se réchauffer au contact de l'air. La chaleur sensible dépend donc du différentiel de température entre la feuille et l'air mais également d'un coefficient dépendant de la résistance aérodynamique de la feuille au vent.

### d. Evapotranspiration

L'évapotranspiration, résulte de deux phénomènes :

L'évaporation qui est un phénomène purement physique au niveau du substrat. Elle correspond au passage de l'eau de l'état liquide à l'état gazeux. Cette transformation de l'eau s'accompagne de la consommation d'une importante quantité d'énergie (i.e. chaleur latente de vaporisation). L'évaporation n'est possible que si la pression de vapeur d'eau de l'air est inférieure à la pression de vapeur saturante.

La transpiration qui est une forme particulière de l'évaporation, concerne les organismes vivants et correspond dans notre cas à la perte d'eau du couvert végétal au niveau des feuilles. En cultures sous serres, la transpiration constitue la voie la plus importante des échanges de vapeur d'eau. L'eau liquide extraite du sol circule à travers la plante, et est évacuée dans l'air sous forme de vapeur au niveau des stomates. La transpiration est une réponse du végétal au rayonnement reçu. La plante possède des propriétés optiques (absorptivité notamment) qui font qu'elle absorbe plus ou moins du rayonnement. Comme tout corps qui absorbe du rayonnement, la plante voit alors sa température s'élever. La transpiration permet à la plante de thermo-réguler son organisme et de lutter contre les fortes chaleurs en journée (Boulard et Wang, 2002). En fonction de la température de l'air, le flux de chaleur sensible (échanges convectifs) est positif ou négatif. S'il contribue à réchauffer la plante, alors la plante aura besoin de transpirer d'autant plus. S'il contribue à refroidir la plante, alors la plante aura moins besoin de transpirer.

Le troisième facteur influençant la transpiration en plus du rayonnement et de la température est le déficit de pression de vapeur entre la feuille et l'air adjacent. La transpiration n'est possible que si la pression de vapeur saturante de l'air contenue dans la feuille (air considéré comme saturé en vapeur d'eau) est supérieure à la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air environnant.

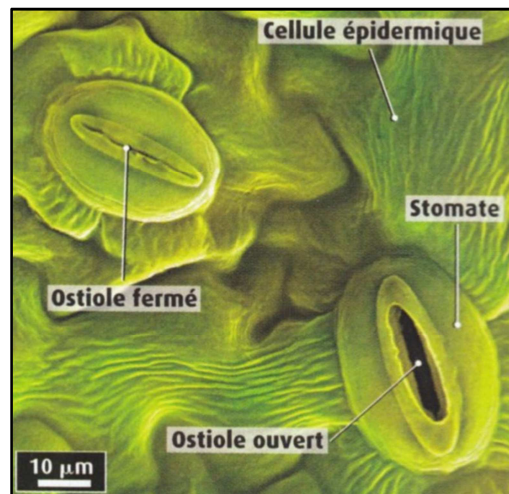
Les modèles physiques actuels de transpiration des plantes supposent que le transfert de vapeur d'eau entre la plante et l'atmosphère est régi par une loi classique de diffusion analogue à celle de la chaleur. Dans ce cas, le flux de vapeur d'eau est proportionnel au gradient de concentration de vapeur d'eau entre l'air à l'intérieur des feuilles et l'air ambiant, mais aussi inversement proportionnel à la résistance totale au

transfert. Cette résistance est considérée comme la somme de deux résistances en série : la résistance aérodynamique (externe), et la résistance stomatique foliaire (interne). Cette approche requiert la connaissance de la température à la surface des feuilles qui est difficile à mesurer. La méthode combinatoire proposée par Penman (1948), puis modifiée par Monteith (1973) permet de s'affranchir de cette mesure délicate et d'estimer la transpiration en fonction des grandeurs physiques plus facilement accessibles (i.e. déficit de pression de vapeur air-air, rayonnement, résistance stomatique et aérodynamique). Cette méthode s'appuie sur le concept de « big leaf », grande feuille virtuelle possédant les propriétés moyennes des feuilles du couvert, tant du point de vue de ses résistances stomatique et aérodynamique que du point de vue climatique. Bien que simplifié, ce concept de grande feuille virtuelle a aidé les chercheurs à élaborer un grand nombre de modèles de transpiration pour une large gamme de cultures sous serre : une série d'espèces ornementales (Baille et al., 1994c), le concombre (Yang, 1995) ou bien encore la tomate (Haxaire, 1999).

### **2.4.2.3 Influence des variables climatiques et du régime d'irrigation sur le fonctionnement transpiratoire des végétaux**

#### **a. Fonctionnement des stomates**

Les stomates sont des pores situés sur l'épiderme des feuilles des plantes (Fig. 15). Ils sont constitués de deux cellules de garde entourant un orifice appelé ostiole. Les stomates représentent 0.5 à 5 % de la surface des feuilles, cette densité étant dépendante de la génétique et de l'environnement climatique. Par exemple les plantes adaptées aux conditions arides du désert ont une faible densité des stomates. Le degré d'ouverture des stomates (i.e. ostioles) permet de réguler les échanges gazeux ( $H_2O$  et  $CO_2$ ) avec l'atmosphère et contrôle deux des plus importants processus de fonctionnement des plantes : la photosynthèse et la transpiration. Environ 95% de l'eau perdue par transpiration s'échappe à travers les stomates (Gerosa et al., 2012).



**Figure 15: Stomates observés par microscope optique** (source : <http://hortidact.eklablog.com/le-vegetal-physiologie-osmose-tropismes-symbioses-a57617767>).

La modélisation du degré d'ouverture de stomates généralement abordée à travers le concept de résistance stomatique  $R_s$  (ou bien la conductance stomatique qui est l'inverse de la résistance stomatique  $1/R_s$ ) a été beaucoup étudiée durant les 45 dernières années (Damour et al., 2010). L'ouverture et la fermeture des stomates dépendent de la turgescence des cellules de garde. Lorsque la pression de turgescence de ces cellules est forte, les stomates sont ouverts (i.e. résistance stomatique faible); lorsqu'elle est faible, les stomates sont fermés (i.e. résistance stomatique forte). Ainsi, les mouvements des cellules de garde sont liés à des ajustements osmotiques (Damour et al., 2010). La résistance stomatique est influencée par différentes variables climatiques (Fig. 16) comme le rayonnement, le déficit de pression de vapeur air-air ou feuille-air et la température. Elle est aussi influencée par d'autres facteurs comme la concentration de gaz carbonique, le potentiel hydrique du substrat (disponibilité en eau), et l'espèce végétale.



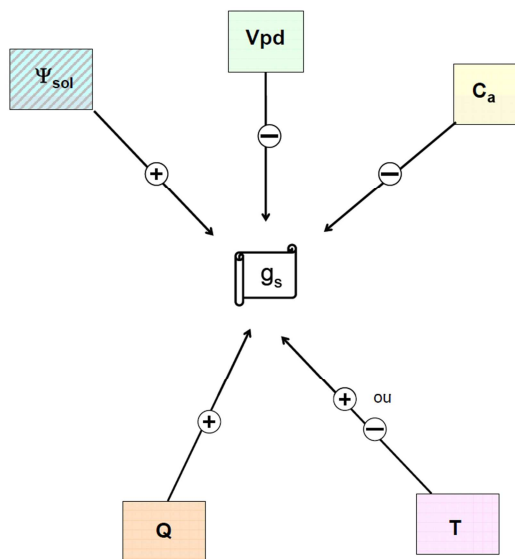


Figure 16 : Principaux facteurs environnementaux influençant la conductance stomatique ( $g_s$ ). Les flèches indiquent qu'un élément influe sur la conductance stomatique ( $g_s$ ). + indique une relation positive, et - indique une relation négative.  $\psi_{sol}$  : potentiel hydrique du sol; Vpd : déficit de saturation en vapeur d'eau de l'air;  $C_a$  : concentration en  $CO_2$  de l'air; Q : intensité lumineuse (i.e. variable équivalente au rayonnement); T : température (Source : Damour, 2008).

### b. Influence du rayonnement

En condition de confort hydrique, le rayonnement est le facteur prépondérant du contrôle des stomates pour la plupart des plantes (Mengel et Kirkby, 1978; Monteith et Unsworth, 2013). Une augmentation du rayonnement stimule, jusqu'à un maximum, l'ouverture des stomates en réduisant la résistance stomatique (Baille et al., 1994b et Kichah et al., 2012 pour l'impatiens ; Stewart, 1988 pour le pin) (Fig.17).

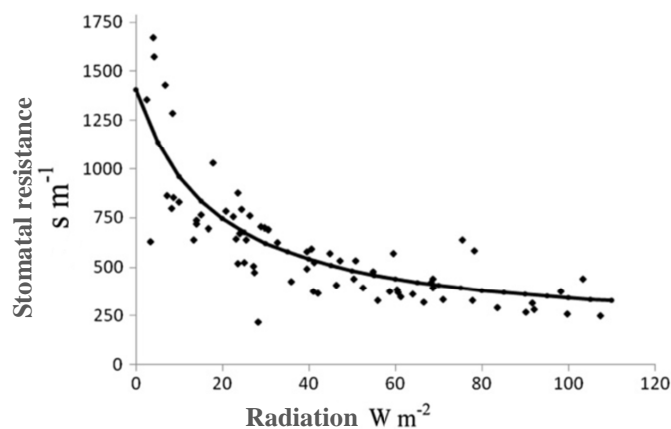
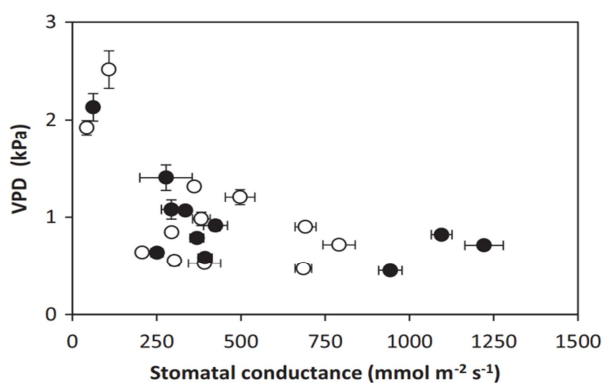


Figure 17 : Influence du rayonnement solaire sur la résistance stomatique des cultures d'impatiens, les points correspondent aux mesures et la ligne au modèle (source : Kichah et al., 2012).

### c. Influence du déficit de pression de vapeur

Les stomates sont sensibles aux variations de déficit de pression de vapeur VPD. Cette sensibilité est différente d'une espèce à une autre. La résistance stomatique augmente avec l'augmentation du VPD (Baille et al., 1994b pour l'impatiens; Day, 2000 pour l'épinette rouge; Díaz et al., 2013 pour l'arganier; Irmak and Mutiibwa, 2009 pour le maïs; Motzo et al., 2013 pour le blé et le triticale; Yong et al., 1997 pour trois plantes différentes : soja, coton, cocklebur) (Fig.18). Selon Monteith (1995) pour la plupart des plantes,  $R_s$  augmente de façon exponentielle lorsque VPD augmente.



**Figure 18 : Influence du déficit de pression de vapeur sur la conductance stomatique, les symboles (○) correspondent aux mesures pour le blé, et les symboles (●) correspondent aux mesures pour le triticale (source : Motzo et al., 2013).**

Le mécanisme de réponse des stomates aux variations de VPD est peu connu, alors que cette variable climatique est parmi les variables prépondérantes (surtout la nuit), ce qui lui donne une grande importance dans la prédiction du fonctionnement des stomates (Aasamaa et Söber, 2011).

### d. Influence de la température

Des comportements différents des stomates en réponse à la température qui règne à la surface de la feuille ont été observés (Jones, 1999). Pour des plantes de type *Hedera helix*, la relation entre  $R_s$  et  $T$  est décroissante (i.e. une augmentation de la température provoque une diminution de  $R_s$ ) (Aphalo et Jarvis, 1991), tandis que pour d'autres, elle est hyperbolique avec un minimum dépendant de l'espèce étudiée (Jarvis, 1976). Selon Irmak et Mutiibwa (2009), pour des cultures de maïs, l'effet de la température sur l'ouverture et la fermeture des stomates reste visible pour des résistances stomatiques inférieures à  $150 \text{ s m}^{-1}$  et des températures supérieures à  $28 \text{ }^\circ\text{C}$ . Ils ont remarqué qu'une

augmentation de la température provoque une diminution linéaire de la résistance stomatique (Fig. 19). Cependant plusieurs auteurs (Baille et al., 1994b pour l'impatiens ; Kaufmann, 1982 pour trois types de conifères; Warrit et al., 1980 pour des pommiers) considèrent que l'influence de la température sur  $R_s$  est négligeable. Plus précisément, ces auteurs considèrent que la température influence  $R_s$  de façon indirecte, via le déficit de pression de vapeur.

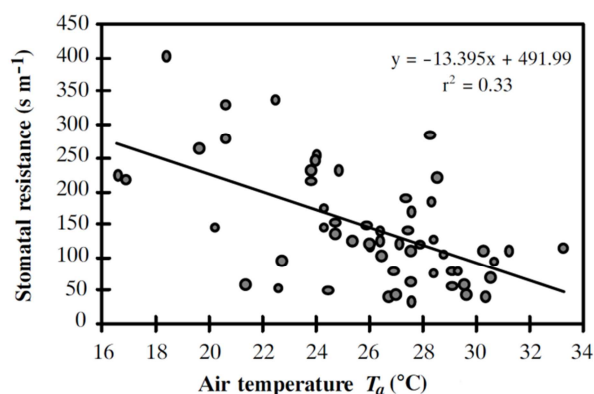


Figure 19 : Influence de la température sur la résistance stomatique des culture de maïs, les points correspondent aux mesures et la ligne au modèle d'ajustement (source : Aphalo et Jarvis, 1991).

#### e. Influence de la concentration en gaz carbonique

Les stomates se ferment en réponse à une augmentation de la concentration en  $\text{CO}_2$  de l'air ; un faible taux de  $\text{CO}_2$  dans l'air stimule l'ouverture des stomates (Ball, 1988; Hu et al., 2010). L'ouverture des stomates permet une assimilation plus élevée de  $\text{CO}_2$ , ce qui augmente la concentration de  $\text{CO}_2$  dans la cavité sous-stomatique et accroît l'activité photosynthétique (Kim et al., 2010). Selon Ball (1988) la concentration de  $\text{CO}_2$  dans la cavité sous-stomatique reste un facteur très lié à la variation du rayonnement. Stewart (1988) néglige l'influence de la concentration de  $\text{CO}_2$  dans l'air sur l'ouverture et la fermeture des stomates et considère que la concentration de  $\text{CO}_2$  dans l'air est presque constante pour des cultures en plein champ. Boulard et al. (1991) ont également constaté que sans enrichissement en  $\text{CO}_2$  pour une serre avec des ouvrants ouverts, le taux de  $\text{CO}_2$  dans l'air à l'intérieur de la serre ne varie pratiquement pas.

#### f. Influence de la disponibilité en eau

Selon le degré de restriction hydrique, les stomates sont plus au moins fermés. Les plantes ont tendance à stocker des quantités d'eau dans leurs tissus. Ce stockage

engendre une diminution des pertes d'eau par transpiration, les stomates se fermant en réponse à une augmentation de restriction hydrique. Le potentiel hydrique du sol ou bien de feuille a été largement utilisé afin d'exprimer l'influence de la restriction hydrique sur la résistance stomatique. Dans leurs travaux de modélisation, Tuzet et al. (2003) ont utilisé le potentiel de feuille pour le blé, ainsi que Vico et Porporato, (2008) pour le blé et le tournesol. D'autres auteurs considèrent que le potentiel hydrique du sol, ou bien une autre variable exprimant le stock d'eau dans le sol, sont plus appropriés (Egea et al., 2011 pour différentes cultures; Li et al., 2012 pour le concombre, chrysanthème, tulipe, lys).

Lorsque le stock d'eau baisse dans le substrat, le potentiel hydrique du sol diminue. Par contre, la variation du potentiel hydrique de feuille est liée à la fois à l'état hydrique du substrat et aussi à l'espèce de plante considérée. Ball (1988) mais aussi Zhang et Outlaw (2001) ont en effet montré que la réponse des stomates à la variation du potentiel hydrique du sol n'est pas directe mais dépend de la concentration en acide abscissique apoplastique (ABA). Cette hormone porte l'information du statut hydrique de la plante. Il est maintenant couramment admis que l'ABA est créé au niveau des racines et que sa concentration dans le xylème augmente au fur et à mesure que s'accroît la restriction hydrique (Tardieu et Simonneau, 1998; Zhang et Outlaw, 2001).

### **g. Influence des espèces**

Selon Blake et al. (1996) deux familles de plantes peuvent être considérées en fonction de la variation de l'état hydrique de la plante (potentiel hydrique de feuille), de la transpiration et du degré de restriction hydrique. Ils qualifient d'isohydriques les plantes (e.g. maïs, vigne (Keane, 2000)) qui maintiennent leur potentiel hydrique de feuille constant quelles que soient les variations de la transpiration et de l'état hydrique du sol (i.e. le potentiel hydrique du sol influe sur la quantité d'eau absorbée par les racines) jusqu'à un degré sévère de restriction hydrique (Tardieu et Simonneau, 1998). Pour cette famille de plantes une corrélation peut être établie entre  $R_s$  et le potentiel hydrique du sol. La deuxième famille de plante est qualifiée d'anisohydrique (e.g. tournesol, sorgho (Keane, 2000)). Contrairement à l'autre situation, l'état hydrique des tissus végétaux varie en fonction des variations de la transpiration et du potentiel du sol. Pour les espèces anisohydriques, il est alors recommandé d'exprimer la résistance

stomatique en fonction du potentiel hydrique de feuille. Schultz (2003) a montré qu'il y a toute une gamme d'espèces intermédiaires qui sont caractérisées par des sensibilités différentes au potentiel hydrique de feuille. L'espèce *Impatiens* n'est pas encore classée comme plusieurs autres espèces. Cependant, Cochran et al. (2013) ont montré que le potentiel de feuille de l'impatiens varie avec la restriction hydrique ce qui laisse présager que l'impatiens peut être du type anisohydrique.



### Chapitre 3. Formalisation mathématique des phénomènes biophysiques mis en jeu en vue d'une intégration dans un modèle de climat distribué

Pour étudier les phénomènes biophysiques sous serres, nous utilisons souvent des modèles qui consistent à résoudre numériquement des équations de transport (équations de la mécanique des fluides). La modélisation numérique des écoulements de fluide, qui est en réalité une représentation mathématique du phénomène étudié, consiste à déterminer en un nombre fini de points et à plusieurs instants les variables d'état représentatives de l'écoulement (vitesse, pression, température,...), par la résolution d'un système d'équations aux dérivées partielles, avec un ensemble de conditions aux limites et initiales tirées du problème.

#### 3.1 Équations de base du modèle aérodynamique

Le système d'équations gouvernant les phénomènes est déduit en général de l'application des principes de conservation de la mécanique et de la thermodynamique. Un certain nombre d'hypothèses simplificatrices est pris en compte afin de simplifier le système d'équations de base : équation de conservation de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie. Ce système général est valable pour tous les régimes d'écoulement. Ces équations se basent sur des bilans qui sont tous de la même forme :

Variation temporelle = Flux entrant - Flux Sortant + Création (source) – Dissipation (puits)

Ces équations de bilan sont appliquées sur chaque élément de volume de l'espace d'étude discrétisé. Pour un fluide incompressible en régime transitoire, les équations qui décrivent les phénomènes de transport sont de la forme générale suivante en notation cartésienne (Eq. 1):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \Phi u_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) + S_\Phi \quad (1)$$

Où  $\Phi$  est la concentration adimensionnelle de la quantité transportée (i.e. quantité de mouvement, masse, énergie...) ;  $u_i$  : composante de la vitesse ;  $\Gamma_\Phi$  : coefficient de diffusion ;  $S_\Phi$  correspond aux termes source ou puits.

On aboutit à un système d'équations aux dérivées partielles, couplées et non linéaires. La résolution d'un tel système avec un ensemble de conditions initiales et aux limites est très

complexe. En vue de réduire ce système et faciliter sa résolution, nous posons des approximations et hypothèses simplificatrices (Patankar, 1980):

- L'air est considéré comme un fluide visqueux et newtonien.
- La vitesse de l'air étant faible ( $<10 \text{ m s}^{-1}$ ) l'écoulement est considéré comme incompressible (i.e.  $\rho$  est considéré constant sauf dans le terme de force de flottabilité), et la dissipation visqueuse de chaleur est négligeable devant les échanges de chaleur diffus dans l'équation de l'énergie.
- Les forces volumiques se réduisent à l'accélération de la pesanteur et aux forces d'inertie.
- Les propriétés thermo-physiques de l'air sont indépendantes de la température.
- L'air est considéré comme un milieu complètement transparent ; son absorption du rayonnement sera donc négligée dans le bilan radiatif.

En tenant compte de ces hypothèses, les équations de conservation pour la masse, la quantité de mouvement et l'énergie peuvent être simplifiées.

### 3.1.1 Équation de conservation de la masse

Elle est basée simplement sur le principe de conservation de la masse sur chaque élément de fluide (i.e. un petit volume de contrôle) et elle s'écrit (Eq. 2) :

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

Avec  $\vec{u}$  vecteur vitesse ( $\text{m s}^{-1}$ ).

### 3.1.2 Équation de conservation de la quantité de mouvement

L'équation de la conservation de la quantité de mouvement est aussi connue sous le nom de l'équation de Navier-Stokes mais généralement en CFD, ce terme regroupe l'ensemble des équations de conservation. Elle est basée sur la loi fondamentale de la dynamique qui traduit l'équilibre des forces exercées sur une particule fluide, cette loi permet d'écrire (Eq. 3) :

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = f_i - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_j} + \nu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j^2} \quad (3)$$



Avec :  $p$  (Pa) : pression hydrostatique,  $f_i$  ( $\text{N kg}^{-1}$ ) force massique (force de flottabilité) due à la variation de la densité, et  $\nu$  ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ) viscosité cinématique.

Dans le cas d'un fluide constitué d'une espèce, l'approximation de Boussinesq est utilisée pour tenir compte de la variation de densité. En effet dans la convection libre qui correspond aux cas des serres fermées ou bien des serres ouvertes mais avec des faibles vitesses d'air à l'extérieur, la force motrice prépondérante est due à la différence de densité du fluide induite par les gradients de températures qui existent. Il existe un couplage entre l'équation de conservation de l'énergie et l'équation de la quantité de mouvement. L'approximation de Boussinesq consiste à négliger les variations de la masse volumique dans les équations de conservation, sauf son implication comme force motrice dans le terme  $f_i$  de l'équation de conservation de la quantité de mouvement (Boussinesq, 1904). En prenant un état thermodynamique de référence (masse volumique  $\rho_0$  et température  $T_0$ ), la masse volumique devient (Eq. 4) :

$$\rho = \rho_0(1 - \beta(T - T_0)) \quad (4)$$

Nous pouvons exprimer ainsi la force volumique  $F_i$  motrice de la convection naturelle (Haxaire, 1999) sous la forme (Eq. 5, 6) :

$$F_i = (\rho_0 - \rho)g_i = \beta\rho_0(T - T_0)g_i \quad (5)$$

Ou bien encore en force massique  $f_i$  (Eq. 6) :

$$f_i = \beta(T - T_0)g_i \quad (6)$$

Avec  $\beta$  le coefficient de dilatation ;  $T_0$ ,  $\rho_0$  température et masse volumique de référence dans les conditions opératoires, respectivement .

Dans le cas d'un fluide constitué de plusieurs espèces la loi des gaz parfaits est utilisée. Cette loi permet de tenir compte de la variation de densité non seulement en fonction de température comme dans le cas de l'approximation de Boussinesq, mais aussi de la concentration des espèces présentes dans un volume de fluide (Bouhoun Ali et al., 2014). La densité dans ce cas est définie en fonction de la température et de la fraction massique des espèces. Elle est exprimée selon l'Eq. 7, issue de la loi des gaz parfaits :

$$\rho = \frac{P_{op}}{RT \sum_i \frac{\omega_i}{M_i}} \quad (7)$$

Avec  $R (= 8.31 \text{ J Mol}^{-1} \text{ K}^{-1})$  constante universelle des gaz parfaits,  $P_{op}$  (Pa) pression opératoire,  $\omega_i$  ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) fraction massique de l'espèce  $i$ , et  $M_i$  ( $\text{kg mol}^{-1}$ ) masse molaire de l'espèce  $i$ .

En tenant compte des Eq. 5 et 7, la force massique  $f_i$  est exprimée par (Eq.8):

$$f_i = \left( 1 - \frac{P_{op}}{\rho_0 RT \sum_i \frac{\omega_i}{M_i}} \right) g_i \quad (8)$$

#### 3.1.3 Équation de conservation de l'énergie

L'équation de conservation de l'énergie est issue du premier principe de la thermodynamique (i.e. principe de conservation de l'énergie) la forme finale du bilan énergétique du système s'écrit (Eq. 9) :

$$\underbrace{\frac{\partial T}{\partial t}}_a + \underbrace{u_j \frac{\partial T}{\partial x_j}}_b = \alpha \underbrace{\frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2}}_c + \underbrace{\frac{S_h}{\rho c_p}}_d \quad (9)$$

a : variation temporelle de l'énergie totale du système ; b : variation convective de l'énergie interne ; c : variation d'énergie due à la conduction ; d : production interne de chaleur ;  $\alpha = \frac{\lambda}{\rho c_p}$  ( $\text{m}^2 \text{ s}^{-1}$ ) diffusivité thermique du fluide;  $S_h$  : source de chaleur volumique interne ( $\text{W m}^{-3}$ ) ;  $C_p$ : capacité calorifique massique à pression constante ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ).

#### 3.2 Equation de conservation d'espèces (transfert de masse)

Le fluide est considéré dans la présente étude comme un mélange de deux espèces : air et vapeur d'eau. La fraction massique  $y_m$  de chaque constituant  $m$  dans le fluide peut être déterminée par la résolution de l'équation de transport diffusif-convectif de la fraction massique d'air et de la fraction massique d'eau (Ould Khaoua, 2006) (Eq. 10) :

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho y_m)}{\partial t}}_a + \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho y_m u_j)}_b = - \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j} \cdot J_m}_c + \underbrace{s_m}_d \quad (10)$$

a : variation temporelle ; b : variation convective ; c : effet de la concentration sur la diffusion de l'espèce  $m$  ; d : terme source ou puits de l'espèce  $m$ . Où  $y_m$  est la fraction massique d'une espèce  $m$  définie par l'Eq. 11:

$$y_m = \frac{m_m}{\sum m_i} \quad (11)$$

Avec  $m_m$  (kg) la masse de l'espèce  $m$ .

Dans notre cas, en considérant un mélange binaire d'eau et d'air, nous pouvons écrire :  $y_{air} + y_{vapeur} = 1$ . Donc en calculant la fraction massique pour un constituant donné nous pouvons déduire la fraction massique de l'autre constituant.

Le terme  $J_m$  s'exprime avec la loi de Fick (Eq. 12) :

$$J_m = -\rho D_{m,a} \frac{\partial y_m}{\partial x_j} \quad (12)$$

Où  $D_{m,a}$  est le coefficient de diffusion de l'espèce  $m$  dans l'air.

Dans le cas de la vapeur d'eau le coefficient de diffusion  $D_{w,a}$  est estimé par la relation de Schmeer (Eq. 13) valable entre 20°C et 90°C :

$$D_{w,a} = 2.26 \cdot 10^{-5} \frac{1}{p} \left( \frac{T}{273} \right)^{1.81} \quad (13)$$

Avec  $p$  : pression en bar,  $T$  : température en K et  $D_{w,a}$  en  $m^2 s^{-1}$ .

### 3.3 Sous modèle de condensation et couplage avec la conservation d'espèces et de l'énergie

La condensation est un phénomène de changement de phase pour l'eau. Elle permet le passage de l'eau d'un état vapeur à un état liquide sur les parois où la température est inférieure à la température de saturation. La condensation est accompagnée d'une réduction de la fraction massique de vapeur d'eau dans la serre. Cette réduction de la fraction massique de la vapeur d'eau dans la serre est accompagnée d'une libération d'énergie, ce qui réchauffe les parois concernées par la condensation. Pour cette raison, un terme puits est ajouté dans l'équation de conservation d'espèces (Eq. 14) :

$$s_m = -\text{flux de condensation} \quad (14)$$

Un autre terme source est ajouté dans l'équation de l'énergie (Eq. 15) :

$$s_h = L_v \times \text{flux de condensation} \quad (15)$$

Avec  $L_v$  ( $J kg^{-1}$ ) : chaleur latente de vaporisation de l'eau.

L'annexe 1 (article publié dans Biosystems Engineering Bouhoun Ali et al., 2014) et l'annexe 2 donnent plus des détails sur le phénomène de condensation dans une serre agricole et la façon de modéliser ce phénomène.

### 3.4 Sous modèle radiatif

#### 3.4.1 Équation de transferts radiatifs

Pour simuler l'énergie liée au rayonnement dans le bilan thermique de chaque élément du système serre (i.e. parois, tablette, sol...), nous résolvons l'équation de transfert radiatif (ETR). Pour obtenir l'expression standard différentielle de l'ETR, et intégrer toute la complexité du problème physique (émission, absorption, diffusion et dépendance spectrale). L'ETR est basée sur la variation totale de la luminance  $I(s, \vec{\Omega})$  traversant un milieu semi transparent d'épaisseur  $ds$  autour de la position  $s$  dans la direction  $\vec{\Omega}$ . Avant de présenter l'ETR nous définissons d'abord la luminance.

Luminance monochromatique  $I_\lambda(s, \vec{\Omega})$  : c'est le flux d'énergie radiative émis par une surface  $dA$  dans la direction  $\vec{\Omega}$  par unité de longueur d'onde  $d\lambda$  autour de  $\lambda$ , par unité de surface perpendiculaire à  $\vec{\Omega}$   $dA \cos \theta$ , par unité d'angle solide  $d\Omega$  autour de  $\vec{\Omega}$  (Fig. 20 ; Eq. 16).

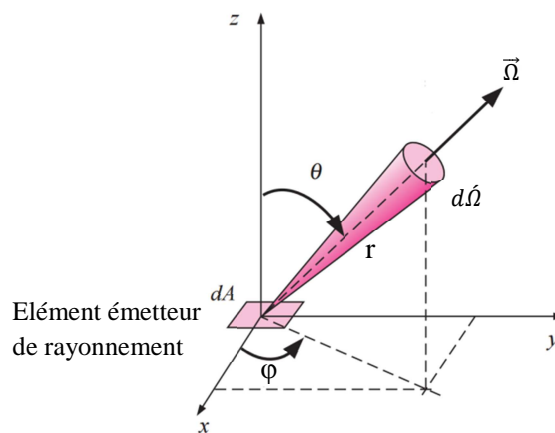


Figure 20 : Élément émetteur de luminance et angle solide (source : Yunus, 2003).

$$I_\lambda(s, \vec{\Omega}) = \frac{dq}{dA \cos \theta \, d\lambda \, d\Omega} \quad (16)$$

L'angle solide est exprimé en coordonnées sphériques  $(r, \theta, \varphi)$  en fonction de  $\theta$  qui désigne la co-latitude (ou l'angle polaire) et qui varie dans l'intervalle  $[0, \pi]$  et en fonction de  $\varphi$ , la longitude (ou angle azimutal), qui varie quant à elle entre 0 et  $2\pi$  (Eq. 17) :

$$d\Omega = \sin \theta \, d\theta \, d\varphi \quad (17)$$

Les relations qui permettent le passage des coordonnées sphériques aux coordonnées cartésiennes en 3D pour un rayonnement dans la direction  $\vec{\Omega}$  s'écrivent (Eq. 18, 19, et 20) :

$$\vec{x} = r \cos \varphi \sin \theta \vec{i} \quad (18)$$

$$\vec{y} = r \sin \varphi \sin \theta \vec{j} \quad (19)$$

$$\vec{z} = r \cos \theta \vec{k} \quad (20)$$

Dans notre cas d'étude et pour modéliser le climat sous serre avec l'outil de CFD (Ansys, Fluent), ce système de coordonnées cartésiennes est nécessaire pour pouvoir inclure la course du soleil en fonction des angles. Dans le cas du soleil, la différence avec l'exemple donné sur la Fig. 20 se situe au niveau de la surface émettrice de rayonnement ainsi qu'au niveau de la direction du rayonnement. Dans le cas d'une représentation en 2D, pour prendre en considération la course du soleil, les directions suivant les axes  $\vec{x}$  et  $\vec{y}$  demandées par le logiciel Ansys Fluent, sont données par les Eq. 21 et 22 :

$$\text{Direction suivant } \vec{x} = -\sin \varphi \sin \theta \vec{i} \quad (21)$$

$$\text{Direction suivant } \vec{y} = -\cos \theta \vec{j} \quad (22)$$

N.B : la course du soleil est donnée en coordonnées géographiques par deux angles à savoir l'azimut et la latitude (ou élévation), avec  $\text{latitude} = \frac{\pi}{2} - \theta$ .

Considérons un volume  $dV$  de milieu semi-transparent d'épaisseur  $ds$  et de section  $dA$  et un faisceau de luminance  $I_\lambda$  qui le traverse (Fig. 21).

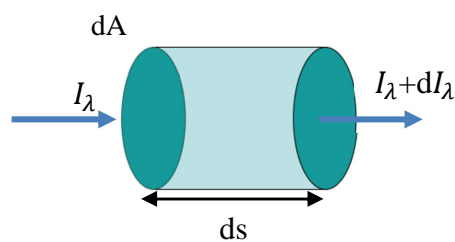


Figure 21 : Bilan radiatif sur un élément de volume (source : Bouhoun Ali).

On réalise un bilan d'énergie sur ce volume élémentaire. Celui-ci fait intervenir :

- L'énergie radiative gagnée par le faisceau grâce à l'émission dans l'élément de volume.
- La perte d'énergie radiative par le faisceau due à l'absorption dans le milieu.
- Le gain d'énergie radiative recueillie par le faisceau dû à la diffusion du rayonnement arrivant de toutes les directions.

- La perte d'énergie radiative du faisceau due à la diffusion dans la matière contenue dans  $dV=dA.ds$ .

Les notions de « perte » et de « gain » sont relatives au volume considéré (Fig. 22).

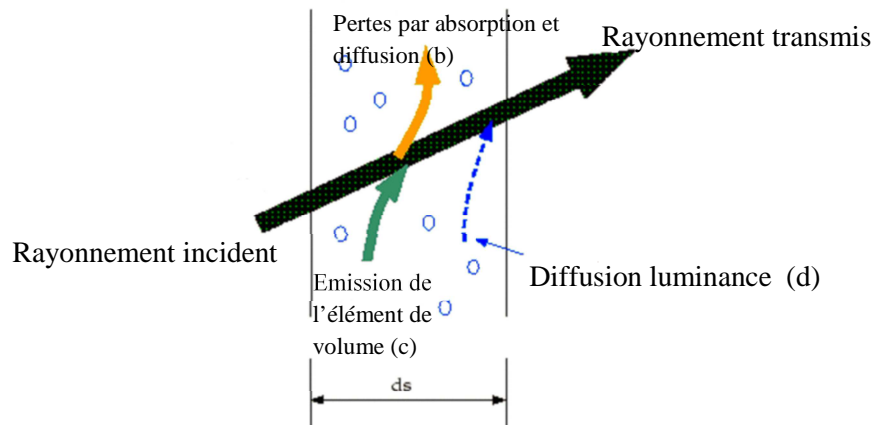


Figure 22 : Transferts radiatifs (source : Fluent, 2014).

L'équation de transferts radiatifs (ETR) (Eq. 23) est obtenue en sommant les termes liés à chacun des trois phénomènes rencontrés évoqués dans le chapitre 1 : absorption, émission et diffusion (Fluent, 2014) :

$$\frac{dI_\lambda(s, \vec{\Omega})}{ds} + (\alpha_\lambda + \sigma_{\lambda,d}) I_\lambda(s, \vec{\Omega}) = \alpha_\lambda n^2 I_\lambda(\vec{\Omega}, T) + \frac{\sigma_{\lambda,d}}{4\pi} \int_0^{4\pi} I_\lambda(s, \vec{\Omega}') \Phi_\lambda(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}') d\Omega' \quad (23)$$

Par intégration des deux membres de l'équation sur toute la gamme de longueur d'onde  $\lambda \in [0, +\infty[$  nous obtenons l'ETR en grandeurs totales soit Eq. 24:

$$\underbrace{\frac{dI(s, \vec{\Omega})}{ds}}_a + \underbrace{(\alpha + \sigma_d)}_b I(s, \vec{\Omega}) = \underbrace{\alpha n^2 \frac{\sigma T^4}{\pi}}_c + \underbrace{\frac{\sigma_d}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(s, \vec{\Omega}') \Phi(\vec{\Omega}, \vec{\Omega}') d\Omega'}_d \quad (24)$$

Avec :

a : représente la variation de la luminance à la traversée de l'élément d'épaisseur  $ds$  ;  
 b : correspond à l'atténuation du rayonnement par diffusion sortante et absorption ;  
 c : correspond à un gain de luminance par émission à la traversée de l'élément ;  
 d'épaisseur  $ds$  avec un coefficient de réfraction  $n \geq 1$  ; d : correspond à un gain de  
 luminance par diffusion des luminances provenant des directions  $\vec{\Omega}'$  ;  $s$  : position ;  
 $\alpha$  : coefficient d'absorption du milieu ;  $n$  : indice de réfraction ;  $\sigma_d$  : coefficient de

dispersion ;  $\sigma$  : constante de Stefan-Boltzmann ( $5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2}\text{K}^{-4}$ ) ;  $I$  : luminance ;  $T$  : température locale ;  $\Phi$  : fonction de diffusion de phase ;  $\Omega$  : angle solide ;  $\vec{\Omega}$  : vecteur direction ;  $\vec{\Omega}'$  : vecteur direction de diffusion.

Lorsqu'un rayonnement atteint la surface d'un corps, une fraction  $\rho$  du rayonnement total incident est réfléchi, une autre fraction  $\alpha$  est absorbée par le corps et une troisième  $\tau$  est transmise par le corps. Les rayonnements  $R_i$ ,  $R_a$ ,  $R_r$ ,  $R_t$ , sont respectivement les flux totaux incidents, absorbé, réfléchi et transmis.

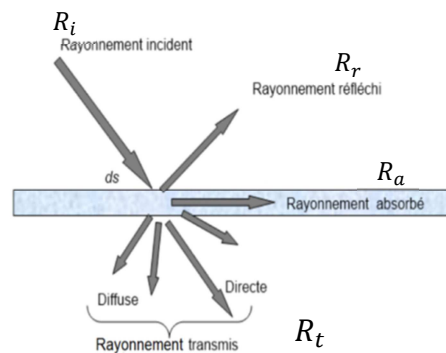


Figure 23: Absorption, réflexion et transmission du rayonnement (source : Bouhoun Ali).

A partir de ces rayonnements, les trois fractions peuvent être définies :  $\alpha$  l'absorptivité (Eq. 25),  $\rho$  la réflectivité (Eq. 26), et  $\tau$  la transmittance (Eq. 27):

$$\alpha = \frac{R_a}{R_i} \quad (25)$$

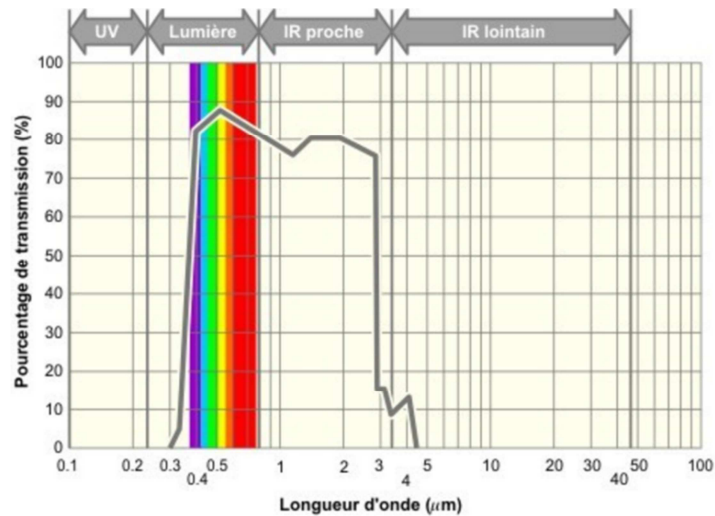
$$\rho = \frac{R_r}{R_i} \quad (26)$$

$$\tau = \frac{R_t}{R_i} \quad (27)$$

Comme expliqué précédemment (§ 2.3.3.3) ces grandeurs sont liées par la relation suivante (Eq. 28)

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (28)$$

Pour certains matériaux semi-transparents tels que le verre, il est nécessaire de considérer des variations des coefficients selon certaines longueurs d'onde comme l'indique la Fig. 24 pour un type de verre avec une épaisseur donnée.



**Figure 24: Variation du coefficient de transmission en fonction de la longueur d'onde**  
(source :<http://www.vaucanson.org/php5/Accueil/index.php/comment-minimiser-les-pertes-d-energie/707-limitation-des-pertes-par-rayonnement>).

### 3.4.2 Absorptivité, réflectivité et transmittance pour une paroi opaque

Un corps noir appelé aussi corps idéal est un corps qui absorbe la totalité du rayonnement incident sans réfléchir ni transmettre du rayonnement. A l'équilibre thermique pour un corps noir selon la loi de Kirchhoff on peut écrire (Eq. 29) :

$$\alpha = \varepsilon \quad (29)$$

Avec  $\varepsilon$  émissivité de milieu : elle est définie comme étant la capacité d'un matériau à émettre de la chaleur de manière radiative. C'est le rapport entre l'émission du corps réel et celle du corps noir, porté à la même température. Pour un corps noir  $\varepsilon$  est égale 1.

La loi de Kirchhoff reste aussi valable pour un corps gris. Un corps gris est un corps qui absorbe partiellement le rayonnement incident et le reste est réfléchi. Comme le corps noir, un corps gris ne transmet pas du rayonnement. Le code de calcul Fluent considère tout milieu opaque (e.g. parois opaque) comme un corps gris (Fluent, 2014). Trois types des parois opaques peuvent être distingués selon la façon de réfléchir le rayonnement incident d'une façon diffuse, ou spéculaire (i.e. réflexion dans une direction privilégiée) (Fig. 25).



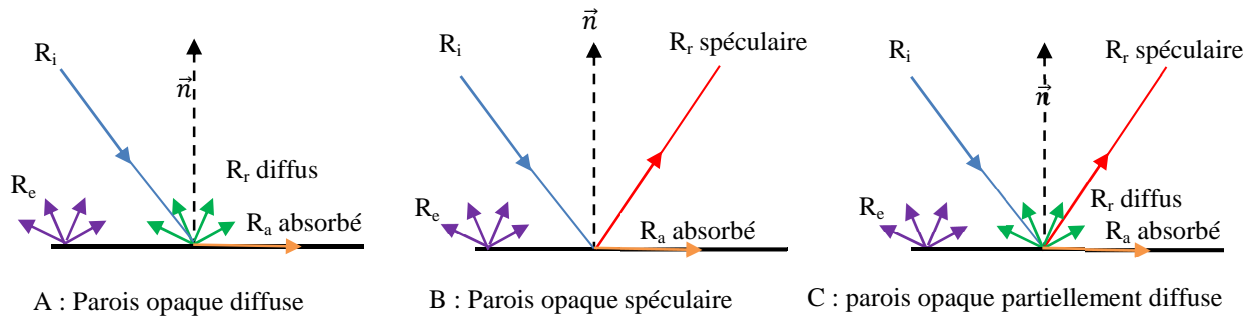


Figure 25 : Rayonnement réfléchi spéculaire et diffuse paroi opaque (source : Bouhoun Ali).

Une quantité du rayonnement incident qui arrive sur une paroi opaque est absorbée, une autre est réfléchie et une autre quantité est émise. Par conséquent, en absorbant du rayonnement, la température de la paroi opaque augmente ce qui permet à la paroi d'émettre du rayonnement  $R_e$ . La quantité de rayonnement absorbé ou émis dépend de l'émissivité de la paroi (Fluent, 2014). Pour une paroi opaque le rayonnement réfléchi, diffus, ou spéculaire, le rayonnement émis ou bien le rayonnement absorbé sont donnés par les Eq. 30, 31, 32, 33 :

$$R_r \text{ diffus} = f_d (1 - \varepsilon) R_i \quad (30)$$

$$R_r \text{ spéculaire} = (1 - f_d) (1 - \varepsilon) R_i \quad (31)$$

$$R_e = \varepsilon R_i \sigma T^4 \quad (32)$$

$$R_a = \varepsilon R_i \quad (33)$$

Avec  $f_d$  ( $0 \leq f_d \leq 1$ ) la fraction diffuse du rayonnement réfléchi d'une façon diffuse et  $(1 - f_d)$  la fraction du rayonnement réfléchi de façon directe ou spéculaire, et  $\sigma$  la constante de Stefan-Boltzmann.

A partir de la connaissance de chaque fraction du rayonnement, les coefficients  $\alpha$ ,  $\rho$ , et  $\tau$  peuvent être calculés par l'utilisation des Eq. 25, 26, et 27.

### 3.4.3 Réflectivité, transmittance, et absorptivité pour une paroi semi transparente

Une paroi semi transparente est susceptible, non seulement de réfléchir, d'absorber et d'émettre le rayonnement incident comme une paroi opaque, mais aussi de transmettre une fraction du rayonnement incident ( $R_t$ ) d'une façon directe et/ou diffuse comme dans le cas du rayonnement réfléchi par une paroi opaque. Une étude de la propagation du rayonnement à l'intérieur de la matière sur une épaisseur donnée est inutile pour une

paroi opaque, mais est indispensable dans le cas d'une paroi semi transparente (Modest, 2003) (Fig. 26).

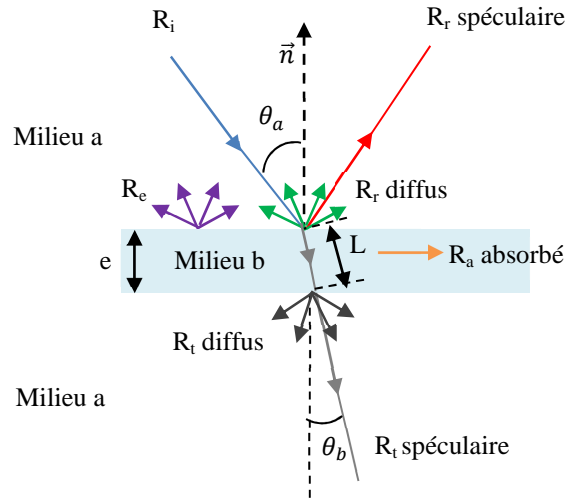


Figure 26: Différentes composantes du rayonnement sur une paroi semi transparente (source : Bouhoun Ali).

Où  $e$  est l'épaisseur du milieu  $b$  (paroi semi transparente),  $L$  est la longueur du trajet optique qui représente la distance parcourue par le rayonnement dans le milieu semi transparent (milieu  $b$ ). La longueur du trajet optique est donnée en fonction de l'épaisseur  $e$  et de l'angle  $\theta_b$  (Eq. 34)

$$L = \frac{e}{\cos \theta_b} \quad (34)$$

En général pour une paroi mince ou pour un rayonnement incident perpendiculaire à la paroi  $L \approx e$  (Ould Khaoua, 2006).

#### ➤ Réflectivité

Au niveau d'une paroi semi-transparente, le coefficient de réflexion dépend des indices de réfraction des milieux adjacents à la paroi. Si  $n_a$  est l'indice de réfraction du milieu adjacent, que  $n_b$  est l'indice de réfraction du milieu semi transparent (Fig. 26) et que  $n_b > n_a$ , le coefficient de réflexion spéculaire est alors donné par l'Eq. 35 (Fidaros et al., 2010) :

$$\rho = 0.5 \left( \frac{n_a \cos(\theta_b) - n_b \cos(\theta_a)}{n_a \cos(\theta_b) + n_b \cos(\theta_a)} \right)^2 + 0.5 \left( \frac{n_a \cos(\theta_a) - n_b \cos(\theta_b)}{n_a \cos(\theta_a) + n_b \cos(\theta_b)} \right)^2 \quad (35)$$

Où  $\theta_a$  est l'angle incident et  $\theta_b$  l'angle transmis. Ils sont reliés par la loi de Descartes (Eq. 36):

$$n_a \sin(\theta_b) = n_b \sin(\theta_a) \quad (36)$$

Dans la plupart des études d'ingénierie, les surfaces rencontrées sont diffuses, c'est-à-dire que le rayonnement incident est réfléchi de façon isotrope dans toutes les directions du demi-espace, quel que soit l'angle incident. Le coefficient de réflexion est alors donné par la formule (Eq. 37) (Siegel and Spuckler, 1994) :

$$\rho = 0.5 + \frac{(3+1)(n-1)}{6(n+1)^2} + \frac{n^2(n^2-1)^2}{(n^2+1)^3} \ln \frac{(n-1)}{(n+1)} - \frac{2n^3(n^2+2n-1)}{(n^2+1)(n^4-1)} + \frac{8n^4(n^4+1)}{(n^2+1)(n^4-1)^2} \ln(n) \quad (37)$$

Avec  $n$  qui est donné par l'Eq. 38 :

$$n = \frac{n_b}{n_a} > 1 \quad (38)$$

Pour une paroi pas parfaitement diffuse le calcul du coefficient de réflexion dépend de la fraction diffuse  $f_d$ . La réflectivité dans ce cas est calculée selon l'Eq. 37, et le reste du rayonnement réfléchi est traité de façon spéculaire, avec la réflectivité calculée par les formules données par les Eq. 35 et 36.

#### ➤ Transmittance

Il est possible d'utiliser la loi de Beer-Lambert pour quantifier l'atténuation du rayonnement incident qui traverse un milieu semi transparent (Fig. 26). Cette loi permet aussi de calculer le rayonnement transmis (Eq. 39).

$$R_t = (1 - \rho)R_i e^{-\tilde{k}L} \quad (39)$$

Avec  $\tilde{k}$  le coefficient d'extinction ou d'atténuation qui représente la somme des coefficients d'absorption et de dispersion donnés dans l'ETR (Eq. 21).

A partir des Eq. 27 et 39 la transmittance peut être calculée à partir de la connaissance du chemin optique, de la réflectivité et du coefficient d'extinction du rayonnement du milieu ou de la paroi semi transparente (Eq. 40).

$$\hat{\tau} = (1 - \rho)e^{-\tilde{k}L} \quad (40)$$

#### ➤ Absorptivité

En connaissant la réflectivité et la transmissivité, l'absorptivité d'un milieu semi transparent peut être alors déduite de l'Eq. 28.

### 3.4.4 Couplage ETR et équation de conservation de l'énergie

La variation d'énergie interne d'un élément de volume, est la somme de la variation due à la conduction et à la convection, de la production d'une source interne de chaleur,

de la variation d'énergie due à l'effet de compressibilité, et de l'énergie de dissipation visqueuse auxquelles s'ajoute la contribution par rayonnement à travers la matière translucide de cet élément de volume. En définissant le vecteur flux radiatif  $\vec{q}_s$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) par l'Eq. 41:

$$\vec{q}_s = \int_0^\infty \int_0^{4\pi} I_\lambda(s, \vec{\Omega}) \vec{\Omega} \cdot \vec{n} d\Omega d\lambda \quad (41)$$

Avec  $I_\lambda$  la luminance monochromatique,  $\vec{s}$  un vecteur unitaire dans la direction de propagation du rayonnement et  $\Omega$  un angle solide.

La contribution nette du rayonnement par unité de volume sur le bilan énergétique peut être exprimée par la divergence du vecteur flux radiatif total  $\vec{q}_s$  transcrit par un signe "-", soit  $-\nabla \cdot q_s(\vec{\Omega}) (\text{W m}^{-3})$ . Ainsi, nous soustrayons le terme:  $\frac{\nabla \vec{q}_s(\vec{\Omega})}{\rho c_p}$  du terme de droite dans l'équation d'énergie (Eq. 9) pour un fluide translucide (Ould Khaoua, 2006).

#### 3.4.5 Modèle aux ordonnées discrètes (DO)

Cette méthode est basée sur l'approximation suivante : toute intégration faite sur l'espace des angles solides  $4\pi$  est remplacée par une quadrature angulaire numérique représentée par un nombre  $N$  de directions orientées selon les vecteurs unitaires  $\vec{\Omega}_i$  (ou ordonnées discrètes) sur lesquelles l'ETR est résolue (Fluent, 2014).

Notre objectif étant de définir le terme source radiatif  $\nabla \cdot q_s$ , cela nécessite la détermination de la luminance  $I_\lambda(s, \vec{\Omega})$  (Ould Khaoua, 2006).

L'application d'une quadrature angulaire (discrétisation angulaire) permet de remplacer toute l'intégrale sur l'espace des angles solides par une sommation pondérée sur des directions discrètes. Nous considérons que pour toute fonction de la luminance, on peut faire l'approximation suivante (Eq. 42) :

$$\int_0^{4\pi} f(\vec{\Omega}) d\Omega = \sum_{i=1}^N w_i f(\vec{\Omega}_i) \quad (42)$$

Avec  $\vec{\Omega}_i$  exprimée dans un repère orthonormé  $(0, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ . Pour la fonction unité  $f(\vec{\Omega}_i)=1$ , l'Eq. 42 se ramène à la principale condition nécessaire sur les poids (Eq. 43) :

$$\sum_{i=1}^N w_i = 4\pi \quad (43)$$

De la même manière, avec  $f(\vec{\Omega}) = I_\lambda(s, \vec{\Omega})$  nous pouvons écrire la divergence du vecteur flux radiatif monochromatique sous la forme (Eq. 44) :

$$\nabla \cdot q_{s,\lambda}(\vec{\Omega}) = \nabla \cdot \left[ \int_0^{4\pi} I_\lambda(s, \vec{\Omega}) \vec{\Omega} d\Omega \right] = \partial_\lambda \left[ n^2 4\pi I_{\lambda,0}(\vec{\Omega}) - \sum_{i=1}^N w_i I_\lambda(s, \vec{\Omega}_i) \right] \quad (44)$$

Seul le sous modèle DO a été présenté car il est considéré comme le modèle le plus complet et le plus adapté pour le cas des serres agricoles. En particulier, il permet de définir un comportement différent d'un matériau (par exemple le verre) dans les courtes longueurs d'onde et dans les grandes longueurs d'onde. Il autorise également la réflexion spéculaire des parois, alors que les parois dans d'autres sous modèle comme Discrete Transfer Radiation Model (DTRM) sont totalement diffuses (Fluent, 2014). Enfin, il s'agit du sous-modèle le plus étudié et pour lequel nous disposons du plus grand nombre d'études d'ordre général (Cha and Song, 2000 ; Granate et al., 2016) et d'applications aux serres (Bournet et al., 2007 ; Fidaros et al., 2010).

### 3.5 Discrétisation des équations de transport

#### 3.5.1 Discrétisation temporelle

On a besoin de faire une hypothèse sur l'évolution temporelle de la variable  $\Phi$  de l'instant  $t$  à  $t+\Delta t$ . Plusieurs hypothèses sont disponibles (Patankar, 1980). Quelques hypothèses peuvent être déduites de l'Eq. 45 :

$$\int_t^{t+\Delta t} \Phi dt = (c \Phi^1 + (1-c) \Phi^0) \Delta t \quad (45)$$

Avec  $\Phi^0$  la variable  $\Phi$  à l'instant  $t$ ,  $\Phi^1$  la variable  $\Phi$  à l'instant  $t+\Delta t$ , et  $c$  un facteur compris entre 0 et 1.

La valeur de  $c$  sert à définir le schéma de discrétisation temporelle. Une valeur de  $c$  égale à 0 correspond à un schéma explicite, et une valeur égale à 1 correspond à un schéma implicite.

Le schéma d'Euler basé sur le développement de Taylor à l'ordre 1 correspond à une discrétisation temporelle de la dérivée de la variable  $\Phi$  par rapport au temps  $\frac{\partial \Phi}{\partial t}$ . Le schéma d'Euler est utilisé dans la discrétisation des équations de transport. Les schémas d'Euler explicite et implicite sont donnés par les Eq. 46, et 47 respectivement :

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial t}\right)^0 = \frac{\Phi^1 - \Phi^0}{\Delta t} \quad (46)$$

$$\left(\frac{\partial \Phi}{\partial t}\right)^1 = \frac{\Phi^1 - \Phi^0}{\Delta t} \quad (47)$$

Patankar (1980) a testé un schéma de discrétisation des équations de transport spatialement avec la méthode des volumes finis (décrite ci-dessous) et temporellement avec les deux schémas présentés précédemment. Il a conclu que le schéma implicite pour

le temps représente le schéma le plus stable, et sa stabilité est indépendante de la taille des volumes de contrôles (i.e. les mailles) et du pas de temps  $\Delta t$ . En revanche, le schéma explicite pour un coefficient de diffusion constante est stable uniquement s'il vérifie la condition suivante Eq. 48 :

$$\Delta t < \frac{\rho \Delta y^2 \Delta x^2}{2 \Gamma_{\phi}} \quad (48)$$

Pour la suite de notre étude nous avons choisi d'utiliser un schéma implicite du premier ordre pour la discrétisation temporelle des équations.

### 3.5.2 Discrétisation spatiale

#### 3.5.2.1 Éléments finis vs volumes finis

La méthode des volumes finis et la méthode des éléments finis représentent les méthodes de discrétisation les plus utilisées afin de numériser les équations différentielles (i.e. transformer les équations différentielles en équations algébriques) pour faciliter leurs résolutions. La méthode des volumes finis est beaucoup utilisée pour les calculs de CFD, cette méthode est simple à mettre en place avec une précision des calculs acceptables (Molina-Aiz et al., 2010). Une étude a été réalisée par Molina-Aiz et al. (2010) pour modéliser en 2D l'aération naturelle pour des écoulements turbulents incompressibles dans une serre multi-chapelles en comparant la méthode de volumes finis et la méthode des éléments finis. Ils ont constaté que la méthode des volumes finis nécessite deux fois moins de temps de calcul et 10 fois moins de mémoire de stockage que la méthode des éléments finis. C'est pour cette raison que les logiciels basés sur la méthode des volumes finis (e.g. ANSYS Fluent) restent les logiciels de la CFD les plus fréquemment utilisés dans le domaine des bâtiments pour étudier les transferts de chaleur et de masse.

#### 3.5.2.2 Méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis consiste à intégrer sur des volumes élémentaires "volumes de contrôle" les équations écrites sous forme intégrale. C'est une méthode bien adaptée à la discrétisation spatiale des lois de conservation, contrairement à la méthode des éléments finis (Eymard et al., 2000). La méthode des volumes finis est ainsi très utilisée en mécanique des fluides. Cependant, cette méthode permet d'utiliser des mailles "volumes de contrôle" de forme quelconque et donc de traiter des géométries complexes

(Causon et al., 2011). La méthode des volumes finis a été utilisée en CFD pour la première fois par McDonald (1971), afin de prédire le flux transsonique (i.e. une vitesse d'écoulement égale à la vitesse du son) des gaz dans une turbine. La discrétisation des équations de transport données par la forme générale de l'Eq. 1 (Fig. 27).

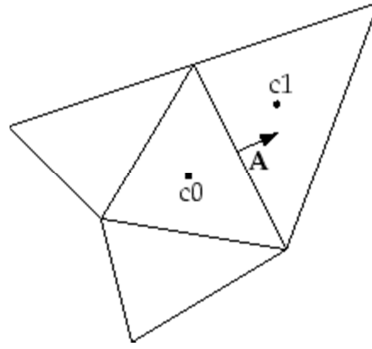


Figure 27 : Mailles : notations utilisées pour la discrétisation des équations (source : Fluent, 2014).

En se basant sur le théorème de Green-Ostrogradsky où les intégrales de volume sont converties en intégrales sur l'interface de volume qui représente une surface (Ferziger et Peric, 2012), l'Eq. 1 devient (Eq. 49) :

$$\iiint \frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} dv + \oint (\rho \Phi u_i) dA = \oint \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} dA + \iiint s_\Phi dv \quad (49)$$

La discrétisation avec la méthode des volumes finis pour n'importe quel maillage de l'Eq. 49 permet d'obtenir le système d'équations algébriques (Eq. 50) pour les inconnues discrètes (Fluent, 2014; Molina-Aiz et al. 2010) :

$$\frac{\partial \rho \Phi}{\partial t} v + \sum_{f=1}^N \rho_f \Phi_f \vec{u}_n \vec{A}_f = \sum_{f=1}^N \Gamma_\Phi \left( \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right)_n \vec{A}_f + S_{vc} v \quad (50)$$

Avec :  $N$  : nombre de surfaces formant le volume de contrôle (i.e. maille) ;  $\Phi_f$  : valeur de  $\Phi$  traversant la surface  $f$  par convection ;  $\Phi_f \vec{u}_n \vec{A}_f$  : flux massique à travers la face  $f$  d'une surface  $\vec{A}_f$  ;  $\left( \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right)_n$  : magnitude du gradient de  $\Phi$  dans la direction normale à la face  $f$  ;  $\vec{u}_n$  : vecteur vitesse normal à la face  $f$  ;  $v$  : volume de la maille ;  $S_{vc}$  : terme source ou puits qui correspond au volume de contrôle.

Pour notre cas d'étude et pour un système d'équations de transport discrétisé avec des mailles rectangulaires en 2D, on manipule des valeurs moyennes prises sur un volume de contrôle entourant les points de calcul (N, S, W, E, P, n, s, w, e) (Fig. 28).

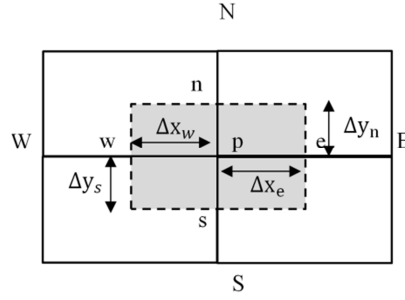


Figure 28 : Volume de contrôle entourant le point central P (source : Bouhoun Ali).

En intégrant l'équation de transport (Eq. 1) sur le volume de contrôle, on peut écrire (Eq. 51) :

$$\int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} dt dy dx + \int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial x} (\rho u \Phi) dt dy dx + \int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial y} (\rho v \Phi) dt dy dx =$$

$$\int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial x} \left( \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) dt dy dx + \int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} \frac{\partial}{\partial y} \left( \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) dt dy dx + \int_w^e \int_s^n \int_t^{t+\Delta t} S_\Phi dt dy dx \quad (51)$$

L'application de la méthode des volumes finis sur l'Eq. 51 pour un schéma implicite pour le temps donne (Eq. 52) :

$$[(\rho\Phi)_P^1 - (\rho\Phi)_P^0] \Delta x \Delta y = \left[ \left( \frac{\Gamma_e (\Phi_E^1 - \Phi_P^1)}{(\partial x)_e} \right) \right] - \left[ \left( \frac{\Gamma_e (\Phi_P^1 - \Phi_W^1)}{(\partial x)_w} \right) \right] \Delta t \Delta y + \left[ \left( \frac{\Gamma_n (\Phi_N^1 - \Phi_P^1)}{(\partial y)_n} \right) \right] -$$

$$\left[ \left( \frac{\Gamma_s (\Phi_P^1 - \Phi_S^1)}{(\partial y)_s} \right) \right] \Delta t \Delta x + 0,5 [(\rho u)_e (\Phi_E^1 + \Phi_P^1) - (\rho u)_w (\Phi_P^1 + \Phi_W^1)] \Delta t \Delta y + 0,5 [(\rho v)_n (\Phi_N^1 +$$

$$\Phi_P^1) - (\rho v)_s (\Phi_P^1 + \Phi_S^1)] \Delta t \Delta x + S_{vc} \Delta t \Delta x \Delta y \quad (52)$$

Pour simplifier l'écriture on a choisi d'enlever l'exposant 1, donc  $\Phi_P, \Phi_E, \Phi_W, \Phi_N$  et  $\Phi_S$  représentent des valeurs à l'instant  $t+\Delta t$ . En forme algébrique réduite (Patankar, 1980) l'Eq. 52 s'écrit (Eq. 53) :

$$a_P \Phi_P = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_N \Phi_N + a_S \Phi_S + b \quad (53)$$

Où les coefficients voisins  $a_E, a_W, a_N$  et  $a_S$  donnés par les Eq. 54, 55, 56, et 57 respectivement représentent la convection et la diffusion pour les quatre faces du volume de contrôle,  $a_P^0$  représente le coefficient de  $\Phi_P$  à l'instant  $t$  (Eq. 58),  $b$  est le terme source ou puits (Eq. 59), et  $a_P$  est le coefficient de  $\Phi_P$  à l'instant  $t+\Delta t$  (Eq. 60).

$$a_E = D_e A (|P_e|) + [-F_e, 0] \quad (54)$$

$$a_W = D_w A (|P_w|) + [F_w, 0] \quad (55)$$

$$a_N = D_n A (|P_n|) + [-F_n, 0] \quad (56)$$

$$a_s = D_s A (|P_s|) + [F_s, 0] \quad (57)$$



$$a_p^0 = \frac{\rho_p^0 \Delta x \Delta y}{\Delta t} \quad (58)$$

$$b = S_{cv} \Delta x \Delta y + a_p^0 \Phi_p^0 \quad (59)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S + a_p^0 \quad (60)$$

Avec  $|P|$  la valeur absolue du nombre de Peclet  $P$  et  $[F, 0]$  le maximum entre  $F$  et  $0$ .  $D_e, D_w, D_n, D_s$  sont les conductances pour les différentes interfaces (Eq. 61) :

$$D_e = \frac{\Gamma_e \Delta y}{(\Delta x)_e}, D_w = \frac{\Gamma_w \Delta y}{(\Delta x)_w}, D_n = \frac{\Gamma_e \Delta x}{(\Delta y)_e}, D_s = \frac{\Gamma_s \Delta x}{(\Delta y)_s} \quad (61)$$

$F_e, F_w, F_n, F_s$  sont le flux massique à travers les interfaces de volume de contrôle donnés par l'Eq. 62:

$$F_e = (\rho u)_e \Delta y, F_w = (\rho u)_w \Delta y, F_n = (\rho u)_n \Delta x, F_s = (\rho u)_s \Delta x \quad (62)$$

Les nombres de Peclet sont exprimés par l'Eq. 63 :

$$P_e = \frac{F_e}{D_e}, P_w = \frac{F_w}{D_w}, P_n = \frac{F_n}{D_n}, P_s = \frac{F_s}{D_s} \quad (63)$$

Selon la fonction  $A(|P|)$ , le schéma de discrétisation spatial peut être défini selon le Tab. 2 (Eymard et al., 2000 ; Patankar, 1980) :

**Tableau 2 : Schéma de discrétisation.**

Schéma	Formule de $A( P )$
Différences centrés	$1 - 0.5  P $
Upwind	1
Loi de puissance	$[0, (1 - 0.1  P ^5)]$
Exponentiel	$ P  / (\exp( P ) - 1)$

Dans notre étude, un schéma Upwind d'ordre 2 a été utilisé : contrairement au schéma d'ordre 1, qui utilise uniquement les valeurs de la maille amont (Ould Khaoua, 2006 ; Patankar, 1980), le schéma d'ordre supérieur utilise plus de points pour décrire le flux de convection. Il nécessite l'ajout de points et alourdit le mode de résolution numérique. Ce schéma permet cependant un gain en précision, bien que la convergence des calculs soit souvent plus difficile à obtenir. Fluent propose aussi le schéma Quick, qui correspond à une combinaison linéaire des schémas simples présentés dans le tableau 2 (Fluent, 2014).

### 3.5.2.3 Model DO Quadrature polaire / azimutale

La méthode de discrétisation angulaire est la plus typique des méthodes de volumes finis, que ce soit pour un maillage structuré ou non structuré (Murthy and Mathur, 1998). Pour ANSYS Fluent chaque quadrant en 2D ou chaque octant dans le cas du 3D pour un angle solide de  $4\pi$  l'équation de transfert radiatif est résolu pour les  $N_\theta \times N_\phi$  ordonnées discrètes (Baxevanou et al., 2008 ; Fluent, 2014).

L'angle polaire ( $\theta$ ) :  $0 < \theta < \pi/2$  est divisé en angles égaux de valeur  $\Delta\theta = \frac{\pi}{2 N_\theta}$  et l'angle azimutal ( $\phi$ ) :  $0 < \phi < 2\pi$  en angles égaux de valeur  $\Delta\phi = \frac{\pi}{2 N_\phi}$  (Fig. 29).

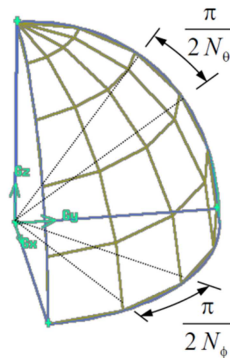


Figure 29: Discrétisation en  $\Delta\theta$  et  $\Delta\phi$  d'un octant de l'angle solide  $4\pi$  (source : Fluent, 2014).

A chaque ordonnée discrète correspond une direction. La luminance est calculée pour cette direction et pour un angle solide discret. Par exemple, sur une discrétisation 3D avec  $N_\theta \times N_\phi = 3 \times 3$  l'angle solide  $4\pi$  est discrétisé en 72 ordonnées discrètes contre 36 pour le 2D en raison de la symétrie.

## 3.6 Transfert de masse : eau

### 3.6.1 Potentiel hydrique d'une solution aqueuse

De façon formelle selon Eamus (2006) et Nobel (1999) le potentiel hydrique d'une solution aqueuse est défini à partir du potentiel chimique de l'eau et peut être décrit de la façon suivante (Eq. 64) :

$$\Psi = \frac{(\mu_w - \mu_{ow})}{VM_w} = \Psi_0 + \Psi_s + \Psi_p + \Psi_g \quad (64)$$

Avec :  $\Psi$  (Pa) le potentiel hydrique et  $\mu_w$  ( $J \text{ mol}^{-1}$ ) le potentiel chimique de l'eau dans le système considéré. Ce dernier est maximum lorsque l'eau est à l'état pur et diminue lorsqu'il se trouve dans un mélange.  $\mu_{ow}$  est le potentiel chimique de l'eau pure.  $VM_w$  est

le volume d'une mole d'eau liquide, à température et pression normales (20°C, 1 bar)  
 $VM_w = 18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$ ;

- $\Psi_o$  : (Pa) est le potentiel osmotique qui représente l'abaissement du potentiel de l'eau associé à la présence de solutés dissous.
- $\Psi_s$  : (Pa) est le potentiel exercé par la matrice solide où l'eau circule (i.e. sol, tissus de feuille).
- $\Psi_p$  : (Pa) est le potentiel de pression dû à la pression de l'air extérieur.
- $\Psi_g$  : (Pa) est le potentiel gravitationnel qui est provoqué par les forces de gravité.

De la même façon que le potentiel chimique d'une solution est donné par rapport à un état de référence de l'eau pure, le potentiel osmotique et le potentiel de pression prennent des valeurs relatives, ils sont donnés par rapport à l'état de référence de l'eau pure. Pour l'eau pure en valeur absolue  $\Psi_o$  est égal à 0 (pas de solutés dissous) et le potentiel de pression est égal à 1 atmosphère. Pour l'eau pure, les deux composantes du potentiel hydrique valent 0 en valeur relative.

Selon Lemaire (2003) le potentiel gravitationnel est donnée par l'Eq. 65

$$\Psi_g \text{ (Pa)} = \rho_w g \hat{h} \quad (65)$$

Avec :  $\rho_w$  : ( $\text{kg m}^{-3}$ ) masse volumique de l'eau ;  $g$  : ( $\text{m s}^{-2}$ ) accélération gravitationnelle.  
 $\hat{h}$  : (m) représente la hauteur à laquelle on s'intéresse pour le calcul de  $\Psi_g$ , la hauteur  $\hat{h}$  peut être négative ou positive selon la référence. Si on s'intéresse à un point qui se trouve au-dessus de la référence,  $\hat{h}$  est positif et inversement.

### 3.6.1.1 Potentiel hydrique du sol

Selon l'Eq. 64, le potentiel hydrique dans le sol ( $\Psi_{\text{sol}}$ ) est donné par l'Eq. 66 :

$$\Psi_{\text{sol}} = \Psi_o + \Psi_s + \Psi_p + \Psi_g \quad (66)$$

- Le potentiel osmotique  $\Psi_o$  diminue avec l'augmentation des solutés dissous dans le sol, il est toujours négatif.
- Le potentiel matriciel  $\Psi_s$  dans le sol est engendré par les forces d'attraction (i.e. force de capillarité et d'adsorption) exercées par la matrice solide du sol sur les molécule d'eau (Eamus, 2006).

- Le potentiel de pression  $\Psi_p$  est dû à la pression de l'air en contact avec le sol, cette grandeur est égale à 0 si le sol est sous une pression atmosphérique du fait que c'est une grandeur relative par rapport à une pression de 1 atm.
- Le potentiel gravitationnel  $\Psi_g$  correspond à l'énergie provenant du travail des forces de pesanteur lors d'un déplacement. Il représente le travail nécessaire pour déplacer de manière réversible une unité de quantité d'eau de l'état de référence jusqu'à l'altitude du point considéré dans le sol. Il correspond donc à un déplacement dans le champ de pesanteur. En général, il est négligeable pour les sols non saturé avec de l'eau (Eamus, 2006).

### 3.6.1.2 Potentiel hydrique de feuille

Dans la plante, le potentiel hydrique de feuille ( $\Psi_l$ ) s'écrit (Guyot, (1999) (Eq. 67) :

$$\Psi_l = \Psi_0 + \Psi_s + \Psi_p + \Psi_g \quad (67)$$

- Le potentiel osmotique  $\Psi_0$  dans la plante est fonction de la concentration en soluté dans les cellules de la plante. C'est le potentiel prédominant dans la plante et il est toujours négatif.
- Le potentiel matriciel  $\Psi_s$  dans la plante est égal au potentiel de turgescence qui est dû à la l'élasticité de la paroi qui s'oppose à l'augmentation du volume d'eau dans la cellule. Il est toujours positif et vaut 0 pour le point de flétrissement (i.e. les forces de turgescence sont presque négligeables) (Eamus, 2006).
- Le potentiel de pression  $\Psi_p$  est fonction de la pression de l'air extérieur.
- Le potentiel gravitationnel  $\Psi_g$  correspond à l'énergie provenant du travail des forces de pesanteur.

Čereković et al., (2013) décrivent la manière de mesurer chaque composante du potentiel hydrique pour la feuille i.e.  $\Psi_0$  et  $\Psi_p$ .

### 3.6.2 Potentiel hydrique de l'air

Le potentiel hydrique peut être défini dans la phase gazeuse ou dans l'air ( $\Psi_a$ ). Il est lié à l'humidité de l'air (Woodward et Sheehy, 2013) (Eq.68) :

$$\Psi_a(\text{MPa}) = \frac{R T_a}{V M_w} \ln \frac{P_{v,a}}{P_{v,a}^{\text{sat}}} \quad (68)$$

Où  $R$  est la constante des gaz parfaits ;  $T_a$  (K) la température de l'air ;  $P_{v,a}$  la pression de vapeur d'eau et  $P_{v,a}^{sat}$  est la pression saturante de vapeur d'eau à la température  $T$ .

#### 3.6.3 Circulation de l'eau et conductivité hydraulique

La force motrice responsable de la circulation de l'eau entre deux points dans le CSPA dépend de l'état énergétique de l'eau en ces deux points. En physiologie des plantes, l'état énergétique de l'eau est caractérisé par le potentiel hydrique. L'eau circule du potentiel hydrique élevé vers le potentiel hydrique plus faible.

De façon générale, le flux d'eau ( $F$ ) entre deux points A et B suit l'équation généraliste suivante (Nobel, 1999) (Eq. 69):

$$F_{AB} = \text{force motrice} / \text{coefficient de proportionnalité} \quad (69)$$

Nous avons vu que la force motrice responsable des transferts d'eau en phase liquide était générée par une différence du potentiel hydrique. Par ailleurs, le coefficient de proportionnalité est conventionnellement appelé résistance hydraulique. En première approximation, le flux d'eau dans la plante est considéré comme conservatif au long du continuum substrat-plante-atmosphère (si l'on néglige les effets de stockage).

L'application de l'Eq. 69 aux différentes parties du CSPA fait apparaître les résistances élémentaires de chacune des parties (Fig. 30) qui, selon Katerji et al. (1983), peuvent être exprimées sous la forme (Eq. 70) :

$$\text{Absorption} = \frac{\Psi_{sol} - \Psi_r}{R_r} = \frac{\Psi_r - \Psi_l}{R_p} = \frac{\Psi_l - \Psi_a}{R_s + R_a} = \text{Transpiration} \quad (70)$$

Où  $\Psi_{sol}$  est le potentiel hydrique du sol,  $\Psi_r$  le potentiel hydrique des racines,  $\Psi_l$  le potentiel hydrique des feuilles ;  $R_r$  représente la résistance au passage de l'eau du sol aux racines,  $R_p$  la résistance interne de la plante,  $R_s$  la résistance stomatique et  $R_a$  la résistance aérodynamique.

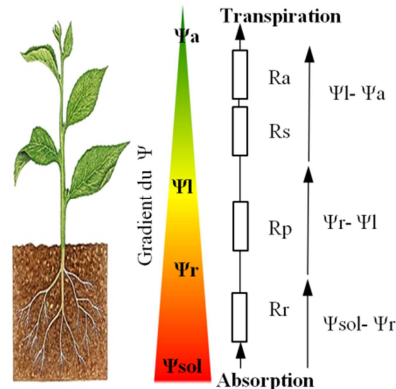


Figure 30 : Résistances aux transferts hydriques et le gradient du potentiel hydrique du continuum substrat-plante-atmosphère (source : Bouhoun Ali).

Sack et Holbrook (2006) négligent  $R_r$  et considèrent que  $\Psi_r = \Psi_{sol}$ . A partir de cette simplification le potentiel de feuille est donné par l'Eq. 71 :

$$\Psi_l = \Psi_{sol} - R_p \cdot Tr \quad (71)$$

où  $Tr$  est la transpiration.

D'autres auteurs comme Tardieu et Simonneau (1998) considèrent que  $R_r$  n'est pas négligeable, dans ce cas le potentiel de feuille est donné par l'Eq. 72 :

$$\Psi_l = \Psi_{sol} - (R_r + R_p) \cdot Tr \quad (72)$$

Généralement  $R_p$  est estimée expérimentalement,  $R_r$  est donnée par Tardieu et Simonneau (1998) (Eq. 73) :

$$R_r = \ln(d^2/r^2)/(4\pi K(\theta)) \quad (73)$$

Où  $d$  correspond à la moitié de la valeur moyenne de la distance entre deux racines voisines,  $r$  est le diamètre moyen des racines et  $K(\theta)$  la conductivité hydraulique du sol en fonction de la teneur en eau.

### 3.6.4 Courbe de rétention en eau

La courbe de rétention en eau pour un substrat donné consiste à relier la teneur en eau ( $\theta$ ) au potentiel matriciel  $\Psi_s$  du substrat. A chaque valeur de potentiel correspond alors une teneur en eau (cf. chapitre 2). Plusieurs modèles ont été développés, ces modèles permettent de tracer les courbes de rétention (Weiss et al., 1998). En général, ce sont des modèles semi empiriques avec des paramètres à ajuster (Weiss et al., 1998). Hallema et al. (2015) ont testé les performances de trois modèles:

le modèle de Van Genuchten (1980), le modèle de Groenevelt et Grant (2004) et le modèle Grant et al. (2010) pour modéliser la courbe de rétention de la tourbe. La différence entre les modèles réside dans le nombre de paramètres à calibrer qui varie de 2 à 3 selon le modèle et aussi dans la forme mathématique. Hallema et al. (2015) ont constaté que le modèle de Van Genuchten (1980) est le plus précis. Les travaux de Hallema et al. (2015) confirment les résultats obtenus par Weiss et al. (1998) pour la tourbe. Weiss et al. (1998) ont testé différents modèles pour étudier la courbe de rétention pour la tourbe, et ils ont obtenu de meilleurs résultats avec le modèle de Van Genuchten (1980). Le modèle de van Genuchten (1980) est le plus couramment utilisé pour prédire les courbes de rétention de par sa simplicité et sa précision. Cannavo et al. (2011) et Cannavo et Michel (2013) ont utilisé ce modèle pour la tourbe. Le modèle de Van Genuchten (1980) est donné par l'Eq. 74 suivante :

$$\theta = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) [1 + (\alpha \Psi_s)^n]^{-m} \quad (74)$$

Où  $\theta_r$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) est la teneur en eau résiduelle,  $\theta_s$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) la teneur en eau à saturation,  $\alpha$  ( $\text{kPa}^{-1}$ ),  $n$  (sans dimension) et  $m$  (sans dimension) des paramètres de forme de la courbe à ajuster.

#### 3.6.5 Bilan d'eau substrat- plante

Un bilan hydrique entre la plante et le substrat est nécessaire, afin de déduire la teneur en eau du substrat à chaque pas de temps dans le logiciel de CFD (Eq. 75). Ce bilan est effectué entre la quantité d'eau apportée par irrigation (qui correspond à la teneur en eau initiale du substrat) et les pertes d'eau par le couvert végétal par transpiration si l'évaporation au niveau du substrat est négligeable.

$$\theta_i = \theta_0 - \left( \frac{ts \ s_{sh} \sum_{j=0}^{j=i} Tr_{avg,j}}{L_v \ m \ \rho_w \ v_p} \right) \quad (75)$$

Avec  $\theta_i$  : teneur en eau au temps  $i$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) ;  $\theta_0$  : teneur en eau initiale ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) ;  $ts$  : pas de temps qui est égal à 3600 s pour notre cas d'étude ;  $s_{sh}$  : surface totale des tablettes ( $\text{m}^2$ ),  $Tr_{avg,j}$  : moyenne pondérée par les volumes des mailles pour le flux de transpiration sur l'ensemble du domaine du couvert végétal pour le pas de temps  $j$  ( $\text{W m}^{-2}$ ) ;  $L_v$  : chaleur latente de vaporisation de l'eau ( $\text{J kg}^{-1}$ ),  $m$  : nombre total de plantes qui est ;  $\rho_w$  : masse volumique de l'eau ( $\text{Kg m}^{-3}$ ) ;  $V_p$  : volume du pot ( $\text{m}^3$ ).

### 3.7 Sous modèle de culture-climat et couplage avec les équations de l'énergie et de la conservation de vapeur d'eau

#### 3.7.1 Effet dynamique (approche milieu poreux)

Du fait, de la complexité de la description d'un couvert végétal, nous proposons de l'assimiler à un milieu poreux. Généralement, ce milieu peut être défini comme une matrice solide, parcourue par un réseau de trous (pores). La présence d'une matrice solide dans l'écoulement conduit à une perte de quantité de mouvement correspondant aux pertes de charge créées par la présence d'obstacles. Pour tenir compte des effets dynamiques induits sur l'écoulement par le couvert végétal, on préfère utiliser l'équation de Darcy-Forchheimer (Fluent, 2014) (Eq. 76) plutôt que l'équation de Darcy qui n'est valable que pour des nombres de Reynolds  $< 5$  :

$$\nabla p = -\frac{\mu}{K}u - \frac{C_f}{\sqrt{K}}\rho u^2 \quad (76)$$

$\mu$  : viscosité dynamique de l'air ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$ ) ;  $\rho$  : masse volumique ( $\text{kg m}^{-3}$ ) ;  $K$  : perméabilité moyenne du milieu poreux ( $\text{m}^2$ ) ;  $C_f$  : coefficient de perte de charge non linéaire (facteur inertiel, sans dimension).

Boulard et Wang (2002) sont à notre connaissance les premiers à avoir intégré l'approche milieu poreux pour modéliser les pertes de charge au niveau du couvert végétal dans le modèle de CFD pour une serre. Ils ont utilisé le modèle de Darcy-Forchheimer. Beaucoup des travaux de CFD pour modéliser le climat sous serre ont utilisé la même approche de milieu poreux pour le couvert végétal : Roy et al. (2002) et Majdoubi et al. (2016) pour les tomates et Morille et al. (2012) pour l'impatiens.

Le terme du premier ordre dans l'Eq. 76, est négligeable car, la valeur de la perméabilité du couvert végétal est plus grande que celle de la viscosité dynamique (l'ordre de grandeur de  $\mu$  pour l'air est  $10^{-5} \text{kg s}^{-1} \text{m}^{-1}$ ). Donc, le gradient de pression dans cette équation dépend uniquement du terme quadratique (Boulard et Wang, 2002) (Eq. 77).

$$\nabla p = -\frac{C_f}{\sqrt{K}}\rho u^2 \quad (77)$$

L'Eq. 76 est valable pour des écoulements à nombre de Reynolds  $Re_p$  (i.e. basé sur la taille typique d'un pore) (Eq. 78) supérieur à l'unité (Boulard et Wang, 2002).

$$Re_p = \frac{uK^{0.5}}{\nu} \quad (78)$$

Avec  $\nu$  : ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ ) viscosité cinématique de l'air.



Cette force qui correspond au terme  $\nabla p$  dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement, représente la force de résistance du couvert végétal à l'écoulement d'air. Elle peut être aussi exprimée par la formule déduite de l'approche de Bernoulli (Eq. 79) :

$$\nabla p = -LAD \cdot C_d u^2 \quad (79)$$

$C_d$ : coefficient de perte de charge (facteur de traînée).

$LAD$  : ( $m^2 m^{-3}$ ) densité foliaire ( $m^2 m^{-3}$ ) définie par:  $h \cdot LAD = LAI_s$  où  $h$  est la hauteur de la végétation avec  $LAI_s$  donné par l'Eq. 80 :

$$LAI_s = \frac{S_f}{S_s} \quad (80)$$

$S_f$  : surface des feuilles ( $m^2$ ) ;  $S_{sh}$ : surface totale des tablettes ( $m^2$ ).

Afin de calculer le coefficient de perte de charge non linéaire  $C_f$  et la perméabilité  $K$  de la végétation, on combine les Eq. 77 et 79, et nous obtenons ainsi l'Eq. 81 :

$$\frac{C_f}{\sqrt{K}} \rho = LAD \cdot C_d \quad (81)$$

Fluent permet également de modéliser le terme de perte de charge  $\nabla p$  par une loi qui est une fonction puissance de la vitesse (Fluent, 2014) (Eq. 82).

$$\nabla p = -C_0 \cdot \|\vec{u}\|^{C_1-1} \vec{u} \quad (82)$$

Avec :  $C_0 = \rho \frac{C_f}{K^{0.5}} = LAD \cdot C_d$  et  $C_1=2$ .

Il reste dès lors d'identifier le coefficient  $C_d$ . Haxaire (1999) a trouvé expérimentalement une valeur de  $C_d = 0.32$  pour des tomates. Cette valeur de  $C_d$  a été utilisé pour différentes plantes (e.g. Majdoubi et al., 2016 pour les tomates, Kichah et al., 2012a pour l'Impatiens).

#### 3.7.2 Effet physiologique

La surface d'un élément du couvert végétal reçoit de l'énergie radiative. Elle renvoie et transmet une partie de cette énergie incidente. L'autre partie est absorbée par la surface des feuilles et accompagnée d'échanges de chaleur à la fois sensible et latente (transpiration) entre le couvert végétal et l'air (Boulard et Wang, 2002). Ces phénomènes sont pris en compte dans le logiciel de CFD via un bilan de masse (vapeur d'eau) et de chaleur sur les feuilles par le biais d'une routine. La prise en compte du végétal dans le modèle se traduit ainsi par l'ajout d'un terme source de vapeur d'eau dans l'équation de

conservation de la vapeur d'eau et d'un terme source de chaleur sensible dans l'équation de conservation de l'énergie.

Un bilan d'énergie sur les mailles du couvert végétal (Eq. 83) permet de calculer la température du couvert végétal (Fig. 31).

$$R_{abs} = Q_s + Q_l \quad (83)$$

Avec :  $R_{abs}$  : rayonnement net absorbé par la cellule du couvert végétal considérée ( $W m^{-3}$ ) ;  $Q_s$  : densité de flux de chaleur sensible ( $W m^{-3}$ ) ;  $Q_l$  : densité de flux de chaleur latente ( $W m^{-3}$ ).

Le rayonnement absorbé par le végétal est calculé à partir du rayonnement global ( $R_g$ ) (Boulard & Wang, 2002). Aux limites supérieure ( $y_1$ ) et inférieure du couvert végétal ( $y_2$ ), il est donné par l'Eq. 84 :

$$R_{abs} = \frac{R_g(y_1) - R_g(y_2)}{y_1 - y_2} \quad (84)$$

Certains auteurs comme Kichah et al. (2012a) ont considéré que l'impatiens absorbe aussi du rayonnement grande longueur, mais la quantité absorbée reste très faible : seulement 4% du rayonnement grande longueur d'onde.

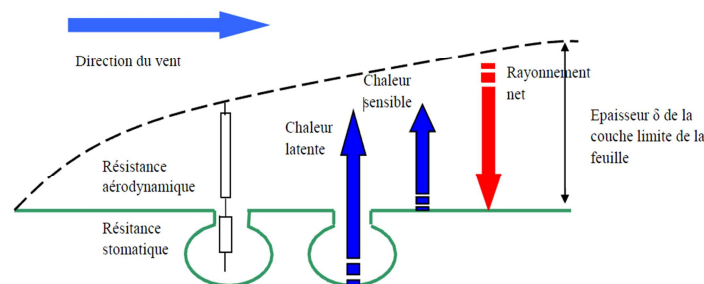


Figure 31: Bilan d'énergie, résistance aérodynamique et résistance stomatique à l'interface de la feuille (source : Morille, 2012).

La loi de Beer-Lambert appliquée à un couvert végétal pour modéliser la décroissance du rayonnement permet de calculer  $R_g(y)$  dans les différents points du couvert végétal (Eq. 85).

$$R_g(y) = R_{g_0} \exp(-\hat{k} LAD y) \quad (85)$$

Avec  $R_{g_0}$  ( $W.m^{-2}$ ) le rayonnement global incident sur la surface supérieure du végétal et  $\hat{k}$  : le coefficient d'extinction sans dimension.

### 3.7.2.1 Source de chaleur sensible

Par analogie avec les lois de l'électricité et en fonction de la résistance au transfert, la densité de flux de chaleur sensible  $Q_s$  entre la feuille et l'air peut s'écrire sous la forme suivante Eq. 86 (Stanghellini, 1987):

$$Q_s = 2LAD \cdot \rho_a C_p \frac{T_l - T_a}{R_a} = 2LAD h_s (T_l - T_a) \quad (86)$$

Le facteur 2 provient du fait que l'échange de chaleur a lieu des deux côtés de la feuille.

$\rho_a$  : ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ ) masse volumique de l'air ;  $C_p$  : ( $\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ ) capacité calorifique de l'eau ;  $R_a$  : ( $\text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ ) résistance aérodynamique ;  $T_l$  : (K) température de la feuille ;  $T_a$  : (K) température de l'air ;  $h_s$  : ( $\text{W} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ ) coefficient d'échange de chaleur sensible.

La plupart des études CFD pour les serres ont intégré ce sous modèle (Eq. 86) afin de tenir compte des échanges thermiques entre le couvert végétal et l'air à l'intérieur de la serre agricole (Roy et Boulard, 2005 ; Chen et al., 2015).

### 3.7.2.2 Source de chaleur latente (transpiration)

Deux modèles sont couramment employés pour estimer la transpiration : le modèle de Penman-Monteith et la méthode dite « directe » (Morille et al. 2012). Les premiers travaux de CFD sur les serres ont utilisé la méthode directe. Cette méthode est la plus simple à mettre en place et elle demande moins de paramètres. Plusieurs travaux de CFD sur les serres ont utilisé ce modèle : on peut citer Boulard et Wang (2002) pour les plants des salades, Majdoubi et al. (2009), Nebbali et al. (2012) et Wang et al. (2013) pour les tomates ou bien les travaux de Morille et al. (2012) pour l'Impatiens. Les derniers travaux de CFD pour simuler le microclimat sous serre qui intègrent la transpiration des plantes, commencent à utiliser le modèle de Penman-Monteith malgré sa complexité de mise en oeuvre, et le nombre de paramètres dont dépend ce modèle (cf. Chen et al., 2015) pour le bégonia). Le modèle de Penman-Monteith est en effet plus complet car il est issu d'un bilan d'énergie au niveau de la plante (Stanghellini, 1987).

#### a. Modèle de Penman Monteith (PM)

Caspari et al. (1993) ont intégré les modèles de résistance stomatique en confort et en restriction hydrique dans le modèle de transpiration de PM. Leurs travaux portaient sur des arbres en plein champ. Baille et al. (1994) ont utilisé ce même modèle en confort hydrique pour 9 plantes ornementales dont l'Impatiens. L'approche de PM s'appuie sur le

modèle dit "big leaf". Il consiste à modéliser une grande feuille virtuelle possédant les propriétés moyennes des feuilles du couvert végétal. La formule de Penman Monteith, découle du bilan énergétique sur le couvert végétal et s'exprime pour un végétal hypostomatique (i.e. stomates sur une face) (Eq. 87):

$$Q_l = \frac{\Delta R_n + 2 \rho_a LAD C_{pa} VPD_a / R_a}{\Delta + 2 \gamma \left(1 + \frac{R_c}{R_a}\right)} \quad (87)$$

Avec :  $Q_l$  : densité de flux de transpiration ou de chaleur latente ( $W m^{-3}$ ) ;  $R_n$  : rayonnement net total absorbé ( $W.m^{-2}$ ) ;  $\rho_a$  : masse volumique de l'air ( $kg.m^{-3}$ ) ;  $C_{pa}$  : chaleur spécifique de l'air ( $J.kg^{-1}.K^{-1}$ ) ;  $VPD_a$  : déficit de pression de vapeur air-air (Pa) (i.e. différence entre la pression de vapeur saturante à la température de l'air et la pression de vapeur de l'air) ;  $\gamma$  : constante psychométrique  $\gamma = 66 Pa.K^{-1}$  ;  $\Delta$  : gradient de pression de vapeur saturante entre l'air et la feuille ( $Pa.K^{-1}$ ) ;  $R_a$  : résistance aérodynamique ( $s.m^{-1}$ ) ;  $R_c$  : résistance stomatique moyenne du couvert ( $s.m^{-1}$ ).

$R_n$  peut être remplacé par le rayonnement global incident au-dessus du couvert végétal (Morille et al., 2013). Selon Caspari et al. (1993)  $R_c$  correspond à la moyenne pondérée par les indices foliaires de la  $R_s$  des feuilles du haut du couvert végétal (i.e. les feuilles exposées au rayonnement) et de la  $R_s$  des feuilles du bas du couvert (i.e. les feuilles à l'ombre) (concept de big leaf §2.3.2), ils ont constaté aussi que  $R_s$  moyenne des feuilles de bas était presque égale à deux fois la  $R_s$  moyenne des feuilles du haut.

Le déficit de pression de vapeur air-air  $VPD_a$  est donné par l'Eq. 88 :

$$VPD_a = P_{v,a}^{sat} - P_{v,a} \quad (88)$$

Avec  $P_{v,a}^{sat}$  : Pression de vapeur saturante à la température de l'air (Pa) calculé par l'Eq. 89 de Magnus-Tetens.

$$p_v^{sat}(Ta) = 6.11 \cdot 10^2 \exp\left(\frac{17.25 Ta}{237.8 + Ta}\right) \quad (89)$$

Ta : température de l'air ( $^{\circ}C$ ).

$P_{v,a}$ , la pression de vapeur de l'air (Pa) s'écrit (Eq. 90) :

$$P_{v,a} = \frac{RH_a}{100} p_v^{sat} \quad (90)$$

La température de l'air et l'humidité absolue ( $AH_a$ ) (i.e. le rapport de la masse de vapeur d'eau dans l'air sur la masse d'air sec) sont déterminées via la résolution des équations de l'énergie et de la conservation de la vapeur d'eau par le logiciel CFD.

L'humidité relative de l'air  $RHa$  (%) peut être déduite de l'humidité absolue par l'Eq. 91 (Nadeau et Puiggali, 1995) :

$$RHa = \frac{P_{atm} AH_a 100}{p_v^{sat} (0.622 + AH_a)} \quad (91)$$

Avec :  $P_{atm}$  : pression atmosphérique (Pa).

#### b. Méthode directe

Dans la littérature le modèle appelé méthode directe (MD) a été utilisé à notre connaissance seulement pour des cas de plantes en confort hydrique. Il s'écrit (Eq. 92) :

$$Q_l = L_v \cdot LAD \rho_a \frac{(AH_l - AH_a)}{R_a + R_c} = \frac{\rho_a LAD C_{pa} (P_{v,l}^{sat} - P_{v,a})}{\gamma (R_a + R_c)} \quad (92)$$

$Q_l$ : flux de transpiration ( $W m^{-3}$ );  $L_v$  : chaleur latente de vaporisation d'eau ( $2256 \cdot 10^3 J kg^{-1}$ ) ;  $AH_l$  : humidité absolue (masse de vapeur d'eau contenue dans l'air par kg d'air sec) dans la feuille au niveau de la chambre sous stomatique ;  $AH_a$  : humidité absolue de l'air à l'extérieur de la feuille ( $kg_{eau} kg^{-1}_{air}$ ) ;  $P_{v,l}^{sat}$ : pression de vapeur saturante à la température de la feuille (Pa) ;  $P_{v,a}$  : pression de vapeur de l'air (Pa).

#### c. Modèles de la résistance stomatique en confort

##### ➤ Modèle multiplicatif de Jarvis

Jarvis (1976) est à notre connaissance le premier à avoir proposé un modèle multiplicatif (Eq. 93) de résistance stomatique. Il intègre l'influence des différentes variables climatiques (intensité lumineuse  $I_l$ , déficit de pression de vapeur air-air  $VPD_a$ , température de feuille  $T_l$ , concentration de  $CO_2$  dans l'air  $C_a$ ) ainsi que le potentiel hydrique de la feuille sur la  $R_s$ . Il a supposé que chaque variable agit d'une façon indépendante.

$$\frac{1}{R_s} = f_1(I_l) \cdot f_2(VPD_a) \cdot f_3(T_l) \cdot f_4(C_a) \quad (93)$$

Où les  $f_i$  sont des fonctions empiriques des différentes variables étudiées selon Jarvis (1976). Ces fonctions empiriques prennent les formes suivantes :  $f_1(I_l)$  est une fonction

asymptotique,  $f_2(VPD_a)$  une fonction linéaire,  $f_3(T_l)$  une fonction hyperbolique,  $f_4(C_a)$  une fonction décroissante partiellement linéaire.

D'autres améliorations sur le modèle de Jarvis ont été proposées par d'autres chercheurs comme Baille et al. (1994b) pour modéliser la résistance stomatique de l'Impatiens qui considère que pour le cas du confort hydrique, les variables qui influencent le plus le fonctionnement des stomates sont le rayonnement global incident (Rg) (i.e. l'intensité lumineuse dans le modèle de Jarvis) et le déficit de pression de vapeur. Ils ajoutent aussi la résistance stomatique minimale  $R_{s_{min}}$  dans le modèle qu'il propose (Eq. 94).

$$R_s = R_{s_{min}} f_1(Rg) \cdot f_2(VPD_a) \quad (94)$$

Baille et al. (1994b) proposent les expressions mathématiques suivantes pour les différentes fonctions (Eq. 95, 96) :

$$f_1(Rg) = \frac{a_1 + Rg}{b_1 + Rg} \quad (95)$$

$$f_2(VPD_a) = 1 + a_2(VPD_a - VPD_0)^2 \quad (96)$$

Avec :  $a_1$ ,  $b_1$ ,  $a_2$  des paramètres déterminés empiriquement à partir de données recueillies sous serre agricole et  $VPD_0$  le déficit de pression pour lequel  $R_s$  est minimale.

Une autre forme pour  $f_2(VPD_a)$  a été proposée par Boulard et al. (1991) pour les tomates (Eq. 97):

$$f_2(VPD_a) = 1 + a_2 \exp(b_2(VPD_a - VPD_0)) \quad (97)$$

#### ➤ **Modèle polynomial issu de la méthode des plans d'expériences**

La méthode des plans d'expériences a été développée par Box et Wilson (1951). Il existe différents types de plans d'expériences. Chaque plan est caractérisé par une forme particulière de la réponse du modèle et un nombre bien défini de scénarios (i.e. un scénario représente une combinaison des variables à des niveaux ou des valeurs bien définis). Parmi ces plans d'expériences on trouve les plans complets ou fractionnels à deux ou trois niveaux ou plus.

Pour notre étude et en raison du coût de l'expérience en termes du temps, un plan factoriel complet de deux niveaux à trois variables (rayonnement global RG, humidité relative RH, et température)  $2^3$  a été choisi avec un point au centre

(Lundstedt et al., 1998 ; Montgomery, 2008). Le modèle mathématique pour un plan factoriel complet  $2^3$  s'écrit (Eq. 98) :

$$R_s = a_0 + b_1.RG + b_2.RH + b_3.T + b_{12}.RG.RH + b_{13}.RG.T + b_{23}.RH.T + b_{123}.RG.RH.T \quad (98)$$

Avec  $a_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{23}$ , and  $b_{123}$  les paramètres du modèle définis par les données issues des expériences basées sur les différents scénarios du plan  $2^3$  avec un point au centre (i.e. 9 scénarios différents). Dans le modèle (Eq. 98), les variables sont des variables centrées et réduites. Pour transformer une variable naturelle en une variable codée (i.e. centrée réduite) on fait appel à l'Eq. 99 :

$$A = \frac{a_0 - a}{pas} \quad (99)$$

Avec  $a$  : variable naturelle ;  $A$  : variable codée ;  $a_0$  et  $pas$  sont données par les Eq. 100 et 101 respectivement :

$$a_0 = \frac{a_{max} + a_{min}}{2} \quad (100)$$

$$pas = \frac{a_{max} - a_{min}}{2} \quad (101)$$

L'intérêt de travailler avec des variables codées est de ramener toutes les variables à la même échelle comprise entre -1 et +1, ce qui facilite la comparaison entre les différents paramètres du modèle. Après quelques modifications sur le modèle polynomial originel issu du plan factoriel complet  $2^3$  avec un point au centre (Eq. 98), et afin d'améliorer sa précision. Ces améliorations concernent le remplacement des termes du polynôme qui ne jouent pas un rôle significatif par d'autres termes (quadratique et cubique du rayonnement) (Bouhoun Ali et al., 2016). On aboutit alors au modèle suivant (Eq. 102) qui sera calibré à partir des données expérimentables :

$$R_s = b_1.RG + b_2.RH + b_3.T + b_{12}.RG.RH + b_{13}.RG.T + b_{23}.RH.T + b_{11}.RG^2 + b_{111}.RG^3 \quad (102)$$

#### d. Modèles de résistance stomatique en restriction hydrique

##### ➤ Modèle multiplicatif de Jarvis

Dans le cas d'une restriction hydrique, l'état hydrique du sol ou de la plante devient une variable limitante de la fermeture ou de l'ouverture des stomates. Des chercheurs comme Gang et al. (2012) proposent de rajouter une fonction de stress dépendante du potentiel hydrique du sol ou de feuille selon l'espèce étudiée (Eq. 103).

$$R_s = R_{s\min} f_1(Rg) f_2(VPD_a) f_5(\Psi_s) \text{ ou } R_s = R_{s\min} f_1(Rg) f_2(VPD_a) f_5(\Psi_f) \quad (103)$$

Nikolov et al., (1995) proposent d'adopter la forme suivante pour la fonction stress (Eq. 104) :

$$f_5(\Psi) = 1 + \left(\frac{\Psi}{\Psi_1}\right)^{a_3} \quad (104)$$

Où  $\Psi_1$  représente le potentiel matriciel du sol ou de feuille pour lequel  $R_s$  en restriction hydrique est égal à deux fois  $R_s$  en confort et dans ce cas la fonction  $f_5(\Psi)$  vaut 2 ;  $a_3$  est un paramètre empirique à estimer à partir des données expérimentales.

#### ➤ **Modèle polynomial issu de la méthode des plans d'expériences**

La même méthode que celle décrite précédemment sera utilisée pour modéliser  $R_s$  en restriction hydrique avec le modèle polynomial. L'idée est ici de multiplier le polynôme déduit de la méthode des plans d'expérience par la fonction stress (Eq. 104) qui sera paramétrée avec les données acquises sous serre. Le modèle de résistance stomatique en restriction hydrique s'écrit (Eq. 105) :

$$R_s = (b_1.RG + b_2.RH + b_3.T + b_{12}.RG.RH + b_{13}.RG.T + b_{23}.RH.T + b_{11}.RG^2 + b_{111}.RG^3) \left(1 + \left(\frac{\Psi}{\Psi_1}\right)^{a_3}\right) \quad (105)$$

#### **e. Résistance aérodynamique**

Dans les limites de variations climatiques usuelles que l'on rencontre sous serre, la valeur de la résistance aérodynamique ( $R_a$ ) est assez peu influencée par les variations des caractéristiques de l'air humide. Baille et al. (1994a) considèrent une valeur constante de  $R_a$  pour des roses sous serre. Plusieurs formules sont proposées pour estimer  $R_a$  dans la littérature (Boulard et Wang, 2002 ; Roy et Boulard, 2005). Boulard et al. (2002) proposent une formule pour des cultures de tomate sous serre (Eq. 106). La particularité des cultures sous serre est qu'elles sont exposées à de faibles vitesses de vent contrairement au plein champ.

$$R_a = \frac{\rho_a C_{pa}}{h_s} \quad (106)$$

Pour évaluer le coefficient d'échange de chaleur  $h_s$  (Eq. 107), nous faisons appel au nombre de Nusselt. Cependant, cette expression dépend du régime de l'écoulement à proximité des feuilles.

$$h_s = \frac{Nu.\lambda_a}{d} \quad (107)$$



Avec  $\lambda_a$  conductivité de l'air ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ) ;  $d$  (m) dimension caractéristique des feuilles. Selon Morille (2012) pour l'Impatiens,  $d$  s'écrit (Eq. 108) :

$$d = 0.581 l_l \quad (108)$$

$l_l$  : longueur de la feuille (m)

L'écoulement le long de la couche limite des feuilles est largement considéré comme laminaire, même si l'écoulement est turbulent un peu plus loin de la feuille. L'expression du nombre de Nusselt peut alors s'écrire en fonction du mode de convection et du régime d'écoulement (Tab. 3) qui est laminaire. La feuille est assimilée à une plaque plane horizontale (Monteith and Unsworth, 2013 ; Morille et al., 2013 ; Roy et al., 2002) :

Convection libre (Eq. 109)

$$Nu = 0.59 (Pr \cdot Gr)^{0.25} \quad (109)$$

Convection mixte (Eq. 110) :

$$Nu = 0.68 (Re^{1.5} + Pr^{0.75})^{0.33} \quad (110)$$

Convection forcée (Eq. 111) :

$$Nu = 0.67 Re^{0.5} Pr^{0.33} \quad (111)$$

Avec  $Pr$  nombre de Prandtl égale à 0.71 pour l'air.

Pour le cas d'une serre sans ventilation mécanique, c'est généralement la convection libre qui prédomine à l'intérieur de la serre. A partir des équations précédentes (Eq. 106, 107, et 109) on peut déduire l'expression de  $Ra$  (Eq.112) :

$$Ra = \frac{\rho C_p d}{0.59 (Pr \cdot Gr)^{0.25} \lambda_a} \quad (112)$$

### 3.8 Étude de la turbulence et du modèle de fermeture (k-ε)

La turbulence désigne l'état d'un écoulement de fluide, liquide ou gaz, dans lequel la vitesse présente en tout point des fluctuations aléatoires entraînant la création de tourbillons dont la taille et la localisation varient continûment.

La distinction entre les écoulements laminaires et turbulents est basée sur le nombre de Grashof  $Gr$  (Eq. 113) pour la convection libre et le nombre de Reynolds  $Re$  (Eq.114) pour la convection forcée (Tab. 3) (Monteith and Unsworth, 2013).

**Tableau 3 : Type de régime d'écoulement.**

Mode de convection	Condition	Écoulement Laminaire	Écoulement turbulent
Convection Libre	$Re^2 < Gr$	$10^4 < Gr < 10^9$	$10^9 < Gr < 10^{12}$
Convection Mixte	$Re^2 = Gr$	$10^3 < Gr < 10^9$	$10^9 < Gr < 10^{12}$
Convection Forcée	$Re^2 > Gr$	$Re < 3 \cdot 10^5$	$Re > 5 \cdot 10^5$

Avec :

$$Gr = \frac{g \beta \Delta T d^3 \rho^2}{\mu^2} \quad (113)$$

$$Re = \frac{\rho u d}{\mu} \quad (114)$$

$g$  : accélération de la pesanteur ( $9.81 \text{ m s}^{-1}$ ) ;  $\beta$  : coefficient de dilatation pour un gaz parfait  $\beta = 1/T \text{ (K}^{-1}\text{)}$  ;  $\Delta T$  : différence de température entre la température du fluide loin de la plaque et la température de la plaque ;  $d$  : longueur caractéristique (m) ;  $\rho$  : Masse volumique du fluide ( $\text{kg m}^{-3}$ ) ;  $u$  : vitesse de fluide ( $\text{m s}^{-1}$ ) ;  $\mu$  : viscosité dynamique de fluide (Pa.s).

Le comportement complexe des écoulements turbulents est la plupart du temps abordé par la voie statistique selon la méthode de moyenne dite de Reynolds (RANS: Reynolds Averaged Navier-Stokes).

Cette méthode consiste à exprimer les variables en composante moyenne et composante fluctuante. Selon la décomposition de Reynolds, ces variables s'écrivent :

$$T_i = \bar{T}_i + \tilde{T}_i ; p_i = \bar{p}_i + \tilde{p}_i ; u_i = \bar{u}_i + \tilde{u}_i$$

Le modèle de fermeture à deux équations de transport ( $k$ - $\epsilon$ ) standard a été largement utilisé pour la CFD, surtout pour sa facilité d'intégration dans les calculs numériques (Kichah et al., 2012b). Ce modèle a prouvé ses performances dans les différentes études de CFD pour les serres (Bournet et al., 2007 ; Fatnassi et al., 2006 ; Kichah et al., 2012b ; Piscia et al., 2012 ; Wang et al., 2013). C'est un modèle semi-empirique basé sur les deux équations de transport de l'énergie cinétique turbulente 'k' et de sa dissipation 'ε', en plus des équations de conservation moyennées (Mohammadi et Pironneau, 1993).

$k$  est défini à partir de la trace du tenseur de Reynolds (Eq. 115):

$$k = \frac{1}{2} \overline{(\dot{u}_i^2)} \quad (115)$$

Tandis que le terme de dissipation visqueuse, s'écrit (Eq. 116):

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial \dot{u}_i}{\partial x_j} \frac{\partial \dot{u}_j}{\partial x_i}} \quad (116)$$

La décomposition de Reynolds introduit des inconnues supplémentaires, d'où le recours à des modèles de turbulence pour déterminer les contraintes de Reynolds  $\overline{(\dot{u}_i \dot{u}_j)}$  et fermer le système d'équations. Les deux équations de transport de l'énergie cinétique turbulente et de la dissipation s'écrivent (Eq. 117, et 118) :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (v + \sigma_k^{-1} \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \overline{\dot{u}_i \dot{u}_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \quad (117)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (v + \sigma_\varepsilon^{-1} \nu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - c_1 \frac{\nu_t \varepsilon}{k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (118)$$

Avec:  $\overline{\dot{u}_i \dot{u}_j} = \nu_t \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right)$ ,  $\nu_t = c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$  où  $\nu_t$  est la viscosité cinématique turbulente. Les constantes empiriques sont :  $c_\mu = 0.09$ ,  $c_1 = 1.44$ ,  $c_2 = 1.92$ ,  $\sigma_k = 1$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.3$ .

Richards et Hoxey (1993) ou encore Richards et Norris (2011) proposent des formules qui permettent d'estimer les valeurs de l'énergie cinétique turbulente 'k' et de sa dissipation 'ε' à proximité des parois qui sont notées respectivement  $k_p$  et  $\varepsilon_p$  et calculées à partir de la connaissance de la vitesse (Eq.119, et 120) :

$$k_p = \frac{u^{*2}}{\sqrt{c_\mu}} = \frac{(K u(y))^2}{\left( \ln \left( \frac{y+y_0}{y_0} \right) \right)^2 \sqrt{c_\mu}} \quad (119)$$

$$\varepsilon_p = \frac{u^{*3}}{K (y+y_0)} = \frac{(K u_{ref})^3}{\left( \ln \left( \frac{h+y_0}{y_0} \right) \right)^3 K (y+y_0)} \quad (120)$$

Avec :  $u^*$ : vitesse de frottement ;  $u(y)$  : vitesse de référence à la hauteur  $y$  ;  $K=0.41$  : constante de Von Karman ;  $y_0$  : longueur de rugosité.

- **Loi dynamique de paroi lisse**

Les phénomènes de transfert proche de la paroi sont compliqués car différentes régions existent à proximité de la paroi. Pour distinguer les différentes régions proches de la paroi, le concept de distance normalisée à la paroi  $y^+$  a été formulé (Blocken et al., 2007). Beaucoup d'expériences ont montré l'existence de trois sous-couches dans la zone

proche de la paroi (i.e la zone interne) selon la valeur de  $y^+$ , qui sont illustrées sur la Fig. 32 (McDonough, 2007) :

- $y^+ < 5$  : correspond à la sous-couche laminaire ou visqueuse où le fluide est dominé par les forces de viscosité moléculaire, la contrainte de cisaillement totale se limite à la contrainte due à la viscosité.
- $5 < y^+ < 30$  : correspond à la sous-couche transitoire ou tampon où un équilibre s'établit entre les forces de viscosité moléculaire et de turbulence.
- $30 < y^+ < 100$  : correspond à la sous-couche turbulente ou logarithmique où les forces de viscosité moléculaire sont négligeables, et la turbulence joue un rôle prépondérant sur les phénomènes du transfert.

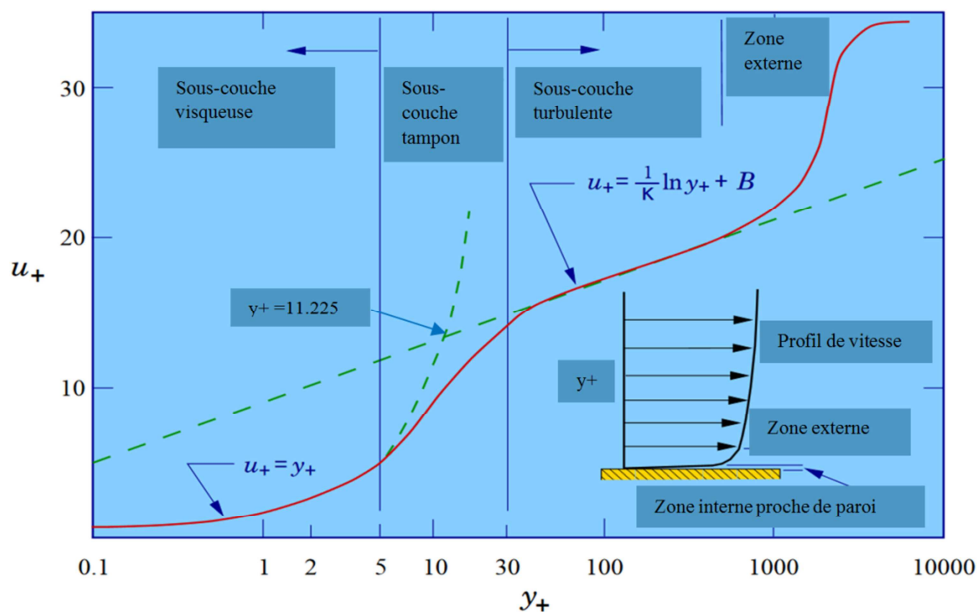


Figure 32 : Profil de vitesse obtenu expérimentalement à proximité de la paroi (source : McDonough, 2007).

Les équations de transferts données précédemment ne sont plus valables au voisinage des parois dans la zone interne. Une solution est basée sur d'autres lois dites lois de parois (Bournet et al., 2007). La Fig. 32 résume les lois de la vitesse pour chaque sous-couche. Elles sont exprimées par la vitesse normalisée en fonction de la distance normalisée  $u^+ = f(y^+)$  : Pour la sous couche visqueuse (Eq. 121):

$$u^+ = y^+ \quad (121)$$

Pour la sous-couche turbulente (Eq. 122) :

$$u^+ = \frac{1}{K} \ln y^+ + B \quad (122)$$

Avec  $u^+$  est donnée par l'Eq. 123 :

$$u^+ = \frac{u_p}{u^*} \quad u^* = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (123)$$

Avec  $u_p$  : la vitesse au point  $p$  (Fig. 33) ;  $\tau_w$  : ( $\text{Kg m}^{-1} \text{s}^{-2}$ ) contrainte de cisaillement à la surface de la paroi solide elle est donné par l'Eq. 124 :

$$\tau_w = \mu \left. \frac{\partial u}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (124)$$

Une formule simple permet d'estimer  $\tau_w$  (McDonough, 2007) (Eq. 125):

$$\tau_w = \frac{1}{2} c_f u_\infty^2 \quad (125)$$

$c_f$  pour une paroi est donné par l'Eq. 126 (McDonough, 2007) .

$$c_f = 0.058 Re^2 \quad (126)$$

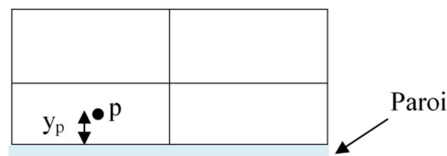
$u_\infty$  : vitesse moyenne loin de la paroi.

$Re$  : nombre de Reynolds basé sur la longueur de la paroi.

$y^+$  : distance normalisée donnée par l'Eq. 127 :

$$y^+ = \frac{\rho u^* y_p}{\mu} \quad (127)$$

Avec  $y_p$  : distance entre le centre de la première cellule adjacente à la paroi  $p$  et la paroi solide (Fig. 33).



**Figure 33 : Mailles adjacentes à la paroi et distance  $y_1$**  (source : Bouhoun Ali).

Fluent utilise d'autres formules (Eq. 128, et 129) pour exprimer la vitesse et la distance normalisées et qui sont notées  $\hat{u}^+$  et  $\hat{y}^+$  respectivement, ces formules sont déduites des Eq. 119, 123, et 127 (Chmielewski et Gieras, 2013) :

$$\dot{u}^+ = \frac{\rho c_\mu^{0,25} k_p^{0,5} u_p}{\tau_w} \quad (128)$$

$$\dot{y}^+ = \frac{\rho c_\mu^{0,25} k_p^{0,5} y_p}{\mu} \quad (129)$$

$k_p$  est l'énergie cinétique turbulente au point  $p$ .

Dans Fluent, l'utilisation du modèle  $k-\varepsilon$  avec l'option « standard wall-function » nous oblige à garantir que la première maille est bien à une distance normalisée  $11.225 < \dot{y}^+ < 100$ , c'est-à-dire dans la zone logarithmique (Fluent, 2014). Pour cela, il faut accroître la densité du maillage à proximité des parois. Les équations précédentes permettent de calculer l'épaisseur  $y_p$  (Fig. 33) pour s'assurer que les premières mailles adjacentes aux parois sont bien dans la zone logarithmique. Dans le cas contraire (i.e. si  $\dot{y}^+ < 11.225$ ), le calcul se fait comme en régime laminaire, la vitesse varie linéairement selon l'Eq. 121. La valeur  $\dot{y}^+ = 11.225$  correspond au point d'intersection entre les deux équations de vitesse pour la zone visqueuse et turbulente (Fig. 32). Pour ce point les effets de viscosité moléculaire et de turbulence sont approximativement égaux.

D'autres lois de paroi permettent aussi de calculer la température et la concentration des espèces, elles sont basées sur le même principe que les lois de la vitesse, plus de détails sur ce sujet sont donnés dans Fluent (2014).

### 3.9 Synthèse du système d'équations

En tenant compte de la turbulence et des termes puits et source, le système d'équations décrivant notre système s'écrit (Eq. 130 à 135) :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \end{array} \right. \quad (130)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \bar{f} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \nu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j^2} - \overline{\dot{u}_i \dot{u}_j} \right) \end{array} \right. \quad (131)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \bar{T}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \alpha \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} - \overline{\dot{u}_i \dot{T}} \right) + \frac{S_h}{\rho c_p} \end{array} \right. \quad (132)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial (\rho \bar{y}_m)}{\partial t} + \rho \frac{\partial \bar{y}_m \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \rho \cdot D_w \frac{\partial \bar{y}_m}{\partial x_j} - \rho \overline{\dot{u}_j \dot{y}_m} \right) + S_m \end{array} \right. \quad (133)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial k}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (v + \sigma_k^{-1} \nu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) - \overline{\dot{u}_i \dot{u}_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \varepsilon \end{array} \right. \quad (134)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \bar{u}_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left( (v + \sigma_\varepsilon^{-1} \nu_t) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - c_1 \frac{\nu_t \varepsilon}{k} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - c_2 \frac{\varepsilon^2}{k} \end{array} \right. \quad (135)$$

- **Termes sources :**

Dans le couvert végétal : l'expression du gradient de pression de l'équation de la quantité de mouvement (Eq. 131) se réduit à  $\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_j} = LAI_v \cdot C_d \bar{u}^2$  ; le terme source de l'équation de la conservation de l'énergie (Eq. 132) est  $s_h = Q_s$ , tandis que dans l'équation du transfert d'espèce (Eq. 133) ce terme source s'écrit  $s_m = Lv \cdot Q_l$ . Pour les parois qui participent aux échanges radiatifs, le terme source ou puits de chaleur s'écrit  $s_h = -\nabla \cdot q_s(\vec{\Omega})$  (cf Eq. 44). Au niveau des parois où il peut y avoir potentiellement des fuites et de condensation dans l'équation de transfert d'espèce  $s_m$  s'écrit  $s_m = Fuite + condensation$  et  $s_h$  dans l'équation de conservation de l'énergie s'écrit  $s_h = L_v * fluxdecondensation$ .





### Chapitre 4. Matériels et méthodes

Un enjeu fort de la thèse est de modéliser la résistance stomatique en confort et en restriction hydrique en vue d'introduire les lois ainsi obtenues dans un modèle de climat distribué. La modélisation de la résistance stomatique passe par l'identification d'un certain nombre de paramètres sur la base de données expérimentales.

#### 4.1 Schéma récapitulatif des différentes étapes de projet de la thèse

La Fig. 34 résume les différentes étapes qui ont été mise en œuvre pour répondre aux objectifs que nous nous étions assignés.

- **Campagnes de mesure (Étape 1 ; Étape 2) :** des verrous scientifiques ont été repérés dans les études qui utilisent l'approche de type CFD pour modéliser les transferts d'énergie et d'eau dans le continuum substrat-plante-atmosphère. Ces verrous scientifiques ont orienté la réflexion pour bâtir un protocole expérimental permettant de suivre précisément les échanges d'eau et d'énergie dans le continuum substrat-plante-atmosphère en confort et en restriction hydrique. Ce protocole expérimental a permis aussi d'accéder à la distribution spatiale et temporelle des paramètres climatiques dans la partie aérienne (température, humidité, rayonnement, vitesse de l'air) ainsi que dans la partie racinaire (température et humidité du substrat). Des mesures de résistance aux transferts de l'eau dans la partie aérienne de la plante (résistance stomatique) ont également été réalisées. Une première campagne de mesure qui représente la **première étape** de ce travail de thèse a été engagée en 2014. Cette campagne s'est déroulée dans une serre agricole et en chambre de culture. Une deuxième campagne de mesure a été réalisée en 2015 dans une serre avec pour objectif d'améliorer la formalisation de la fonction de stress. Cette deuxième campagne représente la **deuxième étape** de ce projet.
- **Exploitation des données de mesure et modélisation (Étape 3) :** L'objectif de cette étape est de développer un formalisme empirique de calcul de la résistance stomatique en condition de confort et de restriction hydrique. Ce formalisme a ensuite été incorporé dans le modèle de transpiration de Penman-Monteith et dans celui correspondant à la méthode directe (cf. chapitre 3). Dans un second temps, les performances de ces deux approches ont été évaluées. L'approche la plus concluante est intégrée dans le logiciel de CFD (ANSYS Fluent) afin de simuler les transferts

d'eau dans le système substrat-plante-atmosphère. Afin de prendre en compte les transferts d'eau dans le continuum substrat-plante-atmosphère, un sous modèle (i.e. routine) basé sur le bilan hydrique sol-plante a été intégré dans le modèle de CFD. Grâce à cette routine, le logiciel ANSYS Fluent permet de modéliser les transferts d'eau et d'énergie dans le continuum substrat-plante-atmosphère. La modélisation sera également un outil utilisé pour tester des scénarios d'irrigation et répondre à de nouveaux questionnements scientifiques. D'un point de vue plus concret, cette étape a vocation à apporter des éléments de réponse sur l'impact d'une restriction hydrique sur le microclimat sous serre agricole.

**Caractérisation et modélisation du transfert d'eau et d'énergie dans le continuum substrat-plante-atmosphère**

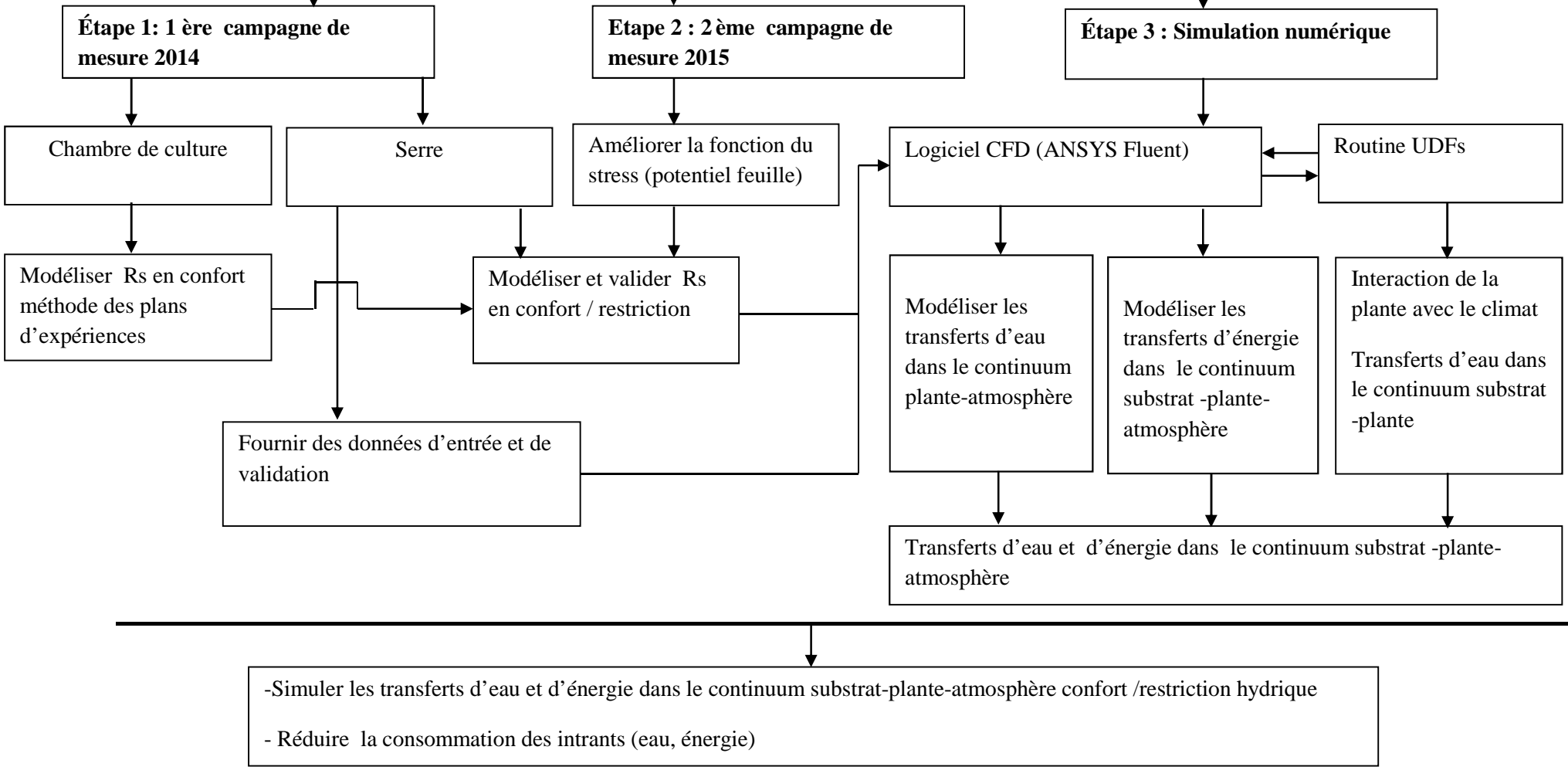


Figure 34 : Organigramme récapitulant les différentes étapes du projet de thèse (source : Bouhoun Ali).

### 4.2 Objectifs des campagnes de mesure

Les campagnes de mesures se sont déroulées en deux étapes :

- Une campagne préliminaire réalisée dans une chambre de culture.
- Une seconde campagne de mesures réalisée dans une serre horticole de type Venlo.

#### 4.2.1.1 Campagne préliminaire en chambre de culture

Cette campagne s'est déroulée du 18 au 20 juillet 2014 dans une chambre de culture. Le but de cette campagne sous conditions climatiques contrôlées était d'étudier l'influence des variables climatiques sur la résistance stomatique (rayonnement global, humidité relative, température de l'air en contact avec les feuilles où les mesures de la résistance stomatique sont prises) en condition de confort hydrique. Les plages de variation des variables climatiques considérées sont déterminées selon la méthode des plans d'expériences (Montgomery, 2008). Les résultats issus de cette campagne préliminaire, seront exploités par la méthode des plans d'expériences dans le but de modéliser la résistance stomatique en confort hydrique. Le modèle obtenu sera validé dans un autre contexte, celui de la serre, en confort hydrique.

#### 4.2.1.2 Première campagne de mesure dans un compartiment de serre en 2014

Cette campagne de mesure s'est déroulée du 26 mars au 20 juillet 2014. Le but de cette campagne dans la serre était de :

- Étudier l'influence d'une restriction hydrique sur le fonctionnement des plantes (transpiration, température des feuilles, résistance stomatique...).
- Comparer les propriétés physiques et écophysologiques entre plantes en confort et plantes en restriction hydrique.
- Valider le modèle de résistance stomatique en confort hydrique établi en chambre climatique.
- Établir un modèle de résistance stomatique en restriction hydrique, fonction notamment du potentiel matriciel.
- Fournir les données d'entrée et de validation pour les simulations numériques (logiciel de CFD Ansys Fluent).

#### 4.2.1.3 Deuxième campagne de mesure dans un compartiment de serre en 2015

Cette campagne de mesure s'est déroulée du 26 mars au 20 juillet 2015, elle avait pour but de compléter la première campagne de mesure. Elle visait d'abord à améliorer les modèles de résistance stomatique en confort et en restriction hydrique. Il s'agissait en particulier d'établir des corrélations entre  $R_s$  et l'état hydrique de la plante : i.e. le potentiel hydrique de feuille, et non le potentiel matriciel comme lors de la première campagne. En effet, pour des plantes de type anisohydrique, il semble plus pertinent d'exprimer la résistance stomatique en fonction du potentiel hydrique de feuille plutôt qu'en fonction du potentiel matriciel. Un autre objectif visait à identifier des corrélations entre le potentiel de feuille et le potentiel matriciel du sol de type de celle correspondant à l'Eq. 71 (cf. chapitre 3), le potentiel matriciel étant plus facilement accessible que le potentiel de feuille.

#### 4.2.1.4 Plante modèle utilisée (Impatiens de Nouvelle Guinée)

Pour les besoins de l'expérimentation, une culture hors-sol (sur tablette) d'Impatiens de Nouvelle Guinée (Fig. 35) a été choisie. L'Impatiens de Nouvelle Guinée est une plante ornementale de la famille des Balsaminacées, elle est originaire de Nouvelle Guinée, sa période de floraison se situe entre mai et octobre, elle s'adapte à des températures de 10 °C minimum, elle peut atteindre une hauteur maximale entre 30 et 60 cm, les feuilles de l'Impatiens sont de couleur vert foncé. C'est une plante de type C3 (i.e. le premier composé issu de la photosynthèse possède 3 atomes de carbone, il s'agit du 3-phosphoglycérate). Les plantes de type C3 ont des résistances stomatiques inférieures à celles des plantes de type C4 (i.e. la première molécule produite lors de la fixation du  $\text{CO}_2$  est un sucre à 4 atomes de carbone l'oxaloacétate) sous des conditions climatiques et hydriques comparables (Hsiao and Acevedo, 1974). Les plante de type C3 sont aussi caractérisées par une consommation d'eau plus élevée pour la photosynthèse : presque le double des plantes de type C4. Ceci tient au fait que les mécanismes de photosynthèse diffèrent entre les deux types de plantes (Kent, 2000; Wang et al., 2012).

L'Impatiens a été choisie pour sa réactivité vis-à-vis du climat ambiant. Elle a en effet la particularité de beaucoup transpirer comparativement à d'autres plantes. Plusieurs études qui s'intéressent à la transpiration ont d'ailleurs utilisé cette plante (e.g. Morille et al., 2013; Pang, 1992). Cette plante demande un substrat de culture relativement bien

aéré, et ayant une grande capacité de rétention en eau. Pour satisfaire à ces exigences, la tourbe blonde de sphaignes de type F1 (granulométrie 5-20 mm) a été utilisée. Les plantes ont été cultivées dans des pots d'un litre, rempli d'un volume de substrat de 0,74 litre avec une densité apparente sèche homogène de  $0.12 \text{ g cm}^{-3}$ .

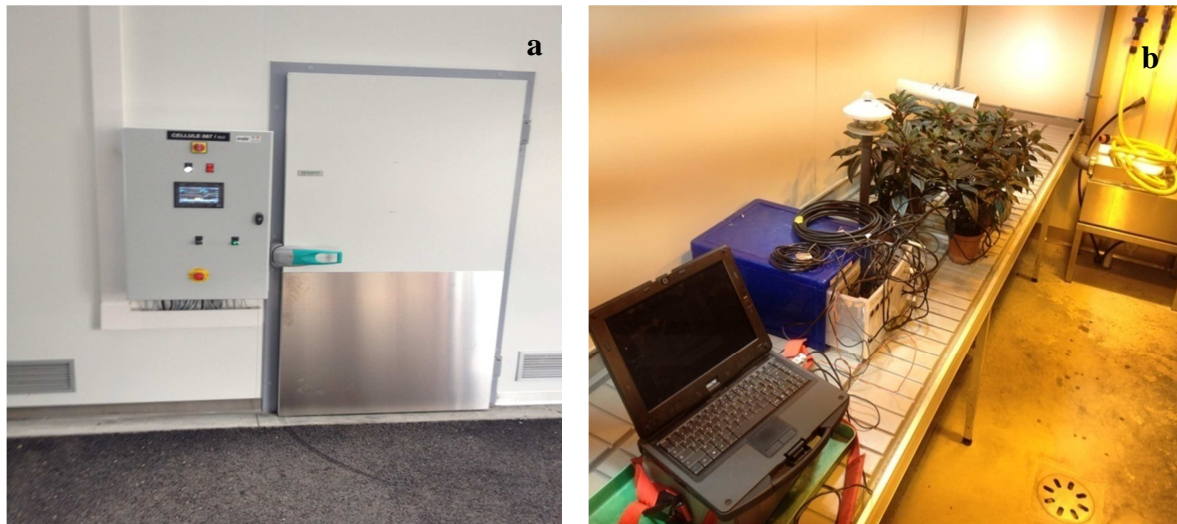


**Figure 35 : Plant d'Impatiens de Nouvelle Guinée après 12 semaines de plantation**  
(Source : Serre d'Agrocampus Ouest, 2014).

### 4.3 Première étape du projet : campagne de mesure 2014

#### 4.3.1 Chambre de culture et dispositifs expérimentaux

Une chambre de culture de l'INEM (INStallations Expérimentales Mutualisées, IRHS-Agrocampus Ouest, Angers) a été utilisée. Elle mesure  $10 \text{ m}^2$  (5x2m). L'automate de pilotage climatique se trouve à l'extérieur. Il offre la possibilité de pouvoir fixer des consignes pour différentes variables (température, humidité, rayonnement). Différents capteurs de température, humidité et rayonnement global ainsi qu'une centrale d'acquisition des données ont été placés à l'intérieur de la chambre de culture. Des mesures de résistance stomatique avec un poromètre ont également été effectuées afin d'établir une corrélation entre la résistance stomatique et les variables climatiques selon la méthode des plans d'expériences (Fig.36).



**Figure 36 : Vue de l'extérieur de la chambre climatique et automate de pilotage (a) vue de l'intérieur de la chambre climatique avec l'instrumentation utilisée (b) (Source : Bouhoun Ali, 2014).**

#### **4.3.1.1 Mise en œuvre de la méthode des plans d'expériences**

Un plan d'expérience à  $2^3$  scénarios avec un point au centre (cf. chapitre 3) a été adopté. Des plantes en confort hydrique ayant 16 semaines de croissances sous serre ont été utilisées, et 9 scénarios ont donc été testés dans la chambre de culture en fixant à chaque fois la consigne pour trois variables climatiques (rayonnement global, humidité relative, température). Pour chaque scénario, la réponse des plantes en termes de résistance stomatique a été mesurée par le poromètre. Une valeur maximale et minimale a été fixée pour chaque variable. Ces limites ont été établies en fonction des données enregistrées sous serre agricole et aussi des limites techniques de la chambre de culture. Ainsi le rayonnement  $\in [0-150] \text{ W m}^{-2}$ , l'humidité  $\in [55-75] \%$  et la température  $\in [15-26] \text{ }^\circ\text{C}$ . Ces scénarios ont permis de calibrer le modèle mathématique donné par l'Eq. 96 (cf. chapitre 3).

#### **4.3.1.2 Protocole de mesure de la résistance stomatique**

Les mesures de résistance stomatique ont été effectuées à l'aide d'un poromètre (AP4, Delta-T Device Ltd, Royaume-Uni) (Fig. 37a et 37b) dont la précision est de  $\pm 20 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$  pour  $R_s \in [20-50 \text{ s m}^{-1}]$  et  $\pm 10\%$  pour  $R_s \in [50-4000 \text{ s m}^{-1}]$ . Tout d'abord, un essai a été réalisé concernant la position à laquelle la mesure doit être prise sur la feuille. Des mesures ont été réalisées au milieu et sur les bords de la feuille. On a pu constater que la position de l'appareil de mesure avait une faible influence sur la

mesure, car les différences enregistrées pour les différentes positions étaient inférieures à l'erreur donnée par le constructeur pour le poromètre (cf. Annexe 3). Par précaution les mesures ont finalement été prises au milieu des feuilles.

Pour chaque scénario, cinq mesures sur cinq feuilles vertes, intactes, et bien développées, ont été réalisées sur les feuilles du haut de quatre plantes. Lors du passage d'un scénario à un autre, les plantes ont été laissées 1 heure sous les nouvelles conditions climatiques avant d'effectuer de nouvelles mesures de la résistance stomatique. Ce temps d'une heure permet d'assurer la stabilité de la réponse des stomates.



Figure 37 : Poromètre (a) et tête de mesure du poromètre (b) (source : Bouhoun Ali, 2014).

#### 4.3.2 Compartiment de serre horticole : dispositifs expérimentaux de première campagne de mesure 2014

Le compartiment de serre étudié est de type Venlo (Fig. 38a). Il s'agit d'une serre mono-chapelle en verre de 100 m<sup>2</sup>, située à Angers (Ouest de la France, 47° 28' Nord, 0° 33' Est et 39 m d'altitude). La serre est orientée quasiment suivant l'axe Nord-Sud si bien que le faîtage est sensiblement perpendiculaire à la course du soleil. La serre mesure 10 m de long, 10 m de largeur et fait 3.9 m de hauteur au niveau du chéneau et 5.9 m au niveau du faîtage. La couverture de la serre est en verre d'épaisseur 4mm. La serre est équipée de :

- Quatre tablettes (en aluminium) (Fig. 38b) installées au milieu du compartiment, situées à une hauteur de 80cm au-dessus du sol ; leur épaisseur est de 5mm et leur surface totale est de 18 m<sup>2</sup>. Des plantes sont disposées sur ces tablettes, le nombre de plantes sur ces tablettes a été réduit au fur à mesure que les plantes se développent avec le temps, l'objectif étant de garder la même densité du couvert végétal au long des 16 semaines de la campagne
- Au début de l'expérience il y avait 488 plantes sur les tablettes (i.e. une densité de 28 plantes par m<sup>2</sup> de la surface des tablettes), après 10 semaines de plantation le



nombre de plantes a été réduit à 366 plantes (i.e. une densité de 21 plantes par  $m^2$ ), ensuite le nombre des plantes a été encore réduit pour arriver à 264 plantes après 12 semaines de plantation (i.e. une densité de 15 plantes par  $m^2$ ), ce nombre de plantes a été ensuite conservé jusqu'à la fin de la campagne.

- Deux ouvrants en toiture qui, commandés par un automate, s'ouvrent ou se referment en fonction des conditions climatiques à l'extérieur de la serre (les ouvrants sont fermés pour des températures inférieures à  $20^{\circ}C$ , et/ou lorsqu'il pleut).
- Un écran d'ombrage d'épaisseur 0.2 mm est déployé sous la toiture.

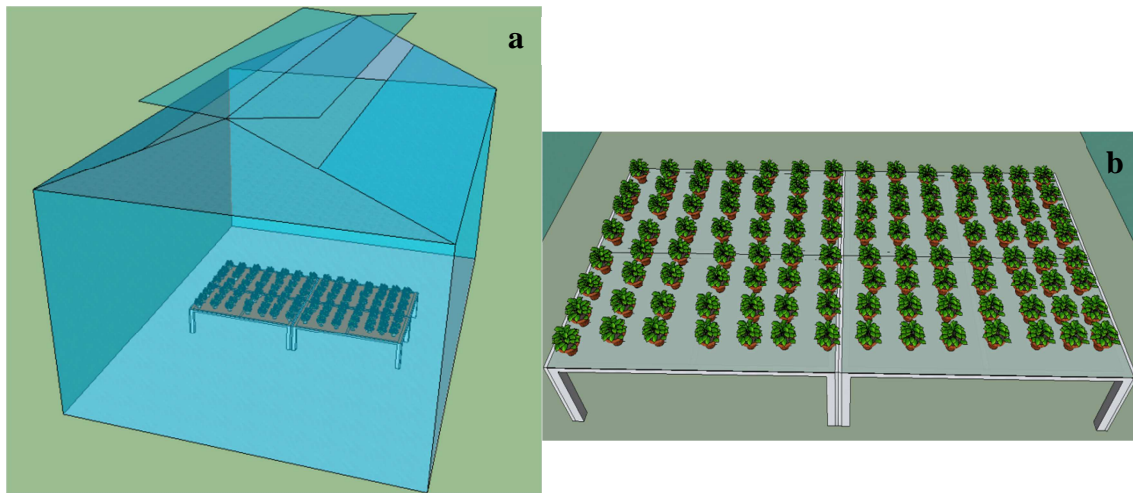


Figure 38 : Schéma d'ensemble de la serre (a), et disposition des plantes sur les tablettes (b)  
(source : Bouhoun Ali).

#### 4.3.2.1 Système et régime d'irrigation

L'irrigation s'est faite par subirrigation (cf. chapitre 2) avec une solution nutritive composée de  $9.6 \text{ mmol N-NO}_3 \text{ L}^{-1}$ ,  $1.8 \text{ mmol PO}_4^{3-} \text{ L}^{-1}$ ,  $6.1 \text{ mmol K L}^{-1}$ , et  $0.9 \text{ mmol M L}^{-1}$ . Deux régimes d'irrigation ont été mis en oeuvre : confort et restriction hydrique. Une tablette comporte des plantes en restriction hydrique tandis que les trois autres sont couvertes de plantes en confort hydrique. Pour la tablette avec les plantes en restriction hydrique, l'irrigation est arrêtée jusqu'à ce que les plantes présentent des signes de stress (i.e. enroulement des feuilles et flétrissement). Pour les trois tablettes avec des plantes en confort hydrique, au début de l'expérimentation, deux irrigations sont effectuées (00h, 6h). Vers la fin des campagnes de mesures, en semaine 14 après plantation, l'irrigation est effectuée trois fois par jour (00h, 6h et 14h). Vers la fin des campagnes, il faisait en

effet plus chaud avec des rayonnements solaires plus forts (i.e. les plantes transpirent plus, ce qui provoquent plus des pertes d'eau) et les plantes étaient à un stade plus développé, donc elles consommaient plus d'eau. L'expérience a duré 16 semaines (16 semaines à partir du jour de repotage des jeunes plants déjà âgés de 4 semaines). Les mesures ont commencé également à partir de la semaine 5 quand les plantes ont atteint un certain degré de maturité. Les semaines 5, 8, 10, 12, 14, et 16 après plantation il y avait une tablette en régime de restriction hydrique et les trois autres en confort, et pour le reste des semaines les quatre tablettes étaient en régime de confort hydrique.

### 4.3.2.2 Capteurs

Plusieurs capteurs ont été utilisés (Fig. 39) pour mesurer la distribution des différentes variables (température, humidité, rayonnement) et suivre leur évolution temporelle. Ils avaient pour objectif de quantifier avec précision les échanges d'eau et d'énergie dans la partie aérienne et racinaire. Les capteurs ont été utilisés pour mesurer les températures et humidités de l'air, le rayonnement, les températures de paroi, les températures de feuille, les températures et humidités du substrat. Les mesures de ces variables se sont focalisées sur deux tablettes munies de plantes : une tablette était en régime d'irrigation en restriction et une autre en confort. Deux balances ont été utilisées pour chaque régime d'irrigation (en confort et en restriction) afin de mesurer la transpiration des plantes. Un suivi particulier des plantes situées sur la tablette en restriction a été réalisé en mettant en place davantage de capteurs que sur la tablette en confort, ceci afin de mesurer les variables climatiques et celles relatives au substrat car elles varient très rapidement pour ce régime.

L'ensemble des capteurs utilisés lors des campagnes de mesure était relié à quatre centrales d'acquisition (CR7, CR1000, et CR5000, Campbell Scientific Ltd., France); (Delta-T Devices Ltd, Royaume-Uni). Les capteurs étaient interrogés par les centrales toutes les 3 secondes, puis les valeurs étaient moyennées sur 10 minutes avant d'être stockées.

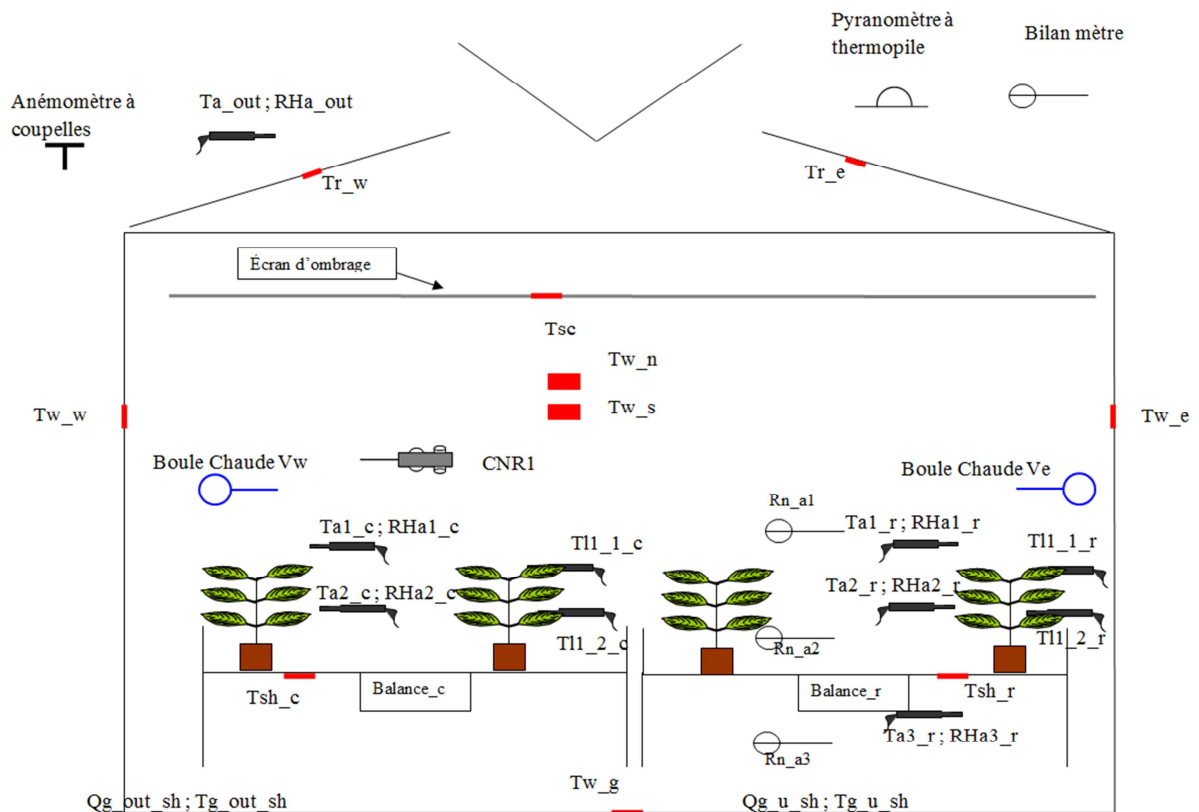


Figure 39: Schéma récapitulatif des capteurs utilisés à l'extérieur de la serre, dans la serre et dans la partie aérienne du couvert végétal pour la campagne de mesure 2014 (source : Bouhoun Ali).

a. Capteurs utilisés à l'extérieur de la serre, dans la serre et dans la partie aérienne du couvert végétal

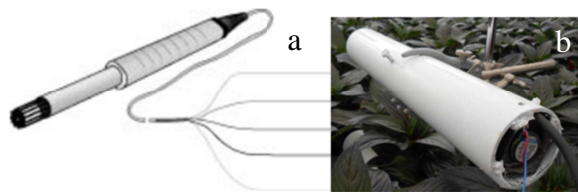
➤ Capteurs situés à l'extérieur

- 1 Bilanmètre (ou pyradiomètre) pour mesurer les rayonnements (courte longueur d'onde + grande longueur d'onde) provenant du dessous et de dessus. En complément, une mesure du rayonnement global (rayonnement incident de courte longueur d'onde) a été réalisée avec un pyranomètre (Fig. 40) à thermopile. A partir de ces mesures, les deux composantes du rayonnement incident (rayonnement grande et courte longueur d'onde) ont pu être déduites. Ces mesures sont utilisées comme données d'entrée pour la CFD.



**Figure 40 : Pyranomètre : capteur de rayonnement incident de courte longueur d'onde** (source : <http://www.kippzonen.fr/News/581/Principe-de-fonctionnement-d-un-pyranometre-a-thermopile>).

- 1 sonde HMP45 (Fig. 41a) pour mesurer l'humidité et la température de l'air à l'extérieur de la serre (Taout ; RHaout). Cette sonde est insérée dans un tube blanc et aérée avec un petit ventilateur (Fig. 41b). Le tube sert à limiter l'impact du rayonnement sur la sonde. Cette mesure est utilisée comme donnée d'entrée pour les simulations numériques.



**Figure 41 : Sonde Vaisala HMP45, illustration de la sonde (a) insérée dans le tubes blanc (b)** (Source : Agrocampus Ouest, 2014).

#### b. Capteurs situés à l'intérieur du compartiment

##### ➤ Caractérisation de la serre (hors végétal)

- 2 Boules chaudes (Fig. 42) pour mesurer la vitesse de l'air. Elles interviennent dans la validation des simulations numériques.



**Figure 42 : Capteurs de vitesse de l'air boule chaude** (Source : Agrocampus Ouest, 2014).

- 1 CNR1 (Fig. 43) sert à mesurer le rayonnement de courte et de grande longueur d'onde provenant du dessous et du dessus. Il permet aussi de déduire les rayonnements nets de courte et de grande longueur d'onde. Ce CNR1 est positionné à l'intérieur de la serre au-dessus de la végétation. Les mesures du

CNR1 sont utilisées comme données d'entrée pour la routine de transpiration du Fluent (modélisation de la résistance stomatique) et aussi d'entrée et de validation pour le modèle CFD.



**Figure 43 : Capteur de rayonnement (CNR1) courte et grande longueur d'onde** (Source : Agrocampus Ouest, 2014).

**N.B :** Dans le cas où en utilisant l'écran d'ombrage, le rayonnement global serait plus homogène au-dessous de ce dernier, un seul capteur de type CNR1 peut suffire. En revanche sans écran d'ombrage il faudrait utiliser plus des capteurs CNR1, au minimum 3 à cause du problème des ombres portées (ce problème avait été identifié dans la thèse de Morille, 2013) qui induit une forte hétérogénéité de la distribution du rayonnement. Dans ce cas, un seul capteur ne suffirait pas à suivre l'évolution temporelle du rayonnement global. En revanche, en combinant plusieurs CNR1, il devrait être possible d'avoir une meilleure appréhension de la distribution de l'évolution du rayonnement global et de son évolution.

- 2 Fluxmètres HFP01SC (Fig. 44) pour mesurer le flux de chaleur et la température au niveau de la surface du sol ( $Q_{g\_x\_x}$  ;  $T_{g\_x\_x}$ ). Les flux mesurés sont utilisés comme données d'entrée des simulations numériques.



**Figure 44 : Fluxmètre HFP01SC pour mesurer le flux de chaleur et de température du sol** (Source : Agrocampus Ouest, 2014).

- 7 sondes platine Pt100 (Fig. 45) pour mesurer les températures des parois de la serre ( $T_{w\_x}$ ). Une attention particulière a été portée à la mesure des températures

des parois de la toiture ( $Tr_w$ ,  $Tr_e$ ) qui sont fortement influencées par les pertes radiatives. Pour cela il a fallu améliorer la méthode de fixation de ces capteurs sur les parois intérieures de la toiture, et les isoler de l'influence du rayonnement pour diminuer les incertitudes (et erreurs) de mesure et résoudre les problèmes qui ont été rencontrés dans les campagnes/simulations précédentes. Ces mesures ont été utilisées comme données d'entrée et de validation pour les simulations numériques.



**Figure 45 : Sonde Pt100 pour mesurer les températures**

(Source : <https://www.meteocontrol.com/fr/industrial-line/capteurs/capteurs-de-temperature-de-module/>).

- 1 sonde platine Pt100 pour la température de l'écran d'ombrage ( $T_{sc}$ ). Cette mesure sert de donnée de validation pour Fluent.
- 5 sondes HMP45 d'humidité et de température de l'air à l'intérieur de la serre ( $T_{ax\_c}$  ;  $RH_{ax\_c}$ ,  $T_{ax\_r}$  ;  $RH_{ax\_r}$ ), sont utilisées pour fournir des données d'entrée et de validation pour la CFD.

**c. Capteurs utilisés au niveau du couvert végétal**

- 2 Balances ( $Balance\_c$ ,  $Balance\_r$ ) (Fig. 46). L'une est utilisée pour la tablette munie de plantes en confort hydrique et l'autre pour la tablette munie de plantes en restriction hydrique. Elles permettent de mesurer le flux de transpiration. Ces mesures sont utilisées pour valider le modèle CFD.



**Figure 46 : Balances pour mesurer la transpiration des plantes en confort et en restriction hydrique**  
(Source : Agrocampus Ouest, 2014).

- 3 Pyrromètres pour le rayonnement net ( $Rn_{a1}$ ,  $Rn_{a2}$ ,  $Rn_{a3}$ ) (Fig. 47). Le rayonnement net est mesuré à la fois au-dessus et en bas du végétal ( $Rn_{a3}$ ,  $Rn_{a2}$ ), la différence entre les deux mesures permet d'accéder au rayonnement absorbé par le couvert végétal. Cette différence est utilisée comme donnée de validation pour la CFD. Les capteurs ( $Rn_{a1}$ ,  $Rn_{a2}$ ) permettront aussi de déterminer le rayonnement absorbé par la tablette.



**Figure 47 : Pyrromètre pour mesurer le rayonnement net** (Source : Agrocampus Ouest, 2014).

- 2 sondes platine Pt100 pour la température des tablettes ( $Tsh_c$ ,  $Tsh_r$ ), qui fourniront des données de validation CFD.
- 12 thermocouples de feuille (Fig. 48) sont fixés sur 3 plantes en confort et 3 plantes en restriction hydrique (2 capteurs pour chaque plante en deux positions en haut du couvert végétal et dans le couvert végétal) ( $Tl1_{1_r}$ ,  $Tl1_{2_r}$ ,  $Tl2_{1_r}$ ,  $Tl2_{2_r}$ ,  $Tl3_{1_r}$ ,  $Tl3_{2_r}$ ,  $Tl1_{1_c}$ ,  $Tl1_{2_c}$ ,  $Tl2_{1_c}$ ,  $Tl2_{2_c}$ ,  $Tl3_{1_c}$ ,  $Tl3_{2_c}$ ). Ces mesures servent de données de validation pour la CFD.





**Figure 48 : Thermocouple fixé sur la feuille pour mesurer sa température**  
(Source : Agrocampus Ouest, 2014).

#### d. Capteurs utilisés pour caractériser le substrat

##### ➤ Objectifs

- Suivre l'évolution de l'humidité volumique et du potentiel matriciel de la tourbe.
- Établir les courbes de rétention en eau.

##### ➤ Instrumentation

Deux types de capteurs ont été utilisés : des sondes ECH2O (Fig. 49a) et des tensiomètres (Fig. 49b).



**Figure 49 : Illustration d'une sonde ECH<sub>2</sub>O (a) et d'un tensiomètre (b)** (Source : Agrocampus Ouest, 2014).

Les différents capteurs ont été installés sur les tablettes en confort et en restriction hydrique, avec un renforcement du nombre de capteurs pour la tablette en restriction hydrique (Tab. 4). Les tensiomètres et les sondes ECH<sub>2</sub>O ont été installés dans les pots à mi-hauteur.



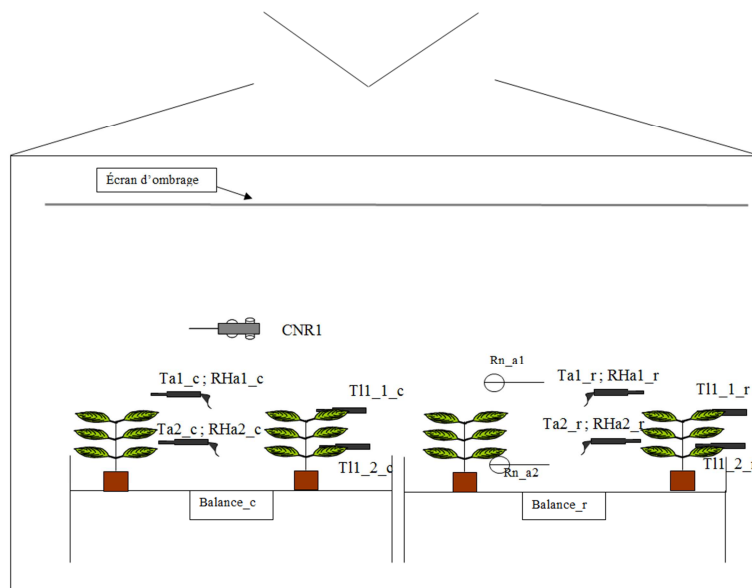
**Tableau 4 : Sondes utilisées pour la tourbe.**

Nom	Constructeur	Nombre des capteurs en stress	Nombre des capteurs En confort	Variable mesurée
Sonde ECH <sub>2</sub> O	Sols mesures	8	4	Teneur en eau volumique
Tensiomètres	SDEC	6	3	Potentiel matriciel

### 4.4 Deuxième étape du projet : campagne de mesure 2015

#### 4.4.1 Dispositifs expérimentaux

Cette campagne de mesure s’est déroulée dans la même serre que la campagne de mesure 2014. Le même dispositif a été conservé. Quatre tablettes ont été utilisées : trois en confort et une en restriction hydrique. L’écran d’ombrage était systématiquement déployé sous la toiture. En revanche, pour cette campagne, seuls les capteurs situés autour du couvert végétal et dans le substrat ont été utilisés (Fig. 50). La principale nouveauté pour cette campagne comparée à celle de 2014 portait sur les mesures du potentiel hydrique de feuille avec une chambre à pression.



**Figure 50 : Schéma récapitulatif des capteurs utilisés dans la partie aérienne du couvert végétal pour la campagne de mesure 2015 (source : Bouhoun Ali).**

#### 4.4.2 Protocole de mesure de la résistance stomatique

Pour les campagnes de mesure 2014 et 2015 dans la serre, des mesures de résistance stomatique ont été effectuées à l’aide d’un poromètre. Cinq répétitions sur cinq feuilles

différentes pour chaque niveau de couvert végétal (feuilles du haut et du milieu) ont été réalisées. Ces séries de mesures ont été répétées tout au long de la journée de 8h à 20h avec un pas de temps de 30 minutes pour des plantes en confort hydrique d'une part et en restriction hydrique d'autre part. Le même protocole de mesure a été adopté pour les deux campagnes en 2014 et 2015.

#### 4.4.3 Protocole de mesure de potentiel hydrique de feuille

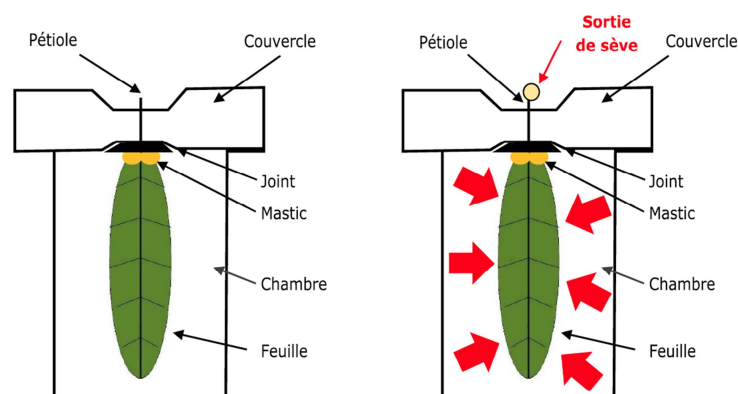
Des mesures du potentiel hydrique foliaire ont été effectuée pendant la campagne de mesure 2015 dans la serre, ces mesures ont été réalisées à l'aide d'une chambre à pression, ou chambre de Scholander (M 600, PMS Instrument Co, USA,  $\pm 1\%$ ) (Fig. 51)



**Figure 51 : Chambre à pression**

(Source : <http://www.pmsinstrument.com/products/?c=01-pressure-chamber-instruments>)

Le principe de fonctionnement consiste à mettre une feuille dans la chambre hermétique, puis à faire augmenter la pression dans la chambre, jusqu'à la sortie de la sève (Fig. 52). L'augmentation de la pression dans la chambre est réalisée en injectant un gaz inerte : le diazote. Lorsque la pression appliquée s'équilibre avec l'énergie de liaison entre l'eau et la feuille, de la sève s'exsude de la feuille au niveau de la section du pétiole observée. Cette pression exercée peut être directement lue sur le manomètre de l'appareil et correspond au signe près au potentiel hydrique de la feuille (Payan et Salançon, 2003).



**Figure 52 : Schéma du principe de fonctionnement de la chambre à pression: À gauche état initial ; à droite sortie de sève lors de la montée en pression (flèches rouges)** (Source : Agrocampus Ouest, 2015).

La mesure du potentiel hydrique foliaire a été effectuée uniquement lors des semaines de restriction hydrique et pour les deux régimes d'irrigation, afin de pouvoir comparer ces derniers. Pour chaque mesure deux plantes ont été choisies pour chaque régime d'irrigation et 6 feuilles par plantes (3 feuilles issues de la partie haute et 3 issues de la partie basse) ont été utilisées. Trois mesures par jour ont été faites le matin vers 10h00 puis vers 14h00 et une troisième mesure en fin d'après-midi vers 16h00.

#### 4.4.4 Incertitude de mesure des capteurs

Les écarts entre données expérimentales et résultats issus de la modélisation peuvent tenir à des erreurs de manipulation, au manque de précision des modèles mais aussi à des erreurs liées aux capteurs utilisés pour mesurer ces données expérimentales. La connaissance de l'incertitude de la mesure peut justifier en partie l'écart entre mesure et simulation. Les incertitudes des capteurs risquent d'augmenter avec le temps (problème de dérive). Pour cette raison une calibration périodique des capteurs a dû être entreprise. Les caractéristiques des différents capteurs et leurs incertitudes (données des constructeurs) sont présentés dans le Tab. 5.

**Tableau 5 : Tableau récapitulatif des caractéristiques des capteurs utilisés ainsi et incertitudes associées**

Capteur	Nombre de capteurs	Variable mesurée	Utilisation de la grandeur mesurée	Plage de mesure	Incertitude (+/-)	Nom du Constructeur/Distributeur
Anémomètre à coupelles	1	Vitesse de l'air extérieur	Donnée d'entrée	?	?	?
Balance	2	Flux d'évapotranspiration	Validation pour Fluent	0 à 16 kg	0.1 g	Melter-Toledo
Bilanmètre	1	Rayonnement incident et réfléchi : 2 voies distinctes	Donnée d'entrée pour Fluent	?	?	?
Boule chaude	2	Vitesse de l'air (v1, v2)	validation pour Fluent	0.01 à 1m s <sup>-1</sup>	0.03 m s <sup>-1</sup>	Campbell Scientific Ltd
CNR1	1	Rayonnement incident/réfléchi grande et courte longueur d'onde : 4 voies de sortie	Donnée d'entrée pour la routine de transpiration	305 to 2800 nm 5000 to 50,000 nm	<10% journalier	Kipp & Zonen, Cambell Scientific Ltd
Fluxmètre HFP01SC	2	Flux de chaleur à la surface du sol (Qg_x_x ; Tg_x_x)	Donnée d'entrée pour Fluent	-30° à +70°C	15%	Campbell Scientific Ltd
Pt100	11	Température des parois (Tw_x), de toiture (Tr_x), d'écran d'ombrage (Tsc), des tablettes (Tsh_s, Tsh_r), du substrat (Tsub_xx)	Validation et entrée pour Fluent	?	0.1°C	TC ONLINE
Pyrradiomètre NR-lite 2	3	Rayonnement net (Rn_ax)	Validation pour Fluent	200 to 100.000 nm	<5%	Kipp and Zonen

Pyranomètre à thermopile CES180	1	Rayonnement global à l'extérieur de la serre	Donnée d'entrée pour Fluent	300 à 3000 nm	1% de la mesure	Cimel
sondes ECH <sub>2</sub> O	12	Teneur en eau volumique	Calibration de la courbe de rétention	?	0.2% kPa	Sols mesures
			Donnée d'entrée pour la routine de transpiration			
Tensiomètre	9	Potentiel matriciel	Calibration de la courbe de rétention, validation pour Fluent	?	3% m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	SDEC
Thermocouple Cu-Cs	12	Température des feuilles (Tlx_xx)	Validation pour Fluent	?	0.1°C	?
Vaisala HMP45C	6	Température et humidité relative de l'air (Tax_x ; RHax_x) et (Ta_out ; RHa_out)	Validation pour Fluent	-39.2°C à 60°C ; 0.8% à 100%	0.2°C ; 2%	Campbell Scientific Ltd
Thermocouple Cu-Cs	12	Température des feuilles (Tlx_xx)	Validation pour Fluent	?	0.1°C	?
Vaisala HMP45C	6	Température ; humidité relative de l'air (Tax_x ; RHax_x) ; (Ta_out ; RHa_out)	Validation pour Fluent	-39.2°C à 60°C 0.8% à 100%	0.2°C 2%	Campbell Scientific Ltd

### 4.5 Troisième étape du projet : outils numériques de simulation

#### 4.5.1 Code CFD : ANSYS Fluent

Le logiciel ANSYS Fluent permet de résoudre numériquement les problèmes de la mécanique des fluides (i.e CFD Computational Fluid Dynamics) par la méthode des volumes finis (cf chapitre 3). Ce logiciel permet aussi de tester des géométries et des maillages en 2D et 3D. Il est basé sur la résolution des équations de transport (i.e. les équations de Navier Stokes) et de l'équation de transfert radiatif (cf chapitre 3) pour chaque maille. Il a été déjà utilisé assez largement dans le passé pour résoudre beaucoup de problèmes concernant la simulation du climat sous serre (e.g. Boulard et al., 2008; Chen et al., 2015; Kichah et al., 2012; Zhang et al., 2016). Ce logiciel est en partie ouvert, ce qui permet d'intégrer des mécanismes spécifiques via ce que l'on appelle une UDF (User Defined Function). Dans notre étude ce logiciel a été utilisé pour modéliser les transferts d'eau et d'énergie dans le continuum substrat-plante-atmosphère pour des plantes en confort et en restriction hydrique. Des simulations ont été réalisées pour la semaine 12 après plantation correspondant à la campagne de mesure 2014 dans la serre, et plus spécialement pour la journée s'étendant de 23h le 17/06 à 22h le 18/06.

#### 4.5.2 Introduction d'une routine spécifique : UDF (User Defined Function)

Une UDF (i.e routine) est un ensemble de fonctions développées par l'utilisateur pour rajouter des phénomènes ou changer des caractéristiques d'un milieu. Cette routine est intégrée au solveur ANSYS Fluent. Les UDFs sont écrites en langage de programmation informatique C++ avec des macros spécifiques au logiciel ANSYS Fluent.

Dans notre cas, l'interaction du couvert végétal avec le climat sous serre et les transferts hydriques dans le continuum substrat-plante ne sont pas intégrés par défaut dans le logiciel ANSYS Fluent. Une routine spécifique a donc été développée (Fig. 53) pour intégrer ces phénomènes dans le logiciel ANSYS Fluent, le code de la routine a été détaillé dans l'Annexe 11.

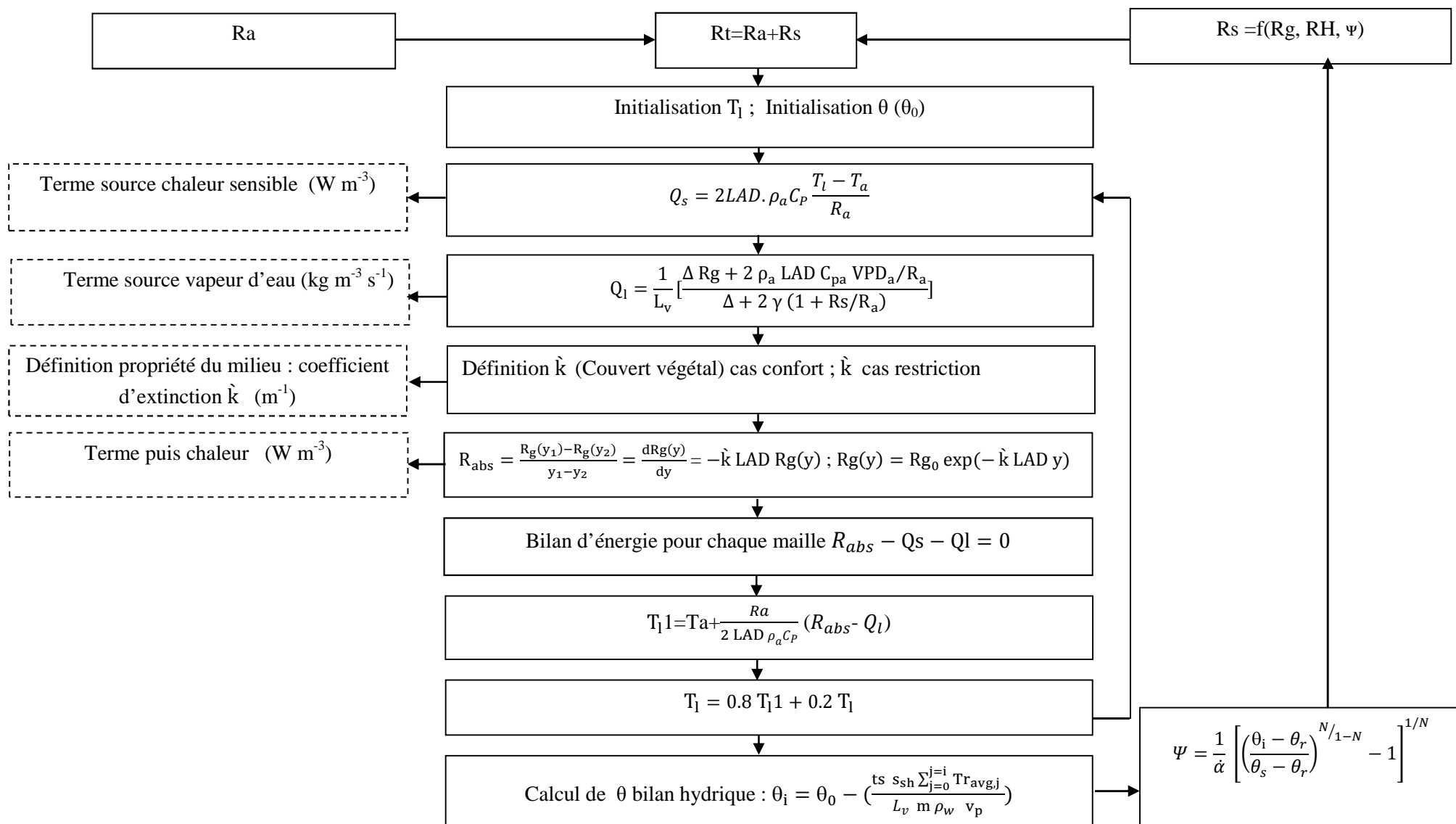


Figure 53 : Routine spécifique au bilan énergétique sur le couvert végétal ; bilan hydrique substrat-plante : les encadrés en ligne discontinue représentent les communications entre la routine et le code Fluent (source : Bouhoun Ali).

L'organigramme (Fig. 53) résume l'algorithme de la routine utilisée, les détails des équations utilisées dans cette routine ont été fournis dans le chapitre 3.

La routine contient deux parties : la première partie concerne l'expression de l'interaction plante-climat et la seconde porte sur l'interaction substrat-plante (avec en plus des interactions entre les deux parties).

Pour résumer le fonctionnement de cette routine, on commence d'abord par définir toutes les constantes ( $\rho_a, \rho_w, LAD, L_v \dots$ ), on définit aussi la résistance aérodynamique et la résistance stomatique calculée avec le modèle des plans d'expériences Eq. 105 (cf. chapitre 3). Pour prendre en considération l'effet d'une restriction hydrique sur les plantes, une fonction (multiplicative) de stress qui dépend du potentiel hydrique du sol est intégrée au modèle des plans d'expériences (Eq. 104) (cf. chapitre 3). Ensuite, la température des feuilles et la teneur en eau sont initialisées. En fonction de la température des feuilles, la chaleur sensible ( $Q_s$ ) est déduite. La routine calcule aussi la transpiration des plantes ( $Q_l$ ) avec le modèle de Penman Monteith. Afin de déduire la nouvelle température des feuilles, un bilan d'énergie est effectué sur les mailles entre le rayonnement absorbé et les chaleurs sensible et latente. La nouvelle température des feuilles sert à recalculer la nouvelle chaleur sensible. Le végétal étant perçu par le logiciel Fluent comme un milieu transparent au rayonnement (i.e. franchi par le rayonnement), il faut donc prendre la précaution de retrancher le rayonnement absorbé par les plantes au volume de végétal, ce qui a été réalisé par l'ajout d'une autre routine spécifique.

Enfin, un bilan hydrique est effectué dans le continuum substrat-plante entre la teneur en eau initiale du substrat et la transpiration des plantes. À partir de ce bilan, la teneur en eau moyenne du pot est déduite à chaque pas de temps (Eq. 75). Une fois la teneur en eau connue à chaque pas de temps, la fonction de Van Genuchten (cf. chapitre 3) est utilisée pour déduire le potentiel hydrique du substrat qui est ensuite utilisé dans la fonction de stress (Eq. 104) (cf. chapitre 3). Ce potentiel hydrique est finalement intégré dans le modèle de la résistance stomatique. La résistance stomatique représente le cœur de cette routine. C'est pour cette raison qu'une attention particulière a été portée à cette quantité dans notre étude. La communication entre la routine et le solveur Fluent est



opérée via les termes sources ou bien les propriétés du milieu. Les communications entre la routine et le solveur Fluent sont figurées par des cadres en ligne discontinue sur la Fig. 53 (i.e. terme source de chaleur sensible, terme source de vapeur d'eau dû à la transpiration, terme puits de chaleur pour le rayonnement absorbé par les plantes, définition des propriétés du couvert végétal coefficient d'extinction ( $k$ ) pour les cas de confort et de restriction hydrique).



### Chapitre 5. Résultats et discussion

L'organigramme de la Figure 53 synthétise les différentes étapes de cette partie. Dans un premier temps les variables climatiques et les mesures de  $R_s$  enregistrées dans une chambre de culture et sous serre ont été analysées et utilisées pour paramétrer et valider les modèles de résistance stomatique obtenus par les différentes méthodes présentées dans le chapitre 4 en confort et en restriction hydrique. La validation des modèles de  $R_s$  a aussi été réalisée via une validation des modèles de transpiration (qui dépend non seulement de la résistance stomatique mais aussi des variables climatiques) sur la base de mesures de transpiration (cette partie est complétée par un article publié dans le journal *Biosystems Engineering*, il est présenté à la fin de ce chapitre, article 1 : Bouhoun Ali et al., 2016a). Après avoir comparé les performances des différents modèles de  $R_s$  et identifié le meilleur d'entre eux, la dernière étape porte sur l'intégration du modèle de  $R_s$  dans le modèle de climat distribué (CFD, ANSYS Fluent 15) pour modéliser le climat sous serre en confort et en restriction hydrique. Les simulations sont d'abord entreprises pour un petit domaine autour du couvert végétal afin de vérifier que la routine intégrée au solveur Fluent fonctionne bien et que l'impact du couvert végétal est correctement pris en compte (cette partie portant sur les simulations pour le domaine limité a fait l'objet d'un article actuellement soumis au journal *Computers and Electronics in Agriculture*, les détails des résultats de cette partie sont présentés dans le manuscrit de cet article qui est joint à la fin de ce chapitre, article 2 : Bouhoun Ali et al., 2016b). Dans un second temps, les simulations avec ANSYS Fluent sont menées sur l'ensemble du domaine que constitue la serre.

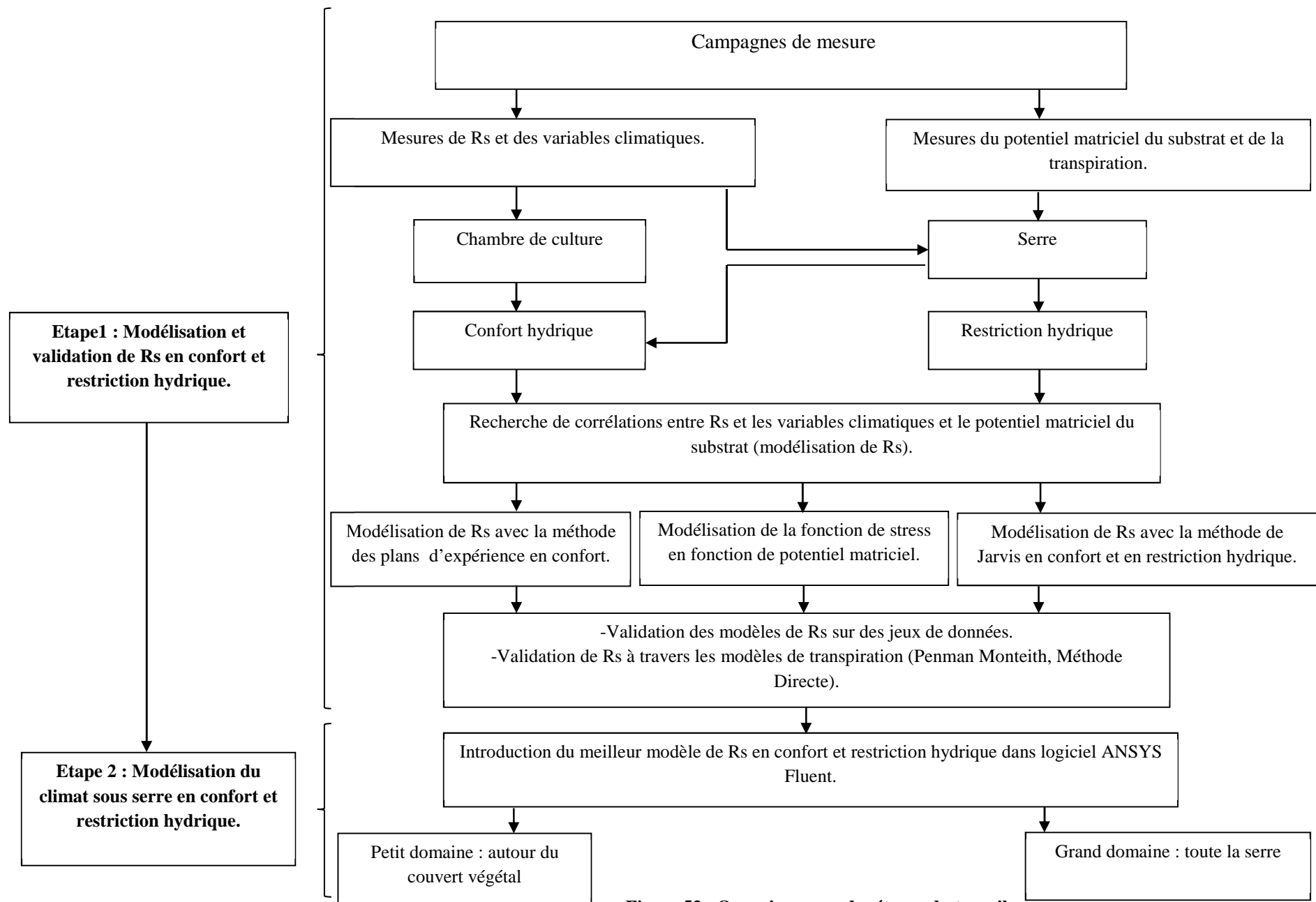


Figure 53 : Organigramme des étapes du travail.

### 5.1 Première étape : Modélisation et validation de la résistance stomatique en confort et en restriction hydrique

#### 5.1.1 Modélisation de la résistance stomatique en confort

Cette partie porte sur l'analyse des données enregistrées dans la chambre de culture et sous serre agricole. Ces données sont utilisées pour calibrer et valider les différents modèles de résistance stomatique  $R_s$  en confort hydrique. Les données enregistrées dans la chambre de culture sont utilisées pour calibrer le modèle de  $R_s$  établi par la méthode des plans d'expériences. Les données recueillies sous serre agricole sont quant à elles utilisées pour calibrer le modèle multiplicatif de Jarvis de  $R_s$ . D'autres jeux de données acquis sous serre sont enfin utilisés pour valider les deux modèles de  $R_s$ .

##### 5.1.1.1 Résultats expérimentaux en chambre de culture

Le Tab. 6 résume les résultats des 9 scénarios utilisés pour calibrer le modèle de la résistance stomatique issu de la méthode des plans d'expérience avec l'utilisation d'un plan factoriel complet  $2^3$  avec en plus un point au centre.

**Tableau 6 : Scénarios considérés pour mettre en œuvre le plan factoriel complet**

Scénario ( $R_g$ , $RHa1$ , $Ta1$ )	$R_s$ moyenne mesurée ( $s\ m^{-1}$ )	Écart type standard ( $s\ m^{-1}$ ) (n = 5 répétitions)
$150\ W\ m^{-2}$ , 55%, 15°C	267	36
$150\ W\ m^{-2}$ , 55%, 26°C	91	10
$150\ W\ m^{-2}$ , 75%, 15°C	254	31
$150\ W\ m^{-2}$ , 75%, 26°C	102	38
$45\ W\ m^{-2}$ , 60%, 22°C	265	18
$0\ W\ m^{-2}$ , 55%, 15°C	1434	315
$0\ W\ m^{-2}$ , 55%, 26°C	1410	381
$0\ W\ m^{-2}$ , 75%, 15°C	848	33
$0\ W\ m^{-2}$ , 75%, 26°C	885	189

Le Tab. 6 montre bien qu'une variation d'une des variables climatiques (rayonnement, température ou humidité) provoque une variation de  $R_s$  mesurée par le poromètre. Si l'on compare les scénarios ( $150\ W\ m^{-2}$ , 55%, 26°C) avec  $R_s = 91\ s.m^{-1}$  et

( $0 \text{ W m}^{-2}$ , 55%,  $26^\circ\text{C}$ ) avec  $R_s = 1410 \text{ s.m}^{-1}$  on observe que le rayonnement global est la variable climatique la plus influente sur  $R_s$ .

### 5.1.1.2 Calibration du modèle polynomial en confort

Le modèle polynomial issu du plan factoriel complet  $2^3$  (Eq. 102 cf. chapitre 3) a été calibré à partir des 9 scénarios mis en œuvre dans la chambre de culture (Tab. 6). Les différents paramètres du modèle sont obtenus par inversion matricielle (Bouhoun Ali et al., 2016). Le modèle après calibration s'écrit Eq. 136:

$$R_s = -115 R_G - 139 R_H - 39 T + 139 R_G R_H + 43 R_G T + 11 R_H T + 661 R_G^2 - 368 R_G^3 \quad (136)$$

Avec :  $R_G = (R_g - 75)/75$ ;  $R_H = (RH_a1 - 65)/10$ ;  $T = (Ta1 - 20.5)/5.5$  ;  $R_G$ ,  $R_H$ , et  $T$  sont les variables codées ;  $R_g$ ,  $RHa1$ , et  $Ta1$  sont les variables naturelles (i.e. grandeurs mesurées).

Les différentes variables de ce modèle sont des variables codées (cf. chapitre 3). L'utilisation des variables codées permet de repérer plus facilement les variables et les interactions les plus influentes sur le modèle de  $R_s$ , par comparaison des coefficients du modèle. Il apparaît clairement que le rayonnement est la variable prédominante dans le modèle de  $R_s$  avec les plus forts coefficients. L'humidité est le second paramètre qui influence le plus la résistance stomatique. Damour et al. (2010) pour différents types de plantes et Baille et al., (1994b) pour différentes espèces de plantes dont l'Impatiens, ont du reste tiré les mêmes conclusions que notre étude. La température se révèle être la variable la moins influente, ce qui est conforme aux conclusions des travaux de Misson et al., (2004).. Le modèle montre que l'interaction  $R_G R_H$  est la plus significative tandis que l'interaction  $R_H T$  est la moins significative. L'étude statistique de significativité des différentes variables et interactions entre ces variables avec un seuil de significativité pour la valeur-p de 5% (cf. article 1 : Bouhoun Ali et al. 2016) montre aussi que la variable température  $T$ , ainsi que les interactions  $R_G T$  et  $R_H T$  dans le modèle (Eq. 136) peuvent être négligées. Ce test confirme que la variable  $R_G$  (rayonnement) joue un rôle prépondérant, l'humidité relative  $R_H$  intervenant en second lieu.

### 5.1.1.3 Résultats expérimentaux sous serre et calibration du modèle de Jarvis

Cette partie présente les résultats de la campagne de mesures 2014 menée sous serre, qui ont servi à calibrer le modèle de Rs avec la méthode de Jarvis et à valider les deux modèles de Rs (Plans d'expériences, Jarvis). Après plusieurs essais de calibration du modèle de Jarvis, il est apparu que pour obtenir une bonne robustesse de ce modèle, il fallait le calibrer avec des données acquises sur au moins 3 semaines (cf. Annexe 4). Les mesures de Rs ont été réalisées durant 6 semaines différentes au cours du cycle de culture de l'Impatiens (semaine 5, 10, 11, 12, 14, 16 après la plantation). Quatre semaines (semaine 10, 11, 14, 16) ont finalement été utilisées pour la calibration. Les données des différentes variables climatiques (Rg : rayonnement global, RHa1 : humidité relative, Ta1 : température) mesurées au-dessus du couvert végétal sont présentées sur les Fig. 54 à 57.

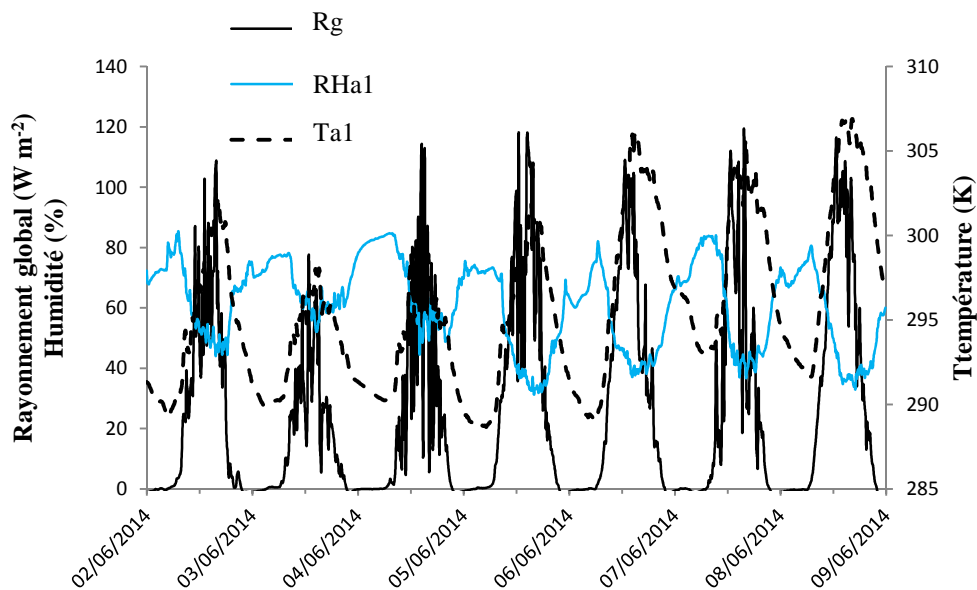


Figure 54: Variation temporelle des variables climatiques (Rg, RHa1, Ta1) 10 semaines après plantation.

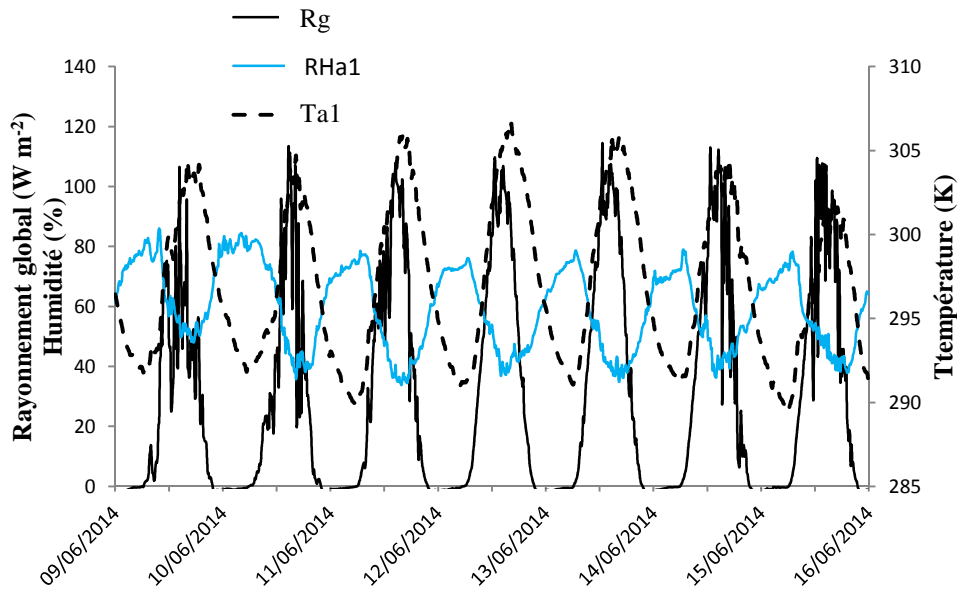


Figure 55 : Variation temporelle des variables climatiques (Rg, RHa1, Ta1) 11 semaines après plantation.

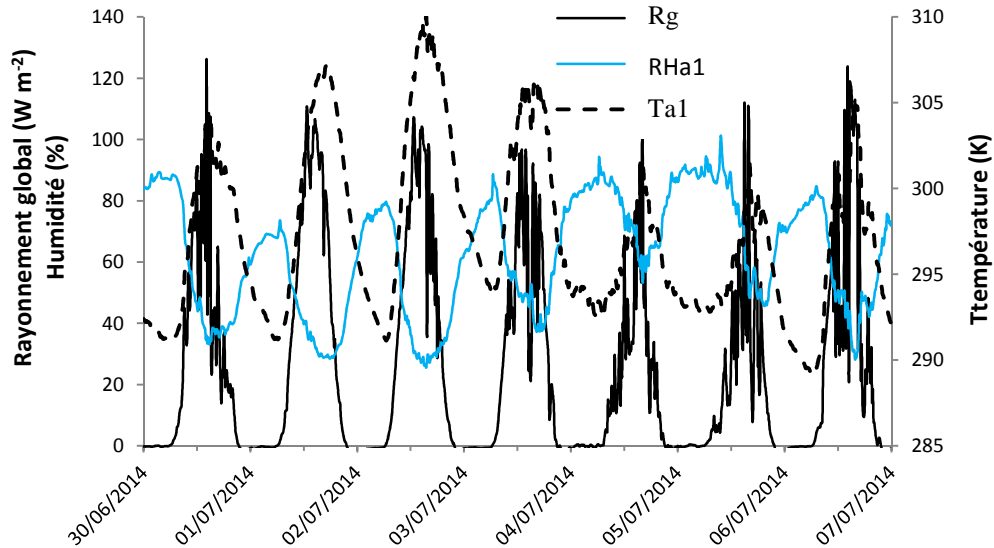


Figure 56 : Variation temporelle des variables climatiques (Rg, RHa1, Ta1) 14 semaines après plantation.



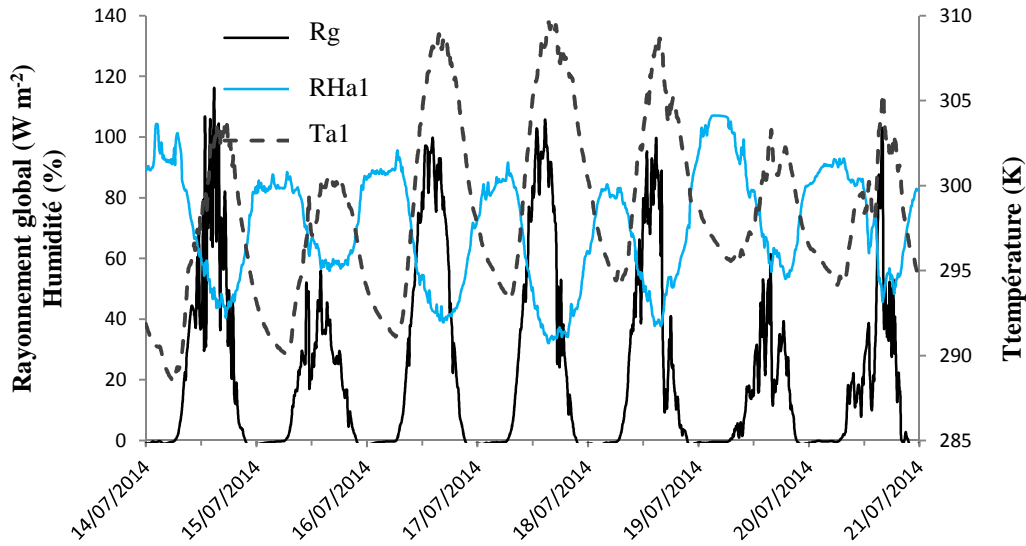


Figure 57: Variation temporelle des variables climatiques (Rg, RHa1, Ta1) 16 semaines après plantation.

Les variables climatiques Rg, RHa1, et Ta1 mesurées au-dessus du couvert végétal dans la serre varient d'une semaine à une autre (Fig. 54 à 57) en raison de conditions météorologiques contrastées à l'extérieur de la serre. On constate durant la semaine 16 que pour la nuit du 20/07/2014, l'humidité dépasse les 100 %. Cette anomalie peut être expliquée par la formation de gouttes d'eau par condensation sur le capteur ou par un dysfonctionnement de capteur. Ces mesures aberrantes de RHa1 pour la semaine 16 seront donc exclues de la procédure de calibration du modèle de Jarvis.

En procédant à une régression linéaire multiple (logiciel Matlab), la calibration du modèle de Jarvis (cf chapitre 3 : Eq. 94, 95, 97) avec les données des 4 semaines mentionnées précédemment conduit à l'Eq. 137 avec  $r^2=0.82$  et  $RMSE=200 \text{ s m}^{-1}$  :

$$R_s = 42 \left( \frac{R_g + 148.9}{R_g + 11.71} \right) \left( 1 + 0.47 \exp \left( 0.64 (VPDa - 1.84) \right) \right) \quad (137)$$

Les paramètres obtenus ici (Eq. 137) concernent uniquement les feuilles du haut (i.e. les feuilles exposées au rayonnement qui arrive sous l'écran d'ombrage) pour lesquelles de nombreuses données de résistance stomatique avaient été acquises. Dans l'Eq. 137 la variable de déficit de pression de vapeur air-air (VPDa) est donnée en fonction de la température (Ta1) et de l'humidité relative (RHa1) (cf. chapitre 3 : Eq. 88).

**N.B :** Deux formes de la fonction multiplicative pour VPDa i.e. loi puissance ou loi exponentielle (cf. chapitre 3 : Eq. 96, Eq. 97) ont été testées dans le modèle de Jarvis. Ces deux fonctions ont présenté des performances similaires, il est cependant apparu que la fonction exponentielle demandait plus de données pour être calibrée est pour parvenir à une précision équivalente à celle obtenue avec la fonction puissance (cf. annexes 4, 5). Dans la suite de notre étude la fonction exponentielle a été utilisée dans le modèle de Jarvis (Eq. 137).

### 5.1.2 Validation des modèles de résistance stomatique en confort

Dans un premier temps la validation des modèles de résistance stomatique a été effectuée avec les mesures de la semaine 12 pour laquelle nous disposions de données de bonne qualité (i.e. peu de passages nuageux ont perturbé les mesures du rayonnement) (Fig. 58). Pour cela, la comparaison entre les  $R_s$  mesurées et calculées par les deux modèles a été engagée. Ensuite une deuxième validation de ces modèles de  $R_s$  a été menée en mettant en œuvre des modèles de transpiration : modèle de Penman Monteith (PM) et Méthode directe (DM) (cf. chapitre 3) et en évaluant la performance de ces modèles sur la base des données de transpirations disponibles. Ces étapes de validations ont été réalisées pour les deux régimes d'irrigation : en confort et en restriction hydrique.

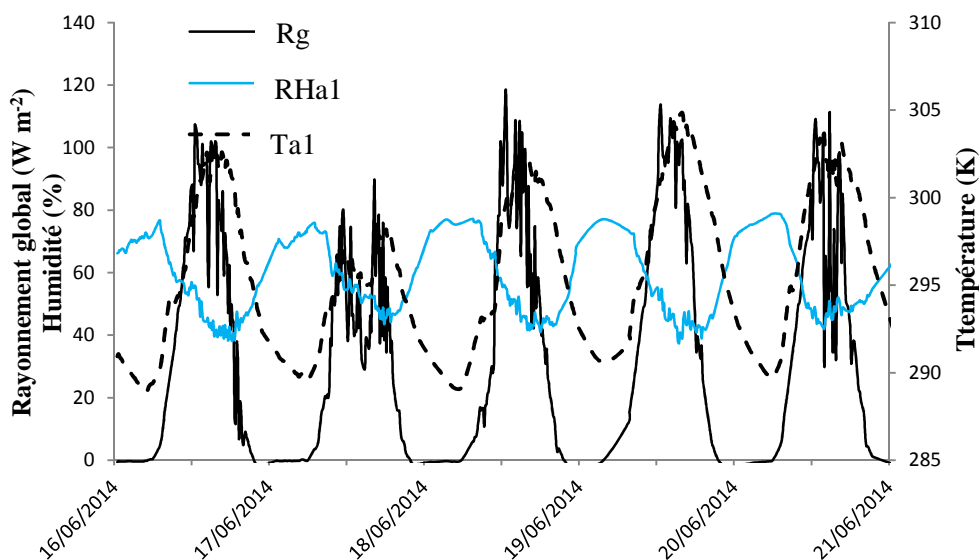
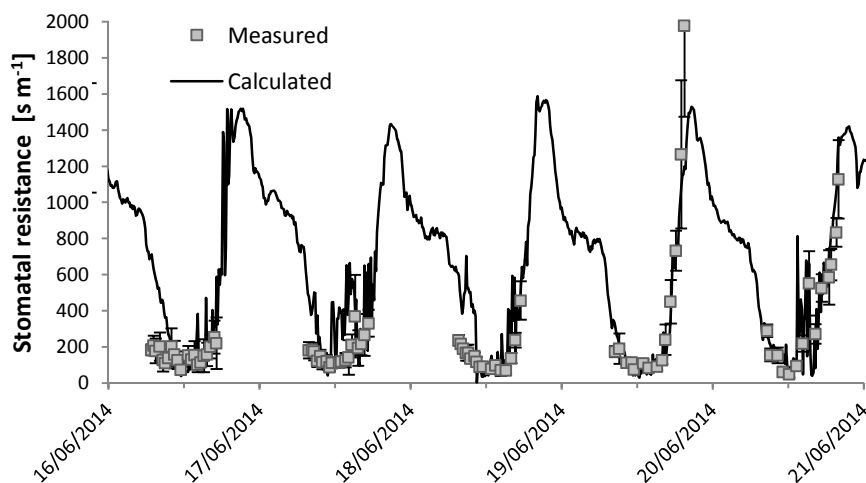


Figure 58: Variation temporelle des variables climatiques ( $R_g$ ,  $RHa1$ ,  $Ta1$ ) 12 semaines après plantation.

### 5.1.2.1 Modèle polynomial issu des plans d'expériences

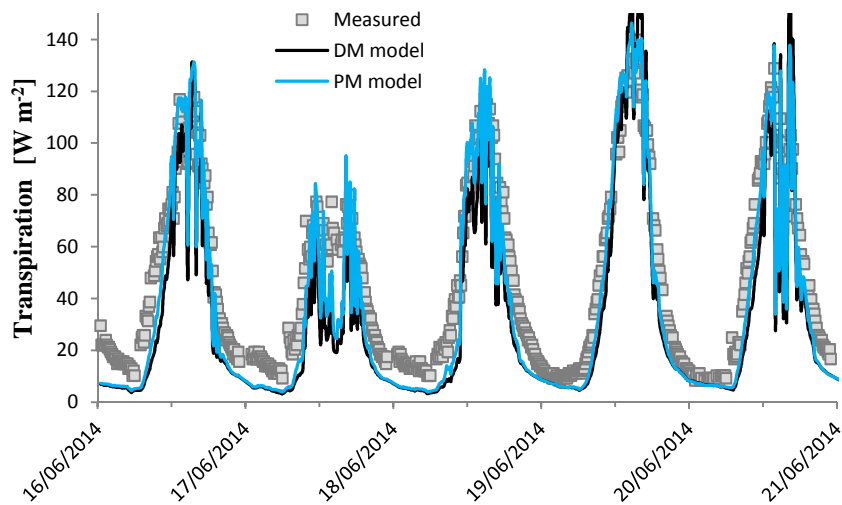
Le modèle polynomial des plans d'expériences (Eq. 136) donne des résultats satisfaisants avec  $r^2=0.58$  et  $RMSE=219 \text{ s m}^{-1}$  (Fig. 59) :



**Figure 59 : Validation du modèle polynomial de  $R_s$ , 12 semaines après plantation.**

La modélisation de la transpiration (PM Eq. 87, DM Eq. 92) utilisant l'expression de la résistance stomatique issue du modèle polynomial est présentée sur la Fig. 60 :

**NB :** La résistance aérodynamique utilisée dans les modèles de transpiration est calculée par l'Eq.112 fournie dans le chapitre 3. Baille et al. (1994a) considèrent que la résistance aérodynamique dans la serre ne varie pas beaucoup à cause des faibles vitesses de l'air. Pour une température moyenne de l'air dans le couvert végétal de 298 K au cours de la journée, on retrouve une valeur moyenne de  $R_a$  de  $271 \text{ s m}^{-1}$ . C'est cette valeur qui a été utilisée dans notre étude.



**Figure 60: Validation des modèles de la transpiration qui utilisent le modèle polynomial de  $R_s$ , 12 semaines après plantation.**

Afin d'appréhender la qualité de l'estimation de la transpiration (Fig. 60), deux critères ont été utilisés : le coefficient de corrélation  $r^2$  et l'erreur relative sur le cumul de la transpiration pendant 5 jours. Ces deux critères donnent un petit avantage au modèle de PM avec  $r^2=0.88$  et une erreur relative sur le cumul =19.80 %, même si le modèle DM reste satisfaisant ( $r^2=0.82$  et erreur relative sur le cumul =29.70 %).

### 5.1.2.2 Modèle de Jarvis

La validation du modèle de Jarvis est présentée sur la Fig. 61. Les résultats montrent que le modèle ne restitue pas très bien les valeurs de  $R_s$  mesurées les plus élevées. Ceci étant, du fait que les valeurs élevées de  $R_s$  correspondent à une transpiration très faible, ceci n'aura qu'un impact très faible sur l'estimation de la transpiration. Les résultats obtenus avec le modèle de Jarvis restent acceptables avec  $r^2=0.64$  et  $RMSE=242.33 \text{ sm}^{-1}$ .

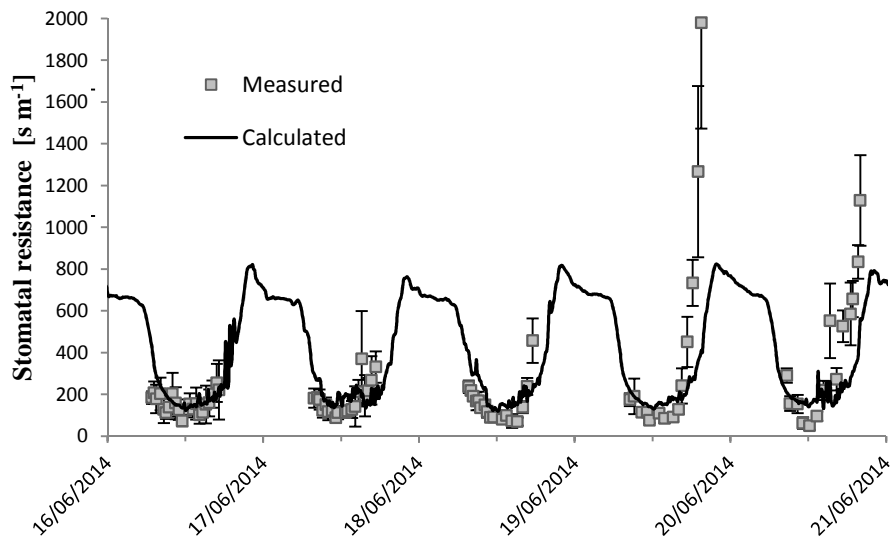


Figure 61 : Validation du modèle de Jarvis, 12 semaines après plantation.

Les résultats de la validation des modèles de la transpiration (Fig. 62) montrent effectivement que les erreurs sur les  $R_s$  élevées ne se propagent pas aux modèles de la transpiration.

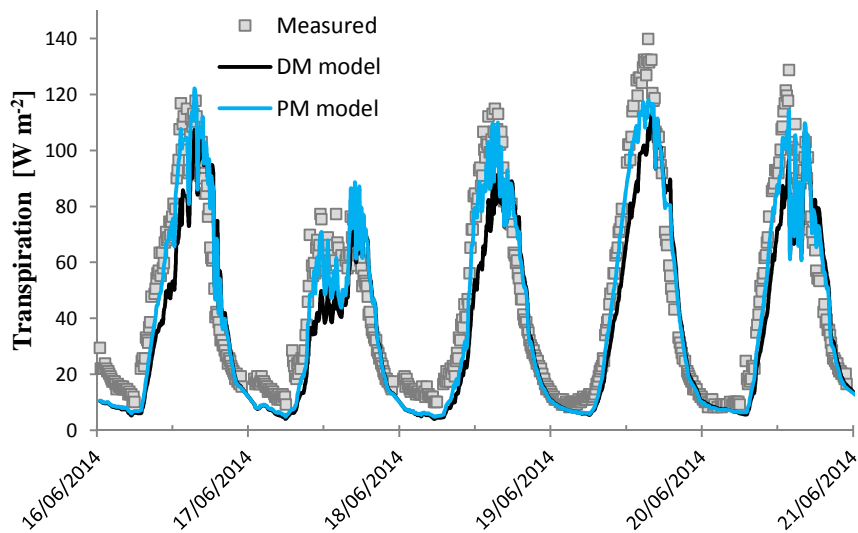


Figure 62 : Validation des modèles de transpiration qui utilisent le modèle de  $R_s$  Jarvis semaine 12

Les résultats présentés sur la Fig. 62 mettent en évidence la bonne performance des modèles PM et DM en termes d'estimation de la transpiration (pour DM  $r^2=0.82$  et erreur

relative sur le cumul =17.00 % et pour PM  $r^2=0.92$  et erreur relative sur le cumul = 7.40 %), avec un petit avantage cependant pour le modèle PM.

### 5.1.3 Modélisation de la résistance stomatique en restriction hydrique

Cette partie présente l'étape de calibration et de validation de la fonction de stress hydrique incluse dans le modèle de résistance stomatique pour les cas de restriction hydrique. La fonction de stress (cf. chapitre 3 : Eq. 104) apparait en effet comme une fonction multiplicative des modèles de résistance stomatique établis en confort hydrique (polynomial et Jarvis) afin d'obtenir in fine des modèle de Rs en restriction hydrique. Les données acquises sous serre en régime de restriction hydrique ont été utilisées pour calibrer et valider les deux modèles de Rs (modèle polynomial et modèle de Jarvis). Enfin les modèles de Rs obtenus en restriction hydrique ont été utilisés pour prédire la transpiration.

#### 5.1.3.1 Résultats expérimentaux sous serre en restriction hydrique et calibration de la fonction de stress et de la courbe de rétention en eau du substrat

Afin de calibrer la fonction de stress (cf. chapitre 3, Eq. 104), les données de potentiel hydrique du substrat et de Rs des semaines 10, 11, 14, 16 ont été utilisées. Les données correspondantes sont présentées sur la Fig. 63.

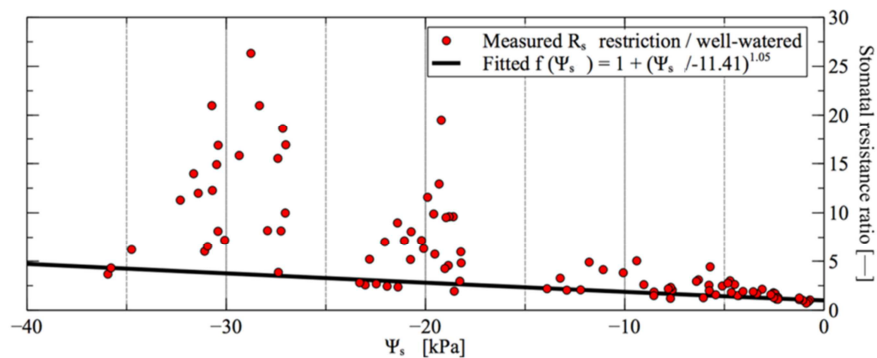


Figure 63 : Calibration de la fonction stress

Sachant que la fonction stress est égale au rapport de Rs en restriction hydrique et de Rs en confort hydrique, la fonction de stress après calibration s'écrit (Eq. 138).

$$(R_s \text{ restriction hydrique} / R_s \text{ confort}) = \left( 1 + \left( \frac{\Psi_s}{-11.41} \right)^{1.05} \right) \quad (138)$$

Les résultats de la calibration de la fonction de stress donnent un  $r^2=0.47$ . Cette faible valeur de  $r^2$  est due aux mesures de nuit lorsque  $R_s$  est élevée (rapports de  $R_s$  en restriction et en confort supérieurs à 10) (Fig. 63).

N.B : la campagne de mesure 2015 sous serre avait pour objectif d'améliorer la fonction de stress. L'idée était de remplacer le potentiel matriciel du substrat par le potentiel de feuille dans la fonction de stress, ce qui semblait plus cohérent, le potentiel de feuille étant une variable directement liée au fonctionnement stomatique des feuilles. Les résultats obtenus n'ont cependant pas été très concluants, puisque la variation de  $R_s$  n'a pas pu être corrélée à celle du potentiel de feuille mesuré par la chambre à pression. Ceci tient peut-être à des erreurs ou incertitudes associées aux mesures de potentiel de feuille. Des campagnes complémentaires devront être menées pour clarifier ce point.

Pour obtenir les modèles de  $R_s$  en restriction hydrique, il suffit donc de multiplier la fonction de stress (Eq. 138) établie précédemment par les modèles de  $R_s$  en confort : i.e. le modèle polynomial issu des plans d'expériences (Eq. 136) ou le modèle de Jarvis (Eq. 137). Les modèles correspondants en restriction hydrique s'écrivent alors respectivement pour  $R_s$  polynomial et  $R_s$  Jarvis (Eq. 139 et Eq. 140) :

$$R_s = (-115RG - 139RH - 39T + 139RG.RH + 43RG.Tr + 11RH.T + 661RG^2 - 368RG^3) \left( 1 + \left( \frac{\Psi_s}{-11.41} \right)^{1.05} \right) \quad (139)$$

$$R_s = 42 \left( \frac{rg+148.9}{rg+11.71} \right) \left( 1 + 0.47 \exp \left( 0.64 (VPDa - 1.84) \right) \right) \left( 1 + \left( \frac{\Psi_s}{-11.41} \right)^{1.05} \right) \quad (140)$$

Le potentiel matriciel du substrat peut être déduit de la teneur en eau dans le substrat grâce au modèle de Van Genuchten (1980) (cf chapitre 3). Mais du fait que la croissance du volume racinaire d'une semaine à une autre influence les propriétés de rétention en eau du substrat (Cannavo et Michel, 2013), il a fallu établir une courbe de rétention pour chaque semaine. La calibration de la fonction de Van Genuchten ou bien de la courbe de rétention en eau du substrat a été réalisée sur la base des données de la semaine 12 (i.e. la semaine choisie pour les simulations avec le logiciel ANSYS Fluent).

Pour la calibration les mesures obtenues par tensiométrie et sonde capacitive ont été utilisées. Le modèle de Van Genuchten (Eq. 74) calibré est donné par l'Eq. 141 avec :

$\theta_r$  : teneur en eau résiduelle ;  $\theta_r = 0.100 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  ;  $\theta_s$  : teneur en eau à saturation  
 $\theta_s = 0.887 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  ;  $\alpha = 0.134 \text{ kPa}^{-1}$  ; et  $n = 1.469$ .

$$\Psi_s = \frac{1}{0.134} \left[ \left( \frac{\theta_i - 0.1}{0.787} \right)^{\frac{1.469}{0.469}} - 1 \right]^{1/1.469} \quad (141)$$

Les résultats de calibration sont présentés sur la Fig. 64. Le modèle de Van Genuchten arrive à bien estimer la courbe de rétention avec un  $r^2 = 0.80$  et  $\text{RMSE} = 6.66 \text{ kPa}$ .

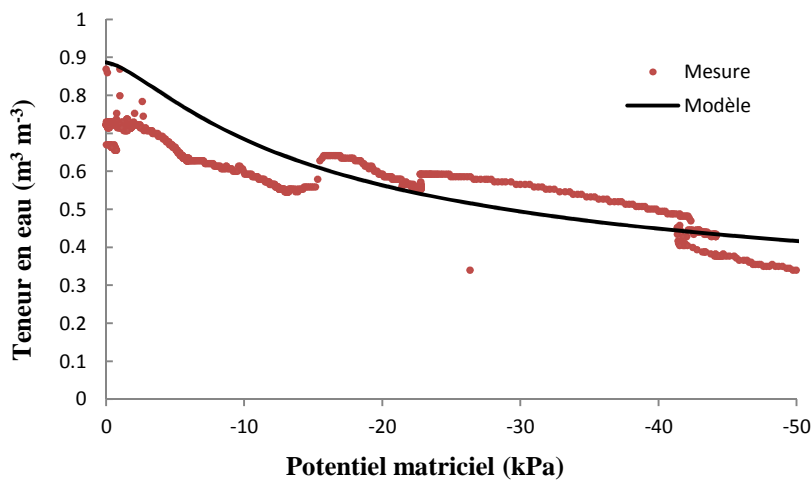


Figure 64 : Courbe de rétention pour du substrat pour la semaine 12 après plantation.

### 5.1.3.2 Validation des modèles de résistance stomatique en restriction hydrique

Comme dans la partie précédente, la validation a été opérée sur la semaine 12. Nous présentons d'abord la validation des modèles de  $R_s$  en restriction hydrique, puis celles des modèles de transpiration.

### 5.1.3.3 Modèle polynomial issu des plans d'expériences

Les résultats sont présentés sur la Fig. 65. Il en ressort une assez bonne adéquation des résultats du modèle avec les mesures puisque  $r^2 = 0.82$  et  $\text{RMSE} = 409.02 \text{ s m}^{-1}$ .



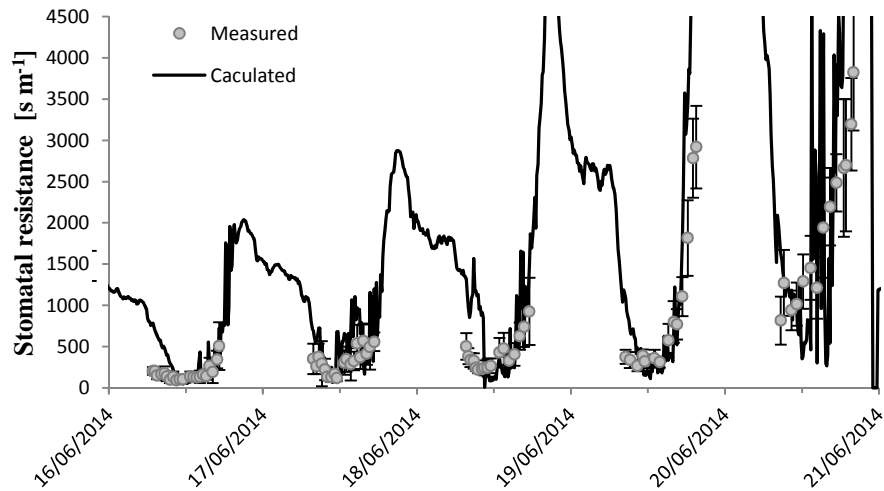


Figure 65 : Validation du modèle polynomial semaine 12

Le RMSE de  $409.02\ s.m^{-1}$  reste cependant un peu élevé. Cela tient très probablement aux fortes fluctuations du rayonnement global le 21/06/14 (Fig. 58). Le modèle polynomial de  $R_s$  est très sensible au rayonnement. Si on ajoute à cela les plus fortes valeurs de  $R_s$  mesurées en restriction hydrique (i.e.  $4000\ s.m^{-1}$ ), les valeurs de  $R_s$  sont d'autant plus exacerbées.

La validation du modèle polynomial de  $R_s$  via les modèles de transpiration (PM, DM) donne les résultats suivants avec  $r^2=0.77$  et une erreur relative sur le cumul = 1.27 % pour DM,  $r^2=0.81$  et une erreur relative sur le cumul = 7.86 % pour PM (Fig. 66) :

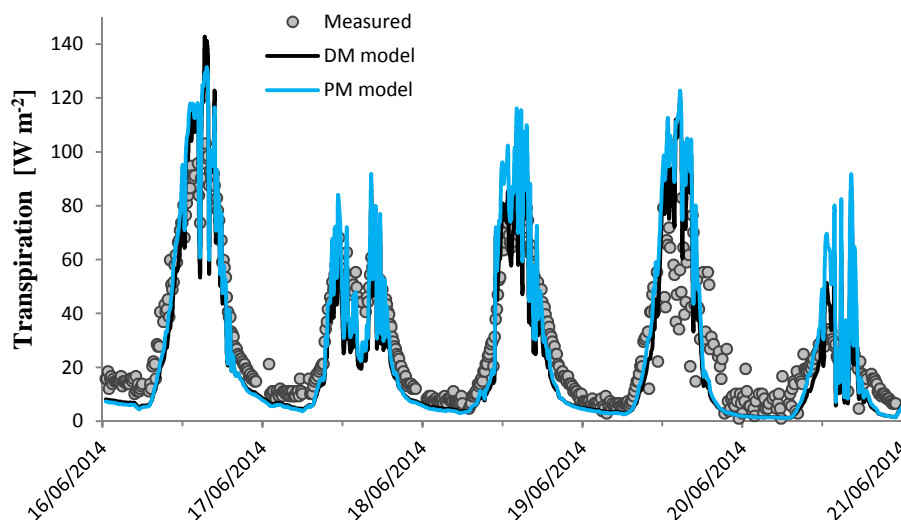


Figure 66 : Validation des modèles de la transpiration qui utilisent le modèle de  $R_s$  polynomial semaine 12

La précision des deux modèles de transpiration reste comparable, la simulation de la transpiration le 21/06 est surestimée surtout avec le model de PM. Ceci tient aux difficultés à simuler correctement  $R_s$  ce jour-là.

#### 5.1.3.4 Modèle de Jarvis

Les résultats de la validation du modèle de résistance stomatique de Jarvis avec les données de la semaine 12 sont présentés sur la Fig. 67. Ces résultats sont globalement concluants, y compris pour les fortes valeurs de  $R_s$  avec  $r^2=0.86$  et  $RMSE = 348.22 \text{ s m}^{-1}$ .

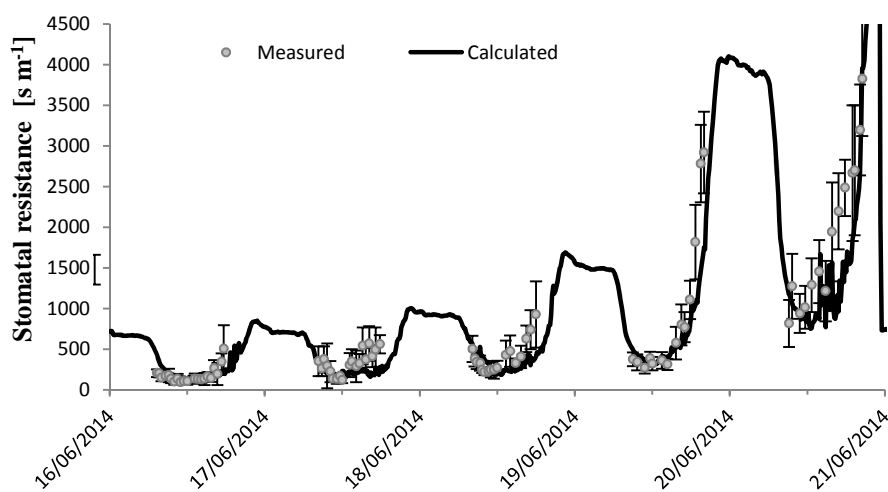


Figure 67 : Validation du modèle de Jarvis semaine 12

La validation par les modèles de transpiration donne les résultats suivants Fig. 68 :

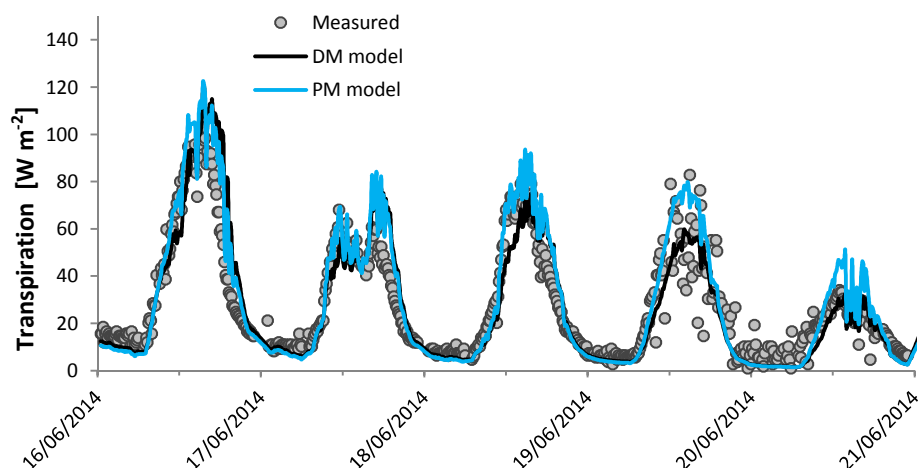


Figure 68 : Validation des modèles de transpiration qui utilisent le modèle de Jarvis pour  $R_s$  semaine 12

Les résultats présentés sur la Fig. 68 montrent une bonne estimation de la transpiration avec un petit avantage pour le modèle de PM, avec  $r^2 = 0.69$  et une erreur relative sur le cumul = 6.27 % pour DM ;  $r^2 = 0.72$  et une erreur relative sur le cumul = 2.74 % pour PM.

### **5.1.4 Conclusion sur la précision des modèles de résistance stomatique et de transpiration pour les deux régimes d'irrigation**

Les résultats précédents concernant la validation de  $R_s$  avec le modèle polynomial d'une part et celui de Jarvis d'autre part indiquent que ces deux modèles ont des performances comparables. Le modèle polynomial établi avec peu de points de mesures, atteint le même degré de précision que le modèle de Jarvis, qui lui est beaucoup plus gourmand avec plus de 180 mesures de  $R_s$  qui ont été utilisées. D'autres auteurs ont utilisé aussi le modèle de Jarvis pour d'autres types de plantes et ont eu besoin de beaucoup des mesures de  $R_s$  pour calibrer le modèle de Jarvis : Wei et al. (2013) pour le blé ont utilisé 992 points de mesures ou bien Granier et Loustau (1994) pour le pin qui en ont utilisé 578. La précision et la validation du modèle polynomial pour estimer  $R_s$  ont été aussi abordées pour d'autres semaines, et les résultats obtenus restent très acceptables (cf. article 1 : Bouhoun Ali et al., 2016a et Annexe 6). De plus, une comparaison des performances des deux modèles de  $R_s$  a été effectuée sur d'autres semaines, et pour les deux régimes d'irrigation. Il en ressort que le modèle polynomial offre un niveau de performance comparable à celui de Jarvis avec des résultats similaires (cf. Bouhoun Ali et al., 2016a).

Concernant les modèles de transpiration, PM et DM donnent presque la même précision d'estimation. Néanmoins, le modèle PM est légèrement meilleur dans le cas d'une restriction hydrique. Compte tenu de ces résultats, dans la suite de notre étude le modèle polynomial issu des plans d'expérience pour  $R_s$  et le modèle de Penman Monteith pour estimer la transpiration ont été introduits dans la routine (cf. chapitre 4) du modèle de culture pour mener à bien les simulations de CFD avec le logiciel ANSYS Fluent.

## 5.2 Deuxième étape : Modélisation du climat sous serre pour les différents régimes d'irrigation

Dans un premier temps, les simulations ont été menées en considérant un domaine de calcul limité à l'environnement proche du couvert végétal. L'écoulement est supposé turbulent à l'intérieur. L'objectif est de déterminer la distribution des champs thermique, dynamique et hydrique à l'intérieur, autour du couvert végétal ainsi que leur évolution temporelle, pour les deux régimes d'irrigation en confort et en restriction hydrique. Le code utilisé pour cette étude de simulation est le logiciel FLUENT (ANSYS 15.0). Une routine a été développée afin de prendre en compte l'impact du couvert végétal. Les simulations ont été réalisées en 2D, ce qui réduit les temps calcul. Des simulations ont été conduites en régime stationnaire et instationnaire, mais seuls les résultats des simulations en régime instationnaire seront présentés ici. En effet, le régime stationnaire ne représente pas la réalité ; il s'agit plutôt d'une étape préliminaire dont la vocation est principalement de régler d'éventuels problèmes de convergence, de vérifier la cohérence des résultats et de s'assurer du bon fonctionnement de la routine intégrée. La validation des résultats des simulations a été réalisée à partir des mesures expérimentales disponibles pour les deux régimes d'irrigation. Une fois le modèle validé, différents scénarios d'irrigation ont été testés afin d'identifier le meilleur scénario permettant de réduire la consommation de l'eau tout en garantissant un bon développement de la plante. Les conditions de bon développement de la plante incluent : (i) une transpiration suffisante pour refroidir le végétal, (ii) des températures de feuille inférieures ou égales aux températures de l'air en contact avec ces mêmes feuilles (González-Dugo et al., 2006; Jackson et Center, 1981), et (iii) un maintien des stomates ouverts pour plus d'assimilation de CO<sub>2</sub>.

Dans un second temps, le domaine de calcul a été modifié et étendu au domaine complet de la serre, ceci afin d'accroître le réalisme des simulations. La Fig. 69 récapitule les étapes des simulations entreprises avec le logiciel ANSYS Fluent, ainsi que les objectifs de chaque étape.

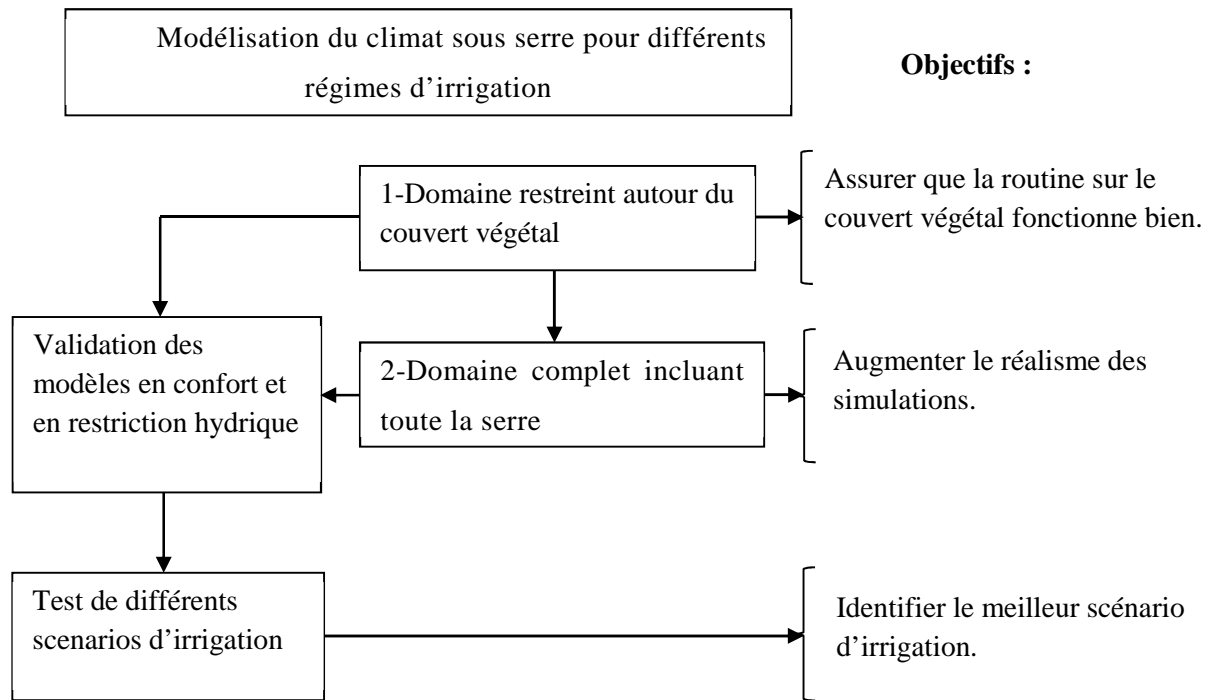


Figure 69 : Organigramme des étapes de simulation du climat distribué avec le logiciel ANSYS Fluent.

### 5.2.1 Paramètres de modélisation

Le Tab.7 résume les équations qui ont été activées pour prendre en compte les transferts d'eau et d'énergie dans le continuum sol-plante-atmosphère sous serre, ces équations ont été détaillées dans le chapitre 3.

Tableau 7 : Paramètres utilisés pour ANSYS Fluent.

Modèle	Paramètres
Espace	2D
Turbulence	k-epsilon standard
Transfert de chaleur	Activé
Rayonnement	Modèle DO
Transport de masse	2 espèces (air/vapeur d'eau)

La plupart des équations de transfert dépendent des propriétés du milieu ou bien des matériaux (Tab. 8). Une attention particulière a été portée au traitement du rayonnement. L'ETR (cf chapitre 3) est résolue toutes les 10 itérations en utilisant le modèle DO (Discrete Ordinates). Le choix de 10 itérations pour DO permet de réduire le temps de calcul tout en assurant la convergence de ce dernier. Deux gammes de longueur d'onde

ont été définies : les courtes longueurs d'ondes (CLO) [0.1-3[  $\mu\text{m}$  correspondant au rayonnement solaire et les grandes longueurs d'ondes (GLO) [3-100]  $\mu\text{m}$  correspondant au rayonnement atmosphérique. Il est nécessaire de définir les propriétés optiques des milieux semi-transparents pour chaque gamme de la longueur d'onde. La serre d'étude comme nous l'avons expliqué dans le chapitre 4 inclut les parois et la toiture en verre, l'écran d'ombrage, les tablettes en aluminium et le couvert végétal qui est considéré comme un milieu poreux. Les propriétés radiatives du couvert végétal ainsi que les propriétés des sols en béton sont également précisées.

**Tableau 8 : Propriétés des matériaux utilisés.**

Matériau	Densité : ( $\text{kg.m}^{-3}$ )	Capacité calorifique: $C_p$ ( $\text{J.K}^{-1}.\text{kg}^{-1}$ )	Conductivité thermique : $\lambda$ ( $\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ )	Indice de réfraction : $n$	Coefficient d'extinction (CLO) : $k$ ( $\text{m}^{-1}$ )	Coefficient d'extinction (GLO) : $k$ ( $\text{m}^{-1}$ )	Emissivité  CLO ; GLO
Verre	2500	800	1.15	1.52	30	1000	0.9
Béton	2300	880	3.76	-	-	-	0.5
Aluminium	2719	871	202.4	-	-	-	0.1
Air	1.22	1006	0.0242	1	0	0	-
Vapeur d'eau	0.554	f(T)	0.0261	1	0	0	-

- **Propriété optique de couvert végétal**

Le couvert végétal est considéré comme transparent au rayonnement GLO et semi-transparent au rayonnement CLO. Pour les besoins de la modélisation, il est nécessaire de définir les propriétés optiques du couvert végétal, et en particulier le coefficient d'extinction. Selon De Costa et Dennett (1992) le coefficient d'extinction est fonction de l'angle des feuilles avec l'axe vertical, de l'angle du rayonnement incident qui dépend de la course du soleil, de la transmittance des feuilles, ainsi que du régime d'irrigation des plantes. Les plantes en confort absorbent plus de rayonnement que les plantes en restriction hydrique. Les plantes en restriction hydrique ont en effet une surface de contact avec le rayonnement qui est réduite à cause de l'enroulement des feuilles induit par le stress (Hattem et al., 2007; Hsiao and Acevedo, 1974b). Pour une

restriction hydrique à court terme comme tel est le cas dans cette étude, les surfaces foliaires restent égales à celles du confort hydrique, l'enroulement des feuilles dans le cas de restriction hydrique ne modifie pas les indices foliaires. Selon la loi de Beer-Lambert (cf. chapitre 3 : Eq. 85) la décroissance du rayonnement dans le couvert végétal dépend de deux paramètres : l'indice foliaire et le coefficient d'extinction. Pour les deux régimes, l'indice foliaire est le même, il convient donc d'ajuster le coefficient d'extinction afin d'introduire l'effet du flétrissement des feuilles sur la décroissance du rayonnement dans le couvert végétal pour le cas de restriction hydrique.

La Fig. 70 représente l'évolution temporelle du coefficient d'extinction avec l'augmentation de la restriction hydrique, pour la semaine 12 après plantation. Le coefficient d'extinction est déduit des mesures du rayonnement au-dessus ( $y_1$ ) et au-dessous du couvert végétal ( $y_2$ ), grâce à la loi de Beer-Lambert (cf. chapitre 3 : Eq. 85) ( $\hat{k} = -\frac{1}{LAI_s} \ln \frac{R_g(y_2)}{R_g(y_1)}$ ). Les premiers jours correspondent au confort hydrique avec un potentiel matriciel du substrat supérieur à -10 kPa, les derniers jours correspondent à des plantes en restriction hydrique avec un potentiel matriciel inférieur à -10 kPa (Fig. 70). Les mesures montrent un coefficient d'extinction moyen de 0.95 pour le cas de confort hydrique et de 0.64 pour le cas des plantes en stress hydrique.

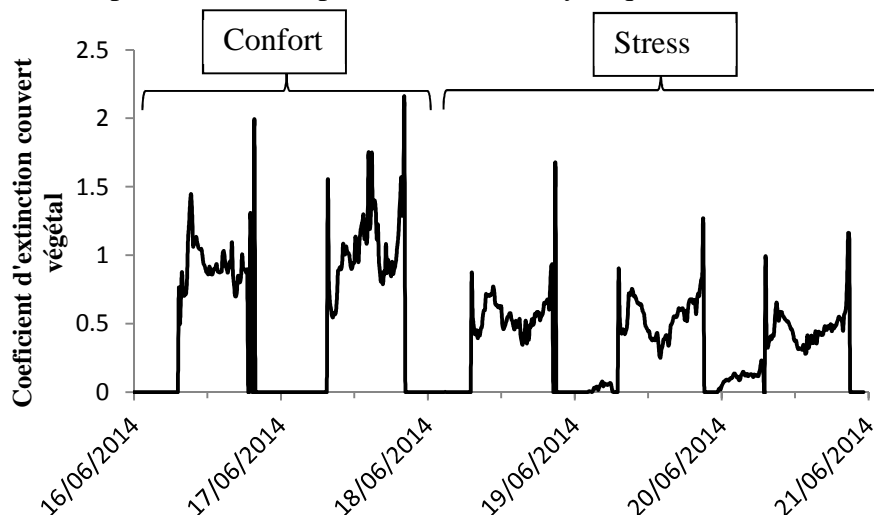


Figure 70 : Evolution temporelle du coefficient d'extinction du couvert végétal avec l'augmentation de la restriction hydrique semaine 12 après plantation.

- **Propriétés optiques et thermiques de l'écran d'ombrage**

L'écran d'ombrage utilisé dans la serre est constitué de 16% d'aluminium et de 84% de polystyrène, l'écran d'ombrage n'est pas complètement étanche avec des vides entre les constituants de l'écran. La conductivité de l'écran d'ombrage est considérée comme égale à celle du polystyrène, à savoir  $0.15 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ , du fait qu'il représente le constituant majoritaire de l'écran.

A notre connaissance il n'y a pas encore eu de travaux de CFD pour des serres équipées d'un écran d'ombrage. Des travaux de CFD pour d'autres types d'écran (Montero et al., 2005; Piscia et al., 2012) ont cependant été menés avec un écran thermique utilisé pour conserver la chaleur de la serre de nuit. Ces auteurs ont assimilé l'écran à une paroi avec une émissivité d'environ  $0.17 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ . Pour ce type d'écran seuls les échanges de chaleur ont été considérés. D'autres travaux de CFD ont été menés sur des filets anti-insectes (Molina-Aiz et al., 2010; Bartzanas et al., 2002) en considérant le filet comme un milieu poreux, au travers duquel seuls les échanges de masse ont été pris en compte. L'écran d'ombrage représente un mélange des deux (i.e. il faut prendre en compte les échanges de chaleur et de masse) d'où la difficulté à l'intégrer dans la modélisation. Dans notre étude, l'écran d'ombrage est considéré comme un milieu semi-transparent complètement diffus (i.e. fraction diffuse  $f_d=1$ , cf. chapitre 3), avec des cheminées laissées de chaque côté de la serre. Selon Kittas et al. (1999), la transmittance des écrans d'ombrage varie en général entre 30% et 70%, selon les constituants de l'écran d'ombrage.

- **Facteurs de relaxation et critères de convergence sur les résidus**

Les facteurs de relaxation employés dans ANSYS Fluent pour la résolution du problème sont donnés dans le Tab. 9.



**Tableau 9: Facteurs de sous-relaxation utilisés pour les simulations.**

Variable	Facteur de sous-relaxation
Pression	0.5
Densité	0.5
Forces volumiques	0.5
Quantité de mouvement	0.5
Énergie cinétique turbulente	0.3
Taux de dissipation turbulente	0.3
Viscosité turbulente	0.3
H <sub>2</sub> O	0.3
Energie	0.5
DO	0.5

Après une étude de convergence, un critère de convergence de  $10^{-6}$  a été fixé sur les résidus. Cette valeur apparaît suffisante pour garantir un bon niveau de convergence. L'algorithme SIMPLE a été retenu pour traiter le couplage entre la pression et la vitesse, il est robuste vis-à-vis des instabilités et augmente la vitesse de convergence vers la solution. Pour la discrétisation spatiale, un schéma Upwind de deuxième ordre a été choisi pour les différentes variables.

Par ailleurs nous choisissons le schéma standard pour la discrétisation de la pression. Ce schéma est utilisé dans le cas de la convection naturelle (Fluent, 2014).

### 5.2.2 Régime instationnaire

Le régime instationnaire a été choisi pour les simulations. Cela signifie que la dimension temps est prise en compte. Sa mise en œuvre consiste à modifier les données d'entrée (conditions aux limites) à chaque pas de temps, et à résoudre les équations de la mécanique des fluides pour prédire les variables à chaque pas de temps. Pour les simulations réalisées dans le cadre de ce travail un pas de temps d'une heure a été choisi. Il eut été possible de choisir un pas de temps de 10 minutes du fait que les données

étaient enregistrées toutes les 10 minutes. Le choix d'un pas temps d'une heure tient au fait que l'analyse des données a montré que la variation des variables climatiques demeurerait très faible pour un pas de temps 10 minutes, alors qu'elle commençait à être visible à partir d'un pas de temps d'une heure.

### 5.2.3 Différents scénarios d'irrigations

Différents régimes d'irrigation ont été testés. L'objectif était d'arriver à optimiser l'irrigation et de voir l'impact de différents régimes d'irrigation sur le climat sous serre. Six scénarios ont été testés, avec les mêmes conditions aux limites, pour les simulations allant du 17/06/2014 à 23h au 18/06/2014 à 22h, avec un pas de temps de 1h. Chaque scénario est caractérisé par une teneur en eau initiale dans le substrat entrée dans la routine à 22h. Un cas de référence a été considéré, qui correspond à un régime d'irrigation de 100%, c'est-à-dire à la capacité de rétention du substrat de  $0.870 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Pour le reste des scénarios, la teneur en eau initiale dans le substrat a été réduite à 90% de la valeur de référence ( $0.783 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), puis à 80% ( $0.696 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), 70% ( $0.609 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), 60% ( $0.522 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ), et 50% de la valeur de référence ( $0.435 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ).

### 5.2.4 Modélisation du climat sous serre : domaine limité autour du couvert végétal

Cette partie a fait l'objet d'un article soumis à la revue Computers and Electronics in Agriculture (article 2 : Bouhoun Ali et al., 2016b). Nous en proposons ici un résumé, on pourra se référer à l'article en question pour plus de détails.

#### 5.2.4.1 Domaine de calcul et maillage

Un domaine de calcul limité autour du couvert végétal ( $23 \times 3.69 \text{ m}^2$ ) a été considéré dans un premier temps (Fig. 71). Ce domaine limité inclut les plantes de hauteur 24 cm, les pots avec une hauteur de 9 cm, et les tablettes d'épaisseur de 0.5 cm. Ce domaine de calcul limité permet de diminuer les coûts de calcul en termes de temps, de diminuer la complexité technique du problème, et surtout de pouvoir multiplier les tests.

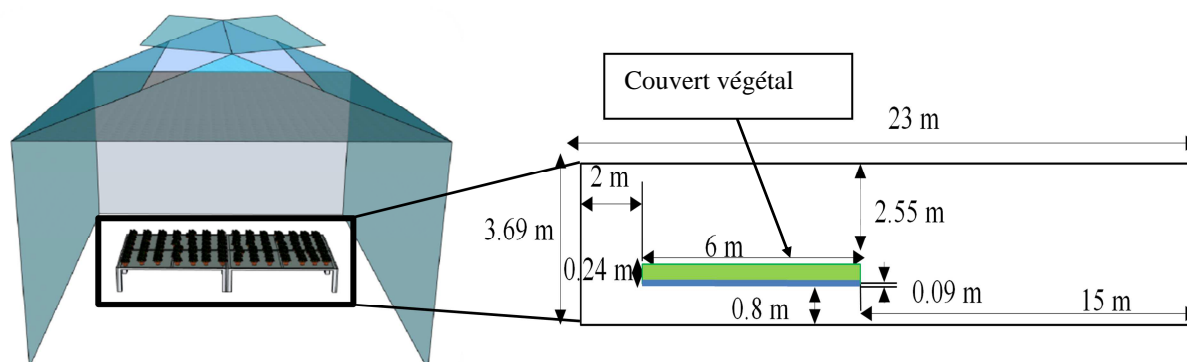


Figure 71 : Géométrie du domaine limité autour du couvert végétal

Avant d'effectuer des calculs, il faut s'assurer que les résultats ne dépendent pas du nombre de mailles utilisées. Pour ce faire, on a affiné le maillage jusqu'à ce que les variables résolues n'évoluent plus, même si le nombre de mailles augmente. Le nombre de mailles finalement retenu garantissant une bonne indépendance des résultats vis-à-vis du maillage est de  $50 \times 190$  mailles, dont  $10 \times 60$  mailles consacrées au couvert végétal. Afin de simuler correctement la turbulence à proximité des parois, le modèle  $k-\varepsilon$  retenu exige de raffiner le maillage dans cette zone (Fig. 72). Un maillage structuré quadratique a été utilisé.

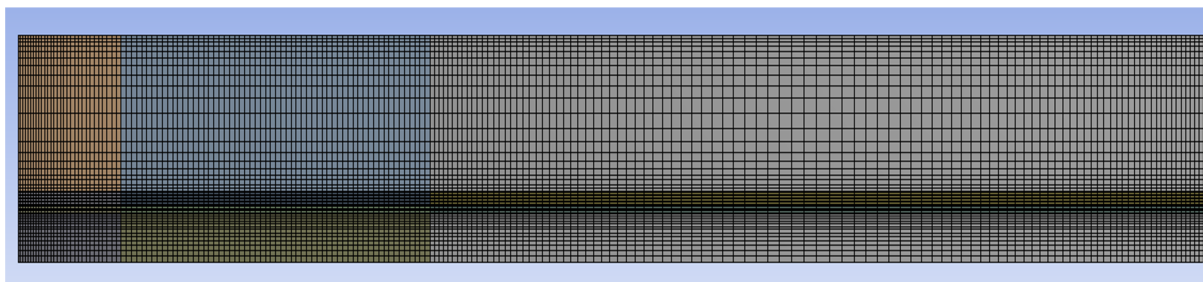


Figure 72 : Maillage du système d'étude

#### 5.2.4.2 Conditions initiales et aux limites

Les conditions initiales ont été obtenues en réalisant une simulation en régime stationnaire avec les conditions aux limites mesurées à 22h. Cette simulation préliminaire permet ainsi de définir les conditions initiales utilisées sur tout le domaine. Pour la seconde phase de calculs, seule la plage horaire du 17/06/2014 à 23h au 18/06/2014 à 22h

a été considérée, avec un pas de temps de 1h. Cela est valable aussi bien pour le cas du confort que pour la restriction hydrique.

Les conditions aux limites (Fig. 73) sont déterminées à partir des relevés expérimentaux. Une température et une humidité absolue  $AH_{a1}$  sont imposées au sol. Une température, une humidité et une vitesse sont fixées à la limite gauche (entrée du domaine de calcul). À la sortie (à la limite droite), une pression ( $P = 101325$  Pa), une température et une humidité ont été fixées. Le choix de « Pressure Outlet » (option disponible dans le logiciel Fluent) à la sortie permet de mieux contrôler la convergence surtout dans le cas de vitesses faibles inférieures à  $1 \text{ m s}^{-1}$  (Fluent, 2014).

Sur les deux extrémités gauche et droite, la température de ciel est fixée. Elle est déduite du flux de rayonnement mesuré de grande longueur d'onde ( $R_{atm}$ ). Elle est calculée par la relation suivante valable pour un corps noir  $T_{sky} = \left(\frac{R_{atm}}{\sigma}\right)^{0.25}$  avec  $\sigma$  constante de Stefan Boltzmann ( $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ ).

Sur la limite supérieure du domaine, les deux types de rayonnement courte et grande longueur d'onde ( $R_g, R_{atm}$ ) ont été fixés, de même que la température et l'humidité.

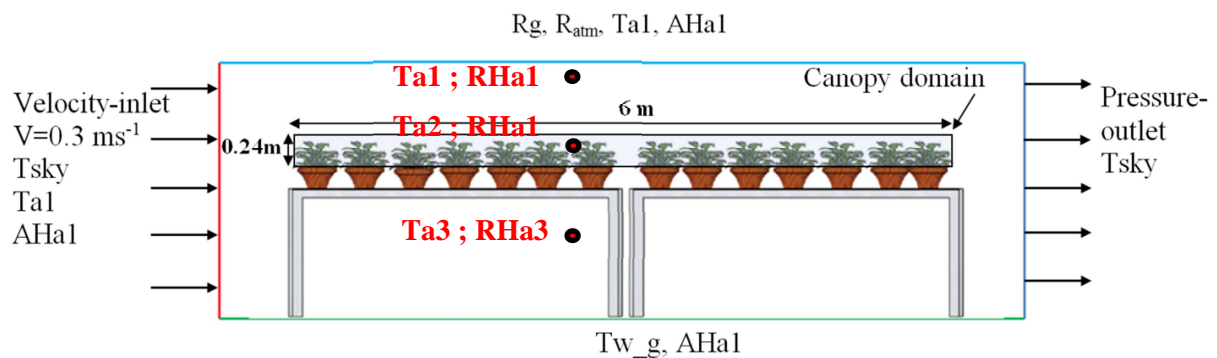


Figure 73 : Conditions aux limites et positions des résultats des simulations.

Les mêmes conditions aux limites et initiales ont été utilisées pour les cas de confort et de restriction hydrique (Fig. 74), sauf pour le potentiel matriciel du substrat où chaque régime a ses propres valeurs. Pour le régime de confort, le potentiel matriciel du substrat a été fixé à une valeur de -1 kPa c'est-à-dire à la capacité de rétention du pot. Par contre pour la restriction hydrique, le potentiel matriciel est déduit du sous modèle de bilan

hydrique entre le substrat et le végétal (cf. chapitre 4). Pour ce sous modèle, il suffit juste de définir la teneur en eau initiale du substrat enregistrée à 22h qui égale à  $0.652 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

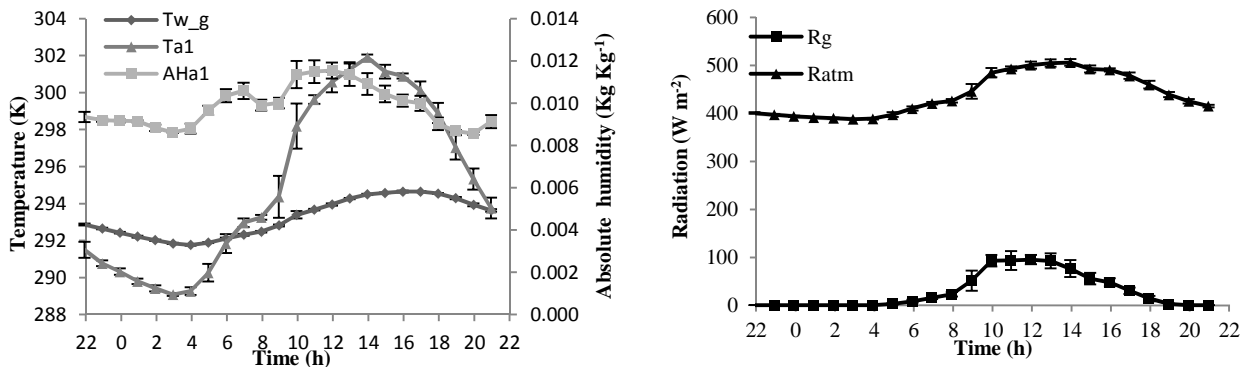


Figure 74: Evolution temporelle des conditions aux limites pour le domaine limité.

### 5.2.4.3 Performance du modèle pour les deux régimes d'irrigation

#### a. Températures et humidités

Des comparaisons entre les variables mesurées et simulées ont été menées. Ces comparaisons permettent d'évaluer les performances du modèle. Plus de détails sur les résultats sont présentés dans l'article 2 (Bouhoun Ali et al., 2016b).

Une comparaison a été effectuée entre les valeurs simulées et mesurées des variables climatiques (température et humidité de l'air) en différents points de l'espace du domaine du calcul (i.e. au-dessus, au-dessous et dans le couvert végétal) (Fig.73). Une autre comparaison a été opérée pour ces mêmes variables, mais dans le couvert végétal ainsi que pour la température des feuilles. Le Tab. 10 et les Fig. 75 à 77 résument les performances des simulations pour les deux régimes. Elles ont été évaluées ici aussi avec le  $r^2$  et le RMSE. Globalement, les résultats obtenus sont satisfaisants avec des  $r^2 > 0.9$  dans la plupart des cas.

Tableau 10: Performance des simulations pour les deux régimes d'irrigation pour le domaine limité.

Régime	Variable	Ta1 (K)	Ta2(K)	Ta3(K)	T <sub>l</sub> (K)	RHa1(%)	RHa2(%)	RHa3(%)
Confort	r <sup>2</sup>	0.97	0.97	0.97	0.98	0.93	0.88	0.90
hydrique	RMSE	0.79	1.09	0.72	1.14	3.80	8.66	4.09
Restriction	r <sup>2</sup>	0.95	0.94	0.96	0.95	0.94	0.78	0.94
hydrique	RMSE	1.03	1.57	0.86	1.62	3.36	6.69	3.68

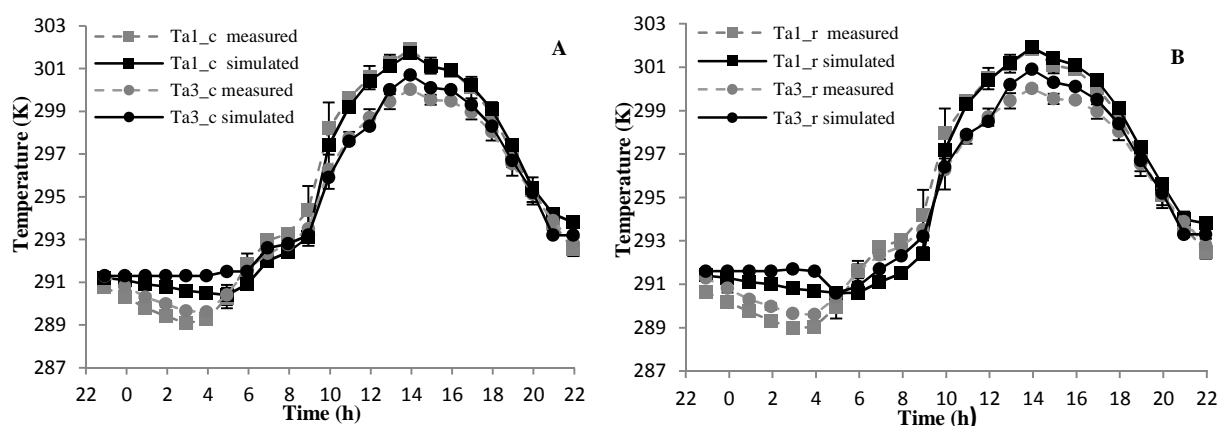


Figure 75 : Température mesurée et simulée de l'air en différents points pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B) : domaine limité

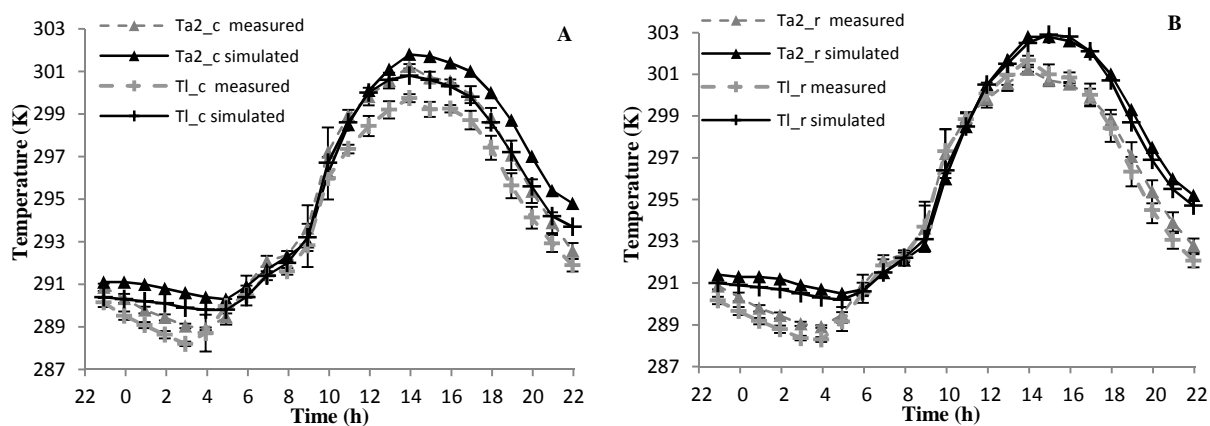


Figure 76 : Température mesurée et simulée de l'air dans le couvert et au niveau des feuilles pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B) : domaine limité.

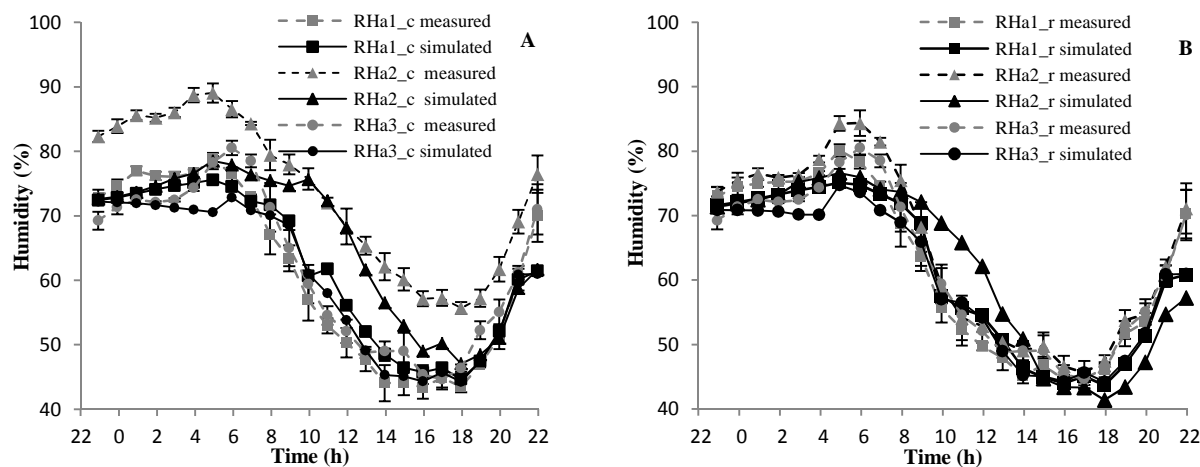


Figure 77 : Humidité relative mesurée et simulée de l'air en différents points du domaine limité pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B).

### b. Potentiel matriciel, résistance stomatique et transpiration

Le début des simulations correspond à 5 jours après que l'irrigation a été stoppée dans la tablette contenant les plantes en restriction hydrique. C'est pour cette raison qu'une valeur d'environ -12 kPa simulée et mesurée vers 23h 17/06/2014 a été trouvée (Fig. 78). L'effet d'une restriction hydrique sur le comportement des plantes devient visible à partir d'une valeur du potentiel matriciel inférieure à -10 kPa (cf. article 2 : Bouhoun Ali et al., 2016b). Des écarts très faibles entre les valeurs mesurées et simulées ont été trouvés avec  $r^2=0.99$  et  $RMSE=3.38$  kPa, ce qui témoigne de la qualité des simulations du potentiel matriciel du substrat pour la restriction hydrique, et aussi du bon fonctionnement de la routine qui effectue le bilan hydrique entre la plante et le substrat.

Une comparaison des valeurs de  $R_s$  des feuilles du haut et des feuilles à l'ombre ou en bas mesurées et simulées a été menée (Fig. 79A et 79B). Le modèle ANSYS Fluent, avec la routine intégrée montre sa capacité à bien simuler l'évolution temporelle de la résistance stomatique, avec un  $r^2 > 0.52$ ;  $RMSE < 168$  s  $m^{-1}$  et  $r^2 > 0.51$ ;  $RMSE < 527$  s  $m^{-1}$  pour les feuilles du bas et du haut du couvert et pour les cas de confort et de restriction hydrique, respectivement.

Les simulations de la transpiration montrent des écarts très faibles entre les valeurs mesurées et simulées pour les deux régimes d'irrigation (Fig. 80A et 80B) : avec

un  $r^2=0.98$  ;  $RMSE=5.87 \text{ W m}^{-2}$  pour le cas de confort, et  $r^2=0.97$  ;  $RMSE=5.64 \text{ W m}^{-2}$ ; pour le cas de restriction hydrique. L'erreur relative sur le cumul de transpiration pour 24 h a été calculé, avec une valeur de 3.32% pour le cas de confort et une valeur de 4.82% pour le cas de restriction. Ces valeurs de l'erreur relative sur le cumul de transpiration confirment la qualité des simulations.

Les distributions spatiale de résistance stomatique et de transpiration sur le couvert végétal prédites par le modèle (cf. article 2 : Bouhoun Ali et al., 2016b) font ressortir des gradients de résistance stomatique et de transpiration dans le couvert végétal. Des résistances stomatiques faibles génèrent des flux de transpiration plus forts dans la partie haute du domaine, tandis que c'est le contraire pour la partie basse, du fait que les feuilles du haut sont plus exposées au rayonnement.

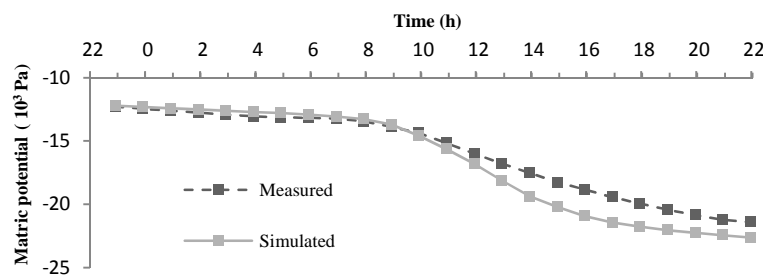


Figure 78 : Evolution temporelle du potentiel matriciel mesurée et simulée pour le domaine limité dans le cas de restriction hydrique.

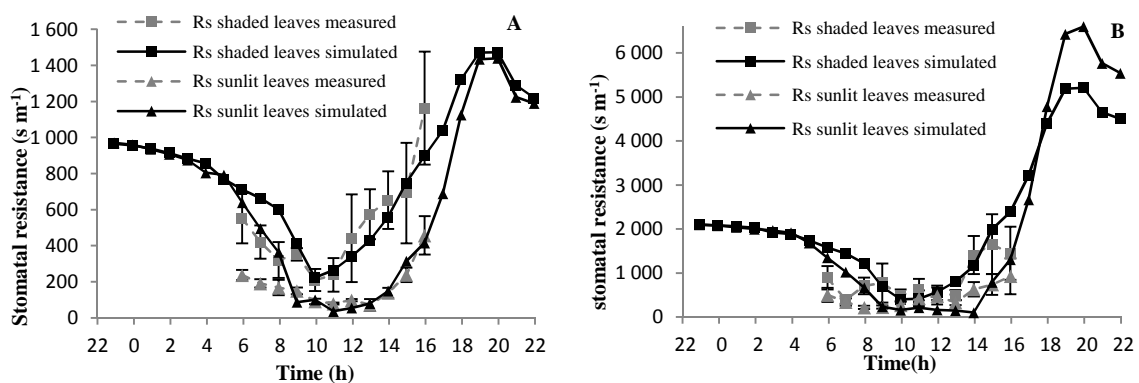


Figure 79 : Résistance stomatique mesurée et simulée pour les feuilles du bas et les feuilles du haut du couvert végétal : confort (A), restriction hydrique (B) : domaine limité.



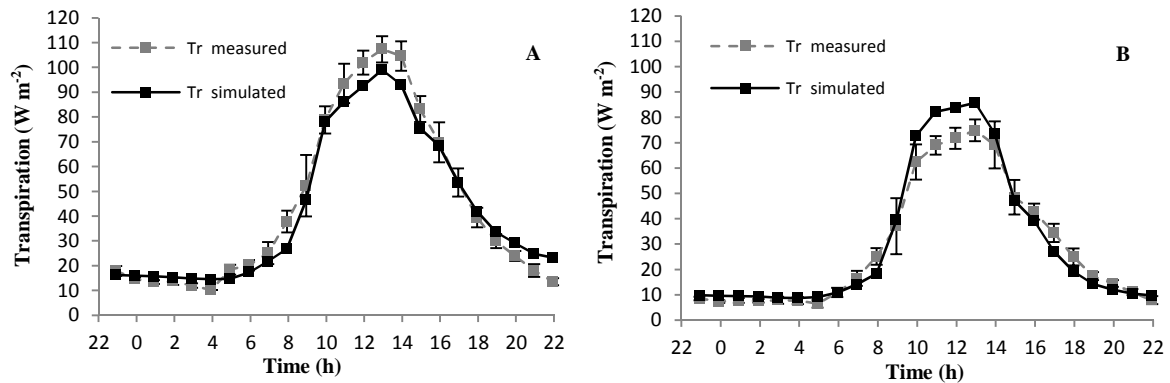


Figure 80 : Transpiration mesurée et simulée pour le domaine limité : confort (A) restriction hydrique (B).

#### 5.2.4.4 Test de différents scénarios d'irrigation

Une fois le modèle validé pour les deux régimes d'irrigation (confort et restriction – i.e. arrêt de l'irrigation), différents scénarios ont été testés en réduisant progressivement les apports en eau par rapport au cas de référence. L'idée était d'évaluer le changement induit par une diminution des apports d'eau sur les variables (température, humidité relative, potentiel matriciel, résistance stomatique, transpiration) par rapport au cas de référence. Une gradeur statistique a été définie  $D_{ref,j}$ , basée sur le même principe que le RMSE mais la comparaison se faisant entre le cas de référence et un scénario donné j (cf. article 2 Bouhoun Ali et al., 2016b). Pour la transpiration, le ratio entre le cumul de transpiration du cas testé et le cumul de transpiration du cas de référence (CTR) pour 24 h a été également calculé. Le Tab. 11 résume les résultats de simulation pour les différents scénarios d'irrigation.

**Tableau 11: Ecart des valeurs prédites des variables pour un scénario donné, par rapport au scénario de référence, valeurs des variables climatiques ( $T_a$ ,  $RHa$ ), potentiel matriciel, résistance stomatique, et transpiration.**

Scénario d'irrigation	Reference (100%)	90%	80%	70%	60%	50%
$D_{ref,j}$ ( $Ta1$ [K])		0.35	0.36	0.37	0.41	0.46
$D_{ref,j}$ ( $Ta2$ [K])		0.35	0.41	0.56	0.78	1
$D_{ref,j}$ ( $Ta3$ [K])		0.31	0.31	0.31	0.31	0.32
$D_{ref,j}$ ( $T1$ [K])		0.43	0.79	1.29	1.92	2.61
Moyenne $T1-Ta2$ [K]	-0.63	-0.45	-0.21	0.04	0.35	0.70
$D_{ref,j}$ ( $RHa1$ [%])		0.88	0.98	1.22	1.56	1.98
$D_{ref,j}$ ( $RHa2$ [%])		1.15	2.15	3.50	5.01	6.65
$D_{ref,j}$ ( $RHa3$ [%])		0.88	0.88	0.88	0.89	0.90
Moyenne $\Delta\Psi_s$ [kPa]		3.91	8.87	16.27	28.03	49.09
$R_s$ minimale (feuilles de bas) [ $s\ m^{-1}$ ]	194	250	360	537	883	1710
$R_s$ minimale (feuilles de haut) [ $s\ m^{-1}$ ]	68	88	93	123	228	566
$D_{ref,j}$ (Transpiration [ $W\ m^{-2}$ ])		4.11	8.64	14.18	20.77	28.64
CTR [%]		90.36	79.97	67.67	53.34	37.10

Le Tab. 11 et les résultats présentés dans l'article 2 (Bouhoun Ali et al., 2016b) montrent bien que quand la quantité d'eau dans le substrat diminue, le potentiel matriciel diminue aussi ce qui provoque l'augmentation de la résistance stomatique et par la suite une diminution de la transpiration. La diminution de transpiration provoque une augmentation des températures des feuilles et de l'air au contact des feuilles. Cette diminution permet de réduire la vapeur d'eau dans la serre, d'où la diminution des humidités relatives. Pour le confort de la plante, il est préférable de garder une température des feuilles ( $T_l$ ) inférieure ou presque égale à la température de l'air en

contact (Ta2) (cf. article 2 Bouhoun Ali et al., 2016b). Le Tab. 11 montre que la température des feuilles reste bien inférieure à celle de l'air en contact jusqu'à une réduction de 80% de l'irrigation. Le scénario de 80 % permet d'assurer le confort des plantes tout en n'induisant qu'une réduction légère de la transpiration. Une réduction légère de la transpiration garantit que les stomates restent ouverts ce qui ne limite pas l'assimilation de CO<sub>2</sub> et par la suite l'activité photosynthétique. Une limitation de l'assimilation de CO<sub>2</sub> réduirait en effet le développement végétatif (Monteith, 1977; Kim et al., 2006).

### 5.2.5 Modélisation du climat sous serre : domaine complet de toute la serre

Après avoir vérifié que le modèle CFD parvenait bien à simuler les transferts d'énergie et d'eau pour le domaine limité et que la routine intégrait correctement l'influence du couvert végétal sur les transferts d'énergie et d'eau dans la serre, nous sommes passés à l'échelle du domaine complet de la serre. L'utilisation du domaine complet rajoute plus de complexité au niveau des simulations du fait de l'intégration des composantes de la serre, comme la toiture et surtout l'écran d'ombrage. À la différence de la partie précédente axée sur les simulations pour un domaine limité, cette partie a été bien détaillée compte tenu du fait qu'elle ne fait pas encore l'objet d'un article.

#### 5.2.5.1 Domaine de calcul et maillage

Le domaine de calcul comporte 3 compartiments de serre, le compartiment d'étude se situant entre les deux autres compartiments, l'impact du couvert végétal n'est pris en compte que dans le compartiment d'étude situé au milieu (Fig. 81). Les deux compartiments situés de part et d'autre du compartiment d'étude ont été rajoutés afin d'éviter les risques de recirculations d'air, et aussi pour rajouter plus de réalisme. Le domaine de calcul s'étend sur 29.40\*10.15 m<sup>2</sup>. Le domaine de la serre d'étude inclut les plantes de hauteur 24 cm, les pots avec une hauteur de 9 cm, et les tablettes d'épaisseur 0.5 cm ainsi que la toiture en verre d'épaisseur 4 mm, et un écran d'ombrage constitué d'un mélange de polyéthylène et d'aluminium d'épaisseur de 2 mm. L'écran d'ombrage s'étend au-dessus de couvert végétal, cet écran laisse deux cheminées de chaque côté de la serre (Fig. 81). Pour les simulations, les ouvrants étaient complètement ouverts.

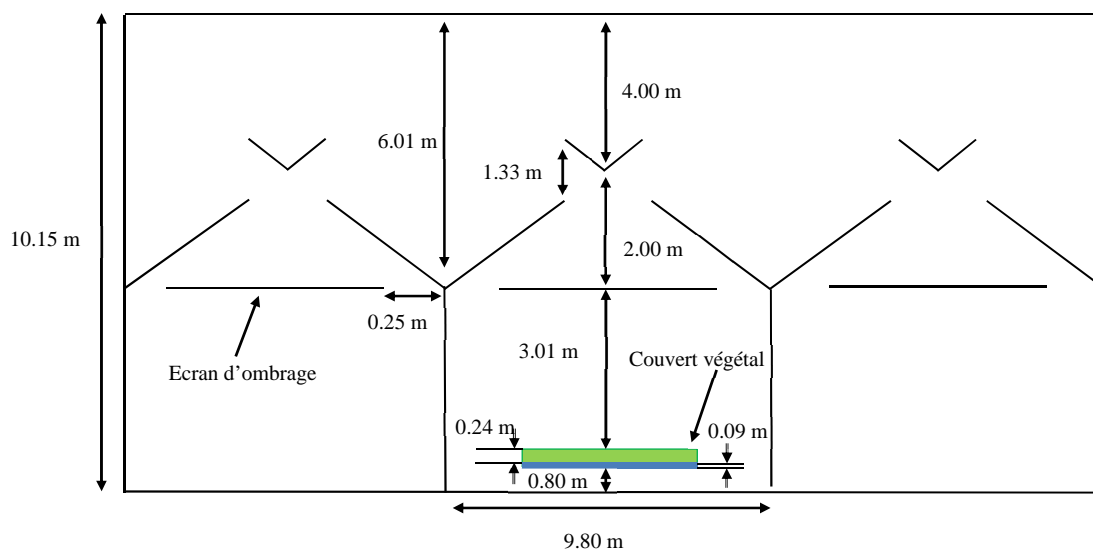


Figure 81: Géométrie du domaine de calcul complet.

Le maillage est structuré quadratique et comporte 151\*330 mailles (Fig. 82). Le même nombre des mailles a été conservé pour le couvert végétal que pour le domaine limité avec 10\*60 mailles. Deux mailles ont été utilisées sur l'épaisseur de l'écran d'ombrage (Fig. 82). Une attention particulière a été portée au maillage près des parois qui a été davantage affiné dans cette zone (Fig. 82). Une étude de sensibilité sur la densité du maillage et sur son impact sur les résultats obtenus a été menée en considérant différents nombres de mailles. Les résultats ne varient pas au-delà de 151\*330 mailles, d'où le choix retenu.

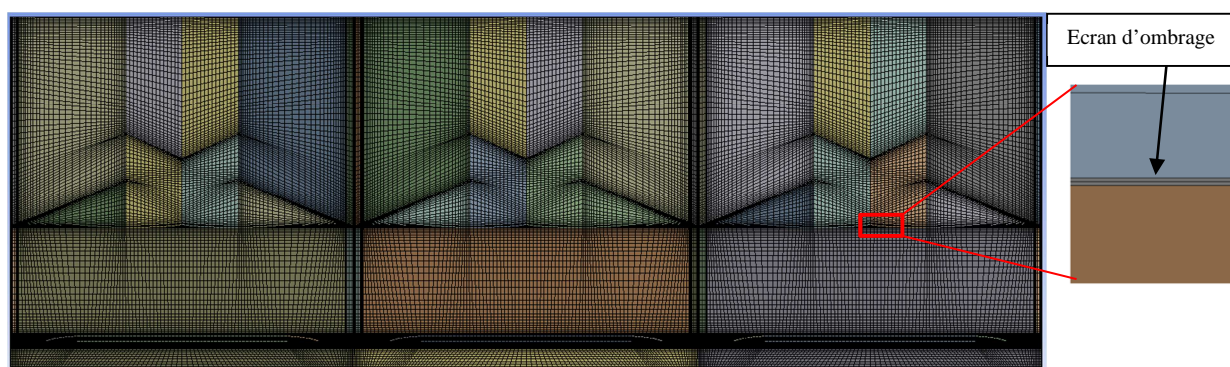


Figure 82 : Aperçu du maillage du domaine complet et zoom sur le maillage de l'écran d'ombrage.

### 5.2.5.2 Conditions initiales et aux limites

Les conditions initiales ont été obtenues à partir de simulations en régime stationnaire avec des conditions aux limites mesurées à 22h. Comme pour le domaine limité, la plage horaire du 17/06/2014 à 23h au 18/06/2014 à 22h a été considérée, avec un pas de temps de 1h et pour les deux régimes d'irrigation.

Les conditions aux limites (Fig. 83) sont déterminées à partir des mesures sous serre. Une température a été imposée au sol. Une température, une humidité et une vitesse sont fixées à la limite haute gauche (entrée du domaine de calcul). À la sortie (à la limite haute droite), une pression ( $P = 101325$  Pa), une température et une humidité ont été fixées. Sur les deux extrémités hautes gauche et droite, la température de ciel est fixée. Elle est déduite du flux de rayonnement mesuré de grande longueur d'onde  $R_{atm}$ . Sur la limite supérieure du domaine, les deux types de rayonnement courte et grande longueur d'onde ( $R_{g\_out}$ ,  $R_{atm\_out}$ ) ont été fixés, de même que la température et l'humidité.

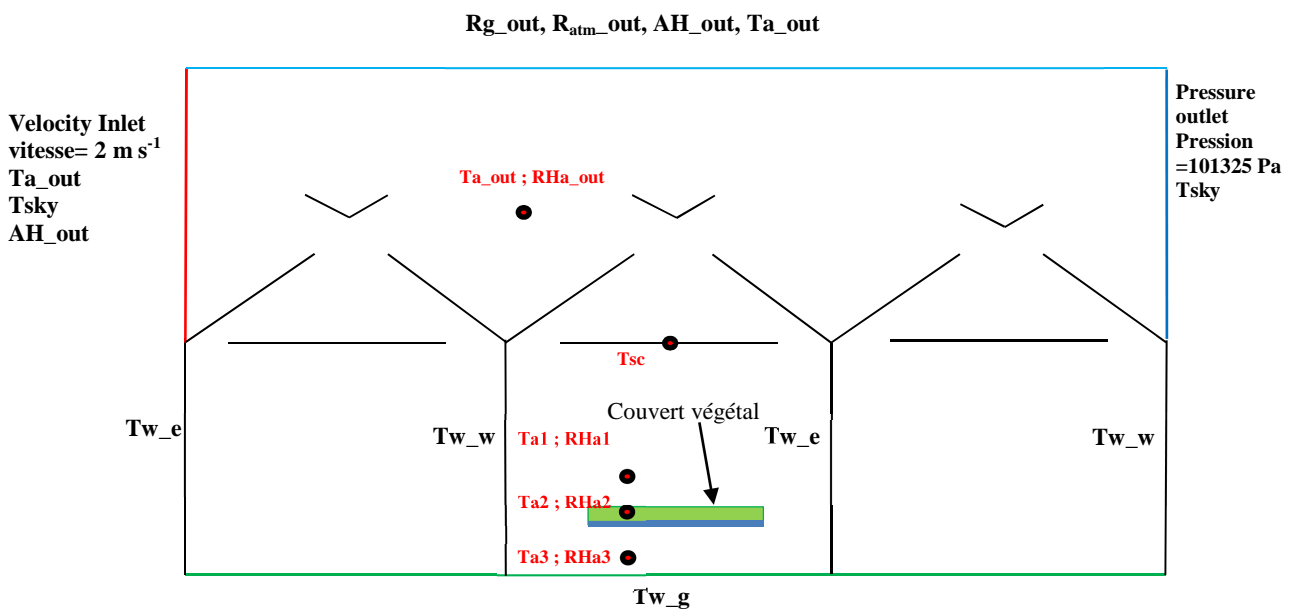


Figure 83 : Conditions aux limites et positions des résultats des simulations: domaine complet.

Comme pour le domaine limité, les mêmes conditions aux limites et initiales ont été utilisées pour les cas de confort et de restriction hydrique (Fig. 84), sauf pour le potentiel

matriciel du substrat. Pour le confort, le potentiel matriciel du substrat a été fixé à une valeur de -1 kPa. Par contre pour la restriction hydrique le potentiel matriciel est déduit du sous modèle de bilan hydrique comme pour le domaine limité. Pour ce sous modèle, la teneur en eau initiale mesurée à 22h ( $0.652 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) a été entrée dans la routine.

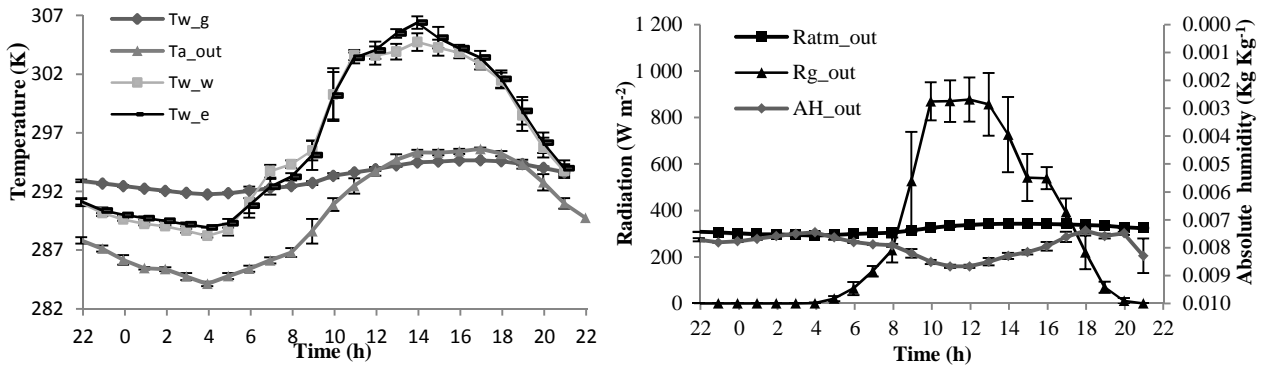


Figure 84: Evolution temporelle des conditions aux limites pour le domaine complet.

### 5.2.5.3 Ecran d'ombrage

Avant de lancer des simulations en régime instationnaire, des simulations en régime stationnaire à 14 h ont été lancées afin d'ajuster les caractéristiques de l'écran d'ombrage. Parmi ces caractéristiques figure la transmittance de l'écran. La transmittance d'un milieu semi transparent complètement diffus dépend de l'indice de réfraction et du coefficient d'extinction de ce milieu (cf chapitre 3). On dispose de la température mesurée de l'écran égale à 312 K et du rayonnement mesuré au-dessous de l'écran d'ombrage qui vaut  $95 \text{ W m}^{-2}$  à 14 h afin de fixer les différents paramètres de l'écran avec les simulations. Du point de vue pratique, différentes valeurs de l'indice de réfraction et du coefficient d'extinction ont été testées afin de parvenir à retrouver avec les simulations la température de l'écran mesurée ainsi que le rayonnement mesuré au-dessous de l'écran. A l'issue de ce travail, une valeur de 1.9 pour l'indice de réfraction et une valeur de  $60 \text{ m}^{-1}$  pour le coefficient d'extinction ont été trouvées. Avec ces valeurs de  $n$  et  $k$ , une transmittance de 0.50 a été obtenue, cette valeur est très proche de celle donnée par Montero et al. (1990) à savoir 0.45 pour un même type de l'écran d'ombrage.

#### 5.2.5.4 Performance du modèle pour les deux régimes d'irrigation

##### a. Températures et humidités

Une comparaison a été effectuée entre les valeurs simulées et mesurées des variables climatiques (température et humidité de l'air) pour les deux régimes d'irrigation en différents points de l'espace du domaine de calcul (i.e. au-dessus, au-dessous et dans le couvert végétal et à l'extérieur de la serre) (Fig. 85). Une autre comparaison a été opérée pour ces mêmes variables, mais dans le couvert végétal ainsi que pour la température des feuilles. Une comparaison a enfin été effectuée pour les températures de l'écran d'ombrage. Les résultats sont présentés sur les Fig. 85 à 88.

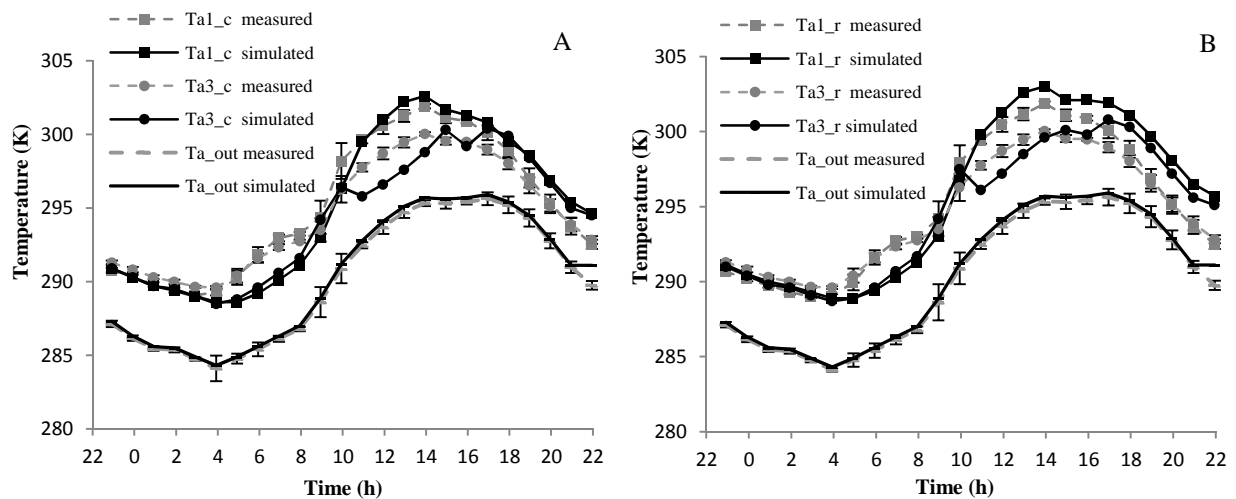


Figure 85 : Température mesurée et simulée de l'air en différents points du domaine complet pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B).

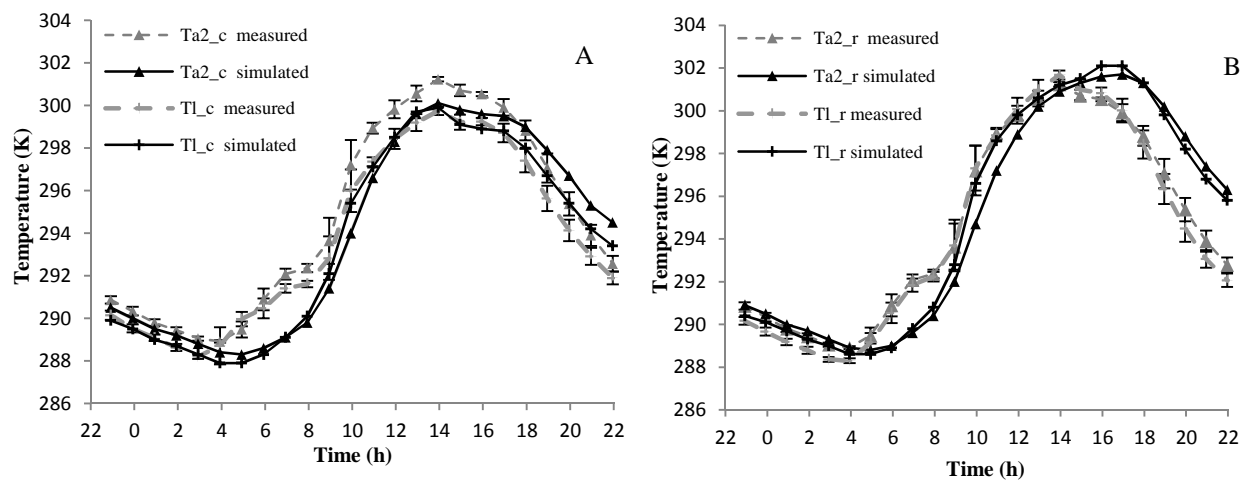


Figure 86 : Température mesurée et simulée de l'air dans le couvert et au niveau des feuilles pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B) : domaine complet.

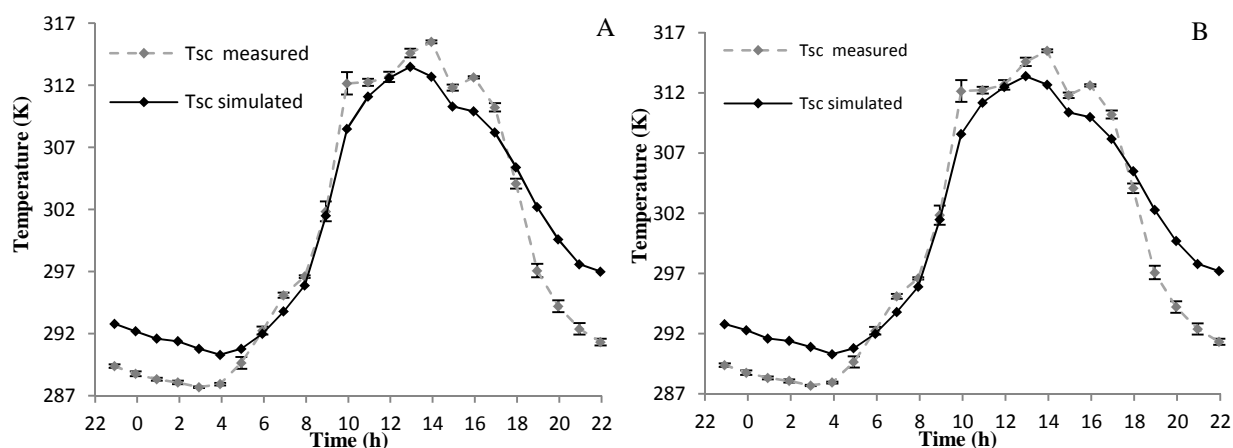
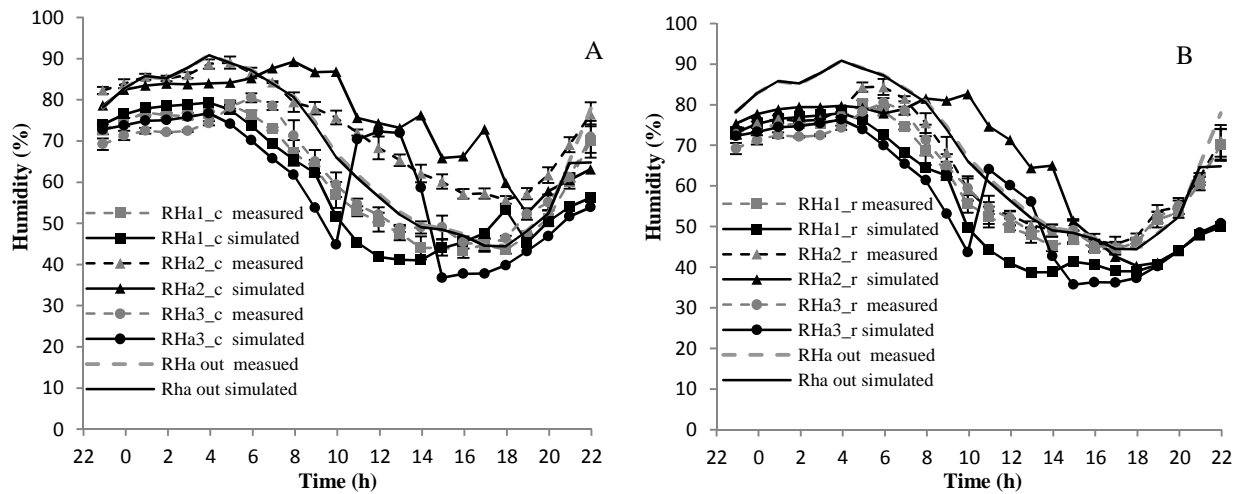


Figure 87 : Température mesurée et simulée de l'écran d'ombrage pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B) : domaine complet.





**Figure 88 : Humidité relative mesurée et simulée de l'air en différents points du domaine complet pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B).**

Ces figures montrent en général la capacité du modèle à restituer de manière satisfaisante l'évolution temporelle des températures et des humidités pour les deux régimes d'irrigation en différents points de l'espace du domaine du calcul, sauf pour les températures et les humidités sous le couvert végétal où les résultats sont moins concluants. Le Tab. 12 résume les différents résultats obtenus pour les deux régimes d'irrigation. En confort hydrique,  $RMSE < 3.01$  K et  $r^2 > 0.90$  pour les températures et  $RMSE < 10$  % et  $r^2 > 0.45$  pour les humidités relatives. En restriction hydrique,  $RMSE < 3.06$  K et  $r^2 > 0.89$  pour les températures et  $RMSE < 9.76$  % et  $r^2 > 0.68$  pour les humidités relatives.

**Tableau 12: Performance des simulations pour les deux régimes d'irrigation.**

Variable	Régime			
	Confort hydrique		Restriction hydrique	
-	r <sup>2</sup>	RMSE	r <sup>2</sup>	RMSE
Ta1 (K)	0.94	1.34	0.92	1.69
Ta2 (K)	0.91	1.56	0.86	1.87
Ta3(K)	0.90	1.35	0.90	1.40
Ta_out(K)	0.99	0.36	0.99	0.36
T <sub>i</sub> (K)	0.95	1.04	0.89	1.83
T <sub>sc</sub>	0.95	3.01	0.95	3.06
RHa1(%)	0.98	4.99	0.91	7.47
RHa2(%)	0.94	10.00	0.78	6.69
RHa3 (%)	0.45	9.97	0.68	9.76
RHa_out (%)	0.98	2.71	0.98	2.71

Les résultats indiquent que le modèle ne simule pas très bien l'évolution temporelle des températures sous le couvert végétal (Ta3) pour les deux régimes d'irrigation (Fig. 85A et 85B). Une chute brutale des températures vers 11h a été enregistrée et vers 17h les températures ont retrouvé leur évolution normale. Cette chute tient probablement à la simplification qui a été effectuée pour simuler l'écran d'ombrage. Ce dernier a en effet été considéré comme une paroi solide au lieu d'un milieu poreux ce qui limite la circulation d'air qui rentre de l'extérieur de la serre. Le choix d'assimiler l'écran d'ombrage à une paroi solide avait été décidé en raison de limites techniques du logiciel CFD pour prendre en compte le rayonnement réfléchi au niveau d'un milieu poreux. Avec la routine qui a été développée pour le couvert végétal, on parvient bien à intégrer le rayonnement absorbé et transmis dans un milieu poreux mais pas le rayonnement réfléchi. A cause de cette simplification, la circulation de l'air à proximité de l'écran est concentrée sur les deux cheminées qui ont été créées de part et d'autre de l'écran pour

autoriser les échanges avec l'extérieur. L'évolution temporelle des températures sous le couvert végétal est de fait plus influencée par la circulation de l'air qui rentre de l'extérieur de la serre à travers les cheminées et par la condition à la limite imposés au niveau du sol. Les cartographies des vitesses de l'air avant la chute (vers 3h) et au moment de la chute (vers 11h) et après la reprise de l'évolution normale des températures vers 17h sont présentées sur les Fig. 89, 90 et 91 respectivement.

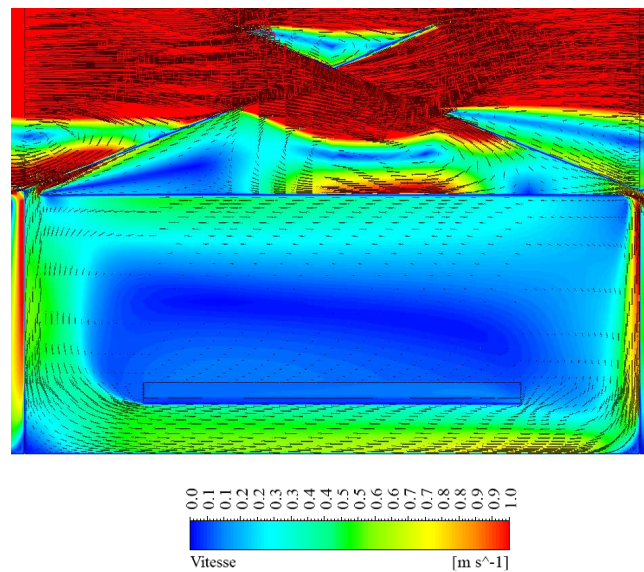


Figure 89 : Cartographie des vitesses de l'air et leurs vecteurs à l'intérieur de la serre à 3h.

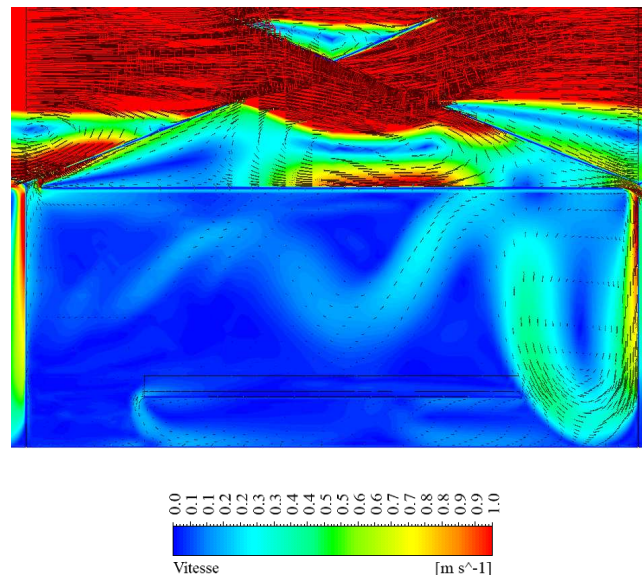
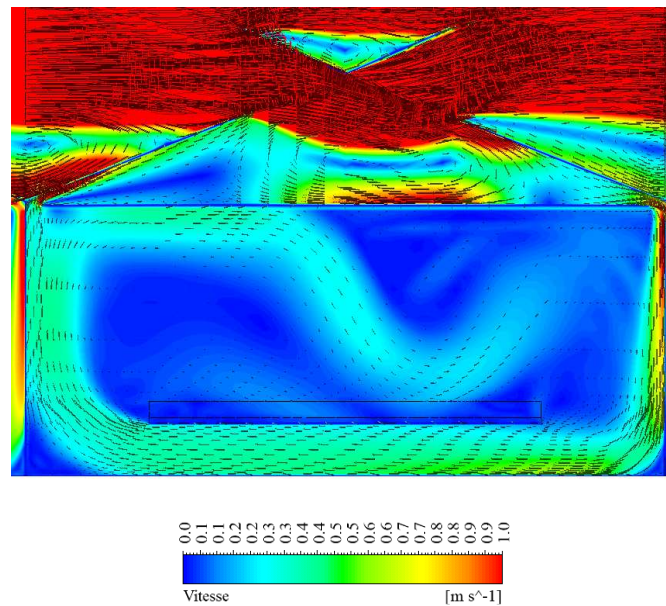


Figure 90 : Cartographie des vitesses de l'air et leurs vecteurs à l'intérieur de la serre à 11h.



**Figure 91 : Cartographie des vitesses de l'air et leurs vecteurs à l'intérieur de la serre à 17h.**

Les Fig. 89 et 91 correspondent aux périodes de la journée où l'évolution de la température sous le couvert végétal était « normale ». Pour ces deux cas, la température sous le couvert végétal traduit un équilibre entre la température de l'air qui rentre de l'extérieur de la serre et la condition à la limite au niveau du sol, ce qui est le cas dans la réalité. Pour le cas de 11h les vitesses simulées sous le couvert végétal sont presque nulles ce que signifie qu'il y a pas de circulation d'air. Si l'écran d'ombrage était considéré comme un milieu poreux, on aurait probablement eu plus de circulation d'air avec l'extérieur de la serre, même à 11h.

Dans le cas de la situation simulée à 11h, la température sous le couvert végétal est influencée seulement par la condition à la limite de la température au sol. Du reste, la température enregistrée sous le couvert végétal à 11h est d'environ 295 K, cette température correspond bien à la condition à la limite entrée à 22h au niveau du sol.

Le même phénomène a été constaté sur l'évolution temporelle de l'humidité sous le couvert végétal RHa3 pour les deux régimes d'irrigation (Fig. 88A, 88B). Ceci est bien une conséquence de l'erreur sur la simulation de l'évolution temporelle des températures

sous le couvert végétal Ta3. Une chute de température provoque en effet une augmentation de l'humidité relative sous le couvert végétal.

L'effet de la restriction hydrique est apparu clairement (Fig. 85 à 88 et Tab. 12) pour les températures de l'air dans le couvert végétal Ta2, les températures des feuilles Tl, ainsi que pour les humidités dans le couvert végétal. Cet effet a été moins marqué au niveau des températures et des humidités de l'air au-dessus du couvert végétal (Ta1, RHa1) et au-dessous du couvert végétal (Ta3, RHa3). La restriction hydrique s'est traduite par une augmentation des températures et une diminution des humidités relatives, par comparaison avec le cas de confort hydrique. Les Fig. 92 et 93 présentent les cartographies de la distribution des températures et des humidités à 12h pour les cas de confort et de restriction hydrique dans la serre d'étude. Ces cartographies montrent clairement l'effet de la restriction hydrique qui a été évoqué dans la partie précédente.

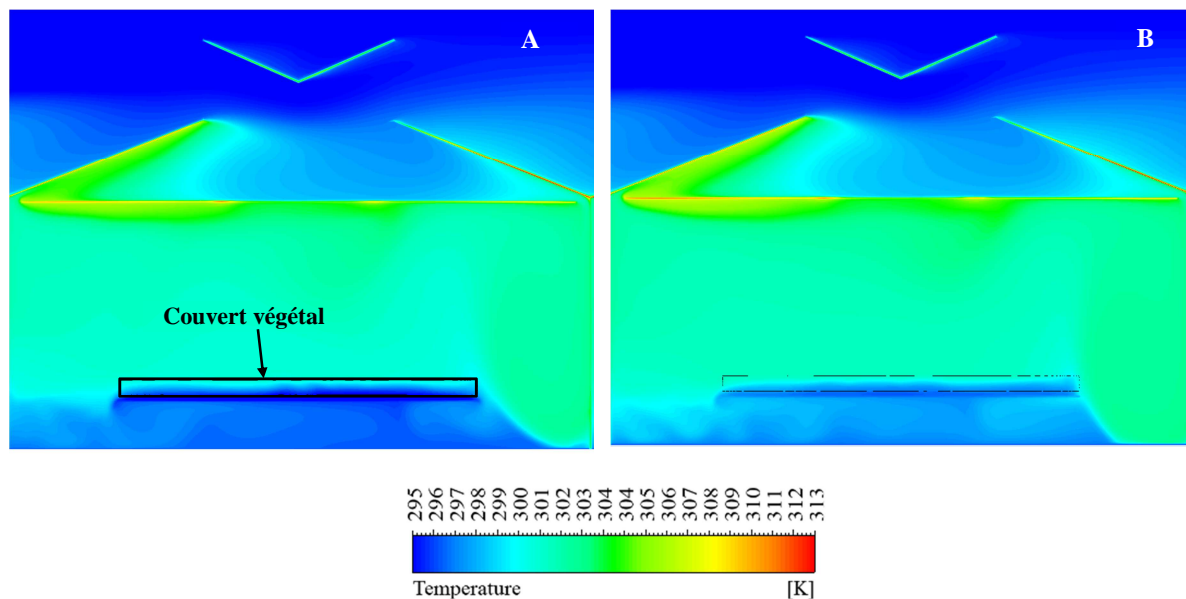


Figure 92 : Cartographies des températures dans la serre d'étude à 12h pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B).

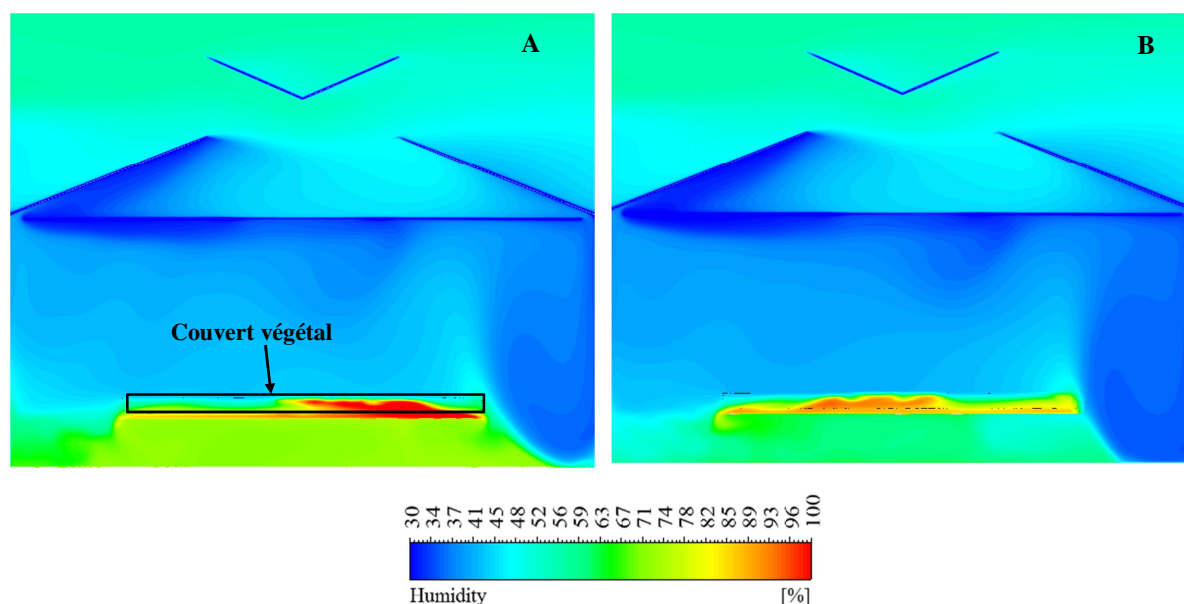


Figure 93 : Cartographies des humidités dans la serre d'étude à 12h pour les deux régimes d'irrigation : confort (A), restriction hydrique (B).

Cette influence du changement de régime est due à la diminution de la transpiration pour la restriction hydrique présentée en bas (Fig. 96). Comme nous l'avons expliqué pour les simulations dans le domaine limité, la diminution de la transpiration limite le refroidissement des feuilles et par la suite de l'air en contact. C'est pour cette raison que les températures des feuilles pour le cas de restriction hydrique sont globalement supérieures à la température de l'air en contact de 1.17 K en moyenne, alors que pour le cas de confort, les températures des feuilles sont inférieures à la température de l'air adjacent de 0.36 K en moyenne.

Les températures et les humidités à l'extérieur de la serre et la température de l'écran d'ombrage (Fig. 85, et 86) ne sont pas influencées par le changement de régime d'irrigation.

### b. Potentiel matriciel

Une comparaison a été effectuée entre les valeurs simulées et mesurées du potentiel matriciel du substrat. Elle est présentée sur la Fig. 94 après 5 jours d'interruption d'irrigation. Sans apports d'eau, la quantité de l'eau dans le substrat diminue au fur et à



mesure que l'eau est évacuée par transpiration, induisant par conséquent simultanément une diminution du potentiel matriciel dans le temps (Fig. 94). Le modèle simule globalement très bien l'évolution temporelle du potentiel matriciel avec  $RMSE=0.32$  kPa et  $r^2=0.99$ .

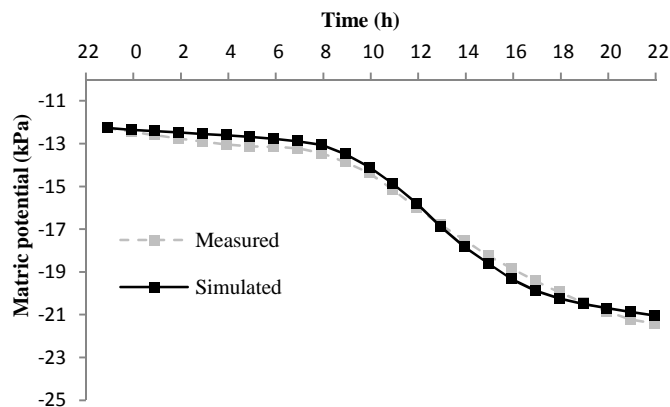


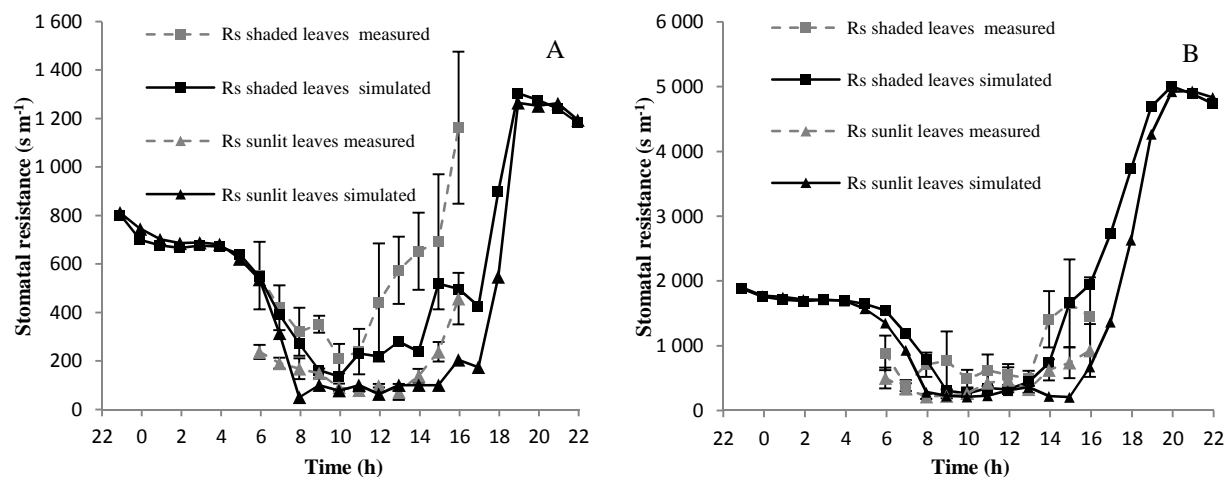
Figure 94 : Evolution temporelle de potentiel matriciel mesuré et simulé pour le cas de restriction hydrique : domaine complet.

### c. Résistance stomatique et transpiration

Des résultats acceptables ont été trouvés pour la simulation des résistances stomatiques pour les deux régimes d'irrigation (Fig. 95A, 95B). Dans le cas du confort  $RMSE= 273.97$  s  $m^{-1}$  et  $r^2=0.44$  pour les feuilles du bas, tandis que  $RMSE=133.58$  s  $m^{-1}$  et  $r^2=0.48$  pour les feuilles du haut. Dans le cas de restriction  $RMSE= 445.41$  s  $m^{-1}$  et  $r^2= 0.47$  pour les feuilles du bas tandis que  $RMSE= 389.12$  s  $m^{-1}$  et  $r^2= 0.45$  pour les feuilles du haut. Il en ressort donc que les  $R_s$  simulées sont un peu moins bien prédites que pour le domaine limité, nous attribuons ceci aux erreurs sur la simulation des humidités dans le couvert végétal.

Comme pour les simulations réalisées pour le domaine limité, une augmentation des résistances stomatiques a été aussi prédite pour le cas d'une restriction hydrique, comparé au cas du confort pour les feuilles du bas et du haut. Cette augmentation des résistances stomatiques dans le cas de restriction hydrique est liée à la diminution du potentiel matriciel du substrat. Pour le cas de confort hydrique des résistances stomatiques minimales simulée de  $R_s \text{ min} = 136$  s  $m^{-1}$ , et  $R_s \text{ min}=50$  s  $m^{-1}$

respectivement pour les feuilles du haut et du bas ont été calculées. Pour le cas de restrictions hydrique,  $R_s \text{ min} = 260 \text{ s m}^{-1}$ , et  $R_s \text{ min} = 205 \text{ s m}^{-1}$  pour les feuilles du haut et du bas respectivement.



**Figure 95 : Résistance stomatique mesurée et simulée pour les feuilles du bas et les feuilles du haut du couvert végétal : confort (A), restriction hydrique (B) : domaine complet.**

Les Fig. 96A, 96B pour les transpirations montrent des écarts très faibles entre les valeurs mesurées et simulées pour les deux régimes d'irrigation. Dans le cas du confort hydrique,  $RMSE=9.92 \text{ W m}^{-2}$ ,  $r^2 = 0.94$  et l'erreur sur le cumul de transpiration pour 24h était de 11.40 %. Dans le cas de la restriction hydrique,  $RMSE=3.50 \text{ W m}^{-2}$ ,  $r^2 = 0.98$  et l'erreur sur le cumul de transpiration pour 24h était de 5.12 %. Une comparaison des transpirations mesurées et simulées pour les deux régimes montre que la transpiration diminue pour le cas de la restriction hydrique. Cela a été expliqué précédemment : cette diminution tient principalement à l'augmentation des résistances stomatiques (i.e. fermeture progressive des stomates) lors d'une restriction hydrique.



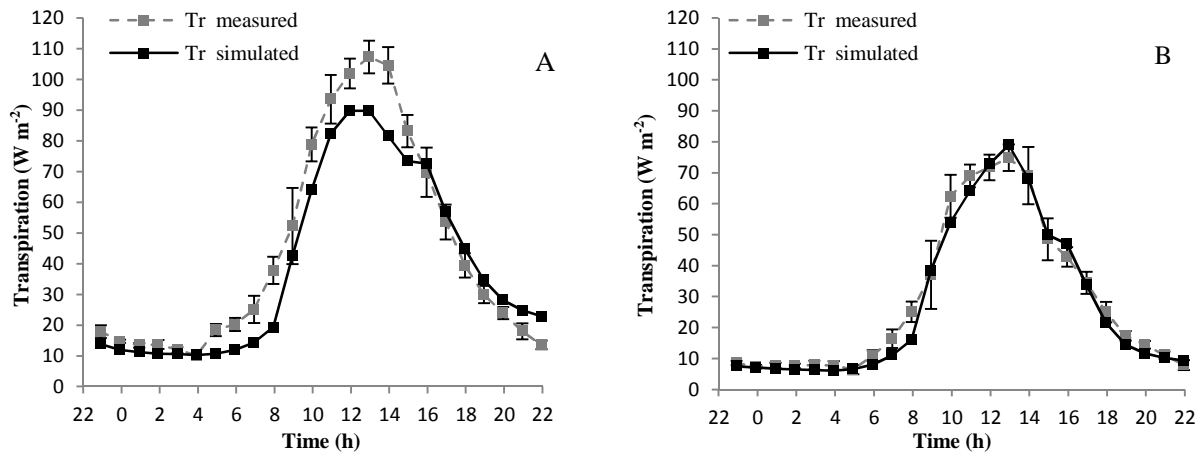


Figure 96 : Transpiration mesurée et simulée : confort (A), restriction hydrique (B).

#### 5.2.5.5 Test des différents scénarios d'irrigation

Une fois le modèle validé pour les deux régimes d'irrigation, différents scénarios ont été testés. Il s'agit des mêmes que ceux présentés dans le cas des simulations réalisées pour le domaine limité. L'idée à nouveau était d'évaluer l'impact d'une diminution des apports d'eau sur les variables (température et humidité de l'air, potentiel matriciel, résistance stomatique, transpiration) par rapport au cas de référence. Le Tab. 13 résume les résultats de simulation obtenus pour les différents scénarios d'irrigation.

Le Tab. 13 et les résultats des simulations (Fig. 97 à 102) montrent bien que quand la quantité d'eau dans le substrat diminue les résistances stomatiques augmentent et par conséquent, la transpiration diminue. La diminution de transpiration provoque une augmentation des températures des feuilles et de l'air en contact avec les feuilles. Cette diminution permet de réduire la quantité de vapeur d'eau dans la serre, d'où la diminution des humidités relatives dans et autour du couvert végétal. Ceci peut être un atout puisque l'on sait que la diminution de l'humidité avec la réduction des apports en eau peut aider à prévenir le développement de certaines maladies fongiques (e.g. le botrytis) (Kittas et Bartzanas, 2007). La température de l'écran d'ombrage reste presque inchangée jusqu'à une restriction hydrique sévère avec le scénario de 50% où une légère augmentation a été prédite par rapport au cas de référence (Fig. 97).

**Tableau 13: Résultats des simulations pour différents régimes d'irrigation**

Senario d'irrigation	Reference (100%)	90%	80%	70%	60%	50%
$D_{ref,j}$ (Ta1 [K])		0.16	0.20	0.35	0.61	1.33
$D_{ref,j}$ (Ta2 [K])		0.34	0.45	0.89	1.37	2.37
$D_{ref,j}$ (Ta3 [K])		0.47	0.24	0.47	0.52	1.08
$D_{ref,j}$ (T1 [K])		0.52	0.65	1.27	2.07	3.61
$D_{ref,j}$ (Tsc [K])		0.04	0.07	0.08	0.29	1.55
Moyenne T <sub>1</sub> -Ta <sub>2</sub> [K]	-0.10	0.01	0.02	0.22	0.52	0.92
$D_{ref,j}$ (RH <sub>a1</sub> [%])		1.12	1.29	1.87	3.72	5.89
$D_{ref,j}$ (RH <sub>a2</sub> [%])		3.37	4.74	7.58	12.42	18.05
$D_{ref,j}$ (RH <sub>a3</sub> [%])		3.30	1.84	4.61	7.32	10.69
Moyenne $\Delta\Psi_s$ [kPa]		-3.92	-8.94	-16.27	-27.97	-48.81
Rs minimale (feuilles de bas) [s m <sup>-1</sup> ]	96	221	193	384	549	1980
Rs minimale (feuilles de haut) [s m <sup>-1</sup> ]	180	128	131	220	283	668
$D_{ref,j}$ (Transpiration [W m <sup>-2</sup> ])		2.99	5.95	9.86	15.09	22.59
CTR [%]		93	86	75	61	44

Le Tab. 13 et les résultats des simulations (Fig. 97 à 102) montrent bien que quand la quantité d'eau dans le substrat diminue les résistances stomatiques augmentent et par conséquent, la transpiration diminue. La diminution de transpiration provoque une augmentation des températures des feuilles et de l'air en contact avec les feuilles. Cette diminution permet de réduire la quantité de vapeur d'eau dans la serre, d'où la diminution des humidités relatives dans et autour du couvert végétal. Ceci peut être un atout puisque l'on sait que la diminution de l'humidité avec la réduction des apports en eau peut aider à prévenir le développement de certaines maladies fongiques (e.g. le

botrytis) (Kittas et Bartzanas, 2007). La température de l'écran d'ombrage reste presque inchangée jusqu'à une restriction hydrique sévère avec le scénario de 50% où une légère augmentation a été prédite par rapport au cas de référence (Fig. 97).

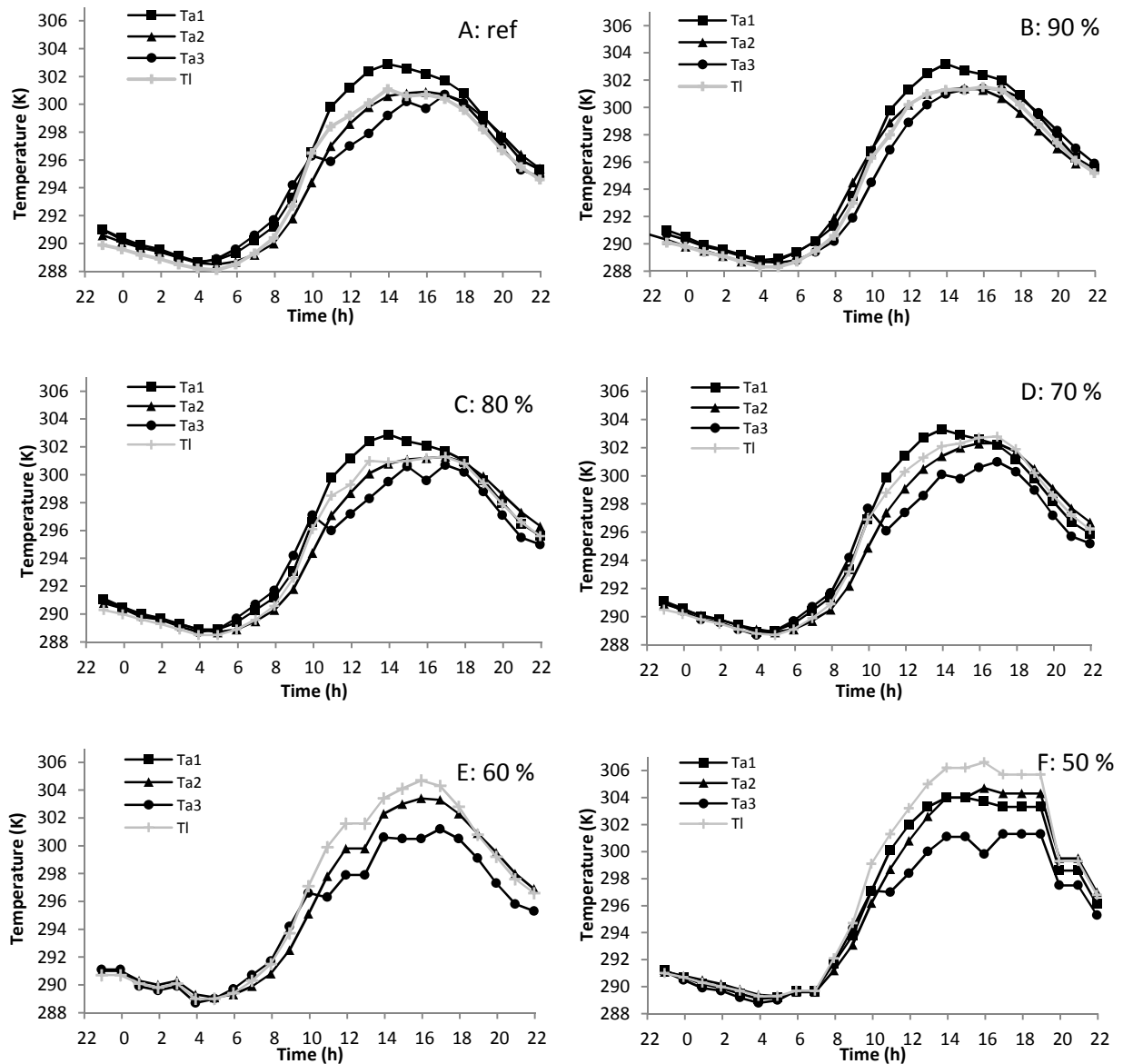


Figure 97 : Température simulée de l'air en différents points du domaine complet et des feuilles pour les différents régimes d'irrigation.

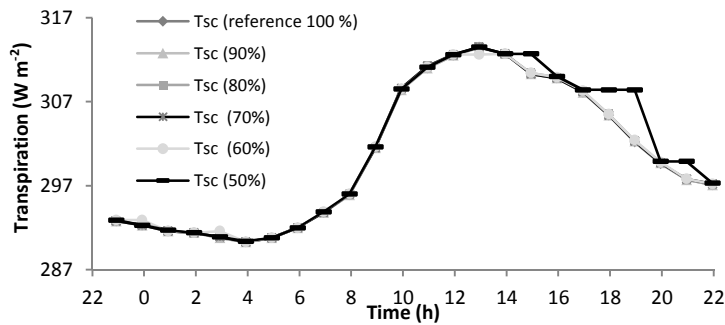


Figure 98 : Température simulée de l'écran d'ombrage pour les différents régimes d'irrigation : domaine complet.

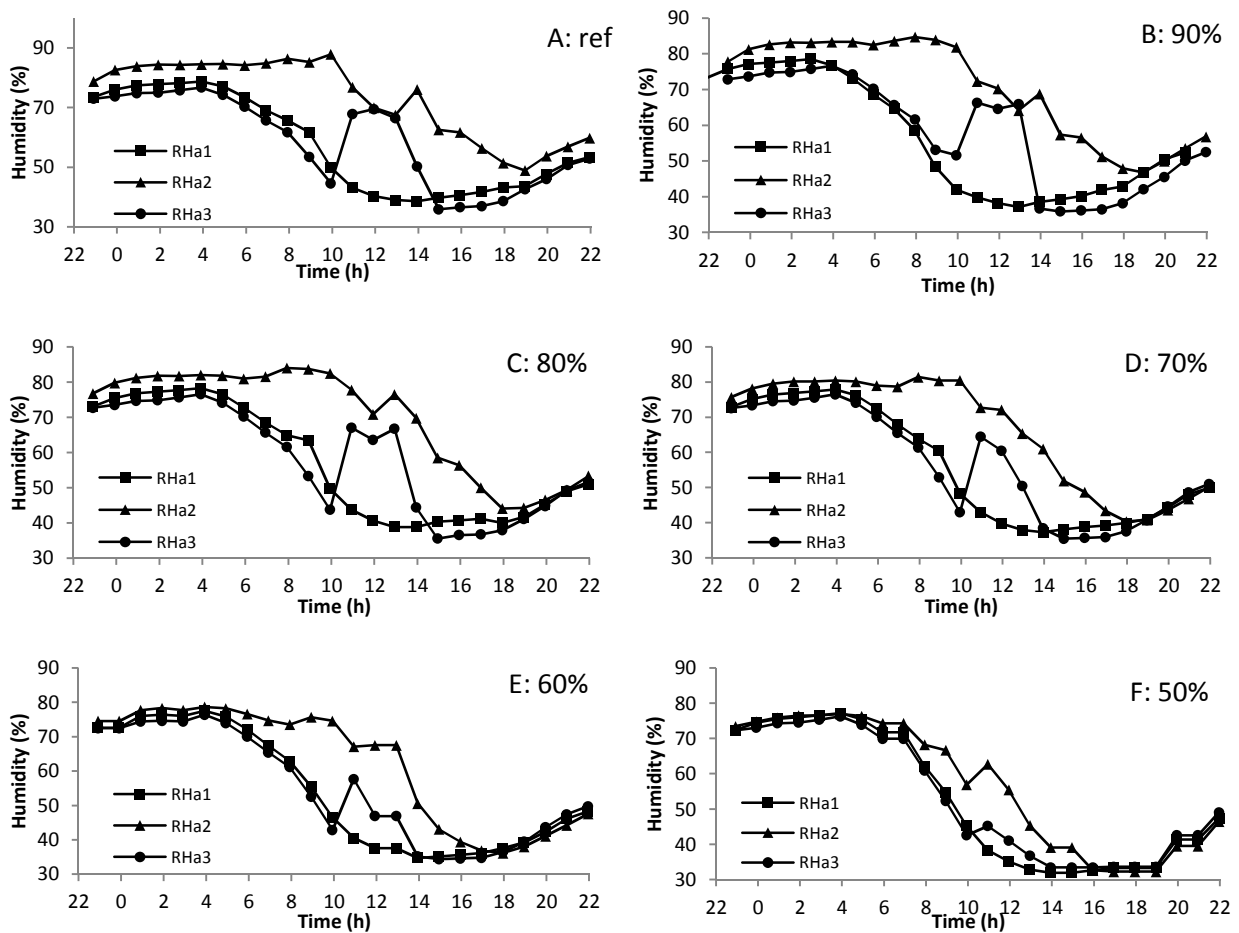


Figure 99 : Humidité relative simulée de l'air en différents points du domaine complet pour les différents régimes d'irrigation.

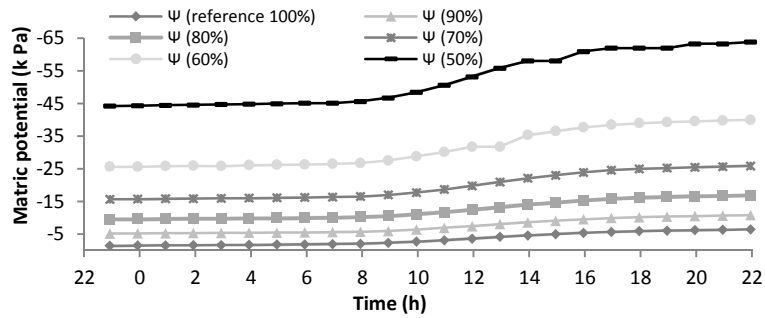


Figure 100 : Potentiel matriciel simulé pour les différents régimes d'irrigation.

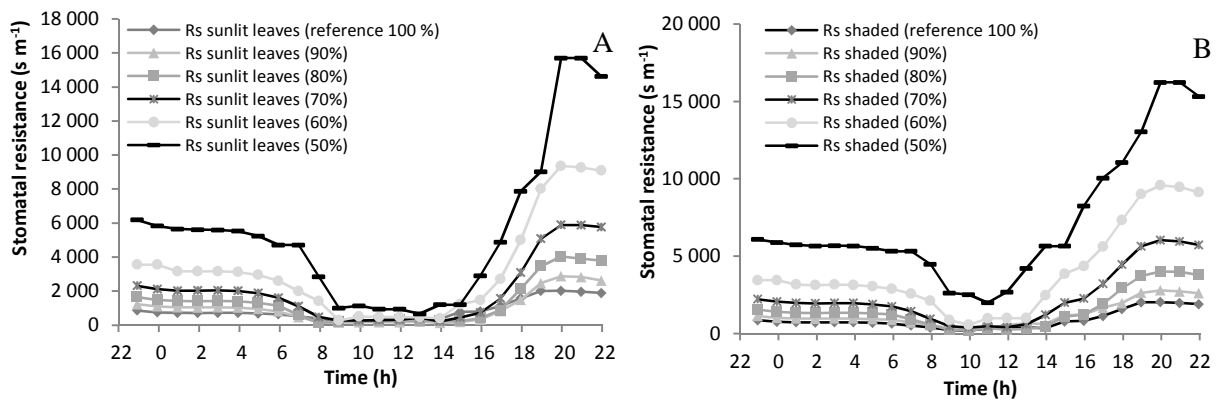


Figure 101 : Résistance stomatique simulée pour les feuilles du bas et les feuilles du haut du couvert végétal pour les différents régimes d'irrigation.

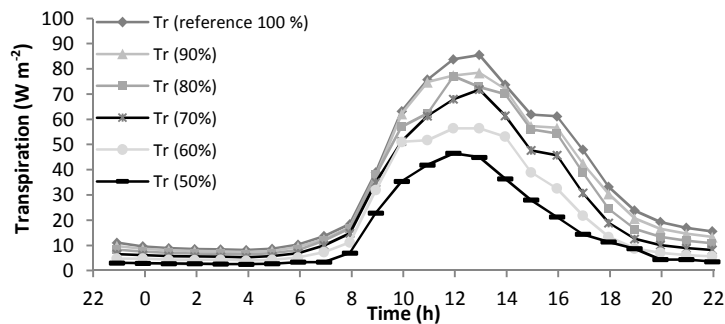


Figure 102 : Transpiration pour les différents régimes d'irrigation.

Pour le confort de la plante, il est préférable de garder la température des feuilles ( $T_l$ ) inférieure ou presque égale à la température de l'air en contact ( $T_{a2}$ ) (cf. article 2 :

Bouhoun Ali et al., 2016b). Le Tab. 13 montre que la température des feuilles reste presque égale à celle de l'air en contact jusqu'à une réduction de 70 % de l'irrigation. Ce résultat est légèrement différent de celui obtenu lors des simulations avec le domaine limité où le scénario de 80 % était le meilleur. La différence observée entre les simulations effectuées pour chacun des deux domaines de calcul tient probablement aux fortes vitesses à l'intérieur de la serre qui ont été considérées pour le domaine limité comparé au domaine complet. De fortes vitesses provoquent une diminution de l'humidité dans le couvert végétal, du fait que l'air dans le couvert végétal est renouvelé plus vite avec l'air extérieur ou autour du couvert végétal qui est moins humide. Cette diminution de l'humidité dans le couvert végétal provoque une augmentation du déficit de pression de vapeur, ce qui occasionne une augmentation de la transpiration. C'est certainement pour cette raison que des transpirations plus fortes ont été prédites pour le domaine limité, surtout pour le scénario de référence de 100%. Pour les simulations avec le domaine complet, le scénario de 70 % permet d'assurer le confort des plantes, mais aussi une réduction de la transpiration cumulée correspondant à 75 % de celle du scénario de référence.

Les Fig. 103 et 104 présentent les cartographies des températures et des humidités à 12h pour les trois scénarios 50, 70 et 100 %. Ces cartographies montrent une légère différence entre le scénario 70 % et le scénario de référence 100 %. Cette différence augmente avec l'augmentation de la restriction hydrique, et elle est particulièrement marquée dans le couvert végétal si l'on compare les scénarios 50% et 100%.

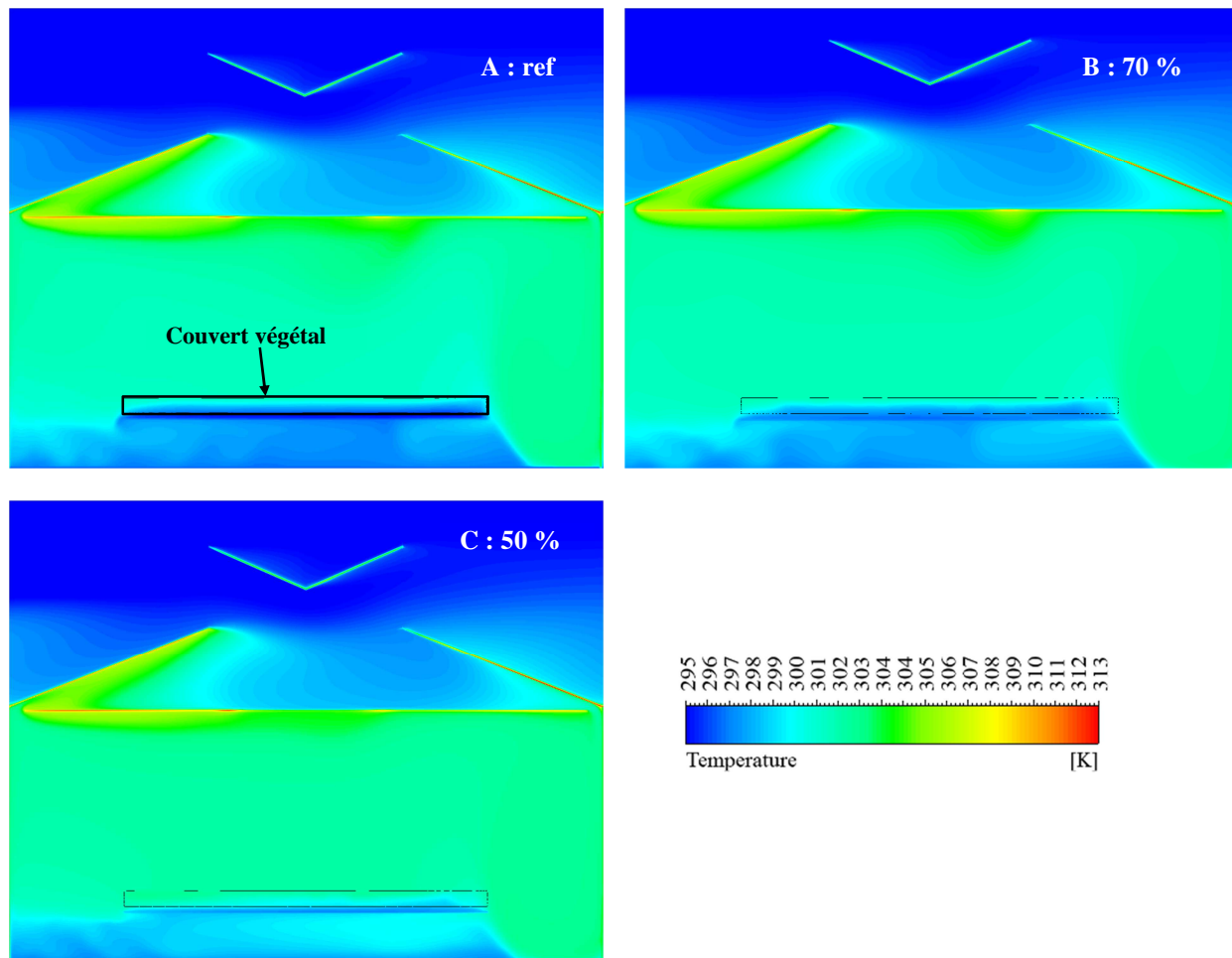
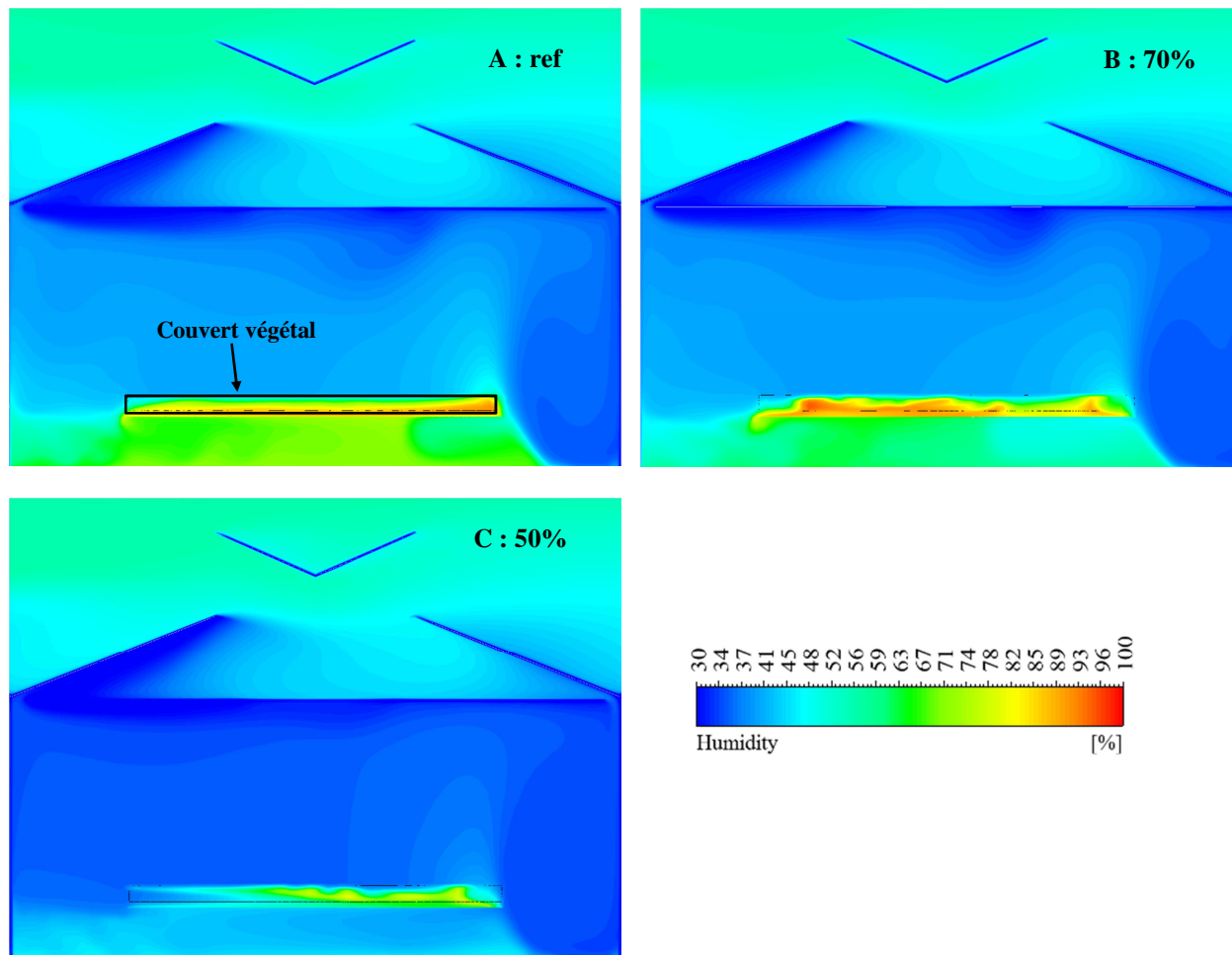


Figure 103 : Cartographies des températures dans la serre d'étude à 12h pour trois régimes d'irrigation : ref : 100 % (A), 70 % (B), et 50 % (C).



**Figure 104 : Cartographies des humidités dans la serre d'étude à 12h pour trois régimes d'irrigation : ref : 100 % (A), 70 % (B), et 50 % (C).**

La diminution de transpiration avec l'accroissement de la restriction hydrique explique les différences de distribution des variables climatiques entre les différents scénarios d'irrigation. Les cartographies de distribution de la transpiration dans le couvert végétal pour les trois régimes d'irrigation 50 %, 70 % et 100 % (Fig. 105A à 105C) à 12h illustrent clairement ce résultat. Le flux de transpiration diminue du haut vers le bas du couvert végétal, du fait que la résistance stomatique augmente du haut vers le bas du couvert végétal (principalement parce que le rayonnement diminue du haut vers le bas du couvert végétal).



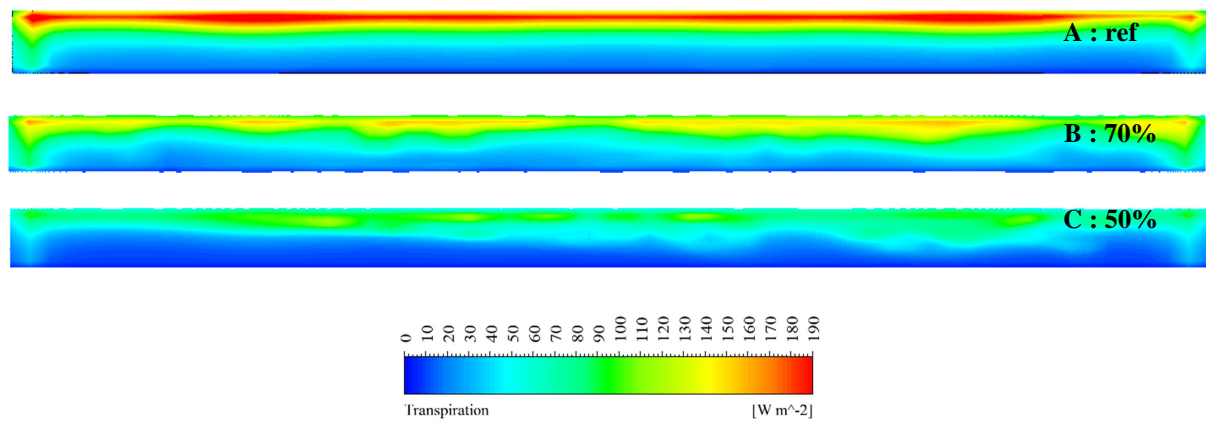


Figure 105 : Cartographies du flux de transpiration dans le couvert végétal à 12h pour trois régimes d'irrigation : ref : 100 % (A), 70 % (B), et 50 % (C).



**Article 1 : Stomatal resistance of New Guinea Impatiens pot plants. Part 1: Model development for well watered plants based on design of experiments.**

Publié dans le journal Biosystems Engineering

Bouhoun Ali H., Bournet P.E<sup>1</sup>., Cannavo P., Chantoiseau E., and Sourgues M.

EPHor, Environmental Physics and Horticulture Research Unit,

Agrocampus Ouest, Centre d'Angers, Institut National d'Horticulture et de Paysage

2, rue Le Nôtre, 49045 Angers, France; Tel.: +33 (0)2 41 22 55 04; Fax: +33 (0)2 41 22 55 53

<sup>1</sup> [Pierre-Emmanuel.Bournet@agrocampus-ouest.fr](mailto:Pierre-Emmanuel.Bournet@agrocampus-ouest.fr)

\* *Corresponding author*

### Abstract

In greenhouses, reducing water consumption by increasing water efficiency in order to fulfill the requirements of sustainability is a challenge. To reach this goal, we need to better understand the water demand of plants. Transpiration is the main mechanism involved in water transfer, which is controlled by stomatal resistance  $R_s$ . Predictive models can be used to assess this parameter. However, few models currently exist for greenhouse plants grown in pots. The aim of this work is to develop a model of  $R_s$  based on full factorial design (FFD), and to validate it for greenhouse plants at various growth stages.

FFD is based on an optimisation process to establish a polynomial relationship between  $R_s$  and radiation, humidity, and temperature. To establish the parameters of the model, a set of experiments was conducted inside a 10-m<sup>2</sup> growth chamber with New Guinea Impatiens grown in pots.  $R_s$  was measured with a porometer under nine climatic scenarios. Once the parameters were determined, the FFD model was validated against experimental data recorded from a greenhouse Impatiens crop, and compared with the Jarvis model. The slopes of the linear regression between measured  $R_s$  values and  $R_s$  values predicted from the FFD and Jarvis models varied within the range 0.89-1.12 for FFD and 0.45-0.54 for Jarvis.

FFD was therefore able to correctly simulate  $R_s$ . Its main advantage was to only require few data for its calibration, contrary to the Jarvis model. In a next step, it will be used to predict transpiration rates.

**Keywords:** New Guinea Impatiens, stomatal conductance, transpiration, full factorial design, Jarvis model.

### Nomenclature

DOE : design of experiments

FFD : full factorial design

$RG$  : global radiation, dimensionless [-]

$rg$  : global radiation [ $W\ m^{-2}$ ]

*RH* : relative humidity, dimensionless [-]  
*rh* : relative humidity [%]  
*Rs* : stomatal resistance [ $s\ m^{-1}$ ]  
*T* : temperature, dimensionless [-]  
*t* : temperature [ $^{\circ}C$ ]  
*VPD* : vapour pressure deficit [kPa]

### Highlights

- A new method based on Full Factorial Design to model stomatal resistance is proposed.
- FFD was implemented from data recorded with a porometer in a growth chamber.
- FFD was validated against data collected from an ornamental crop inside a greenhouse.
- Global radiation and humidity play a major role in stomatal resistance.
- The FFD model showed better performance to predict *Rs* than the Jarvis model.

### INTRODUCTION

Technologies applied to ornamental crops cultivated in pots under greenhouse conditions are developing rapidly, in parallel with the need to keep the horticulture sector competitive and cope with ecological requirements. In particular, attention should be paid to improving the management of water resources. Up to now, the question of an optimal control of irrigation for ornamental crops grown under greenhouses has not been investigated to the same extent as it has been for open field crops. The control of irrigation requires an understanding of water transfer processes from the substrate to the leaf outer cell layer through the stems. Transpiration, the last stage, occurs at the level of the leaves where water vapour is lost through the stomata. Plants regulate stomatal opening according to ambient conditions and water availability in the substrate (Damour, Simonneau, Cochard, & Urban, 2010). The rate of stomatal opening can be measured by means of a parameter called stomatal resistance. Thus, improving the accuracy of transpiration rate measurements requires accurate

estimation of stomatal resistance (Monteith & Unsworth, 2013). The ensuing challenge consists of developing a model that can accurately predict stomatal resistance, taking into account environmental conditions and plant growth stages. This can be done experimentally by focusing on direct measurements of stomatal resistance ( $R_s$ ).

$R_s$  has been extensively modelled in open field conditions over the past 50 years (Damour et al., 2010). Almost all models were derived either from the work of Jarvis (1976), who depicted  $R_s$  as the product of several functions of environmental variables, or from Ball et al. (1987) who linked  $R_s$  not only to the variation of environmental variables but also to the variation of physiological variables such as photosynthetic activity based on  $\text{CO}_2$  assimilation. Nevertheless, only few models exist for plants cultivated in containers under greenhouse conditions (Boulard, Baille, Mermie, & Villette, 1991; Li et al., 2012). Moreover, such models were established from data for stomatal resistance estimated from the inversion of the Penman-Monteith transpiration model (Baille, Baille, & Delmon, 1994a; Granier & Loustau, 1994). But such an estimation of  $R_s$  from indirect measurements of stomatal resistance may induce biases or errors. Only few recent works have used direct measurements of  $R_s$  collected with sensors like porometers or gas exchange analysers. Models of  $R_s$  calibrated from these measurements can potentially lead to better accuracy in the estimation of stomatal resistance.

The most commonly used model to predict  $R_s$  is the multiplicative model of Jarvis (Yu, Nakayama, Matsuoka, & Kon, 1998) for instance, considering several well watered crop species, established Jarvis model parameters for  $R_s$  expressed as the product of two functions of the global radiation and the vapour pressure deficit. Yet, predictions of  $R_s$  by the Jarvis model turned out to have limitations due to the fitting methods of the parameters. In most cases, each environmental function of the model is fitted using successive regression instead of the multiple regression where all the parameters of the model are found simultaneously. For example for the crop species where the global radiation plays a major role in the  $R_s$  response, the global radiation function are generally first determined. Then, the parameters of the other multiplicative functions (mainly VPD) are determined. Results showed that these other functions hardly influenced  $R_s$  predictions: in other words with this successive calibration procedure, global radiation alone explained most of stomatal regulation (90%)

(Demrati et al., 2007). This effect seems to be overestimated, even for plant species for which  $R_s$  is very sensitive to the global radiation. Consequently, the successive regression used to fit the Jarvis model parameters enhances the weight given to one climatic variable, and therefore expresses poorly the sensitivity of the plant species to the other environmental factors. Misson, Panek, & Goldstein (2004) used two different models, the Jarvis model and Ball et al. (1987) model, to express the diurnal sensitivity of the  $R_s$  response to the environmental factors for pine crop. They repeatedly confirmed that the Jarvis model showed little sensitivity to vapour pressure deficit, mostly due to the calibration procedure. However the Ball et al. (1987) model showed that the vapour pressure deficit (or relative humidity) could have a strong effect on  $R_s$ . In recent works, the use of multiple regression to fit all functions of the Jarvis model simultaneously (Irmak & Mutiibwa, 2009) provided better prediction of stomatal resistance.

A major limitation of the Jarvis model is the number of input data required to get acceptable accuracy, with  $R^2$  greater than 0.5. For example, in a similar study, Sourgnès et al. (2015) used more than 180  $R_s$  measurements to get a sufficiently large dataset to reach a correct prediction of  $R_s$ , while Wei, Liu, Xu, Cai, & Zhang (2013) used 992 measurements.

Given the above-mentioned limitations of the Jarvis approach, it appeared relevant to identify and test an alternative modelling approach. Therefore we investigated methods based on the design of experiments (DOE), developed by Box & Wilson (1951). DOE is a set of mathematical and statistical techniques that use a limited number of experiments to describe the relationships between a set of variables (Montgomery, 2008). The DOE method is frequently used in scientific investigations and industrial applications to reduce the time and cost of experiments. Many successful applications have been reported in physical and chemical sciences, and engineering (Montgomery, 2008). Moreover, DOE has also been applied in biosciences such as virology (Jaynes, Ding, Xu, Wong, & Ho, 2013) and biodiesel production (Vicente, Coteron, Martinez, & Aracil, 1998). Numerous designs are available for DOE in order to cover a large diversity of situations such as fractional or factorial, and two- or three-level designs.

The aim of this work is to develop a model based on DOE capable of estimating  $R_s$  accurately. For the purpose of this work, the full factorial design (FFD) method was implemented (Lundstedt et al., 1998). Three main factors impacting stomatal resistance were identified: global radiation, relative humidity, and air temperature. A set of scenarios was defined with fixed values of these factors. These scenarios were implemented inside a growth chamber under controlled climatic conditions, with New Guinea Impatiens as a plant model. This plant was chosen because of its high level of transpiration. Stomatal resistance measurements were made and used for calibrating the FFD model. The performance of the model was then evaluated on the basis of data collected inside a greenhouse.

## MATERIALS AND METHODS

### Experimental setup

The experiments took place in Angers (47° 28' N, 0° 33' E), in north-western France. A 10-m<sup>2</sup> (5 m x 2 m) growth chamber was used to collect the data to be used to calibrate  $R_s$  with the FFD model because it allows climatic factors (radiation, humidity, temperature) to be controlled within a range that replicates natural conditions. In contrast, under greenhouses all climatic factors vary at the same time making it difficult or impossible to implement the different climatic scenarios required by the FFD technique. Inside the growth chamber, four 16-week-old potted Impatiens plants (Novae-Guinea, cv. 'Sonic Scarlet'), initially grown under greenhouse conditions were used. The experiments inside the growth chamber were systematically performed in the morning to keep the same conditions for the different scenarios, and the plants were irrigated once before starting the experiment. The plants came from the greenhouse described below.

Validation experiments were conducted for 16 weeks inside a 100-m<sup>2</sup> (10 m x 10 m) greenhouse compartment from March 26<sup>th</sup> to July 20<sup>th</sup>, 2014, using well-watered plants. Young plants were potted inside 0.74-L containers (8.7 cm height) filled in with fine peat (5-20 mm particle size, 0.12 g cm<sup>-3</sup> bulk density). The plants were equally distributed over four shelves, representing a total area of 18 m<sup>2</sup>, and with an initial density of 28 plants per m<sup>2</sup>.



During the experiment, the canopy covered 100% of the shelves, so plant density was progressively decreased to favour growth (final density of 15 plants per m<sup>2</sup>). Plants were irrigated twice a day at the beginning (12 am, 6 am) and, because of higher temperatures and solar radiation, three times (12 am, 6 am, 2 pm) at the end of the experiment. Irrigation was conducted by flooding the shelves with a complete nutrient solution: 2N–3P–6K + 0.6MgO (9.6 mmol N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> L<sup>-1</sup>, 1.8 mmol PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> L<sup>-1</sup>, 6.1 mmol K L<sup>-1</sup>, and 0.9 mmol Mg L<sup>-1</sup>). In addition, a shade screen was used to avoid high temperatures and to ensure a homogeneous distribution of solar radiation. The roof vents were fully opened as soon as external temperatures exceeded 20°C. The night temperature set point was fixed at 16°C. Experiments began in the 10<sup>th</sup> week after transplanting (from June 2<sup>nd</sup>) to ensure sufficient growth of the plants. The FFD model was validated against data collected inside a greenhouse because the objective of this work was to develop an accurate model of the stomatal resistance under greenhouse conditions.

### Climate and stomatal resistance measurements

Inside the growth chamber, global radiation above the canopy (*rg*) was measured by using a radiometer (CNR1, Kipp&Zonen, Delft, The Netherlands, ±10 %). Temperature (*t*) and relative humidity (*rh*) of the air above the canopy were measured by shielded and ventilated sensors (Vaisala HMP45C, Campbell Scientific Ltd., Antony, France, accuracy ±0.1 °C for *t* and ±2 % for *rh*) (Figure 1.A). All these sensors were connected to a computer to record the values of the different factors simultaneously. Stomatal resistance of the upper leaves was measured using a porometer (AP4, Delta-T Device, United Kingdom). The accuracy of this device was ± 20 s m<sup>-1</sup> for *R<sub>s</sub>* in the [20-40 s m<sup>-1</sup>] range, and ±10 % in the [50-4000 s m<sup>-1</sup>] range. Five measurements were taken from green, young, healthy, fully expanded leaves in four pots for each scenario. Measurements were made after stabilising the chamber climate, i.e. one hour after changing the climatic set points.

For the other part of the experiment inside the greenhouse, global radiation, relative humidity and temperature were measured on one of the four shelves bearing the plants. The same sensors as the ones used inside the growth chamber (Figure 1.B) were used.

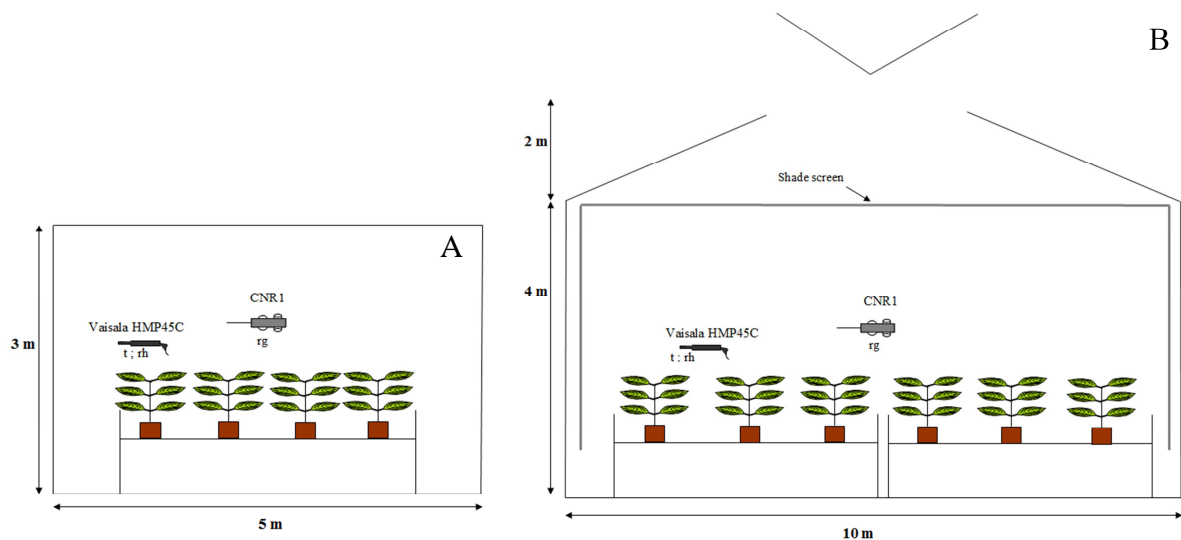


Figure 1: Sketch of the experimental device in a growth chamber (A) and in a greenhouse (B).

All the factors of the air above the canopy were recorded every 3 s and averaged online over 10 minutes periods with a data logger system (CR5000, Campbell Scientific Ltd., Antony, France).  $R_s$  was measured on the upper part of the canopy considering five sunlit leaves from different plants. Measurements were replicated every half hour from 8:00 am to 8:00 pm in weeks 10, 11, 12, 14, and 16 after repotting.

### Modelling methodology

FFD is a collection of mathematical and statistical techniques that uses a sequence of designed experiments to obtain an optimal response. In the present case, FFD was applied to estimate  $R_s$  variation according to variations of climatic variables, named factors hereafter. We identified three factors as playing a major role on stomatal resistance: global radiation, relative humidity, and temperature. Consequently, the  $2^3$  FFD (Montgomery, 2008) was chosen considering the time required to perform the corresponding experiment to get sufficient data to calibrate the model.

For each factor, the maximum and minimum values were fixed by considering the growth chamber operating limits together with real conditions observed inside the

greenhouse: global radiation varied within the [0-150] W m<sup>-2</sup> range, humidity within [55-75] %, and temperature within [15-26] °C. To implement the FFD technique, coded (dimensionless) variables were used. The corresponding coded variables varied within the [-1, 1] range, 0 being in the middle of the design.

The conversion of the original variables global radiation (*rg*), relative humidity (*rh*), and temperature (*t*) into coded variables (*RG*, *RH* and *T*, respectively) was given by the following formula (Eq. [1]):

$$A = \frac{a_0 - a}{step} \quad [142]$$

$$\text{with } a_0 = \frac{a_{max} + a_{min}}{2} \text{ and } step = \frac{a_{max} - a_{min}}{2}$$

where *A* is the coded variable corresponding to *a* as the original variable. In the present case, the corresponding coded variables were then given by:

$$RG = \frac{rg - 75}{75} \quad [143]$$

$$RH = \frac{rh - 65}{10} \quad [144]$$

$$T = \frac{t - 20.5}{5.5} \quad [145]$$

In this experimental design, each factor was applied at two levels, hence 8 experiments to perform. To take into account the non-linear relationships between the responses and the factors depicted in previous works conducted inside a greenhouse (Li et al., 2012), an intermediate point was added. The 9 treatment combinations or scenarios could be displayed geometrically as a cube, as shown in Figure 2.

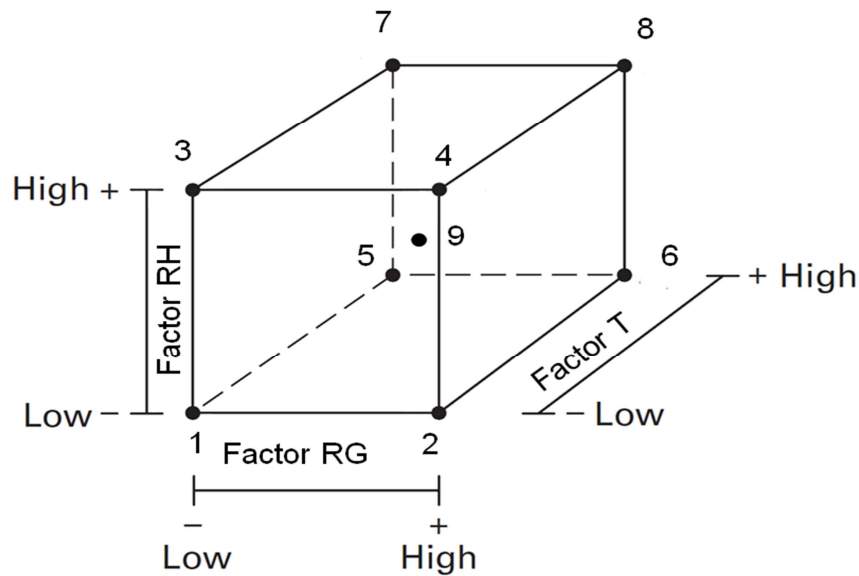


Figure 2: Geometric representation of the 9 scenarios, with the intermediate point located nearly at the center of the cube, for the three climatic factors: solar radiation  $RG$ , relative humidity  $RH$  and temperature  $T$ , “-” means the lowest value for each factor, and “+” means the highest value for each factor.

The effect of a factor was defined as the response caused by a change in the level of the factor, called a main or individual effect. In some experiments, the difference in the response of one factor between levels may not be the same at all the levels of the other factors. This was denoted as an interaction effect between factors, while the main effects and interaction effects were called the factorial effects.

A non-linear mathematical model was used (Eq. [5]) to estimate the response of  $Rs$  to the variations of the climatic factors. This model was derived from the original model of  $2^3$  FFD (Montgomery, 2008).

$$Rs = a_0 + a_1 RG + a_2 RH + a_3 T + a_{12} RG RH + a_{13} RG T + a_{23} RH T + a_{123} RG RH T \quad [146]$$

where  $RG$  is coded global radiation,  $RH$  coded relative humidity, and  $T$  coded air temperature. This polynomial model contains 8 unknown coefficients ( $a_0, a_1, a_2, a_3, a_{12}, a_{13}, a_{23}, a_{123}$ ) to be determined by experiments specified by the  $2^3$  FFD with one intermediate point, meaning

9 different scenarios as described in Table 1. To implement the FFD, the data from experiments conducted inside a growth chamber were used.

Table 1: Scenarios of the climatic factors global radiation  $rg$ , relative humidity  $rh$ , and temperature  $t$  implemented in the growth chamber and the matrix of main effects and interaction effects with dimensionless variables.

Scenario N°	$Rg$ ( $W\ m^{-2}$ )	$rh$ (%)	$t$ (°C)	$a_0$	$a_1$ ( $RG$ )	$a_2$ ( $RH$ )	$a_3$ ( $T$ )	$a_{12}$ ( $RG.RH$ )	$a_{13}$ ( $RG.T$ )	$a_{23}$ ( $RH.T$ )	$a_{123}$ ( $RG.RH.T$ )
1	0	55	15	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1
2	150	55	15	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1
3	0	75	15	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1
4	150	75	15	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
5	0	55	26	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1
6	150	55	26	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1
7	0	75	26	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1
8	150	75	26	1	1	1	1	1	1	1	1
9	45	60	22	1	-0.4	-0.5	0.27	0.2	-0.11	-0.14	0.05

The polynomial regression model (Eq. [5]) was expressed in matrix form, in terms of a design matrix  $x$  in coded variable (i.e. a matrix of the main or individual effects and their interaction given in Table 1), a response vector  $\vec{y}$  (corresponding to the  $R_s$  vector provided in Table 2), and a parameter vector  $\vec{a}$ . Then, the model was written according to Eq. [6]:

$$\vec{a} = (x^T x)^{-1} x^T \vec{y} \quad [147]$$

where  $x^T$  is the transpose of the  $x$  matrix. The resolution of this system made it possible to get the different parameters  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_{12}, a_{13}, a_{23}, a_{123}$  of the FFD model.

Table 2: Measured stomatal resistance values for each scenario, and corresponding standard deviations.

Scenario N°	Mean $R_s$ values ( $s\ m^{-1}$ )	Standard deviations ( $s\ m^{-1}$ ) (n=5)
1	1434	315
2	267	36
3	848	33
4	254	31
5	1410	381
6	91	10
7	885	189
8	102	38
9	265	18

### Statistical analysis

The coefficient of determination ( $r^2$ ) and the root mean square error (RMSE) were calculated to evaluate the accuracy of the fit between measured  $R_s$  values and simulated ones obtained from the FFD model. To validate this model with data collected inside the greenhouse, the same statistical treatment was used. Moreover, we evaluated the performance of FFD by comparing measured and modelled  $R_s$  values to the first bisector.

The t-statistic test was implemented to determine the significance or the weight of contribution of different parameters  $a_i$  in the FFD model. Significance was assessed in each case using P-values. The limit of significance was fixed at 5%.

### Stomatal resistance modelling under growth chamber conditions

The means and standard deviations of stomatal resistance for each scenario are shown in Table 2. After evaluating all scenarios, we identified an  $R_s$  range between 91 and 1434  $s\ m^{-1}$ . With indirect measurements, Kichah, Bournet, Migeon, & Boulard (2012) found similar values of  $R_s$  (i. e. within the [250-1600]  $s\ m^{-1}$  range) for the same plant. According to Baille, et al., (1994b), at least during day time conditions for high radiation, stomatal resistance is low, meaning a high rate of transpiration. On the contrary, when radiation is low,  $R_s$

increases. These results were confirmed, as well as the fact that the effect of radiation on  $R_s$  was the most significant one. For instance, a simple comparison between scenarios 2 ( $150 \text{ W m}^{-2}$ , 55 %,  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) and 1 ( $0 \text{ W m}^{-2}$ , 55 %,  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) showed that  $R_s$  increased from 267 to  $1410 \text{ s m}^{-1}$  only in response to a variation of  $rg$ . Under night time conditions (i.e. for zero radiation), the effect of humidity on  $R_s$  appeared to be prevalent, as shown by comparing scenarios 1 ( $0 \text{ W m}^{-2}$ , 55 %,  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ) and 3 ( $0 \text{ W m}^{-2}$ , 75 %,  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ ), where  $R_s$  decreased from 1434 to  $848 \text{ s m}^{-1}$  when  $rh$  increased. Damour et al. (2010) reported the same effect of humidity on the  $R_s$  response for all studied crop species are sensitive to the humidity. Based on the data provided in Table 2 and the design matrix described before (Table 1), the DOE model (Eq. [5]) was implemented to establish an expression of  $R_s$  as a function of the climatic factors. The parameters of the FFD model (Eq. [6]) were estimated, leading to Eq. [7]:

$$R_s = 590 - 454 RG - 104 RH - 58 T + 124 RG RH - 35 RG T + 20 RH T - 8 RG RH T \quad [148]$$

where  $RG$ ,  $RH$ , and  $T$  are given by Eq. [2],[3] and [4], respectively. The regression equation contained the three climatic factors and their interactions. It confirmed that  $RG$  was the predominant factor with the highest coefficient in the (Eq. [7]) model, while  $RH$  and  $T$  appeared to have a lesser influence.

The accuracy of the (Eq. [7]) model was estimated from  $r^2 = 0.83$  and  $RMSE = 207 \text{ s m}^{-1}$ . In a second step, the model was improved to increase its accuracy. The first modification was to consider that the highest order multiplicative interaction term ( $RG \cdot RH \cdot T$ ) was negligible, as in the study of Myers (1995), and we confirmed that the lowest coefficient was identified for the same term in Eq. [7]. This term was replaced by  $RG^2$  because  $RG$  was the most important factor impacting  $R_s$ . The second modification was suggested after several sensitivity tests showing that the intercept at a value of  $590 \text{ s m}^{-1}$  would be better replaced by an  $RG^3$  term.. Taking account of these modifications in the FFD original model (Eq. [7]), a new model was obtained (Eq. [8]). The procedure to determine the parameters of this model was the same as that followed for the parameters of Eq. [7].

$$R_s = -115 RG - 139 RH - 39 T + 139 RG RH + 43 RG T + 11 RH T + 661 RG^2 - 368 RG^3 \quad [149]$$

In the present case, a coefficient of determination  $r^2=0.99$  and an RMSE = 19 s m<sup>-1</sup> were obtained, far better than the model given by Eq. [7], and showing the capacity to correctly predict stomatal resistance in each scenario.

### RESULTS

#### Tests of significance of individual (main) and combined factors of the FFD model

The t-statistic test results provided in Figure 3 for Eq. [8] reveal a significant impact of two main factors, namely global radiation and relative humidity, with p-values < 0.05 for each factor. Conversely, temperature played a non-significant role on stomatal resistance.

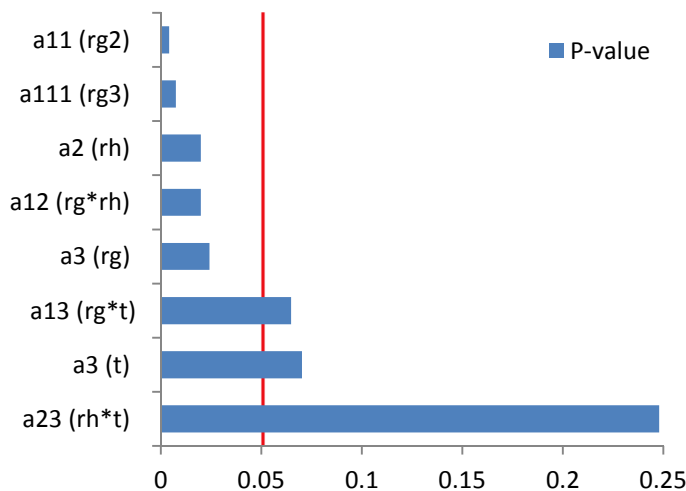


Figure 3: Histogram of T-statistic tests and corresponding P-values. The vertical line corresponds to the significance threshold : 0.05.

Misson et al. (2004) also report that temperature does not really impact  $R_s$ . Concerning the interaction effects between factors, the same p-value threshold of significance was retained for the analysis. Results show the significance of the interaction between radiation and humidity  $RG.RH$ , while the two  $RG.T$  and  $RH.T$  interactions only brought a negligible contribution to stomatal resistance. This t-statistic test therefore shows that  $RG$  was the most important factor, followed by  $RH$  and the interaction between these two factors. Conversely,



none of the terms containing temperature played a significant role. The model given by Eq. [8] was then simplified according to Eq. [9]:

$$R_s = -115 R_G - 139 R_H + 139 R_G R_H + 661 R_G^2 - 368 R_G^3 \quad [150]$$

Once the parameters of the polynomial (Eq. [9]) FFD model were fitted and discussed, validation of the model was undertaken against data collected at different growth stages (14 and 16 weeks after planting) from Impatiens plants grown under a greenhouse. The climatic factors  $rg$ ,  $rh$  and  $t$  measured from the air just above the canopy are presented in Figure 4 and 5 for weeks 14 and 16, respectively.

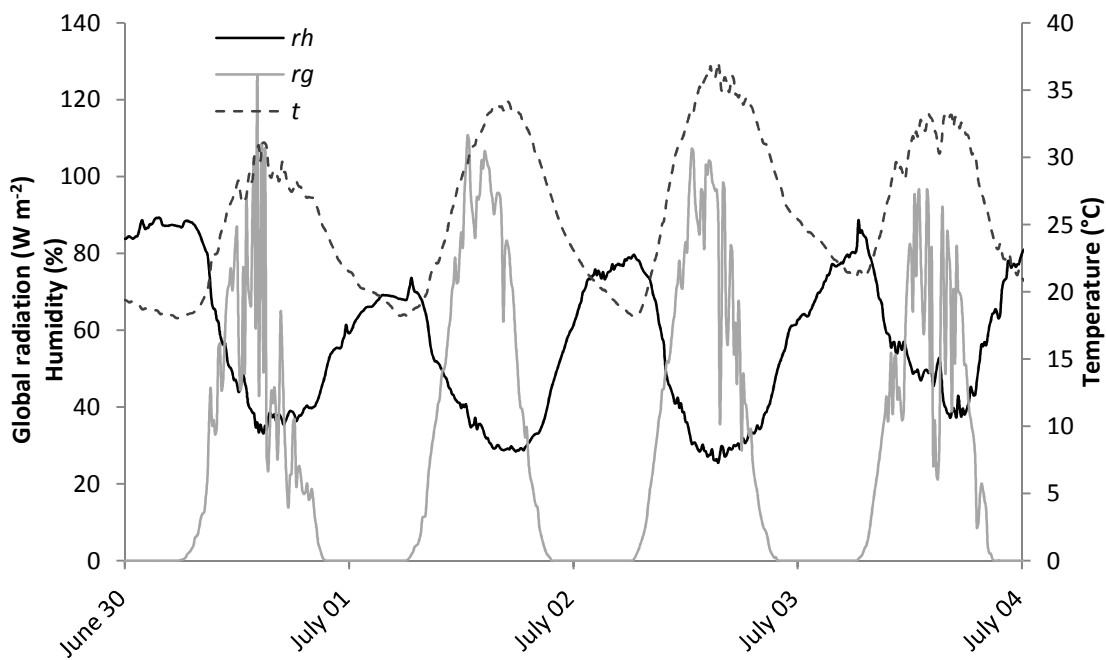


Figure 4: Evolution over time of the climatic factors: solar radiation  $rg$ , relative humidity  $rh$ , and temperature  $t$  in week 14.

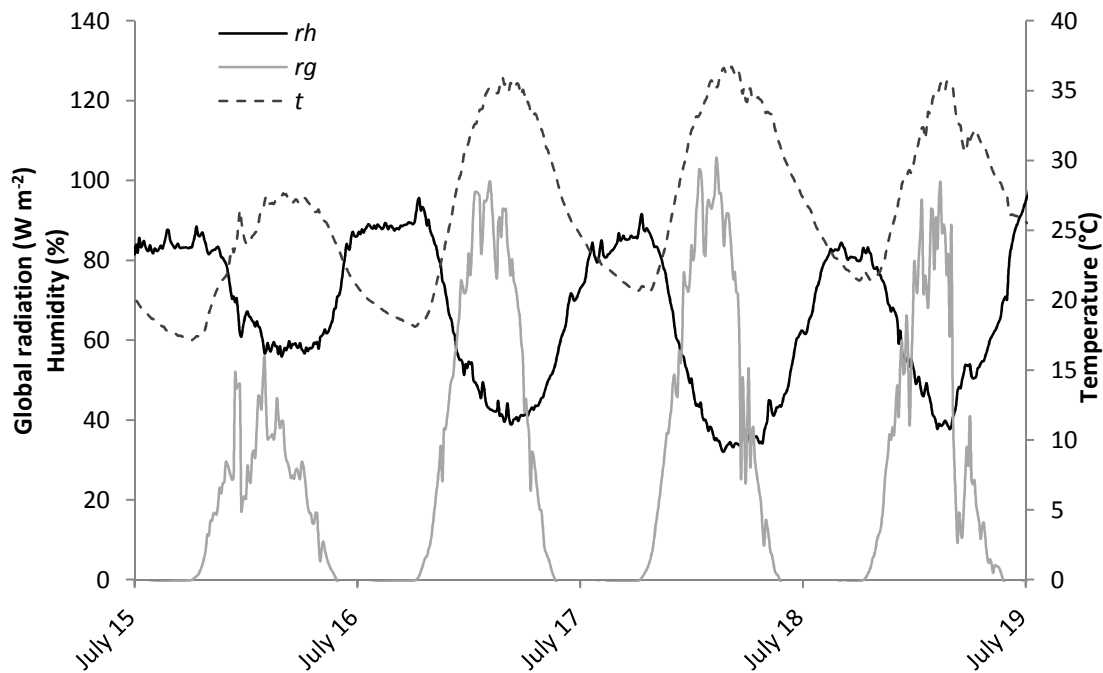


Figure 5: Evolution over time of the climatic factors solar radiation  $rg$ , relative humidity  $rh$ , and temperature  $t$  in week 16.

Measurements show that the air temperature remained within the  $[17.6 - 37]$  °C range, relative humidity within  $[32 - 87]$  %, and global radiation within  $[0 - 115]$   $W m^{-2}$ . Although solar radiation remained well within the range of the experiments conducted inside the growth chamber to determine the stomatal resistance model, both temperature and air relative humidity sometimes exceeded the investigated values (air temperature above 26°C, relative humidity below 55% and above 75%). Applying the FFD model for these values therefore involves an extrapolation of the model out of the range of the factors for which it was established. Such an extrapolation may thus induce discrepancies in the results. However, extrapolation will only occur on rare occasions in the present case, and, as shown before, radiation  $rg$  remained the prevailing factor in the response of the model while temperature played a minor role. Consequently, we may assume that the (Eq. [9]) FFD model was adapted to the present case.

The results of measured and predicted  $R_s$  from Eq. [9] in weeks 14 and 16 are presented in Figure 6 and 7, respectively.

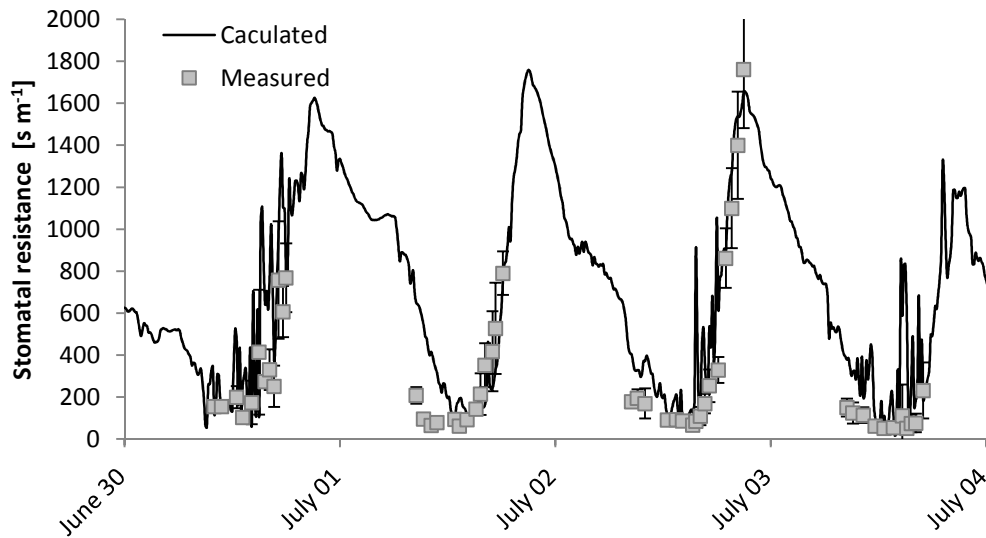


Figure 6: Validation of the FFD model against data collected under the greenhouse 14 weeks after planting with  $r^2=0.69$  and  $RMSE=249 \text{ s m}^{-1}$ .

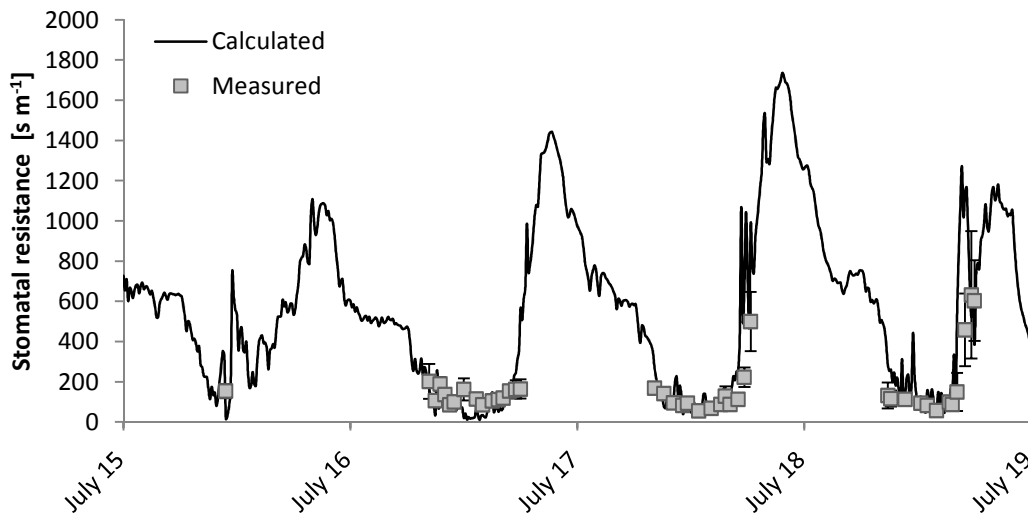


Figure 7: Validation of the FFD model against data collected under the greenhouse 16 weeks after planting with  $r^2=0.50$  and  $RMSE=186 \text{ s m}^{-1}$ .

They confirm that the FFD model predicted stomatal resistance with acceptable accuracy, with  $r^2 = 0.69$  and  $RMSE = 249 \text{ s m}^{-1}$  for week 14, and  $r^2 = 0.50$  and  $RMSE = 186 \text{ s m}^{-1}$  for week 16, when  $R_s$  ranged between 50 and 2000  $\text{s m}^{-1}$ . Although very few values of  $R_s$  were available during the night, the model globally showed its ability to correctly predict stomatal resistance variation between day and night (Figure 6 in particular). It may be noticed that during the night, i.e. for low levels of radiation, a large variability of  $R_s$  was measured from one leaf to another. This variability generated high values of the standard deviation. The model also demonstrated its capacity to correctly predict the low values of  $R_s$  in the day time, which is essential because these low values of  $R_s$  correspond to the highest transpiration rate of the plants. At that time, the variability of  $R_s$ , from one leaf to another was quite small, and predictions of the model were better than at night. This point is essential if this model is used to estimate the transpiration of the crop, which becomes negligible for high values of  $R_s$ . Consequently, the poor accuracy of the  $R_s$  model for high values will hardly impact transpiration.

### DISCUSSION

Generally speaking, the design of experiments is a technique used to study the impact of different factors on the response of a system. It is a powerful technique for optimizing the number of experiments needed to model the response of a system as a function of different factors. In the present study, a  $2^3$  FFD with one intermediate point was used to model  $R_s$ , meaning that only 9 scenarios were enough to fit the model, while far more scenarios would have been required to implement other methods such as the Jarvis or the Ball models. The use of  $R_g^2$  and  $R_g^3$  terms in the original FFD model (Eq. [7]), was retained to improve the accuracy of the model and account for the high dependence of  $R_s$  on the solar radiation. The validation of FFD against data from the greenhouse provided acceptable results, although the model was initially fitted based on limited data. These data were chosen and optimised with FFD to provide information about how changes in the factors affected  $R_s$ .

### Calibration of the Jarvis model

To check the accuracy of the FFD model, its performance was compared with the performance of the Jarvis model, i.e. the most commonly used model to predict  $R_s$ . Table 3 provides an overview of several works based on the multiplicative Jarvis model to estimate  $R_s$ .

Table 3: Major characteristics of Jarvis models applied to vegetables and ornamental crops grown in greenhouses and open field.

Authors, Year	Type of plant	Type of culture/ Water condition	Type of data used for $R_s$	Factors used	Calibration method	Data used for calibration (n)	Precision of validation ( $r^2$ )
(Stewart, 1988)	Pine	Open field/ Well watered and restriction	Indirect	Global radiation, specific humidity deficit, temperature, soil moisture deficit	Not identified	Not identified	0.38
(Boulard et al., 1991)	Tomato	Greenhouse/ Well watered	Direct	Global Radiation, vapour pressure deficit, temperature	Successive regression	Not identified	Not identified
(Baille et al., 1994a)	Rose	Greenhouse/ Well watered	Indirect	Global radiation, vapour pressure deficit	Multiple regression	142	Not identified
(Granier & Loustau, 1994)	Pine	Open field/ Well watered and restriction	Indirect	Global radiation, specific humidity deficit, soil moisture deficit	Multiple regression	578	0.49
(Demrati et al., 2007)	Banana	Greenhouse/ Well watered	Direct	Global Radiation, vapour pressure deficit	Successive regression	40	Not identified
(Irmak & Mutibwa, 2009)	Maize	Open field/ Well watered	Direct	Photosynthetically active radiation, vapour pressure deficit	Not identified	Not identified	Not identified
(Li et al., 2012)	Cucumber, chrysanthemum, tulip, lily	Greenhouse/ Well watered and restriction	Direct	Photosynthetically active radiation, vapour pressure deficit, CO <sub>2</sub> concentration	Multiple regression	[60-240]	0.61-0.78
(Wei et al., 2013)	Wheat	Open field/ Well watered	Direct	Photosynthetically active radiation, vapour pressure deficit	Not identified	922	0.47

To calibrate their model, authors considered sets of data containing between 40 and 922 measurements, depending on the expected degree of robustness. The model was also

improved by using a multiple regression to fit the different functions simultaneously instead of conducting successive regression, (e.g. Boulard et al., 1991) did. Finally, the use of direct measurements of stomatal resistance to fit the Jarvis model ((Irmak & Mutiibwa, 2009); (Wei et al., 2013) provided more credibility to the model than the use of indirect measurements through the inversion of the Penman Monteith transpiration model (Stewart, 1988; Baille et al., 1994a; Granier & Loustau, 1994). The main drawback of the Jarvis model is the large amount of data required for calibration; from this point of view, the FFD model offers an interesting alternative to the Jarvis model because it can be calibrated from a very limited amount of data. However, the FFD model is inherently limited by the range of climatic factors which could be replicated in growth chambers, which limits its field of application. Another point is that the Jarvis model requires the knowledge of several thresholds characteristics of the leaf  $R_s$  (Boulard et al., 1991) such as the minimal stomatal resistance and the maximal vapour pressure deficit, which is not the case for the FFD model.

Sourgnès et al. (2015) determined the parameters of the Jarvis model for an Impatiens crop almost 20 years after Baille et al. (1994b). It must be stated however that the calibration of the Jarvis model by Baille et al. (1994b) study was based on indirect measurements of  $R_s$  (i.e. from the evapotranspiration), and the use of successive regression to estimate the parameters of the model. In contrast, Sourgnès et al. (2015), conducted direct measurements of  $R_s$  with a porometer and used multiple regression to implement the Jarvis model. For that reason, the work of Sourgnès et al. (2015) may be viewed as an improvement of the protocol implemented in the pioneering work of Baille et al. (1994b) on Impatiens crop. In this work, the Jarvis model was expressed as the minimal stomatal resistance multiplied by a global radiation function and a vapour pressure deficit function. The vapour pressure deficit was deduced from measurements of relative humidity and temperature above the canopy. To assess the robustness of the Jarvis model, the above-mentioned functions were calibrated from a multiple regression. First, the parameters of the model were established considering three independent datasets (weeks 10, 11, and 12 after planting). For each week, strong variability of the coefficients was established, showing a weak robustness of the model. For that reason, in a second stage, the parameters were assessed from all the data collected over 3 weeks (10,

11, and 12 after planting). 180 direct measurements of  $R_s$  for sunlit leaves with a porometer were used, leading to the calibrated model given by Eq. [10]:

$$R_s = 48.1 \frac{(316.67+rg)}{8.87+rg} (1 - 0.15(VPD - 2.84)^2) \quad [151]$$

Acceptable results were obtained when the Eq. [10] model was validated with data from weeks 14 and 16 (Figure 8 and 9), with  $r^2 = 0.65$  and  $RMSE = 242 \text{ s m}^{-1}$  in week 14 and  $r^2 = 0.47$  and  $RMSE = 122 \text{ s m}^{-1}$  in week 16, and  $R_s$  in the  $[50 - 2000] \text{ s m}^{-1}$  range.

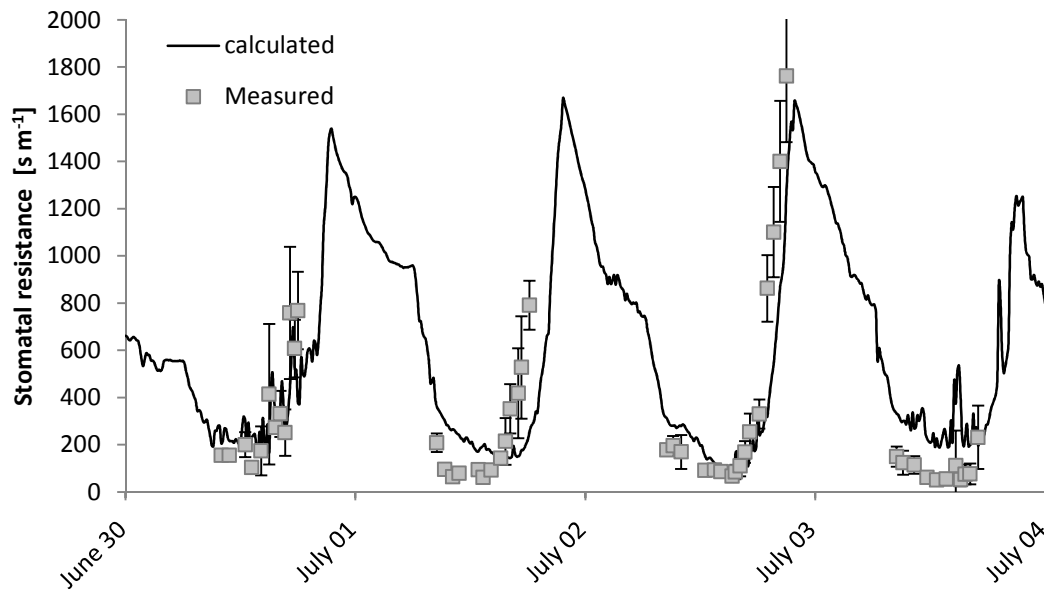


Figure 8: Validation of the Jarvis model against data collected under the greenhouse 14 weeks after planting with  $r^2=0.65$  and  $RMSE=242 \text{ s m}^{-1}$ .

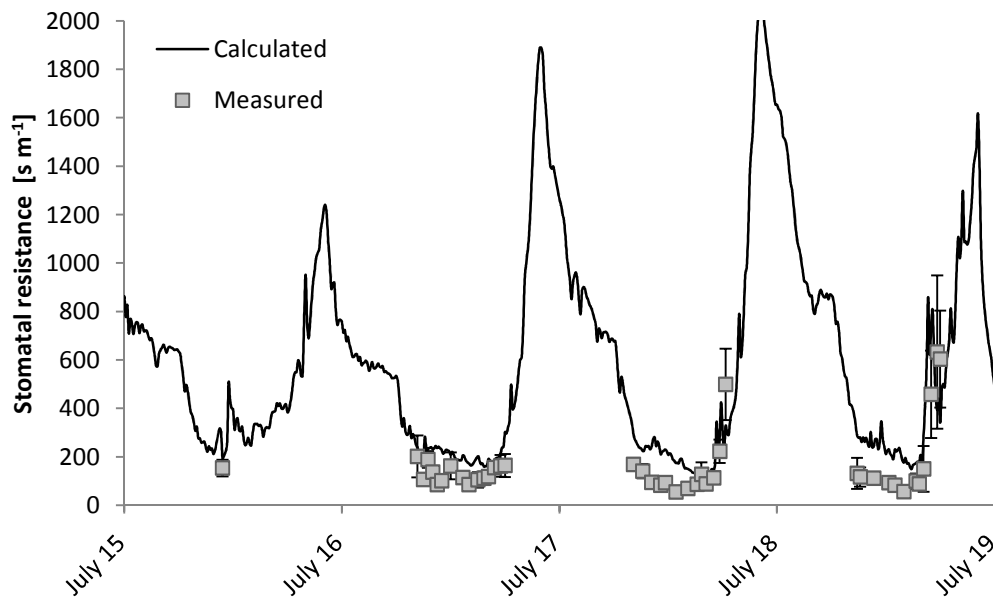


Figure 9: Validation of the Jarvis model against data collected under the greenhouse 16 weeks after planting with  $r^2=0.47$  and  $RMSE=122 \text{ s m}^{-1}$ .

Once the two FFD and Jarvis models were calibrated, the data from weeks 14 and 16 were compared with the corresponding estimations to define which model was more accurate to estimate stomatal resistance.

### Comparison of the performances of the FFD and Jarvis models

Before starting a comparison of the two models, differences between the two approaches should be pointed out. Beyond the techniques used to implement the models, the main difference lies in the climatic factors used in each model. Global radiation, relative humidity and air temperature are considered as the major factors affecting  $R_s$  in FFD. In the Jarvis model, global radiation is also used, but the air to air vapour pressure deficit is considered instead of temperature and relative humidity. However, the vapour pressure deficit is itself a function of temperature and relative humidity. The choice of humidity and temperature in the FFD was made for practical reasons, given that the growth chamber controls allow setting up these two climatic factors and not the vapor pressure deficit.



Based on the  $r^2$  and RMSEs calculated for weeks 14 and 16 (Figure 6, 7, 8, and 9), a good agreement was generally obtained between measured  $R_s$  and  $R_s$  predicted by both models, with a slight advantage for the FFD model. The Jarvis model exhibited some discrepancies in the prediction of  $R_s$  by overestimating it in the morning and underestimating in the afternoon (Figure 8 and 9). This may be due to the arbitrary form of the different functions of the climatic variables used in the Jarvis model. In their study, Sourgnès et al. (2015) tested a set of functions available in the literature to express the impact of climatic factors on  $R_s$  and retained the best functions. Still, their results stress the limitations of the Jarvis model; better agreement was reached with the FFD model based on a polynomial function of the climatic factors.

The performances of the two models were also assessed through a linear regression operated between measured and estimated  $R_s$  values in weeks 14 and 16 (Figure 10 and 11).

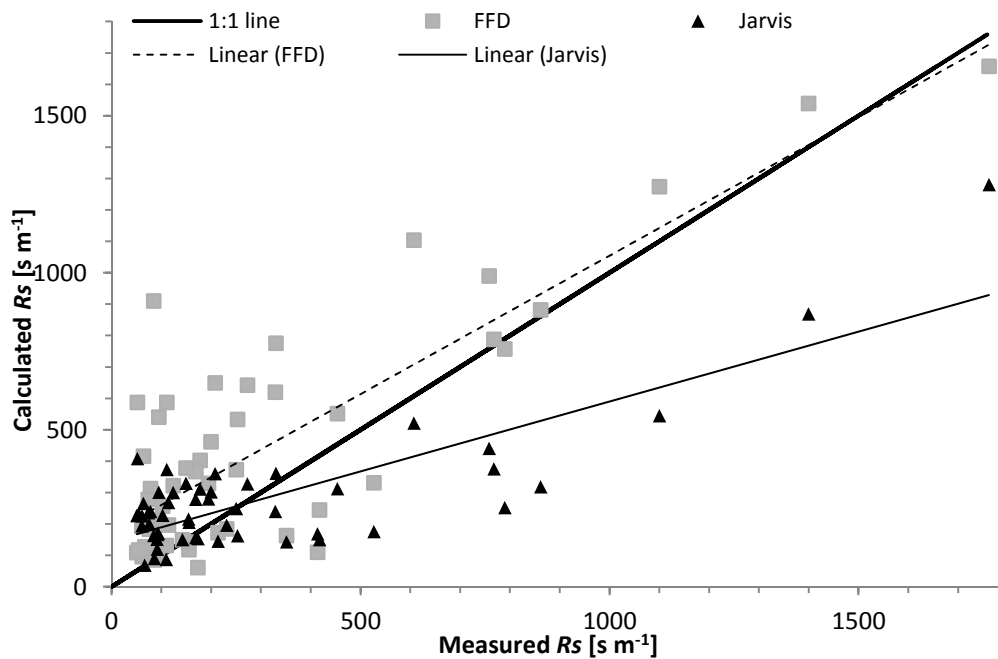


Figure 10: Comparison of the performances of the FFD and Jarvis models for estimating  $R_s$  in week 14; the lines correspond to the linear regression between calculated and measured  $R_s$ ,

the linear regression is given by these equations:  $y = 0.89x + 172.72$  with  $r^2=0.69$  for FFD model, and  $y = 0.45x + 144.63$  with  $r^2=0.65$  for Jarvis model.

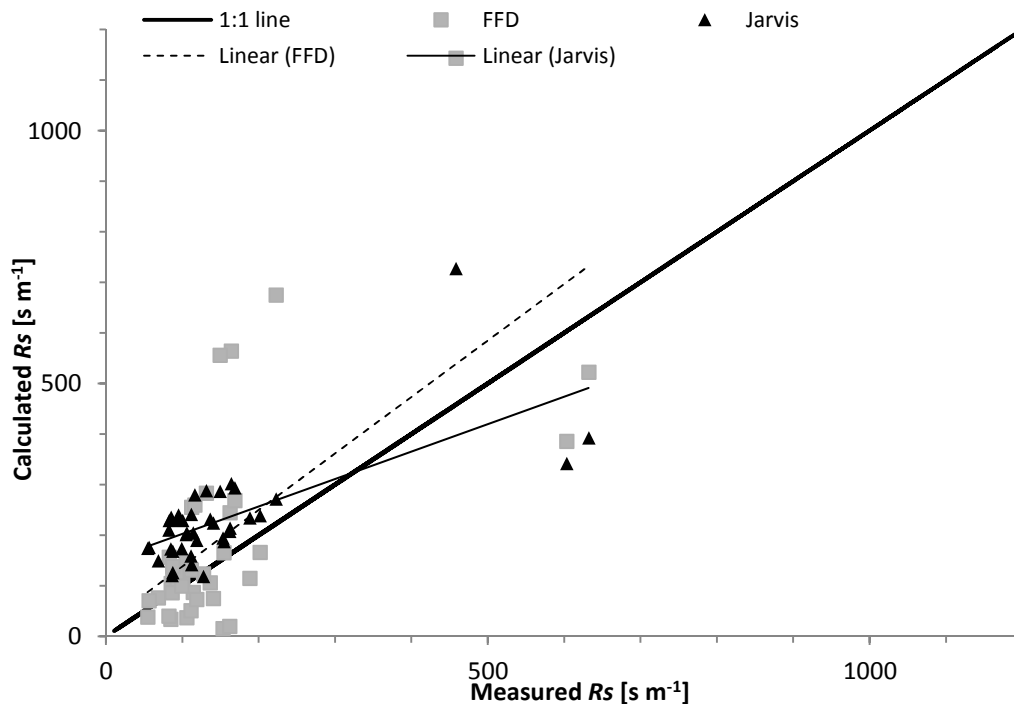


Figure 11: Comparison of the performances of the FFD and Jarvis models for estimating  $R_s$  in week 16; the lines correspond to the linear regression between calculated and measured  $R_s$ , the linear regression is given by these equations:  $y = 1.12x + 26.66$  with  $r^2=0.41$  for FFD model, and  $y = 0.54x + 148.48$  with  $r^2=0.48$  for Jarvis model.

In week 14 (Figure 10) with the FFD model, the slope of the linear regression was close to 1 (slope of 0.89,  $r^2 = 0.69$ ), confirming the good agreement between measured and estimated  $R_s$  values. With the Jarvis model, results were poorer (slope of 0.45,  $r^2 = 0.65$ ). In week 16 (Figure 11), the same conclusions were drawn, with a slope of 1.12 and  $r^2=0.41$  for the FFD model, and a slope of 0.54 and  $r^2=0.48$  for the Jarvis model. The FFD model thus provided promising perspectives for estimating  $R_s$  at different plant growth stages.

## CONCLUSION

A new application of Design of Experiments was implemented to investigate the complex biological function of the stomatal response to variations in climatic variables. In the present study, Full Factorial Design was used not only to model  $R_s$  but also to understand to what extent each climatic variable impacts stomatal resistance, whether alone or in interaction with other factors. To reach this goal, nine scenarios were established inside a growth chamber under controlled climatic conditions. The results revealed that global radiation is the most important variable impacting  $R_s$ , followed by relative humidity and the interaction between these two factors. The effect of temperature on  $R_s$  appeared to be negligible.

To analyse the reliability and performance of the FFD model with regard to other modelling techniques, we compared it with the most commonly used model first described by Jarvis (1976). Compared to the Jarvis model, FFD provided good agreement with measured values of  $R_s$  at different growth stages. Although the Jarvis model was calibrated from data collected over 3 weeks (more than 180 measurements), it showed lower performance than a simple FFD model obtained only from two levels and one intermediate point (i.e. 9 scenarios). Other DOEs are available and could also be tested with more levels and therefore more scenarios to increase the accuracy of the model to predict  $R_s$ . In addition, the use of a more efficient growth chamber offering better control and larger ranges for climatic variables could help to reach this goal.

Still the FFD  $R_s$  model showed its ability to accurately predict  $R_s$  for any growth stage of *Impatiens* plants. The next step will consist of predicting  $R_s$  under water restriction, to better assess plant transpiration under limited water irrigation supply. In the continuation of this study, transpiration will be estimated using the Penman Monteith model which itself also requires the  $R_s$  parameter.

## Acknowledgments

This study was carried out within the EPHor research unit at Agrocampus Ouest, in Angers, France. The authors would like to thank Premier Tech Company for providing the peat, and

Dominique Lemesle, Yvette Barraud-Roussel, Sylviane Delépine-Bourgeois and Claudie Mazzega who performed the laboratory measurements. We would also like to thank Fernando Rojano for his revision and comments.

### References

- Baille, M., Baille, A., & Delmon, D. (1994a). Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. *Agricultural and Forest Meteorology*, *71*(1), 83–97.  
[http://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)90101-5](http://doi.org/10.1016/0168-1923(94)90101-5)
- Baille, M., Baille, A., & Laury, J. C. (1994b). Canopy surface resistances to water vapour transfer for nine greenhouse pot plant crops. *Scientia Horticulturae*, *57*(1–2), 143–155. [http://doi.org/10.1016/0304-4238\(94\)90042-6](http://doi.org/10.1016/0304-4238(94)90042-6)
- Ball, J. T., Woodrow, I. E., & Berry, J. A. (1987). A Model Predicting Stomatal Conductance and its Contribution to the Control of Photosynthesis under Different Environmental Conditions. In J. Biggins (Ed.), *Progress in Photosynthesis Research* (pp. 221–224). Springer Netherlands. Retrieved from [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-0519-6\\_48](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-94-017-0519-6_48)
- Boulard, T., Baille, A., Mermie, M., & Villette, F. (1991). Mesures et modélisation de la résistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomates de serre. *Agronomie, EDP Sciences*, *11*(4), 259–274.  
<http://doi.org/http://dx.doi.org/10.1051/agro:19910403>
- Box, W., & Wilson, W. (1951). Central composite designs. *J. R. Stat. Soc.*, *XIII*(1), 1–35.
- Casaroli, D., de Jong van Lier, Q., & Dourado Neto, D. (2010). Validation of a root water uptake model to estimate transpiration constraints. *Agricultural Water Management*, *97*(9), 1382–1388. <http://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.04.004>

- Damour, G., Simonneau, T., Cochard, H., & Urban, L. (2010). An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant, Cell & Environment*, *33*(9), 1419–1438. <http://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2010.02181.x>
- Demrati, H., Boulard, T., Fatnassi, H., Bekkaoui, A., Majdoubi, H., Elattir, H., & Bouriden, L. (2007). Microclimate and transpiration of a greenhouse banana crop. *Biosystems Engineering*, *98*(1), 66–78. <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2007.03.016>
- Granier, A., & Loustau, D. (1994). Measuring and modelling the transpiration of a maritime pine canopy from sap-flow data. *Agricultural and Forest Meteorology*, *71*(1–2), 61–81. [http://doi.org/10.1016/0168-1923\(94\)90100-7](http://doi.org/10.1016/0168-1923(94)90100-7)
- Irmak, S., & Mutiibwa, D. (2009). On the dynamics of stomatal resistance: relationships between stomatal behavior and micrometeorological variables and performance of Jarvis-type parameterization. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, pp. 1923–1939.
- Jarvis, P. G. (1976). The Interpretation of the Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in the Field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, *273*(927), 593–610. <http://doi.org/10.1098/rstb.1976.0035>
- Jaynes, J., Ding, X., Xu, H., Wong, W. K., & Ho, C. M. (2013). Application of fractional factorial designs to study drug combinations. *Statistics in Medicine*, *32*(2), 307–318. <http://doi.org/10.1002/sim.5526>
- Kichah, A., Bournet, P. E., Migeon, C., & Boulard, T. (2012). Measurement and CFD simulation of microclimate characteristics and transpiration of an Impatiens pot plant crop in a greenhouse. *Biosystems Engineering*, *112*(1), 22–34. <http://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2012.01.012>

- Li, G., Lin, L., Dong, Y., An, D., Li, Y., Luo, W., Zhao, C. (2012). Testing two models for the estimation of leaf stomatal conductance in four greenhouse crops cucumber, chrysanthemum, tulip and liliun. *Agricultural and Forest Meteorology*, 165, 92–103. <http://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.06.004>
- Lundstedt, T., Seifert, E., Abramo, L., Thelin, B., Nyström, Å., Pettersen, J., & Bergman, R. (1998). Experimental design and optimization. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, 42(1–2), 3–40. [http://doi.org/10.1016/S0169-7439\(98\)00065-3](http://doi.org/10.1016/S0169-7439(98)00065-3)
- Misson, L., Panek, J. A., & Goldstein, A. H. (2004). A comparison of three approaches to modeling leaf gas exchange in annually drought-stressed ponderosa pine forests. *Tree Physiology*, 24(5), 529–541.
- Monteith, J. L., & Unsworth, M. H. (Eds.). (2013). Principles of Environmental Physics. In *Principles of Environmental Physics (Fourth Edition)* (p. i). Boston: Academic Press. Retrieved from <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780123869104000184>
- Montgomery, D. C. (2008). *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons.
- Sourgnès, M., Migeon, C., Bouhoun Ali, H., Bournet, P., Cannavo, P., & Chantoiseau, E. (2015). Ability of multiplicative models to simulate stomatal resistance along plant growth : application to the New Guinea Impatiens grown in greenhouse. *Acta Hort, In Press*.
- Stewart, J. (1988). Modelling surface conductance of pine forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 43(1), 19–35. [http://doi.org/10.1016/0168-1923\(88\)90003-2](http://doi.org/10.1016/0168-1923(88)90003-2)
- Vicente, G., Coteron, A., Martinez, M., & Aracil, J. (1998). Application of the factorial design of experiments and response surface methodology to optimize biodiesel production. *Industrial Crops and Products*, 8(1), 29–35. [http://doi.org/10.1016/S0926-6690\(97\)10003-6](http://doi.org/10.1016/S0926-6690(97)10003-6)

Wei, Z., Liu, Y., Xu, D., Cai, J., & Zhang, B. (2013). Application and comparison of winter wheat canopy resistance estimation models based on the scaling-up of leaf stomatal conductance. *Chinese Science Bulletin*, 58(23), 2909–2916.  
<http://doi.org/10.1007/s11434-013-5858-3>

Yu, G.R., Nakayama, K., Matsuoka, N., & Kon, H. (1998). A combination model for estimating stomatal conductance of maize (*Zea mays* L.) leaves over a long term. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92(1), 9–28. [http://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00087-2](http://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00087-2).

**Article 2 : Development of a CFD crop submodel for simulating microclimate and transpiration of ornamental plants grown in a greenhouse under water restriction****Soumis au journal Computers and Electronics in Agriculture en août 2016**Hacene Bouhoun Ali<sup>1</sup>, Pierre-Emmanuel Bournet<sup>1\*</sup>, Patrice Cannavo<sup>1</sup>, Etienne Chantoiseau<sup>1</sup><sup>1</sup> EPHor, Environmental Physics and Horticulture Research Unit,

Agrocampus Ouest, Campus d'Angers

2, rue Le Nôtre, 49045 Angers, France; E-mail: Pierre-Emmanuel.Bournet@agrocampus-ouest.fr

Tel: +33 (0)2 41 22 55 04; Fax: +33 (0)2 41 22 55 53

**Abstract**

Predictive models of soil-plant-atmosphere water transfers may be helpful to better manage water inputs to plants in greenhouses. In particular, Computational Fluid Dynamics appears to be a powerful tool to describe the greenhouse microclimate and plant behavior. Up until now, however, most models for potted plants grown in greenhouses were established for well-watered conditions. In this context, the aim of this work is to develop a specific submodel to simulate the distributed transpiration and microclimate for plants grown in pots inside greenhouses under water restriction conditions. A 2D transient CFD (Computational Fluid Dynamics) model was implemented and user-defined functions were adapted to take account of the crop interactions with the climate inside the greenhouse. The crop was considered as a porous medium and specific source terms for transpiration and sensible heat transfers were added. A specific submodel was also implemented to calculate the substrate water content based on the water balance between irrigation and transpiration. Particular care was paid to the modeling of stomatal resistance. In order to obtain the input data and to validate the CFD simulations, an experiment was conducted over 16 weeks inside a

---

\* Corresponding author



greenhouse equipped with ornamental plants (New Guinea impatiens) grown in containers on shelves. Both well-watered and restriction conditions were analyzed. The results of the CFD simulations showed the ability of the model to correctly predict transpiration, air and leaf temperatures as well as air humidity inside the greenhouse for both water conditions. Different irrigation scenarios were then tested, progressively reducing the water supply by providing a lesser amount of water than the growing media water capacity. The simulations made it possible to assess the model response to different irrigation regimes on plant transpiration, growing media water potential and climate distribution inside the greenhouse. The tests also showed that the water supply could be reduced by 20% without significantly impacting the transpiration rate and, therefore, potential plant growth. The CFD model could thus be useful to test different irrigation scenarios and better manage water inputs.

**Keywords** Crop model, irrigation, matric potential, Penman-Monteith, stomatal resistance, unsteady.

### Nomenclature

$C_D$	drag coefficient
$C_F$	non-linear momentum loss coefficient
$C_p$	specific heat of air, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
CTR	cumulated transpiration ratio
$D_{ref,j}$	gap between the considered irrigation case $j$ and the reference case
$H$	plant height, m
$Kc$	extinction coefficient for solar radiation
$k$	turbulent kinetic energy, $\text{m}^2 \text{s}^{-2}$
LAD	leaf area density, $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$
$M$	molecular weight of species, $\text{kg mol}^{-1}$
$N$	dimensionless parameter
$P$	pressure, Pa
$Q_s$	sensible heat flux density, $\text{W m}^{-3}$
$R_a$	leaf aerodynamic resistance, $\text{s m}^{-1}$

$R$	universal gas constant, $\text{J Mol}^{-1} \text{K}^{-1}$
$rg$	reduced global radiation
$Rg_0$	above-canopy global radiation, $\text{W m}^{-2}$
$Rg$	global radiation
$rh$	reduced relative air humidity
$RH$	relative air humidity, %
$RMSE$	root mean square error
$Rn$	net radiation, $\text{W m}^{-2}$
$r_{s,min}$	minimal leaf stomatal resistance, $\text{s m}^{-1}$
$R_s$	leaf stomatal resistance, $\text{s m}^{-1}$
$s_{sh}$	total area of shelves, $\text{m}^2$
$S_\Phi$	source term
$ts$	time step interval, s
$T$	temperature, K
$Tr_d$	latent heat flux density, $\text{W m}^{-3}$
$U, V$	components of the velocity vector, $\text{m s}^{-1}$
$VPD$	vapor pressure deficit, Pa
$y$	variable
$\dot{\alpha}$	parameter, $\text{kPa}^{-1}$
$\gamma$	psychrometric constant, $\text{Pa K}^{-1}$
$\Delta$	slope of the saturated water vapor pressure curve, $\text{Pa K}^{-1}$
$\varepsilon$	dissipation rate, $\text{m}^2 \text{s}^{-3}$
$\theta$	volumetric water content, v/v
$\lambda$	water latent heat of vaporization, $\text{kJ kg}^{-1}$
$\Gamma$	diffusion coefficient, $\text{Kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
$\mu$	dynamic viscosity, $\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$
$\rho$	density, $\text{kg m}^{-3}$
$\tau$	reduced temperature
$\Phi$	concentration of transported quantity

$\Psi$  peat matric potential, kPa

$\omega$  mass fraction

### Subscripts

*a* air

abs absorbed

atm atmospheric

avg volume-weighted average

c well-watered

w\_g ground

*l* leaf

*PAR* Photosynthetically Active Radiation

r water restriction

res residual

sat saturation

sky for the sky

w water

### INTRODUCTION

Global change combined with an increase in the water demand enhances the occurrence of water scarcity events, making it necessary to develop strategies to better manage water resources. Since agriculture is the largest consumer of water worldwide, it is urgent to find a way to economize water by adapting inputs to plant needs. This is true in greenhouses, in particular, where reducing water consumption by increasing water efficiency is relevant not only for environmental reasons but for economic reasons as well if the horticultural sector is to remain competitive.

In this context, the main idea is to reduce water inputs to plants without significantly impacting the transpiration rate. Knowledge of transpiration evolution is helpful to better understand plant water requirements, to adapt irrigation control and, therefore, to provide the best growing conditions. The transpiration process depends on plant metabolism, substrate

water availability and climate transpiration demand. The rate of transpiration is controlled by the opening and closing of stomata, which are depicted by the so-called stomatal resistance. Water restriction reduces the substrate water content and may therefore impact transpiration and photosynthesis by inducing stomatal closure. Indeed, reducing irrigation would affect the stomata aperture that, itself, impacts CO<sub>2</sub> absorption for photosynthesis and, consequently, plant growth. A compromise must therefore be found between transpiration and photosynthesis to cope with the contradiction between (i) a lower transpiration rate for an optimal management of water resources, and (ii) the expected vegetative development resulting from photosynthetic activity (Monteith, 1977; Kim *et al.*, 2006).

The physiological mechanisms associated with irrigation may be assessed through a representative model of the response of plants to different irrigation regimes. Up until now, the question of an optimal control of irrigation for ornamental crops grown in greenhouses has not been investigated to the same extent as it has been for open field crops, and plant-climate models adapted to the greenhouse are not numerous. In order to predict the transpiration rate, the most commonly used method is that suggested by Penman and Monteith (Monteith and Unsworth, 1990), which is based on a heat balance that depends on the plant environment (solar radiation, air temperature and air humidity). The Penman-Monteith model has been applied to ornamental crops — begonia, cyclamen, gardenia, gloxinia, hibiscus, impatiens, pelargonium, poinsettia, schefflera (Baille *et al.*, 1994a, 1994b), geranium (Montero *et al.*, 2001) — as well as to New Guinea impatiens (Morille *et al.*, 2013; Cannavo *et al.*, 2016). This approach is sometimes referred to as the ‘big leaf’ model since it considers the crop as a uniform medium and assumes that transfers take place along the vertical direction only, which implies an averaging of the variables in the horizontal plane (Fatnassi *et al.*, 2004). Consequently, this one-dimensional method does not give access to the horizontal temperature distribution and heterogeneity of crop transpiration that could occur inside a greenhouse due to heterogeneous ventilation or radiation. Assessing this heterogeneity would make it possible to fit water inputs to plant needs and thus economize water.

Computational Fluid Dynamics (CFD) is a powerful tool that makes it possible to predict the distribution of the climatic variables inside a greenhouse. This numerical device also

makes it possible to test different scenarios at relatively low cost. Modeling the microclimate and transpiration rate distribution in the greenhouse has been extensively investigated in the past through CFD tools. Boulard and Wang (2002) were the first to implement a crop model as part of a general approach to the distributed climate for a lettuce production greenhouse. Bartzanas *et al.* (2004) and Majdoubi *et al.* (2009, 2016) considered a tomato crop; Fatnassi *et al.* (2006) a multi-span rose greenhouse, and Chen *et al.* (2015) begonia plants. To simulate stomatal resistance, almost all of these works used the Jarvis (1976) model, which was initially developed for open field conditions. However, all of these studies focused on well-irrigated plants and, as of this time, there is still no CFD model capable of simulating the microclimate and transpiration rate for water restriction conditions, (i.e., that takes the water content of the substrate into account) or of investigating the impact of different irrigation scenarios.

The objective of this work was to develop a specific crop submodel, integrated within an unsteady 2D CFD model, to simulate the evolution of the transpiration rate and the microclimate distribution under greenhouse conditions, not only for well-watered but for water restriction conditions as well. CFD software (AnsysFluent15, ANSYS Inc., Canonsburg, PA, USA) was used to solve the conservation equation for the mass (air and water vapor), momentum and energy. The model takes account of the interaction of plants with the microclimate, radiative transfers and the substrate water content. For the purpose of this study, a relatively small area around the canopy was considered to assess the microclimate characteristics. In the first stage, the model was validated against data recorded inside a greenhouse compartment equipped with an impatiens crop. A series of irrigation scenarios was then tested to assess the behavior of the plants in response to water restrictions and to determine the best irrigation strategy, making it possible to reduce water inputs without impacting plant transpiration.

### MATERIALS AND METHODS

#### Experimental device

##### Experimental set-up

Experiments took place in Angers (47° 28' N, 0° 33' E), in northwestern France, in 2014 inside a 100-m<sup>2</sup> Venlo glasshouse compartment (CMF Group, Varades, France). It was part of a larger greenhouse (~ 3000 m<sup>2</sup>) and was separated from the adjacent compartments by polyethylene partitions. The compartment (gutter height: 3.9 m; ridge height: 5.9 m) was covered with a 4-mm-thick horticultural glass and equipped with continuous roof vents on both ridge sides that were opened during the day and closed at night. In order to avoid excessive temperatures, a shading screen was used and the roof vents were fully opened as soon as external temperatures exceeded 20°C. Inside the greenhouse, young impatiens plants (Novae-Guinea, cv. 'Sonic Scarlet') were grown on shelves and potted in 0.74-L containers (height: 8.7 cm) filled with fine peat with homogeneous peat bulk density (i.e., 0.12 g cm<sup>-3</sup>). The plants were uniformly placed on four shelves (3 m×1.5 m each), 0.8 m above the ground. The entire shelf area was covered by the crop, corresponding to a canopy area of 18 m<sup>2</sup>. During the measurement period in June 2014, the leaf area index (LAI) was 2.36, the plant density was 15 plants per m<sup>2</sup> and the average plant height was 24 cm. The leaf area was estimated by using a destructive method that consisted of cutting the leaves of four selected plants and determining their area using an image analyzer. Plants were watered twice a day (6 am, 11 am) by subirrigation using a complete nutrient solution (9.6 mmol N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> L<sup>-1</sup>, 1.8 mmol PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> L<sup>-1</sup>, 6.1 mmol K L<sup>-1</sup>, and 0.9 mmol M L<sup>-1</sup>). Plants under well-watered conditions were irrigated on three shelves with the water potential in the peat maintained above -2 kPa, while the irrigation was periodically stopped on the fourth shelf until plants revealed visual signs of water stress. Flowers were regularly removed during the experiment.

##### Microclimate measurements

A set of sensors was used to measure the climate characteristics inside the greenhouse. A schematic view of the experimental device is proposed in Fig. 1. The temperature (Ta) and

relative humidity (RH<sub>a</sub>) of the air were measured by aspirated sensors (Vaisala HMP45C, Campbell Scientific Ltd., Antony, France; accuracy:  $\pm 0.1$  °C for T and  $\pm 2\%$  for RH) located at three positions (15 cm above the crop (Ta<sub>1</sub>, RH<sub>a1</sub>), inside the crop (Ta<sub>2</sub>, RH<sub>a2</sub>), and under the shelves (Ta<sub>3</sub>, RH<sub>a3</sub>)). The ground temperature under the shelves (Tw<sub>g</sub>) was also monitored with PT100 platinum probes (TC ONLINE, France). The downward and the upward long and short wavelength radiations (R<sub>atm</sub> and R<sub>g</sub>) were recorded by a CNR1 pyrradiometer (Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands; accuracy:  $\pm 10\%$ ). All the above-mentioned parameters were measured every 3 seconds and averaged online over 10-min periods with a data logger system (CR3000 and CR7, Campbell Scientific Ltd., Antony, France).

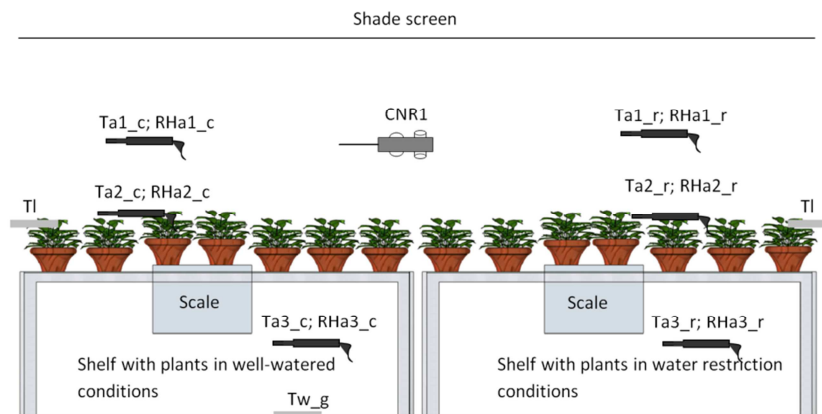


Figure 1. Experimental setup with the different sensors used. “c” stands for measurement on well-watered plants (comfort); “r” stands for measurement on water-restricted plants.

### Substrate properties

The peat matric potential ( $\Psi$ , kPa) and volumetric water content ( $\theta$ , v/v) were measured at mid-height of six containers with tensiometers (SDEC 1300, France; accuracy:  $\pm 0.2\%$  kPa), and volumetric water content sensors (EC-5, Decagon, Dardilly, France; accuracy:  $\pm 3\%$   $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ). Among them, three were placed inside the well-watered containers and the other three inside the water-restricted containers. These parameters were also measured at 3-second intervals and averaged online over 10-min periods.

### Plant activity

The temperature of the leaves ( $T_l$ ) of the upper and bottom part of the crop were recorded at 3-second intervals with copper-constantan (Cu-Cs) thermocouples fixed to the underside of plant leaves by porous plaster and then averaged over 10-min periods. The average temperature measured for six leaves for each water condition was considered. The stomatal resistance of the leaves was also measured using a porometer (AP4, Delta-T Device, United Kingdom). The accuracy of this device was  $\pm 20 \text{ s m}^{-1}$  for  $R_s$  in the  $[20-50 \text{ s m}^{-1}]$  range, and  $\pm 10\%$  in the  $[50-4000 \text{ s m}^{-1}]$  range. Five measurements were undertaken for green, young, healthy, fully-expanded leaves of different plants for each water condition and considering sunlit and shaded leaves successively. The measurements of  $R_s$  were replicated every half hour from 8:00 am to 8:00 pm.

The amount of water lost by transpiration was measured with high-resolution electronic scales (Melter-Toledo, Greifensee, Switzerland; accuracy:  $\pm 0.1 \text{ g}$ ; capacity: 16 kg; accuracy:  $\pm 0.1 \text{ g}$ ), located under the shelves, approximately at the center of the canopy (Fig. 1) and bearing several containers. A set of two horizontal plates connected by vertical rods was used to weigh four plants maintained on a tray ( $56 \times 56 \text{ cm}$ ) at the same elevation as the adjacent plants placed on the shelves. This system permitted an identical water supply for all plants. Water loss was recorded every hour and the corresponding latent heat flux ( $Tr$ ) was then expressed in  $\text{W m}^{-2}$  of ground area.

### Numerical modeling

For CFD simulations, a calculation domain was defined around the area of interest and discretized into elementary volumes where the conservation equations for mass, momentum and energy were solved. The corresponding variables (pressure, velocity, temperature) were obtained in each control volume according to an iterative procedure that proceeded until a converged solution of the non-linear system of equations was reached. As shown by Boulard *et al.* (2000), airflows are often highly turbulent inside a greenhouse. In order to account for turbulent motions, the variables were divided into a mean and a fluctuating part and the equations were averaged, leading to the Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS)



equations. This process led to new variables that were solved by introducing a turbulence closure model. The operator imposed the boundary conditions at the limits of the calculation domain, as well as the source terms such as transpiration or airflow resistance induced by the plants.

CFD simulations were carried out with the commercially-available CFD package, Ansys<sup>TM</sup> Fluent 15. This numerical tool solves the unsteady 2D convection diffusion equations using the finite volume technique.

### Fundamental equations

Only two-dimensional cases were considered in this study because the prevailing flow rate was preferentially in a 2D plane perpendicular to the ridge as a consequence prevailing wind direction that was generally perpendicular to the vent openings. The transport equations may be written in the following general form (Eq. 1):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial(U\Phi)}{\partial x} + \frac{\partial(V\Phi)}{\partial y} = \Gamma \Delta \Phi + S_{\Phi} \quad (1)$$

where  $\Phi$  represents the concentration of the non-dimensional transported quantity, namely momentum, mass (air and water vapor mass fraction) and energy,  $U$  and  $V$  are the components of the velocity vector,  $\Gamma$  is the diffusion coefficient, and  $S_{\Phi}$  is the source term. The  $k$ - $\varepsilon$  turbulence model (Launder & Spalding, 1974) was chosen as closure model because it provided good agreement with experimental data in a number of studies for similar greenhouses (Bournet *et al.*, 2007; Nebbali *et al.*, 2012). Air density depends not only on the temperature but also on the water vapor content in the air. Thus, the Boussinesq model cannot be applied, and the ideal gas law was used in order to link the fluid density to the other variables. The density was defined as a function of the temperature and mass fractions of the components of the mixture according to:

$$\rho = \frac{P_{op}}{RT} \frac{\omega_i}{\sum_i M_i} \quad (2)$$

where  $R$  ( $= 8.31 \text{ J Mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) is the universal gas constant,  $P_{op}$  (Pa) is the operating pressure,

$\omega_i$  ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) is the mass fraction of species  $i$ , and  $M_i$  ( $\text{kg mol}^{-1}$ ) is the molecular weight of species  $i$ .

### **Radiative submodel**

A radiative submodel was activated, distinguishing the contribution of short [0.1-3  $\mu\text{m}$ ] and long wavelength radiation [3-100  $\mu\text{m}$ ]. It solves the equation of luminance for a finite number of discrete solid angles, each associated with a fixed vector direction in the global Cartesian system. The net contribution of radiation per unit volume in the heat balance (energy equation) was then expressed from the spatial integration of the monochromatic luminance over the whole wavelength spectrum. A full description of the bi-band model used in the present study may be found in Bournet *et al.* (2007). For the purpose of the study, the canopy was considered as non-diffusive, meaning that only the direct fraction of the solar radiation was considered. Moreover, since the amount of long wavelength radiation ( $R_{\text{atm}}$ ) absorbed throughout the canopy was almost negligible compared to short wavelength radiation, it was omitted in the energy balance used in the crop submodel. The discrete ordinate (DO) method was chosen to calculate the radiation component since it proved to be efficient for comparable studies (Bournet *et al.*, 2007; Bournet and Boulard, 2010).

### **Crop submodel**

The crop exerted a mechanical strain onto the flow and interacted with the mass and energy balance of the air.

### **Porous medium**

The crop was assimilated to a homogeneous porous medium made of a solid matrix with connected pores and creating a resistance to air movement represented by a source term  $S_\phi$  in the momentum equations. The drag force per unit volume of the crop can be expressed as the sum of two terms: a viscous loss term and an inertial loss term, according to the Darcy-Forchheimer equation (Boulard & Wang, 2002):

$$S_{\phi} = -\left(\frac{\mu}{K}V + \frac{\rho_a C_F}{K^{0.5}}V^2\right) \quad (3)$$

where  $K$  is the permeability ( $m^2$ ) of the porous medium,  $C_F$  is the non-linear momentum loss coefficient,  $\rho_a$  is the air density ( $kg\ m^{-3}$ ),  $\mu$  is the dynamic viscosity of air, and  $V$  is the velocity magnitude of the air ( $m\ s^{-1}$ ). For the range of air speed observed into the crop cover, the term in  $V$  of Eq. (3) can be neglected compared with the quadratic term then:

$$S_{\phi} = -\frac{\rho_a C_F}{K^{0.5}}V^2 = -\rho_a LAD C_D V^2 \quad (4)$$

where the right member expression was suggested by Wilson (1985),  $LAD$  is the leaf area density ( $m^2\ m^{-3}$ ) defined as  $LAI/H$ ,  $C_D$  is the drag coefficient, and  $H$  is the height of the canopy.

From Eq. (4), it can be seen that only the value of  $C_D$  is required both for the containers and for the canopy to solve the Darcy-Forchheimer equation. According to Kichah *et al.* (2012), a value of  $C_D = 0.32$  is appropriate for an impatiens crop and was retained for the present study.

### Energy balance model

The canopy receives a global radiation  $Rg$  ( $W\ m^{-2}$ ) that results from the solar radiation, and exchanges both a latent heat flux density  $Tr_d$  ( $W\ m^{-3}$ ) by transpiration and a sensible heat flux density  $Q_s$  ( $W\ m^{-3}$ ) with the ambient air. The energy balance along the leaves may thus be written as follows (Eq. 5):

$$Rg_{abs} - Tr_d - Q_s = 0 \quad (5)$$

where the absorbed radiation  $Rg_{abs}$  ( $W\ m^{-3}$ ) in each cell of the canopy can be directly deduced from Beer's law (Eq. 6) in a porous medium (Eq. (7)):

$$Rg(y) = Rg_0 \exp[-K_c LAD (H - y)] \quad (6)$$

$$Rg_{abs} = Rg(y_i) - Rg(y_{i+1}) \quad (7)$$

where  $y_i$  and  $y_{i+1}$  are the upper and lower ordinates of the considered cell  $i$ ,  $Rg_0$  is the above canopy global radiation in  $W\ m^{-2}$ , and  $K_c$  is the extinction coefficient of radiation, estimated at a value of 0.95 for well-watered and 0.64 for water restriction conditions in this study. This

difference was explained by the hydric stress signs that appeared on leaves for plants under water restriction. For short-term hydric stress, plants adapt by leaf rolling (Hatem *et al.*, 2007; Hsiao and Acevedo, 1974). This physiological mechanism makes the plants absorb less solar radiation, thus limiting transpiration.

The sensible heat flux at canopy level is governed by the following equation (Eq. 8):

$$Q_s = 2 LAD \rho_a C_p \frac{(T_l - T_a)}{R_a} \quad (8)$$

where  $\rho_a$  is the air density ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $C_p$  is the specific heat of air under constant pressure ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ), and  $T_l$  and  $T_a$  are the temperatures of leaves and air.

The latent heat density (transpiration rate density) for a given cell is calculated by Eq. (9):

$$\text{Tr}_d = \frac{Rg_{abs} + 2 \rho_a LAD C_p \text{VPD}_a / R_a}{\Delta + 2 \gamma \left(1 + \frac{R_s}{R_a}\right)} \quad (9)$$

where  $\gamma$  is the psychrometric constant,  $\text{VPD}_a$  is the air-air vapor pressure deficit (Pa), and  $\Delta$  is the slope of the saturated water vapor pressure curve according to temperature. In the present study, the aerodynamic resistance  $R_a$  was considered as constant according to Baille *et al.* (1994b):  $R_a = 271 \text{ s m}^{-1}$ .  $R_s$  is the stomatal resistance ( $\text{s m}^{-1}$ ) calculated for each cell in the canopy domain.  $R_s$  was derived from the Full Factorial Design (FFD) method as described by Bouhoun Ali *et al.* (2016) (Eq. 10):

$$R_s = \left(-115 \cdot rg - 139 \cdot rh - 39 \cdot \tau + 139 \cdot rg \cdot rh + 43 \cdot rg \cdot \tau + 11 \cdot rh \cdot \tau + 661 \cdot rg^2 - 368 \cdot rg^3\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{\Psi}{-11.41}\right)^{1.05}\right) \quad (10)$$

where  $rg = \frac{(rg-75)}{75}$ ,  $rh = \frac{(RH-65)}{75}$ , and  $\tau = \frac{(T-20.5)}{5.5}$ .  $\Psi$  is the soil matric potential (kPa) deduced from a specific water balance model described below. The leaf temperature for a given cell ( $T_l$ ) may then be deduced from Eq. (5):

$$T_l = \frac{R_a}{2LAD\rho_a C_p} (Rg_{abs} - \text{Tr}_d) - T_a \quad (11)$$

### Water balance model

The growing media matric potential  $\Psi$  (kPa) was deduced from the volumetric water content using Eq. (12) established from the van Genuchten (1980) model, given the growing media water content  $\theta$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ):

$$\Psi = \frac{1}{\alpha} \left[ \left( \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \right)^{N/1-N} - 1 \right]^{1/N} \quad (12)$$

where  $\theta_{res}$ ,  $\theta_{sat}$  are the residual and saturation soil volumetric water content ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) and  $\alpha$  ( $\text{kPa}^{-1}$ ) and  $N$  (dimensionless) are parameters to be calibrated. These parameters were established from tensiometer and volumetric water content sensor measurements for water restriction conditions. Based on a multilinear fit,  $\theta_{sat}=0.887$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\theta_{res}=0.1$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\alpha=0.134$  ( $\text{kPa}^{-1}$ ) and  $N=1.469$  were found. Furthermore, the volumetric water content was calculated at each time step  $i$  by Eq. (13), integrating the transpiration and the initial volumetric water content ( $\theta_0$ ) (which depends on the amount of irrigation):

$$\theta_i = \theta_0 - \left( \frac{ts \ s_{sh} \sum_{j=0}^{i-1} Tr_{avg,j}}{\lambda \ m \ \rho_w \ v_p} \right) \quad (13)$$

where  $\theta_n$  is the volumetric water content at the current time step  $i$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\theta_0$  is the initial substrate water content ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $ts$  is the time step interval (s) equal to 3600 s for this study,  $s_{sh}$  is the total area of the shelves ( $\text{m}^2$ ),  $Tr_{avg,j}$  is the (volume-weighted) averaged transpiration rate over the canopy domain at time step  $j$  ( $\text{W m}^{-2}$ ),  $\lambda$  is the water latent heat ( $\text{J kg}^{-1}$ ),  $m$  is the total number of plants equal to 264,  $\rho_w$  is the water density ( $\text{Kg m}^{-3}$ ), and  $V_p$  is the volume of the container ( $\text{m}^3$ ).

### Mesh and boundary conditions

Due to the complexity and size of the multi-compartment greenhouse considered, the numerical study described here focused on a relatively small area around the canopy in order to validate the model. The calculation domain ( $23 \times 3.69 \text{ m}^2$ ) included the ground of the greenhouse, the shelves, the pots and the plants (Fig. 2). In order to avoid interferences with

the outlet boundary, the limit of the calculation domain was established at 15 m downstream from the shelf (Fig. 2). The total height of the plants was 33 cm, including the pots (9 cm). The thickness of the shelf was 0.5 cm. An orthogonal structured mesh (50\*190 cells) was retained for simulations with a refined grid in the vicinity of the ground and shelves and a higher density in the area of the plants. The canopy consisted of 10\*100 cells. In particular, the independence of the numerical results from the grid was checked by testing different grid densities.

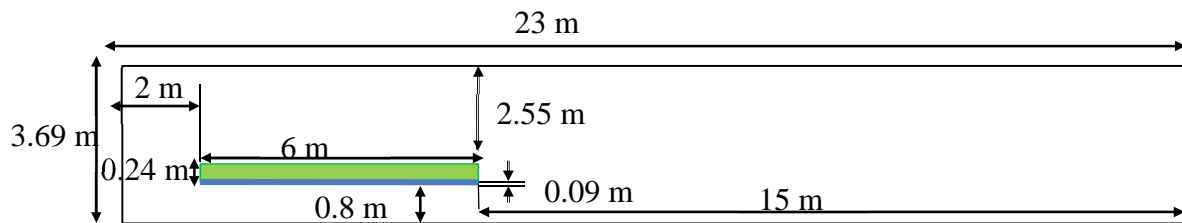


Figure 2: Calculation domain.

The influence of external factors such as temperature, humidity and radiation was introduced through the boundary conditions as follows (Fig. 3):

- (1) At the entrance of the calculation domain on the left side, the horizontal velocity profile was assumed to be almost uniform, using an average value ( $0.3 \text{ m s}^{-1}$ ) established from former hot-bulb anemometer measurements. The corresponding turbulent kinetic energy  $k$  in  $\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$  and dissipation rate profiles in  $\text{m}^2 \text{ s}^{-3}$  at the inlet were calculated as a function of the friction velocity according to the formula established by Richards and Hoxey (1993). Uniform temperature and humidity profiles obtained from the ventilated probe located along the edge of the shelf, 15 cm above the crop, were also imposed at the inlet boundary. The downward long wavelength radiative flux resulting from the emission of the atmospheric gases (e.g., water steam, carbonic gas and the ozone layer) was imposed through a sky temperature deduced from the long wavelength radiative flux measurements (Bournet *et al.*, 2007). The sky temperature  $T_{sky}$  is defined as the temperature of the equivalent black body (emissivity = 1) that absorbs the same thermal radiation as the sky.

- (2) Wall-type boundary conditions were used along the ground where a standard logarithmic wall function was imposed. The time series of temperatures and humidities recorded at ground level were also assumed to impose the corresponding boundary conditions.
- (3) At the upper boundary of the computational domain (Fig. 2), a slipping wall-type condition with no shear was set, meaning that no mass transfer was allowed through this surface. The temperature was the same as the one imposed at the inlet, and the solar and atmospheric radiative fluxes were provided by the CNR1 Pyrradiometer.
- (4) At the outlet, a pressure outlet condition was imposed, requiring the specification of a static pressure at the outlet boundary ( $P=101325$  Pa). All other flow quantities were extrapolated from the interior, corresponding to zero normal gradients. Values for the sky temperature were the same as those retained for the inlet.

The initial peat water content was  $0.870 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (i.e., peat water field capacity at  $\Psi = -1$  kPa).

The shelves were taken as gray bodies with an equivalent emissivity of 0.1, chosen in order to take account of the absorption capacity of the crop covering the shelves. The emissivity of the ground (which consists of concrete) was fixed to 0.5.

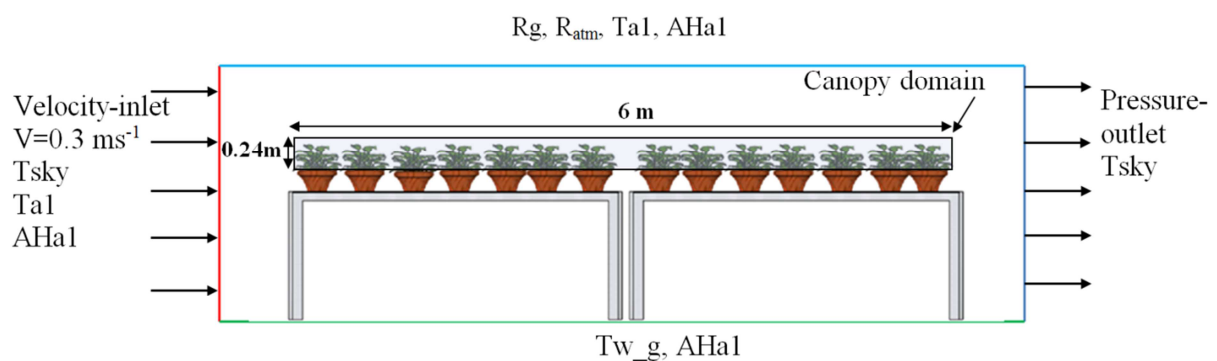


Figure 3: Boundary conditions.

### Numerical procedure

A second-order upwind discretization scheme was used for momentum, heat and turbulence transport equations to obtain a better accuracy with limited risk of divergence. A

semi-implicit method for pressure-linked equations was adopted to solve the coupled pressure-momentum equations. The convergence criterion for all variables was  $10^{-6}$ . The model was run under unsteady-state conditions: the boundary conditions were re-actualized at each time step, and the field of variables calculated at the previous time step was used as the initial conditions for the current time step.

## RESULTS

### Model validation

#### Case study

The model was first validated against data recorded inside the experimental greenhouse and distinguishing two irrigation strategies: the first case consisted of well-watered plants, while the second one consisted of plants under water restriction conditions. 2D unsteady simulations with a 1-hour time step were carried out considering a 24 h period from 11 pm on June 17, to 10 pm on June 18, 2014. The irrigation was stopped on June 13 for plants under water restriction. The experimental measurements were used as input data for the initial and boundary conditions (Figs. 4A, 4B). As expected, the radiation time series disclosed a strong correlation with the evolution of both the air and ground temperatures, with a maximum value at around 2 pm. Initial conditions at 11 pm were obtained by running a preliminary simulation using the boundary conditions recorded at 10 pm and assumed to be uniformly distributed over the whole calculation domain. The initial water content for the water restriction case was deduced from the value recorded at 10 pm and equal to  $0.652 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . The submodel based on the water balance was used (Eqs. 12 and 13) to calculate the soil matric potential at each time step. For the well-watered case, the soil matric potential was considered as constant and its value was fixed at -1 kPa.



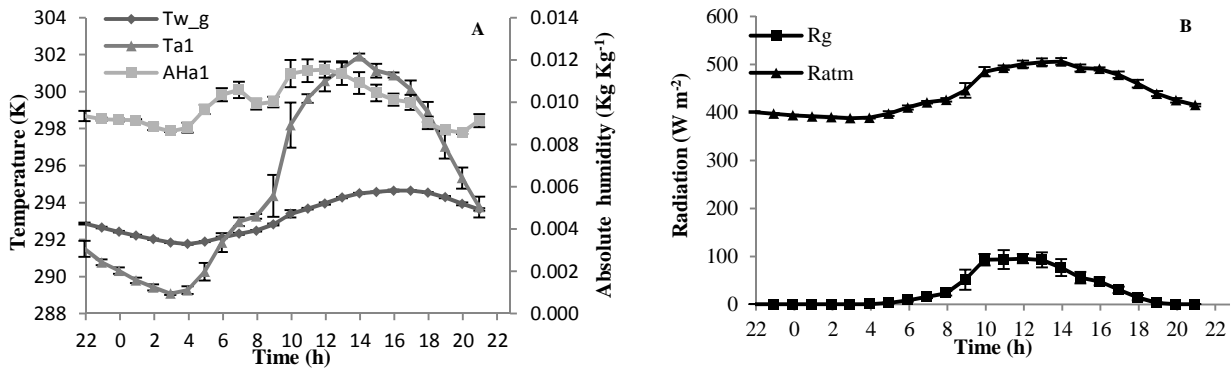


Figure 4: Time evolution of the boundary conditions. A: ground temperature ( $T_{w\_g}$ ), air temperature ( $T_{a1}$ ), air absolute humidity ( $AH_{a1}$ ). B: long wave radiation ( $R_{atm}$ ), short wave radiation ( $R_g$ ) and soil matric potential ( $\Psi$ ).

### Air temperature and humidity

The time evolutions of the air temperatures at three locations and leaf temperatures for well-watered and restriction conditions are shown in Figs. 5 and 6. Both measured and predicted air temperatures (inside, above and below the crop) and leaf temperatures followed the same trend. The order of magnitude of the predicted temperatures was in fair agreement with measurements for both water regimes. For well-watered plants,  $r^2$  was greater than 0.97 and RMSE was lower than 1.14 K for all of the temperatures (Table 1). Similar values were obtained for plants under water restriction conditions with  $r^2$  greater than 0.94 and RMSE lower than 1.62 K. Water restriction barely impacted the local environment above and under the canopy since similar temperatures were observed (and also simulated) there for both irrigation regimes (Figs. 5 A and B). Indeed, these temperatures were mainly influenced by the boundary conditions at the entrance of the calculation domain, which were identical for both cases. Nevertheless, the effect of water restriction was clearly reported on the temperatures inside the canopy and on the leaf temperatures, as indicated in Figs. 6A and B. The measured and predicted temperatures inside the canopy and leaf temperatures for the water restriction case were greater by up to 1 K than the observed and simulated ones under well-watered conditions. This was due to the fact that the transpiration rate decreased for water restriction conditions, as detailed below. The transpiration cooled the leaves of plants

and consequently refreshed the adjacent air. Moreover, the measured and predicted temperatures for the leaves were lower than the temperature of the air inside the canopy during the day for the well-watered case (Fig. 6A). This difference almost vanished in the case of water restriction (Fig. 6B) since the transpiration rate was too low to cool the leaves.

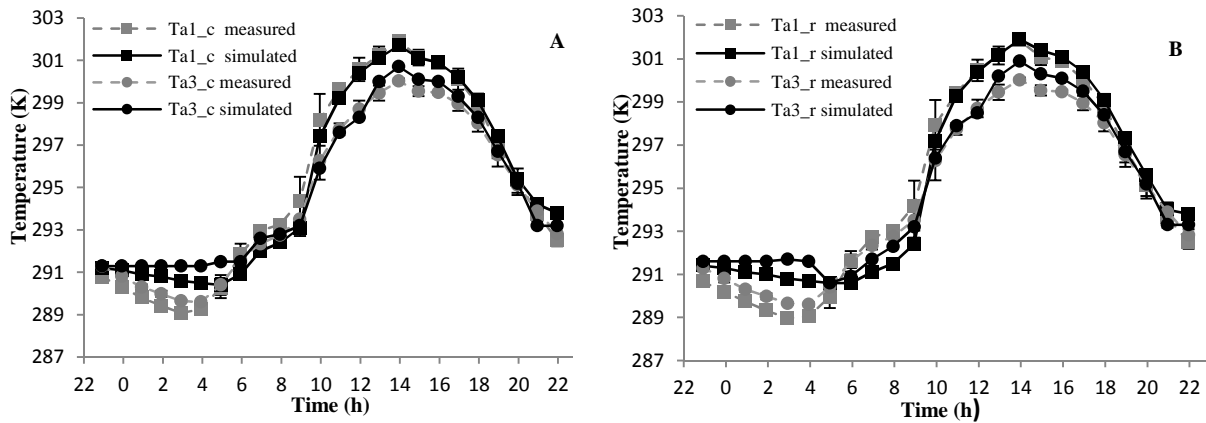


Figure 5: Time evolution of measured and simulated air temperatures above (Ta1) and below (Ta3) the crop for well-watered plants (A) and for plants under water restriction conditions (B).

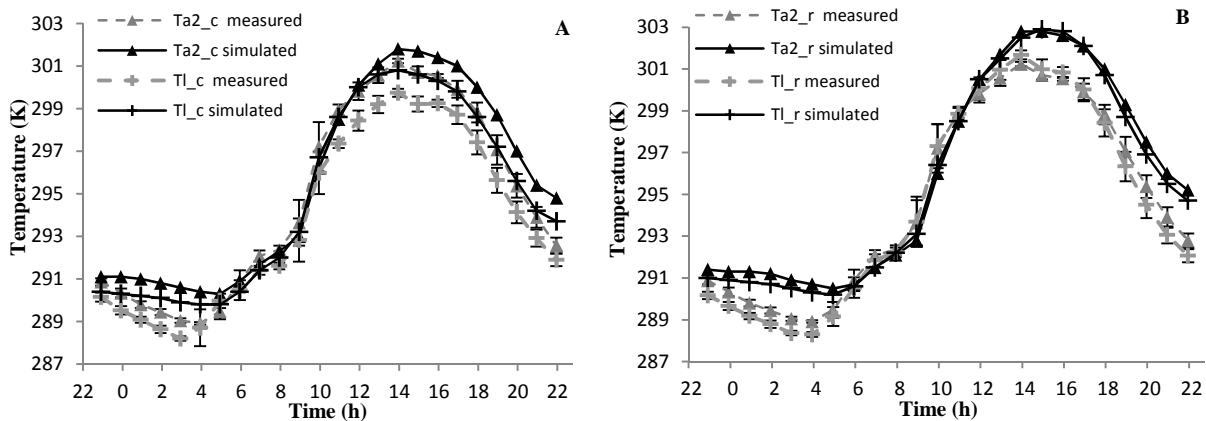


Figure 6: Time evolution of measured and simulated air temperature inside the crop (Ta2) and average leaf temperatures (Ti) for well-watered plants (A) and for plants under water restriction conditions (B).

The relative humidity was also studied at three locations as was done for temperatures and for both regimes. The time evolution of the measured and predicted relative humidity is plotted in Figs. 7A and B. Results show that the predicted and measured RH were higher inside the

canopy than in the air just above or below the canopy, at least for the well-watered case. For the water restriction case, the measured and predicted humidity at the three locations remained similar. In general, rather good agreement was found between measured and calculated humidity for both water regimes, with  $r^2$  greater than 0.88 and RMSE less than 8.66% for well-watered plants, and  $r^2$  greater than 0.78 and RMSE lower than 6.69% for the water restriction case (Table 1).

Table 1. Coefficients of determination and root mean square errors calculated for the air and leaf temperatures (Ta1, Ta2, Ta3 and T<sub>l</sub>) and for the relative humidity (RHa1, RHa2 and RHa3), both for the well-watered and for the water restriction cases.

Case study	Parameter	Ta1	Ta2	Ta3	T <sub>l</sub>	RHa1	RHa2	RHa3
Well-watered	$r^2$	0.97	0.97	0.97	0.98	0.93	0.88	0.90
	RMSE	0.79	1.09	0.72	1.14	3.80	8.66	4.09
Water restriction	$r^2$	0.95	0.94	0.96	0.95	0.94	0.78	0.94
	RMSE	1.03	1.57	0.86	1.62	3.36	6.69	3.68

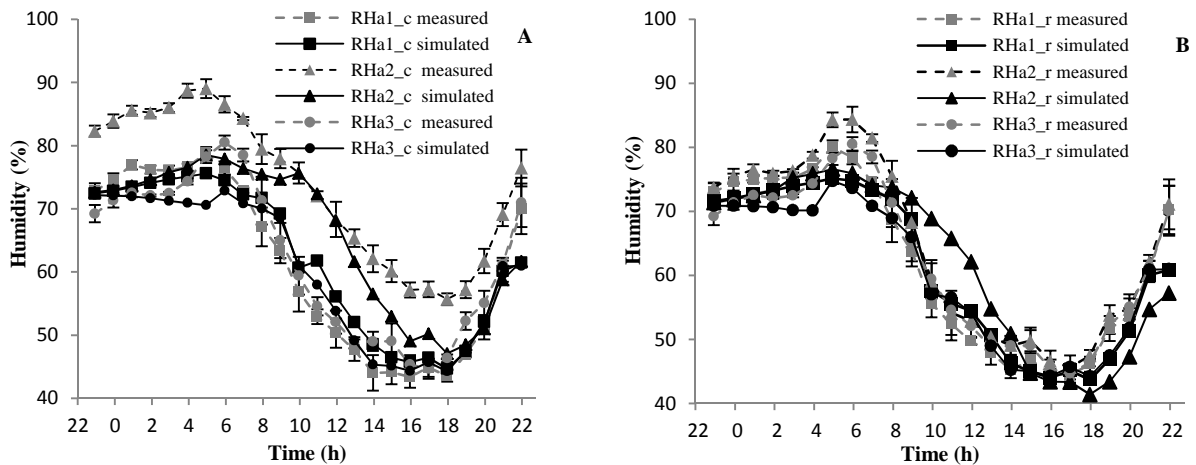


Figure 7: Time evolution of measured and simulated relative humidities above (RHa1), inside (RHa2) and below the crops (RHa3) for well-watered plants (A) and for plants under water restriction conditions (B).

### Peat water potential

The measured and simulated peat matric potential for pots under water restriction conditions are shown in Fig. 8 on June 18, i.e., five days after stopping irrigation. Without irrigation, the amount of water in the soil decreased simultaneously with the amount of water evaporated by plant transpiration. Good agreement between measured and simulated soil matric potential were found with  $r^2=0.99$  and RMSE=3.38 kPa for the water restriction case, even if the model slightly overestimated water lost by the substrate in the second part of the day.

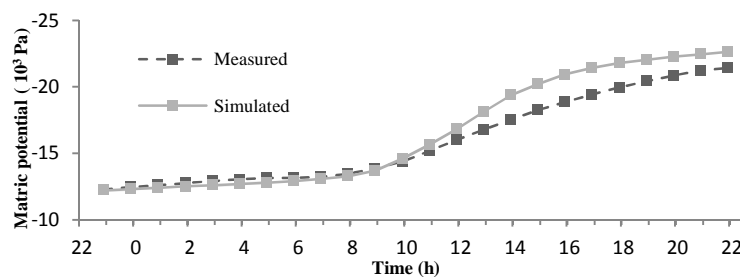


Figure 8: Time evolution of measured and simulated soil matric potential  $\Psi$  for the water restriction case.

### Plant properties

#### Stomatal resistance

As shown in Fig. 9A, measured and predicted  $R_s$  for the water restriction case were higher than  $R_s$  for the well-watered case, both for sunlit and shaded leaves.

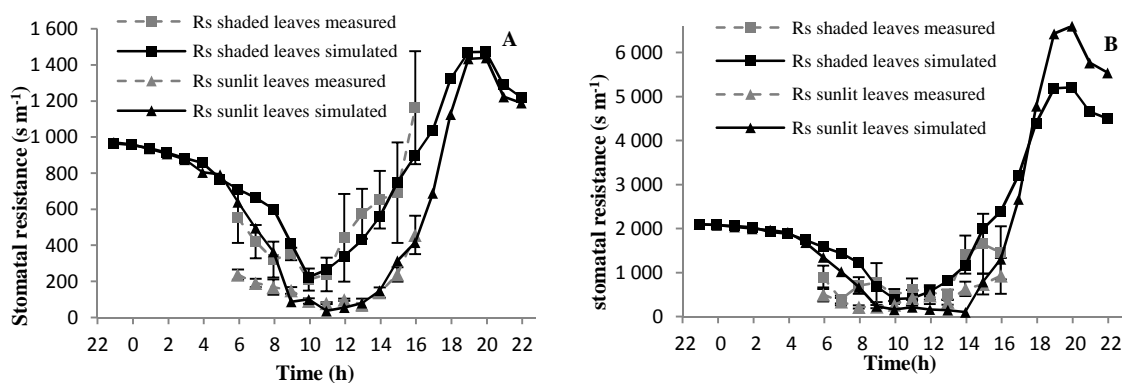


Figure 9: Time evolution of measured and simulated stomatal resistance of sunlit (square symbol) and shaded (canopy, triangle symbol) leaves for plants under well-watered (A) and water restriction (B) conditions.

The difference between both figures was clearly related to the irrigation regime. The stomatal resistance (Fig. 9B) increased (from about 10-11 am) to limit the transpiration when the soil matric potential decreased (Fig. 8) and the extraction of available water from the substrate became more difficult (Verhoef and Egea, 2014). Similar behaviour was reported for well-watered plants (Fig. 9A), but to a far lower extent. In that case, the evolution of  $R_s$  was instead linked to the evolution of the global radiation and air to air vapor pressure deficit.

The CFD model again showed its ability to predict the time evolution of  $R_s$  during the day for sunlit and shaded leaves and for both regimes. The agreement between measured and predicted  $R_s$  was acceptable, with  $r^2$  higher than 0.44 and RMSE less than  $168 \text{ s m}^{-1}$  for the well-watered case, both for sunlit and shaded leaves (Fig. 9A). For the water restriction case,  $r^2$  was higher than 0.51 and RMSE less than  $527 \text{ s m}^{-1}$  for both sunlit and shaded leaves (Fig. 9B).

Simulations exhibited heterogeneities of the stomatal resistance distribution both for the well-watered and water restriction cases inside the canopy, generally from the top to the bottom of the canopy, as shown in Figs. 10A and 10B. The simulated stomatal resistance of the lower leaves was higher than that of the upper ones for both water regimes, which is not surprising provided that the global radiation was much higher in the upper part of the canopy, favoring the aperture of stomata (low  $R_s$  values) and therefore increasing transpiration. Longitudinal variations of the stomatal resistance were probably mainly due to horizontal relative humidity gradients associated with transpiration gradients inside the canopy.

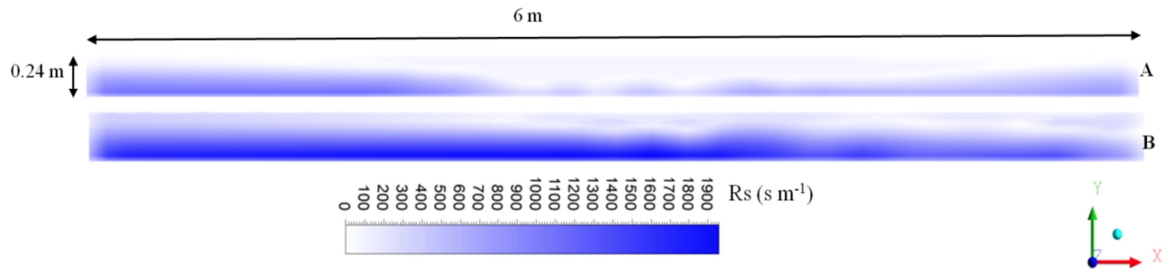


Figure 10: Simulated distribution of the stomatal resistance ( $s\ m^{-1}$ ) inside the canopy domain at 1 pm on June 18, 2014, for well-watered (A) and water restriction (B) conditions.

### Transpiration

Simulated transpiration rates are presented in Figs. 11A (well-watered) and 11B (water restriction) and compared to measured ones. For the water restriction case, they were lower than the ones for the well-watered case. The maximal measured transpiration rate under water restriction was 1.43 times lower than for well-watered plants. Globally, the model demonstrated its ability to correctly predict the time evolution of the transpiration rate with good accuracy for both regimes:  $r^2 = 0.98$  and  $RMSE = 5.87\ W\ m^{-2}$  for the well-watered case, and  $r^2 = 0.97$  and  $RMSE = 5.64\ W\ m^{-2}$  for the water restriction case. The relative error for accumulated transpiration over 24 h was also estimated, leading to 3.32% for the well-watered case and 4.82% for the water restriction case.

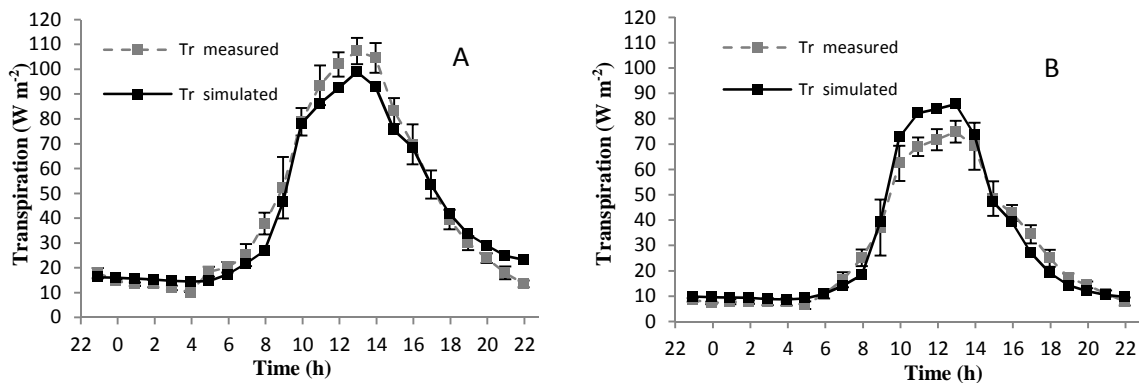


Figure 11: Time evolution of measured and simulated transpiration rate  $Tr$  for plants under well-watered (A) and water restriction (B) conditions.

As shown in Fig. 12, the distribution of transpiration was affected by the heterogeneous distribution of  $R_s$  (Fig. 9).

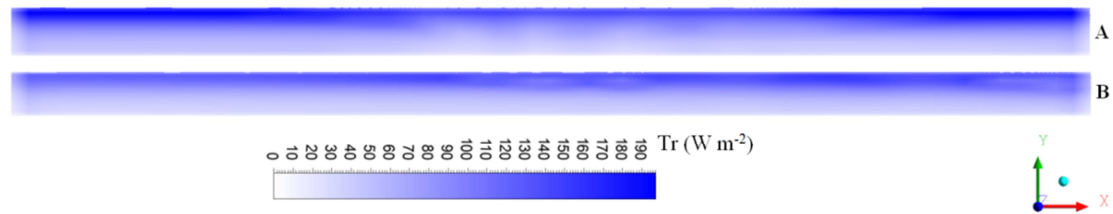


Figure 12: Simulated distribution of the crop transpiration rate ( $\text{W m}^{-2}$ ) inside the canopy domain at 1 pm on June 18, 2014, for well-watered (A) and water restriction (B) conditions. The lowest leaves of the crop had the lowest rate of transpiration. Conversely, the highest values of the transpiration rate were simulated at the top of the crop (Figs. 12A and 12B) for the leaves directly exposed to the incident global radiation. The longitudinal (along the x axis) differences are due to the heterogeneity in stomatal resistance ( $R_s$ ); however, they remain quite limited.

## DISCUSSION

### Test of different irrigation scenarios

Once the model was validated, it was used to test a set of irrigation scenarios, with the aim to assess the behavior of the plants in response to different levels of water restriction. The idea was to identify to what extent water inputs could be reduced without really impacting plant transpiration and, subsequently, plant activity in general.

#### Definition of scenarios and implementation

Six irrigation regimes were tested and a reference case was chosen corresponding to a 100% irrigation regime, i.e., to a substrate retention capacity of  $0.870 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . This value was set as an initial condition inside the substrate at the beginning of the simulation at 10 pm. For the other irrigation regimes, the amount of initial water content was reduced by using 90% of the water supply compared with the reference case ( $0.783 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), 80% ( $0.696 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), 70% ( $0.609 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), 60% ( $0.522 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ) and 50% ( $0.435 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ). The initial conditions at 11 pm were obtained after running a 1-h simulation at 10 pm, assuming that all of the variables were uniformly distributed over the whole calculation domain at that time,

with values inferred from the boundary conditions used for the validation stage (i.e., a 24 h period from 11 pm on June 17 to 10 pm on June 18, 2014) (Fig. 3). Simulations with a 1h time step were then carried out. These boundary conditions were assumed to be the same for the six irrigation scenarios.

To estimate the difference between the simulated variables for the different irrigation regimes and the simulated variables for the reference case, the gap between the considered irrigation case  $j$  and the reference case  $D_{ref,j}$  given by Eq. (4) was calculated for each variable together with the cumulated transpiration ratio (CTR) (i.e., cumulated Tr for a given irrigation regime divided by the cumulated Tr of the reference):

$$D_{ref,j} = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_1^k (y_{ref,i} - y_{j,i})^2} \quad (14)$$

where  $y_{ref,i}$  is the variable for the reference case at time step  $i$ ,  $y_{j,i}$  is the variable for an irrigation regime of  $j$  % at time step  $i$ , and  $k$  is the total number of data inputs.

### Air temperature and humidity

The time evolutions of the simulated air temperatures at three locations (refer to Fig. 1) and simulated leaf temperatures for the six irrigation regimes are shown in Fig. 13.

The air temperatures inside, above and below the crop, as well as leaf temperatures, followed the same trend for all irrigation regimes. Nevertheless, they slightly increased when the water supply was reduced. For instance, for a 50% water supply, the air temperatures inside and above the canopy, as well as the leaf temperatures, were greater than the reference case by almost 2 K on average for air temperatures, and 7 K on average for leaf temperatures. This may be explained by the fact that a modification of the water regime strongly impacted the transpiration rate, the latent heat transfer and, consequently, the energy balance over the canopy. Comparing water restriction cases with the reference case (Table 2) shows the increasing impact of water restriction on air temperature just above the canopy (Ta1). This trend increased inside the canopy for Ta2, while the irrigation regime did not influence Ta3 because it was more impacted by the air circulation coming from the outside of the



greenhouse than by the canopy. For  $T_1$ , the temperature difference with the reference case also increased with water restriction.

A comparison between the leaf and air temperatures inside the canopy for different irrigation regimes was also undertaken to assess the effect of water restriction on the transpiration process. For the well-watered conditions corresponding to the reference case, the leaf temperatures in the middle of the day were smaller than the adjacent air temperatures simulated inside the canopy at location 2 (refer to Fig. 1). Indeed, plant transpiration cooled the leaves of plants and, consequently, refreshed the adjacent air. This cooling process was reduced for lower transpiration rates until the leaf temperatures became greater than the neighboring air temperature, as indicated in Figs. 13 E and F.

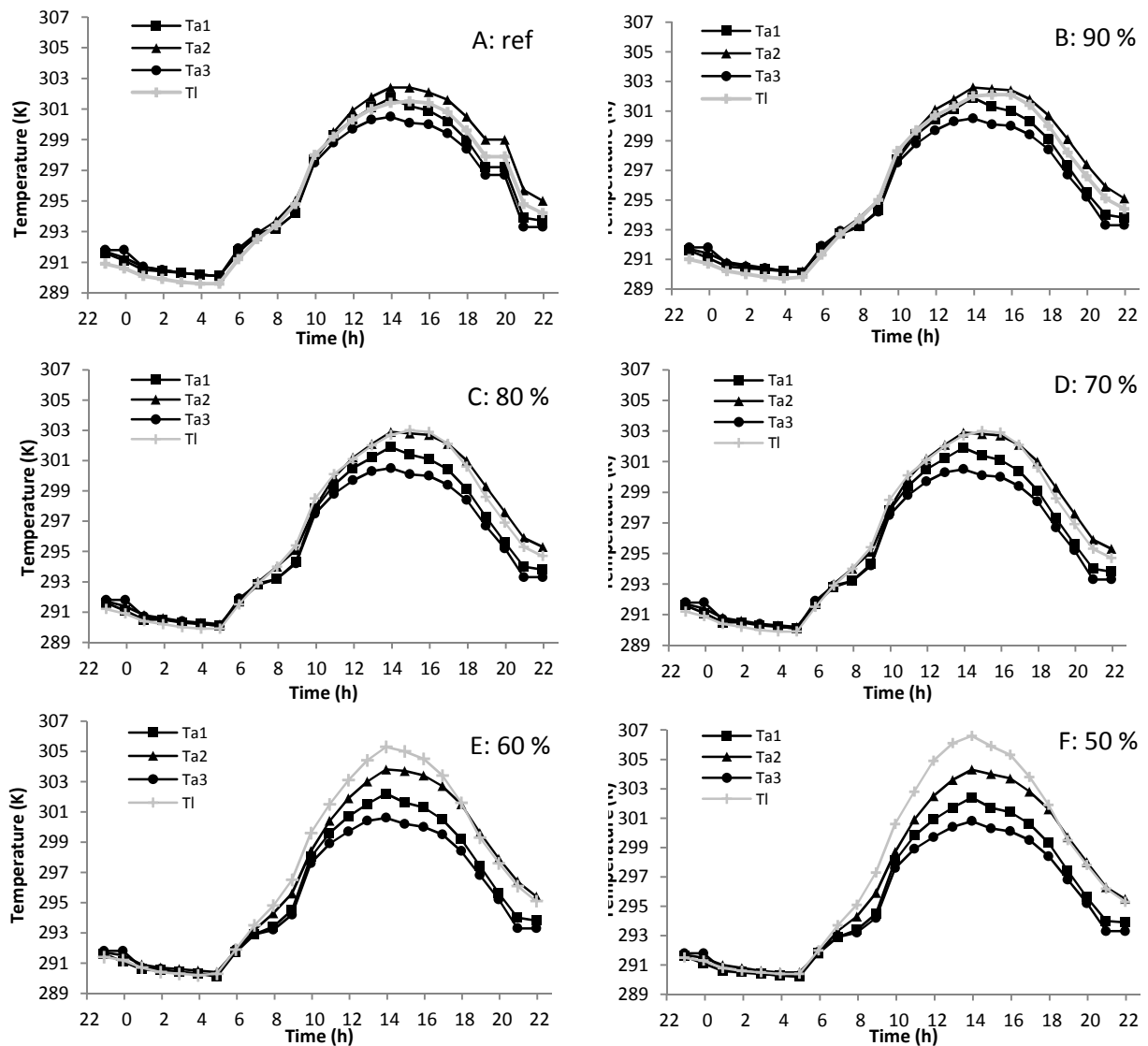


Figure 13: Time evolution of simulated air temperatures above (Ta1), inside (Ta2) and below (Ta3) the crop, and average leaf temperatures (T<sub>l</sub>), for the different irrigation regimes.

This last situation was considered as a stress sign for the plant and could have an impact on its quality (González-Dugo *et al.*, 2006; Jackson and Center, 1981). The average differences between the leaf temperatures and air temperatures inside the canopy (T<sub>l</sub>-Ta<sub>2</sub>) were calculated for each irrigation regime and given in Table 2. With the decrease of the water supply, the amount of water evacuated by transpiration decreased until it became too low to cool the leaves, as detailed below. The results of the average difference between T<sub>l</sub> and

Ta2 indicated that when the water supply was reduced to more than 80%,  $T_1$  became greater than Ta2, leading to plant water stress.

Table 2.  $D_{ref,j}$  value for selected variables, mean difference between  $T_1$  and Ta2, mean difference for peat matric potential  $\Delta\Psi$ , minimal stomatal resistance for shaded and sunlit leaves, and CTR for different irrigation scenarios.

Irrigation regime	Reference	90%	80%	70%	60%	50%
$D_{ref,j}$ (Ta1 [K])		0.35	0.36	0.37	0.41	0.46
$D_{ref,j}$ (Ta2 [K])		0.35	0.41	0.56	0.78	1
$D_{ref,j}$ (Ta3 [K])		0.31	0.31	0.31	0.31	0.32
$D_{ref,j}$ ( $T_1$ [K])		0.43	0.79	1.29	1.92	2.61
Mean $T_1$ -Ta2 [K]	-0.63	-0.45	-0.21	0.04	0.35	0.70
$D_{ref,j}$ (RHa1 [%])		0.88	0.98	1.22	1.56	1.98
$D_{ref,j}$ (RHa2 [%])		1.15	2.15	3.50	5.01	6.65
$D_{ref,j}$ (RHa3 [%])		0.88	0.88	0.88	0.89	0.90
Mean $\Delta\Psi$ [kPa]		3.91	8.87	16.27	28.03	49.09
Minimal $R_s$ (shaded leaves) [s m <sup>-1</sup> ]	194	250	360	537	883	1710
Minimal $R_s$ (sunlit leaves) [s m <sup>-1</sup> ]	68	88	93	123	228	566
$D_{ref,j}$ (Transpiration [W m <sup>-2</sup> ])		4.11	8.64	14.18	20.77	28.64
CTR [%]		90.36	79.97	67.67	53.34	37.10

The relative humidity was also studied at the same three locations and for the six irrigation regimes. The predicted time evolution of the relative humidity is plotted in Fig. 14. As expected, the relative humidity was higher inside the canopy than in the air just above or below the canopy. This is particularly true for the reference case. Moreover, when the restriction degree increased, the humidity decreased at the three locations because of the decrease of the transpiration rate and the higher temperatures inside the canopy. Simulations

also predicted that the humidity inside the canopy during the day was lower than the humidity above and below the canopy when the water supply was reduced to less than 60% of the reference case.

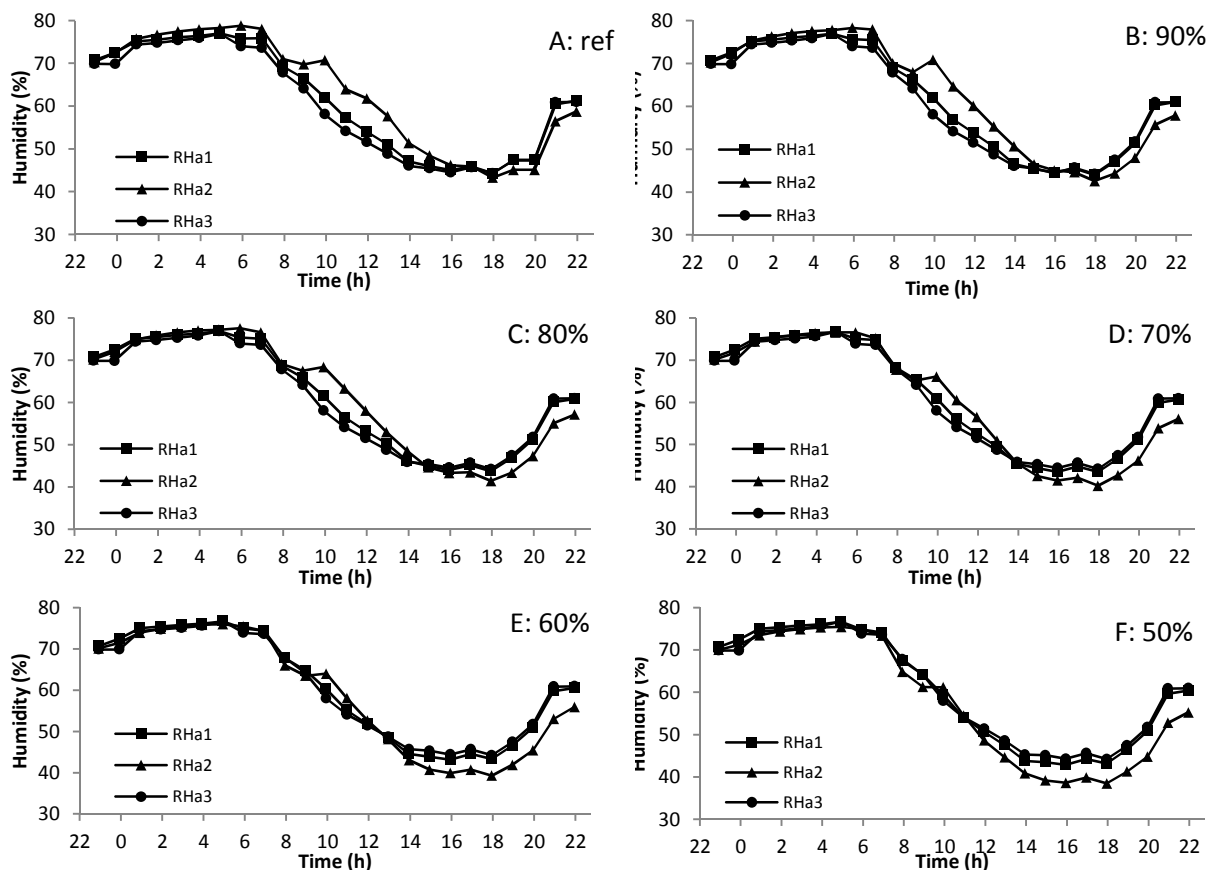


Figure 14: Time evolution of simulated relative humidities above (RHa1), inside (RHa2) and below (RHa3) the crop for the different irrigation regimes.

The  $D_{ref,j}$  calculated for each irrigation regime (Table 2) showed that the variation in humidity increased with the decrease in water supply.  $D_{ref,j}$  for RHa3 remained almost constant ( $\approx 0.88\%$ ) for all irrigation regimes because — as explained in the temperature distribution analysis — at that location, the air humidity was mainly impacted by the air circulation coming from outside the greenhouse. It is known that high humidity levels could create favorable conditions for fungal diseases like botrytis (Bartzanas *et al.*, 2004). Hence, the reduction of water supply could provide a partial solution to this problem.

### Peat water potential

The predicted peat matric potential evolution according to the water irrigation scenario is presented in Fig. 15.

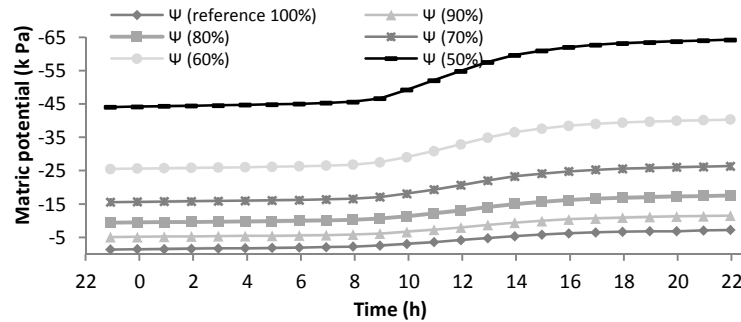


Figure 15: Time evolution of simulated growing media matric potential for different irrigation regimes.

It decreased with decreasing water supply, reaching a minimal value of -64.28 kPa for the 50% water supply scenario. It is considered that the wilting point (i.e., low peat water availability for plants and beginning of plant stress) begins when the matric potential is lower than -10 kPa, and the permanent wilting point (i.e., plant death) when it is lower than -100 kPa (Gobat *et al.*, 2004). In the present study, irrigation scenarios did not make it possible to reach the permanent wilting point. Nevertheless, the wilting point threshold was attempted when the water supply was less than 80% of the reference. The greatest decrease in the growing media matric potential for a given irrigation regime occurred during the day as a consequence of the higher transpiration activity of the plants. When applying a restriction of up to 80% of the reference, the impact of the water irrigation regime on the matric potential was not very significant with  $D_{ref,j} = 8.87$  kPa, whereas it reached 49.09 kPa for 50% of the water supply (see Table 2).

### Plant properties

#### Stomatal resistance

The decrease in water supply caused an increase in  $R_s$  both for sunlit and shaded leaves (Fig. 16). Indeed, the stomatal resistance increased, limiting plant transpiration when

the growing media matric potential decreased (Fig. 15), meaning that the extraction of available water from the substrate had become more difficult (Verhoef and Egea, 2014). The stomatal resistance was almost in the same range [ $68\text{-}1070\text{ s m}^{-1}$ ] for the different irrigation regimes once the soil water potential was higher than  $-10\text{ kPa}$  (Figs. 15 and 16). For these water potentials, it may thus be deduced that the transpiration activity of the plant will be maintained at a level comparable to the reference case (well-watered).

The minimal stomatal resistance found for each irrigation regime is provided in Table 2. The minimal values slightly increased with decreasing water inputs, while the stomatal resistance was higher for shaded leaves than for sunlit ones.

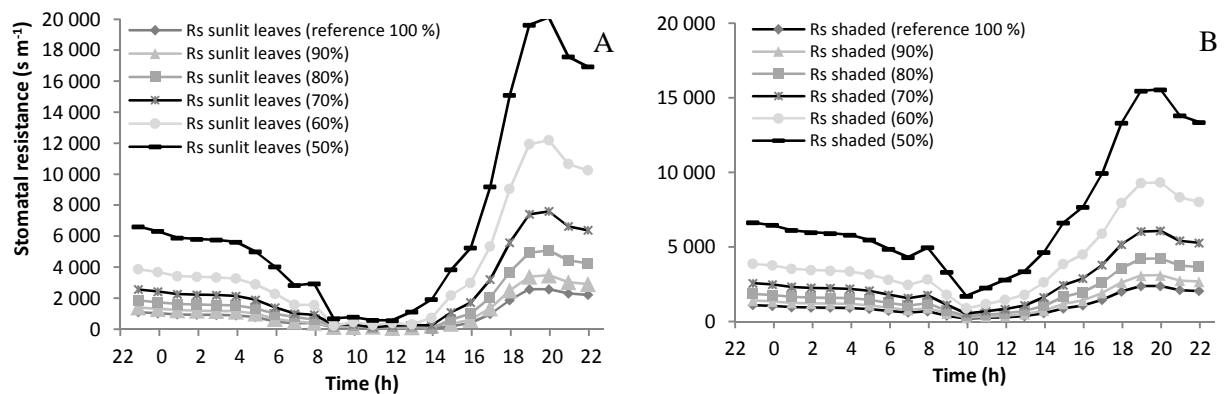


Figure 16: Time evolution of simulated stomatal resistance of sunlit (A) and shaded leaves (B) for different irrigation regimes.

Simulations also revealed heterogeneities of the stomatal resistance distributions for the different irrigation regimes inside the canopy, mostly from the top to the bottom of the canopy, as shown in Fig. 17. As expected, the simulated stomatal resistances of the lower leaves were higher than that of the upper ones, mainly due to the global radiation decay from the top to the bottom of the canopy. The stomatal resistance was almost the same for the reference case (Fig. 17a) and 80% of the water supply (Fig. 17b), whereas for the 50% water supply scenario (Fig. 17c), distributions were very different from the reference case with higher values of  $R_s$ , revealing that the plants were stressed.

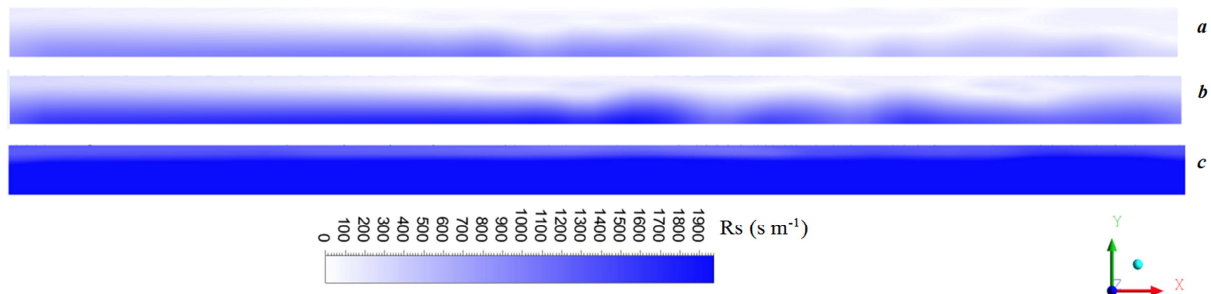


Figure 17: Simulated distribution of the stomatal resistance ( $s\ m^{-1}$ ) inside the crop at 1 pm on June 18, 2014, for plants with 100% water supply (a), 80% (b) and 50% (c).

### Transpiration

The predicted plant transpiration rate evolution for the six irrigation regimes is presented in Fig. 18. Not surprisingly, the results show that the transpiration rate decreased when the water supply was decreased. From the reference (100%) to 80% of the water supply, little impact on plant transpiration was predicted. Greater differences appeared when the water supply was reduced to 70, 60 or 50%. The calculated  $D_{ref,j}$  and cumulated transpiration ratios (CTR) between a given irrigation scenario and the reference are provided in Table 2.

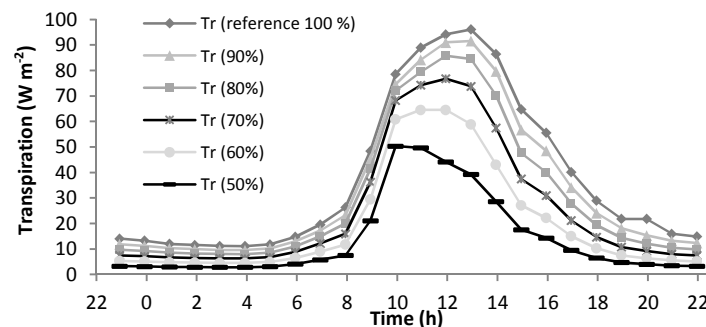


Figure 18: Time evolution of simulated transpiration rates for different irrigation regimes.

The distribution of transpiration inside the crop also revealed heterogeneities mainly associated with the heterogeneous distribution of  $R_s$  (Fig. 19). The lowest leaves of the crop had the lowest transpiration rates and, conversely, the highest transpiration rates were simulated at the top of the crop. The transpiration distributions were almost the same for the

reference case (Fig. 19a) and 80% of the water supply (Fig. 19b), whereas for the 50% water supply scenario (Fig.19c), distributions were very different from the reference case with far lower  $Tr$  values. However, the horizontal distribution of the transpiration rates seemed to barely be impacted by the horizontal heterogeneity in air velocity and humidity inside the canopy, meaning that the radiation distribution was probably the main factor affecting the transpiration rate.

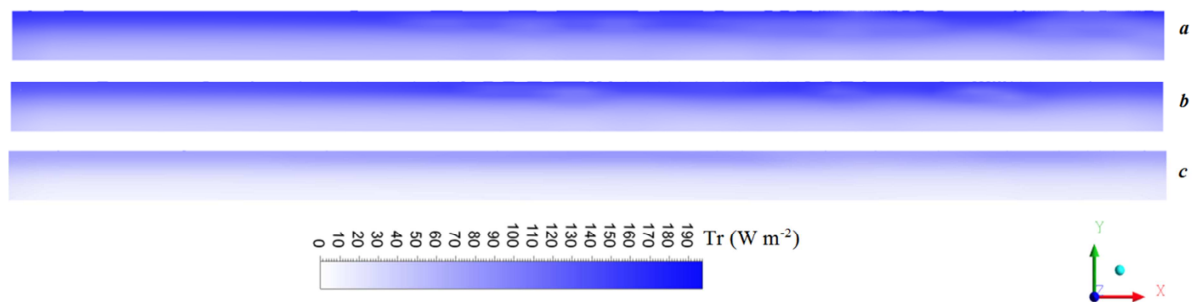


Figure 19: Simulated distribution of the crop transpiration rate ( $W m^{-2}$ ) at 1 pm on June 18, 2014, for plants under 100% water supply (a), 80% (b) and 50% (c).

## CONCLUSION

An unsteady CFD model combining a radiative submodel together with a crop submodel that takes account of the water balance in the substrate-plant-atmosphere continuum was developed. Considering well-watered and water restriction conditions, the model was first validated against data recorded inside a greenhouse compartment equipped with a New Guinea *impatiens* crop. Good agreement was found between measured and simulated evolutions of temperatures, relative humidities, stomatal resistances and transpiration rates for both cases, as well as for the soil matric potential in the case of water restriction. The model also showed its ability to predict the difference between the well-watered and water restriction conditions. In particular, it predicted the decrease in the amount of water available in the substrate. As expected, simulations also showed that the stomatal resistance, the air temperatures inside the canopy and the leaf temperatures were higher for the water restriction conditions than for the well-watered case. In agreement with measurements, simulations also



revealed that transpiration rates were lower for plants under water restriction than for plants under well-watered conditions. This was of course strongly correlated to the increase in the stomatal resistance observed and predicted for water restriction conditions.

Subsequently, in order to identify an adapted strategy to decrease the amount of water supply with as little impact as possible on the transpiration and microclimate inside the greenhouse, six water irrigation regimes were then tested, ranging from well-watered conditions (saturation of the substrate), to half the water inputs corresponding to well-watered conditions. The CFD model made it possible to quantify the impact of the different irrigation regimes on the air temperatures, relative humidities around and inside the canopy, leaf temperatures, growing media matric potentials, stomatal resistances and transpiration rates. As expected, the growing media matric potential decreased with the reduction of water supply, causing an increase in the stomatal resistance that, itself, reduced the transpiration activity of the plants.

CFD simulations could therefore be helpful to define the irrigation regime that would make it possible to maintain approximately the same microclimate as for the well-watered conditions (and, *a priori*, good plant quality) together with the use of a lesser amount of water for irrigation. To ensure good conditions for the plant and avoid stomatal closure (which would reduce photosynthesis activity), the leaf temperatures should remain colder than the adjacent air temperatures during the day. From that point of view, the scenario with 80% water supply appeared to be a good compromise but still needs to be validated against experimental data. Moreover, it made it possible to economize 0.13 l per container and per day compared to the reference case. The reduction of water supply should also help reduce the humidity and could limit problems such as fungal diseases and moisture development. The next step will consist in modeling microclimate and transpiration for different irrigation regimes for an entire greenhouse in order to increase the accuracy of the model and its field of application.

### Acknowledgements

This study was carried out within the EPHor research unit at Agrocampus Ouest, in Angers, France. The authors would like to thank Premier Tech Company for providing the peat, and Dominique Lemesle, Dominique Renard, Yvette Barraud-Roussel and Claudie Mazzega who performed the laboratory measurements. Experiments were conducted at the INEM (shared experimental facilities) with the assistance of Rémi Gardet.

### List of tables

Table 1. Coefficient of determination and root mean square error calculated for the air and leaf temperatures ( $T_{a1}$ ,  $T_{a2}$ ,  $T_{a3}$  and  $T_l$ ) and for the relative humidity ( $RH_{a1}$ ,  $RH_{a2}$  and  $RH_{a3}$ ) both for the well-watered and for the water restriction cases.

Table 2.  $D_{ref,j}$  value for selected variables, mean difference between  $T_l$  and  $T_{a2}$ , mean difference for peat matric potential  $\Delta\Psi$ , minimal stomatal resistance for shaded and sunlit leaves, and CTR for different irrigation scenarios.

### List of figures

Figure 1. Experimental setup with the different sensors used: HMP45C for temperatures and relative humidities above ( $T_{a1}$ ;  $RH_{a1}$ ), inside ( $T_{a2}$ ;  $RH_{a2}$ ) and under ( $T_{a3}$ ;  $RH_{a3}$ ) the canopy, thermocouples for leaf ( $T_l$ ) and ground temperature ( $T_{w\_g}$ ), CNR1 to measure radiation, and scales to measure the transpiration rate. “c” stands for measurement on well-watered plants (comfort); “r” stands for measurement on water-restricted plants.

Figure 2. Calculation domain.

Figure 3. Boundary conditions.

Figure 4. Time evolution of the boundary conditions. A: ground temperature ( $T_{w\_g}$ ), air temperature ( $T_{a1}$ ) and air absolute humidity ( $AH_{a1}$ ). B: long wave radiation ( $R_{atm}$ ), short wave radiation ( $R_g$ ) and soil matric potential ( $\Psi$ ).

Figure 5. Time evolution of measured and simulated air temperatures above ( $T_{a1}$ ) and below ( $T_{a3}$ ) the crop, for well-watered plants (A) and for plants under water restriction conditions (B).

Figure 6. Time evolution of measured and simulated air temperature inside the crop ( $T_{a2}$ ) and average leaf temperatures ( $T_l$ ) for well-watered plants (A) and for plants under water restriction conditions (B).

Figure 7. Time evolution of measured and simulated relative humidities above (RH<sub>a1</sub>), inside (RH<sub>a2</sub>) and below (RH<sub>a3</sub>) the crop for well-watered plants (A) and for plants under water restriction conditions (B).

Figure 8. Time evolution of measured and simulated soil matric potential  $\Psi$  for the water restriction case.

Figure 9. Time evolution of measured and simulated stomatal resistance of sunlit (square symbol) and shaded (canopy, triangle symbol) leaves for plants under well-watered (A) and water restriction (B) conditions.

Figure 10. Simulated distribution of the stomatal resistance ( $s\ m^{-1}$ ) inside the canopy domain at 1 pm on June 18, 2014, for well-watered (A) and water restriction (B) conditions.

Figure 11: Time evolution of the measured and simulated transpiration rate  $T_r$  for plants under well-watered (A) and water restriction (B) conditions.

Figure 12. Simulated distribution of the crop transpiration rate ( $W\ m^{-2}$ ) inside the canopy domain at 1 pm on June 18, 2014, for well-watered (A) and water restriction (B) conditions.

Figure 13. Time evolution of simulated air temperatures above ( $T_{a1}$ ), inside ( $T_{a2}$ ), below ( $T_{a3}$ ) the crop, and average leaf temperatures ( $T_l$ ), for the different irrigation regimes.

Figure 14. Time evolution of simulated relative humidities above (RH<sub>a1</sub>), inside (RH<sub>a2</sub>) and below (RH<sub>a3</sub>) the crop for the different irrigation regimes.

Figure 15. Time evolution of simulated growing media matric potential for different irrigation regimes.

Figure 16. Time evolution of simulated stomatal resistance of sunlit (A) and shaded leaves (B) for different irrigation regimes.

Figure 17. Simulated distribution of the stomatal resistance ( $s\ m^{-1}$ ) inside the crop at 1 pm on June 18, 2014, for plants with 100% water supply (a), 80% (b) and 50% (c).

Figure 18. Time evolution of simulated transpiration rates for different irrigation regimes.

Figure 19. Simulated distribution of the crop transpiration rate ( $W m^{-2}$ ) at 1 pm on June 18, 2014, for plants under 100% water supply (a), 80% (b) and 50% (c).

### References

- Baille M., Baille A., Laury J. C. 1994a. Canopy surface resistances to water vapour transfer for nine greenhouse pot plant crops. *Scientia Horticulturae*, 57, 143–155, doi:10.1016/0304-4238(94)90042-6.
- Baille M., Baille, A., Laury, J.C. 1994b. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. *Sci. Hortic.* 59, 217–232, doi:10.1016/0304-4238(94)90015-9.
- Bartzanas T., Boulard T., Kittas C. 2004. Effect of Vent Arrangement on Windward Ventilation of a Tunnel Greenhouse. *Biosyst. Eng.* 88, 479–490, doi:10.1016/j.biosystemseng.2003.10.006.
- Bouhoun Ali H., Bournet P.E., Cannavo P., Chantoiseau E., Sourgnès M. 2016 Stomatal resistance of New Guinea Impatiens pot plants. Part 1: Model development for well watered plants based on design of experiments, *Biosystems Engineering*, 149, 112–124, doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.05.004.
- Boulard T., Wang S., Haxaire R. 2000. Mean and turbulent air flows and microclimatic patterns in a greenhouse tunnel. *Agricultural and Forest Meteorology*, 100 (2–3), 169–181, doi:10.1016/S0168-1923(99)00136-7.
- Boulard T., Wan, S., 2002. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel. *Comput. Electron. Agric.* 34, 173–190, doi:10.1016/S0168-1699(01)00186-7.
- Bournet P.E. and Boulard T. 2010. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: a review of experimental and CFD studies. *Comput. Electron. Agric.* 74, 195–217, doi:10.1016/j.compag.2010.08.007.
- Bournet P.E., Ould Khaoua S.A., Boulard T. 2007. Numerical prediction of the effect of vent arrangements on the ventilation and energy transfer in a multi-span glasshouse using a

- bi-band radiation model. *Biosyst. Eng.* 98, 224–234, doi:10.1016/j.biosystemseng.2007.06.007.
- Cannavo P., Bouhoun Ali H., Chantoiseau E., Migeon C., Charpentier S., Bournet P.E. 2016. Stomatal resistance of New Guinea Impatiens pot plants. Part 2: Model extension for water restriction and application to irrigation scheduling, *Biosyst. Eng.* 149, 82-93, doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.07.001.
- Chen J., Xu F., Tan D., Shen Z., Zhang L., Ai Q. 2015. A control method for agricultural greenhouses heating based on computational fluid dynamics and energy prediction model. *Applied Energy*, 141, 106–118, <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.12.026>.
- Fatnassi H., Boulard T., Lagier J. 2004. Simple Indirect Estimation of Ventilation and Crop Transpiration Rates in a Greenhouse. *Biosystems Engineering*, 88, 467-478, 10.1016/j.biosystemseng.2004.05.003.
- Fatnassi H. Boulard T. Poncet C. Chave M. 2006. Optimisation of Greenhouse Insect Screening with Computational Fluid Dynamics. *Biosystems Engineering*, 93, 301-312, doi:10.1016/j.biosystemseng.2005.11.014.
- Gobat J.M., Aragno M., Matthey W. 2004. The living soil. *Fundamentals of science science and soil biology*. Science Publishers (USA), 550 p.
- González-Dugo M.P., Moran M.S., Mateos L., Bryant R. 2006. Canopy temperature variability as an indicator of crop water stress severity. *Irrig. Sci.* 24, 233–240. doi: 10.1007/s00271-005-0022-8.
- Hatem Z., Kathy S., Raoul L. 2007. Étude des caractères morphologiques des plantes de tomate soumises à un déficit hydrique en milieu hydroponique. *Sci. Chang. Planétaires Sécher.* 18, 57–64, doi:10.1684/sec.2007.0069.
- Hsiao T.C., Acevedo E. 1974. Plant modification for more efficient water use Plant responses to water deficits, water-use efficiency, and drought resistance. *Agric. Meteorol.* 14, 59–84, doi:10.1016/0002-1571(74)90011-9.
- Jackson R.D., Center L.B.J.S. 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator.

- Jarvis P.G., 1976. The Interpretation of the Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in the Field. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 273, 593–610, doi:10.1098/rstb.1976.0035.
- Kichah A., Bournet P.E., Migeon C., Boulard T. 2012 Measurement and CFD simulations of microclimate characteristics of an Impatiens pot plant crop in a greenhouse, *Biosystems Engineering*, 112, 22-34, doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.01.012.
- Kim K., Yoon J.Y., Kwon H.J., Han J.H., Son J.E., Nam S.W., Giacomelli G.A. and Lee I.B. 2008. 3-D CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with fog cooling system and refrigerative dehumidifiers. *Biosystems Engineering*, 100(2), 245-255, doi:10.1016/j.biosystemseng.2008.03.006.
- Launder B.E., Spalding D.B. 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computational Method for Applied Mechanical Engineering*, 3(2), 269-289, doi: 10.1016/0045-7825(74)90029-2.
- Majdoubi H., Boulard T., Fatnassi H., Senhaji A., Elbahi S., Demrati H., Bouirden L. 2016. Canary greenhouse CFD nocturnal climate simulation. *Open Journal of Fluid Dynamics*, 6(02), 88-100, doi: 10.4236/ojfd.2016.62008.
- Majdoubi H., Boulard T., Fatnassi H., Bouirden L., 2009. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: An experimental and CFD assisted study. *Agric. For. Meteorol.* 149, 1050–1062. doi:10.1016/j.agrformet.2009.01.002.
- Monteith J.L. 1977. Resistance of a partially wet canopy: Whose equation fails? *Bound. Layer Meteorol* 12, 375–383.
- Monteith J.L., Unsworth M.H. 1990. *Principles of Environmental Physics*. Arnold, London, 241 p.
- Montero J.I., Antón A. Muñoz P., Lorenzo P. 2001. Transpiration from geranium grown under high temperatures and low humidities in greenhouses. *Agricultural and Forest Meteorology* 107, 323–332. doi:10.1016/S0168-1923(01)00215-5.
- Morille B., Migeon C., Bournet P.E. 2013. Is the Penman–Monteith model adapted to predict crop transpiration under greenhouse conditions? Application to a New Guinea Impatiens crop. *Scientia Horticulturae*, 152, 80-91, doi:10.1016/j.scienta.2013.01.010.

- Nebbal, R., Roy J.C., Boulard, T. 2012. Dynamic simulation of the distributed radiative and convective climate within a cropped greenhouse *Renewable Energy* 43,111-129, doi:10.1016/j.renene.2011.12.003.
- Richards P.J., Hoxey R.P. 1993. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k -  $\epsilon$  turbulence model. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 46-47, 145-153, doi: 10.1016/j.jweia.2010.12.008.
- van Genuchten M.T. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892–898.
- Verhoef A., Egea G., 2014. Modeling plant transpiration under limited soil water: Comparison of different plant and soil hydraulic parameterizations and preliminary implications for their use in land surface models. *Agric. For. Meteorol.* 191, 22–32, doi:10.1016/j.agrformet.2014.02.009.





### Conclusions

L'objectif principal de ce travail de thèse était de développer un modèle capable de bien simuler les transferts d'eau et d'énergie sous serre agricole tant pour des plantes en conditions de confort hydrique que pour des plantes en restriction hydrique. Ce modèle doit permettre in fine d'identifier le meilleur scénario d'irrigation permettant d'assurer un bon développement des plantes tout en minimisant les consommations en eau. Pour mettre au point ce modèle une double approche modélisatrice et expérimentale a été adoptée. Nous dressons ici un bilan du travail qui a été réalisé et donnons une description succincte des étapes mises en œuvre ainsi que des résultats obtenus :

1. Recherches bibliographiques : L'état de l'art s'est focalisé i) sur les transferts d'eau et d'énergie dans le continuum sol-plante-atmosphère pour les cultures en plein champ et sous serre agricole ainsi que ii) sur les méthodes utilisées pour simuler le micro climat sous serre pour des régimes d'irrigation en confort et en restriction. Une attention particulière a été portée sur la modélisation de la résistance stomatique qui constitue un élément clef gouvernant les flux de transpiration, ainsi que le fonctionnement hydrodynamique du substrat.

2. Campagne de mesure : une campagne de mesure lancée en 2014 sous serre a permis de suivre les échanges d'eau et d'énergie dans le continuum sol-plante-atmosphère. Cette campagne avait pour objectif de fournir des données d'entrée et de validation pour simuler l'impact d'une restriction hydrique sur le microclimat sous serre avec le logiciel de mécanique des fluides numérique (CFD) ANSYS Fluent. Des mesures de résistance stomatique en confort et en restriction hydrique ont été effectuées afin de calibrer et/ou de valider les modèles de résistance stomatique en confort et en restriction hydrique. Une autre campagne de mesure en chambre de culture a été réalisée en 2014 également pour paramétrer le modèle de la résistance stomatique avec la méthode des plans d'expériences. En général, des bonnes mesures ont été récoltées de la campagne 2014 soit dans la serre ou bien dans la chambre de culture. La campagne de mesure 2015 sous serre avait pour objectif d'améliorer la fonction de stress hydrique (intervenant dans l'expression de la résistance stomatique en condition de restriction hydrique) et

d'exprimer cette dernière en fonction du potentiel hydrique de feuille au lieu du potentiel matriciel. Les mesures de potentiel de feuille se sont avérées assez délicates, et il n'a pas été possible d'établir de corrélation claire entre l'évolution de la résistance stomatique et celle du potentiel de feuille.

3. Modélisation: une première étape a été mise en œuvre afin de mettre au point des modèles empiriques de la résistance stomatique en confort et en restriction hydrique selon deux méthodes différentes : la méthode multiplicative de Jarvis et la méthode des plans d'expériences. Dans un premier temps, pour des plantes en condition de confort hydrique, le modèle multiplicatif de Jarvis a été calibré avec les données obtenues sous serre tandis que le modèle polynomial a été calibré avec les données mesurées dans la chambre de culture. Une fonction de stress multiplicative dépendant du potentiel matriciel a ensuite été établie afin d'adapter l'expression de résistance stomatique au de restriction hydrique. Cette fonction a été calibrée à partir des données acquises sous serre. L'étape de validation des deux modèles de  $R_s$  avec les données obtenues sous serre a montré que les deux approches (Jarvis et plans d'expériences) sont comparables en termes de performances aussi bien en confort qu'en restriction hydrique, avec un avantage cependant pour le modèle polynomial qui demande peu de points de mesure dans sa phase de calibration comparé au modèle de Jarvis. Ces modèles de résistance stomatique ont été testés pour estimer la transpiration avec l'approche de Penmann Monteith (PM) d'une part et la méthode directe (DM) d'autre part. Ces méthodes ont montré leur bonne capacité à prédire la transpiration avec un léger avantage toutefois pour le modèle de PM dans le cas d'une restriction hydrique.

Une deuxième étape de modélisation a ensuite été mise en œuvre. Elle concerne l'intégration des modèles de résistance stomatique en confort et en restriction hydrique issu de la méthode des plans d'expérience dans le modèle global de CFD en bidimensionnel (plan vertical) avec le logiciel ANSYS Fluent 15. Une routine spécifique a été développée puis intégrée dans le logiciel ANSYS Fluent 15 pour prendre en compte l'impact du couvert végétal sur le microclimat ainsi le bilan hydrique dans le continuum substrat-plante pour prédire à chaque pas de temps le potentiel matriciel du substrat

utilisé par la suite dans la fonction de stress. Le bilan hydrique dans le continuum substrat-plante à l'instant  $n+1$  est réalisé à partir de la connaissance de la teneur en eau à l'instant  $n$  dans le substrat qui dépend de l'irrigation et de la transpiration. Ce bilan permet de déduire la teneur en eau dans le substrat à chaque pas de temps, puis de déterminer le potentiel matriciel du substrat en utilisant le modèle de Van Genuchten calibré à partir des données recueillies sous serre.

Pour simplifier les calculs et valider la routine, le travail s'est focalisé dans un premier temps sur un domaine limité autour du couvert végétal et des simulations ont été réalisées en considérant les deux régimes d'irrigation. La comparaison entre les différentes variables mesurées et simulées (température, humidité, potentiel matriciel,  $R_s$ , transpiration) a mis en exergue une bonne adéquation des résultats du modèle avec les données expérimentales, que ce soit en confort ou en restriction hydrique. Dans un second temps, des simulations ont été réalisées sur le domaine complet incluant le compartiment de serre expérimental et les deux compartiments adjacents afin d'accroître le réalisme des simulations. Des résultats de bonne qualité ont été obtenus, même si leur adéquation avec les mesures était un peu moins bonne que dans le cas du domaine limité, et ce pour les deux régimes d'irrigation. Nous attribuons cette légère dégradation des performances du modèle à la simplification opérée dans le logiciel Fluent pour représenter l'écran d'ombrage (i.e. milieu considéré comme étanche, et ajout de cheminées de part et d'autre de l'écran pour autoriser une circulation d'air).

Enfin, des tests de différents scénarios d'irrigation ont été effectués aussi bien pour le domaine limité que pour le domaine complet l'idée étant d'identifier le scénario optimal permettant de réduire la consommation en l'eau tout en conservant i) une transpiration comparable à celle de plantes en confort ii) une température des feuilles inférieures ou égale à la température de l'air (ce qui permet a priori d'assurer le confort des plantes et par conséquent de garantir leur bon développement). Ces tests ont révélé que pour le domaine limité, le scénario avec 80 % d'apport (100 % correspondent à la capacité de rétention du substrat), était le meilleur puisqu'il permet d'économiser 20 % d'eau soit 0.13 L par pot par jour, tandis que pour le domaine complet, le scénario à 70 %

d'apport était le meilleur et permettait d'économiser 0.19 L par pot par jour. Nous avons par ailleurs constaté qu'une réduction des apports en eau réduit l'humidité à l'intérieur de la serre dans des proportions probablement suffisantes pour permettre de prévenir le développement de certaines maladies (fongiques notamment) et que donc cette solution méritera plus amples investigations.

4. Valorisation scientifique des travaux : trois articles ont été publiés : Le premier (Bouhoun Ali et al., 2016a) est paru dans le journal *Biosystems Engineering*, il porte sur l'utilisation de la méthode des plans d'expérience pour modéliser la résistance stomatique en confort hydrique. Les performances du modèle établi sont ensuite comparées à celles du modèle de Jarvis. Un deuxième article (cf. Annexe 7: Cannavo et al., 2016) est publié dans le journal *Biosystems Engineering*, où un modèle global a été utilisé pour le test des différents scénarios d'irrigation, ce modèle global intègre le modèle de la résistance stomatique issu des plans d'expérience et la fonction de stress hydrique. Un troisième article (Bouhoun Ali et al., 2016b) a été soumis dans le journal *Computers and Electronics in Agriculture*. Il porte sur la modélisation du microclimat sous serre pour un domaine limité autour du couvert végétal selon une approche de climat distribué (CFD) en 2D pour différents régimes d'irrigation.

Enfin sept autres articles (cf. Annexes 2, 4, 5, 6, 8, 9 et 10) pour des actes de congrès internationaux ont été rédigés en collaboration avec les membres de l'unité. Ils portent essentiellement sur la modélisation de la résistance stomatique avec les méthodes de Jarvis et des plans d'expériences pour les deux régimes d'irrigation en confort et en restriction hydrique (introduction de la fonction de stress), ainsi que sur la modélisation du microclimat sous serre avec le logiciel ANSYS Fluent pour différents régimes d'irrigation. Un acte (cf. Annexe 2) porte sur les travaux qui ont été réalisés dans le cadre de mon stage de fin d'étude M2. Il porte essentiellement sur la modélisation du climat sous serre agricole par le logiciel CFD pour cas de nuit en intégrant les mécanismes de condensation. Il a également débouché sur un article plus conséquent publié sur cette thématique en 2014 (cf. Annexe 1 : Bouhoun Ali et al., 2014). Certains travaux (cf. Annexes 2, 4, 5, et 6) ont été présentés au congrès Greensys 2015 qui s'est

tenu à Evora (Portugal) en juillet 2015, d'autres travaux (cf. Annexe 8, et 9) ont été présentés au congrès CIGR AGenG qui a eu lieu à Aarhus (Danemark) en juin 2016, et un travail (cf. annexe 10) a été présenté au congrès Hortimodel à Avignon (France) septembre 2016. Ces travaux ont été soumis pour publication dans les actes de ces différents congrès.



### Perspectives de ce travail

Nous restons conscients des limites du travail et que d'autres améliorations pourraient être apportées à ce travail tant au niveau de la modélisation de la résistance stomatique (et spécialement la fonction de stress) que sur la modélisation du microclimat pour le domaine complet de la serre pour les différents régimes d'irrigation.

- Des mesures plus précises du potentiel de feuille pourraient aider à améliorer la formalisation de la fonction du stress et donc la modélisation de la résistance stomatique en restriction hydrique.
- Le couplage du modèle de résistance stomatique à un modèle de croissance végétale, pourrait également déboucher sur un modèle plus robuste applicable quel que soit le stade de développement des plantes.
- Une modélisation plus réaliste de l'écran d'ombrage en le considérant comme milieu poreux pour inclure les transferts de masse en plus des transferts thermiques, pourrait aussi aider à augmenter la précision de la simulation du microclimat pour le grand domaine.
- Des simulations en 3D permettraient d'accéder à une distribution plus fine des différentes variables climatiques et permettraient d'accroître le réalisme des simulations.
- Il faudrait enfin valider et tester le modèle en mettant en œuvre des expérimentations s'appuyant sur les meilleurs scénarios d'irrigation identifiés grâce au modèle de CFD afin de vérifier si ces réductions d'apport d'eau, sans affecter trop la transpiration assurent vraiment i) un développement normal des plantes (i.e. une quantité de biomasse équivalente à celle des plantes en confort hydrique) ii) une qualité esthétique de la plante (architecture) semblable à celle du confort.
- Enfin, ce modèle permet de simuler les transferts d'eau et de chaleur dans le systèmes contraints (serre, conteneur). L'unité de recherche souhaite désormais appliquer ce modèle en contexte urbain afin d'évaluer la gestion de la ressource en eau en ville pour optimiser les services écosystémiques rendus par les espaces

verts, tels que l'îlot de fraîcheur. Des adaptations au contexte urbain seront donc nécessaires pour répondre à ces nouveaux enjeux (réverbération des bâtiments, éclairage nocturne,...).



**Références bibliographiques**

- Aasamaa, K., Söber, A., 2011. Responses of stomatal conductance to simultaneous changes in two environmental factors. *Tree Physiol.* doi:10.1093/treephys/tpr078
- Allaire-Leung, S.E., Caron, J., Parent, L.E., 1999. Changes in physical properties of peat substrates during plant growth. *Can. J. Soil Sci.* 79, 137–139.
- Anstett, A., Pasquier, P., 1980. Les substrats et les supports de culture en pépinières, cultures florales, cultures maraichères. *HORTIMAT Angers* 18.
- Aphalo, P.J., Jarvis, P.G., 1991. Do stomata respond to relative humidity? *Plant Cell Environ.* 14, 127–132.
- Baille, A., 1999. Energy cycle. *Greenhouse ecosystems.* Elsevier Neth. 265–286.
- Baille, M., Baille, A., Delmon, D., 1994a. Microclimate and transpiration of greenhouse rose crops. *Agric. For. Meteorol.* 71, 83–97. doi:10.1016/0168-1923(94)90101-5
- Baille, M., Baille, A., Laury, J.C., 1994. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. *Sci. Hortic.* 59, 217–232. doi:10.1016/0304-4238(94)90015-9
- Baille, M., Baille, A., Laury, J.C., 1994c. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. *Sci. Hortic.* 59, 217–232. doi:10.1016/0304-4238(94)90015-9
- Baille, M., Baille, A., Laury, J.C., 1994b. Canopy surface resistances to water vapour transfer for nine greenhouse pot plant crops. *Sci. Hortic.* 57, 143–155. doi:10.1016/0304-4238(94)90042-6
- Ball, J.T., 1988. An analysis of stomatal conductance. Stanford University Stanford.
- Ball, J.T., Woodrow, I.E., Berry, J.A., 1987a. A Model Predicting Stomatal Conductance and its Contribution to the Control of Photosynthesis under Different Environmental Conditions, in: Biggins, J. (Ed.), *Progress in Photosynthesis Research: Volume 4 Proceedings of the VIIth International Congress on Photosynthesis Providence, Rhode Island, USA, August 10–15, 1986.* Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 221–224.
- Ball, J.T., Woodrow, I.E., Berry, J.A., 1987b. A Model Predicting Stomatal Conductance and its Contribution to the Control of Photosynthesis under Different Environmental

- Conditions, in: Biggins, J. (Ed.), *Progress in Photosynthesis Research*. Springer Netherlands, pp. 221–224.
- Baptista, F.J., Bailey, B.J., Randall, J.M., Meneses, J.F., 1999. Greenhouse Ventilation Rate: Theory and Measurement with Tracer Gas Techniques. *J. Agric. Eng. Res.* 72, 363–374. doi:10.1006/jaer.1998.0381
- Bartzanas, T., Boulard, T., Kittas, C., 2004. Effect of Vent Arrangement on Windward Ventilation of a Tunnel Greenhouse. *Biosyst. Eng.* 88, 479–490. doi:10.1016/j.biosystemseng.2003.10.006
- Bartzanas, T., Boulard, T., Kittas, C., 2002. Numerical simulation of the airflow and temperature distribution in a tunnel greenhouse equipped with insect-proof screen in the openings. *Comput. Electron. Agric.* 34, 207–221. doi:10.1016/S0168-1699(01)00188-0
- Baxevanou, C., Bartzanas, T., Fidaros, D., Kittas, C., 2008. Solar radiation distribution in a tunnel greenhouse. *Acta Horti* 801, 855–862.
- Bibi, N.T., Benyarou, F., Benyoucef, B., El Sayed, M.A.R., 1999. Bilan Thermique et Méthode d'Estimation des Besoins Energétiques de la Serre Agricole Tunnel à Double Paroi Constituée dans sa Face Nord d'un Mur en Panneau Sandwich. *Énerg. Renouvelables* 77–82.
- Blake, T.J., Sperry, J.S., Tschaplinski, T.J., Wang, S.S., 1996. Water relations. In: *Biology of Populus and its Implications for Management and Conservation*. NRC Res. Press Ott. 401–422.
- Blocken, B., Stathopoulos, T., Carmeliet, J., 2007. CFD simulation of the atmospheric boundary layer: wall function problems. *Atmos. Environ.* 41, 238–252. doi:10.1016/j.atmosenv.2006.08.019
- Bouhoun Ali, H., Bournet, P.-E., Danjou, V., Morille, B., Migeon, C., 2014. CFD simulations of the night-time condensation inside a closed glasshouse: Sensitivity analysis to outside external conditions, heating and glass properties. *Biosyst. Eng.* 127, 159–175.

- Bouhoun Ali, H., Bournet, P.E., Cannavo, P., Chantoiseau, E., 2016b. Development of a CFD crop submodel for simulating microclimate and transpiration of ornamental plants grown in a greenhouse under water restriction. *Biosyst. Eng.* Press.
- Bouhoun Ali, H., Bournet, P.-E., Cannavo, P., Chantoiseau, E., Sourgnès, M., 2016. Stomatal resistance of New Guinea Impatiens pot plants. Part 1: Model development for well watered plants based on design of experiments. *Biosyst. Eng.* 149, 112–124. doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.05.004
- Bouhoun Ali, H., Bournet, P.E., Cannavo, P., Chantoiseau, E., Sourgnès, M., 2016. A new method for modelling stomatal resistance under water deficit conditions by means of/using design of experiments. *Biosyst. Eng.* Submitt.
- Bouhoun Ali, H., Bournet, P.-E., Cannavo, P., Chantoiseau, E., Sourgnès, M., 2016a. Stomatal resistance of New Guinea Impatiens pot plants. Part 1: Model development for well watered plants based on design of experiments. *Biosyst. Eng.* 149, 112–124. doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.05.004
- Boulard T., Baille A., 1999. Caractérisation de la ventilation sous serre, couplage avec la transpiration, in: Choukr-Allah R. (Ed.), *Protected Cultivation in the Mediterranean Region, Cahiers Options Méditerranéennes*. Paris : CIHEAM / IAV Hassan II, pp. 87–97.
- Boulard, T., Baille, A., 1995. Modelling of Air Exchange Rate in a Greenhouse Equipped with Continuous Roof Vents. *J. Agric. Eng. Res.* 61, 37–47. doi:10.1006/jaer.1995.1028
- Boulard, T., Baille, A., Mermie, M., Villette, F., 1991. Mesures et modélisation de la résistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomates de serre. *Agron. EDP Sci.* 11, 259–274. doi:http://dx.doi.org/10.1051/agro:19910403
- Boulard, T., Fatnassi, H., Kichah, A., Girardot, F., Roy, J.C., Lee, I.B., 2008. Development and validation of a global cfd model of heat, water vapour and fungal spores transfers in a greenhouse, in: *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, pp. 877–885. doi:10.17660/ActaHortic.2008.801.103

- Boulard, T., Mermier, M., Fargues, J., Smits, N., Rougier, M., Roy, J.C., 2002. Tomato leaf boundary layer climate: implications for microbiological whitefly control in greenhouses. *Agric. For. Meteorol.* 110, 159–176. doi:10.1016/S0168-1923(01)00292-1
- Boulard, T., Wang, S., 2002a. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel. *Comput. Electron. Agric.* 34, 173–190. doi:10.1016/S0168-1699(01)00186-7
- Boulard, T., Wang, S., 2002b. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel. *Comput. Electron. Agric.* 34, 173–190. doi:10.1016/S0168-1699(01)00186-7
- Bournet, P.-E., Boulard, T., 2010. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: A review of experimental and CFD studies. *Comput. Electron. Agric.* 74, 195–217. doi:10.1016/j.compag.2010.08.007
- Bournet, P.E., Khaoua, S.O., Boulard, T., 2007. Numerical prediction of the effect of vent arrangements on the ventilation and energy transfer in a multi-span glasshouse using a bi-band radiation model. *Biosyst. Eng.* 98, 224–234.
- Bournet, P.E., Ould Khaoua, S.A., Boulard, T., 2007. Numerical prediction of the effect of vent arrangements on the ventilation and energy transfer in a multi-span glasshouse using a bi-band radiation model. *Biosyst. Eng.* 98, 224–234. doi:10.1016/j.biosystemseng.2007.06.007
- Box, W., Wilson, W., 1951. Central composite designs. *J R Stat Soc X111*, 1–35.
- Brundrett, E., 1993. Prediction of Pressure Drop for Incompressible Flow Through Screens. *J. Fluids Eng.* 115, 239–242. doi:10.1115/1.2910130
- Cannavo, P., Bouhoun Ali, H., Chantoiseau, E., Migeon, C., Charpentier, S., Bournet, P.-E., 2016. Stomatal resistance of New Guinea Impatiens pot plants. Part 2: Model extension for water restriction and application to irrigation scheduling. *Biosyst. Eng.* 149, 82–93. doi:10.1016/j.biosystemseng.2016.07.001
- Cannavo, P., Hafdhi, H., Michel, J.-C., 2011. Impact of root growth on the physical properties of peat substrate under a constant water regimen. *HortScience* 46, 1394–1399.

- Cannavo, P., Michel, J.-C., 2013. Peat particle size effects on spatial root distribution, and changes on hydraulic and aeration properties. *Sci. Hortic.* 151, 11–21. doi:10.1016/j.scienta.2012.12.021
- Casaroli, D., de Jong van Lier, Q., Dourado Neto, D., 2010. Validation of a root water uptake model to estimate transpiration constraints. *Agric. Water Manag.* 97, 1382–1388. doi:10.1016/j.agwat.2010.04.004
- Caspari, H.W., Green, S.R., Edwards, W.R.N., 1993. Transpiration of well-watered and water-stressed Asian pear trees as determined by lysimetry, heat-pulse, and estimated by a Penman-Monteith model. *Agric. For. Meteorol.* 67, 13–27. doi:10.1016/0168-1923(93)90047-L
- Castilla, N., 2013. *Greenhouse technology and management*. Cabi.
- Causon, D.M., Mingham, C.G., Qian, L., 2011. *Introductory finite volume methods for pdes*. Bookboon.
- Čereković, N., Pagter, M., Kristensen, H.L., Pedersen, H.L., Brennan, R., Petersen, K.K., 2013a. Effects of drought stress during flowering of two pot-grown blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) cultivars. *Sci. Hortic.* 162, 365–373. doi:10.1016/j.scienta.2013.08.026
- Čereković, N., Pagter, M., Kristensen, H.L., Pedersen, H.L., Brennan, R., Petersen, K.K., 2013b. Effects of drought stress during flowering of two pot-grown blackcurrant (*Ribes nigrum* L.) cultivars. *Sci. Hortic.* 162, 365–373. doi:10.1016/j.scienta.2013.08.026
- Cha, H., Song, T., 2000. Discrete Ordinates Interpolation Method Applied to Irregular Three-Dimensional Geometries. *ASME J Heat Transf.* 122, 823–827. doi:10.1115/1.1315597
- Chen, J., Xu, F., Tan, D., Shen, Z., Zhang, L., Ai, Q., 2015. A control method for agricultural greenhouses heating based on computational fluid dynamics and energy prediction model. *Appl. Energy* 141, 106–118. doi:10.1016/j.apenergy.2014.12.026
- Chmielewski, M., Gieras, M., 2013. Three-zonal Wall Function for k- $\epsilon$  Turbulence Models. *Comput. Methods Sci. Technol.* 19, 107–114.

- Choi, M., Jacobs, J.M., Kustas, W.P., 2008. Assessment of clear and cloudy sky parameterizations for daily downwelling longwave radiation over different land surfaces in Florida, USA. *Geophys Res Lett* 35, L20402. doi:10.1029/2008GL035731
- Cochran, D.R., Harkess, R.L., Knight, P.R., Blythe, E.K., Tomaso-Peterson, M., Gilliam, C.H., 2013. Antitranspirant effects on water use efficiency in impatiens, in: *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, pp. 423–428. doi:10.17660/ActaHortic.2013.1014.94
- Cohen, S., Raveh, E., Li, Y., Grava, A., Goldschmidt, E.E., 2005. Physiological responses of leaves, tree growth and fruit yield of grapefruit trees under reflective shade screens. *Sci. Hortic.* 107, 25–35. doi:10.1016/j.scienta.2005.06.004
- Damour, G., 2008. Bases théoriques et approches expérimentales de la modélisation des effets de la contrainte hydrique sur les échanges gazeux foliaires du manguier et du litchi. Université de la Réunion.
- Damour, G., Simonneau, T., Cochard, H., Urban, L., 2010. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant Cell Environ.* 33, 1419–1438. doi:10.1111/j.1365-3040.2010.02181.x
- Darcy, H., Darcy, H., Darcy, H., 1856. Les fontaines publiques de la ville de Dijon.
- Day, M.E., 2000. Influence of temperature and leaf-to-air vapor pressure deficit on net photosynthesis and stomatal conductance in red spruce (*Picea rubens*). *Tree Physiol.* 20, 57–63.
- De Boodt, M., Verdonck, O., 1971. The physical properties of the substrates in horticulture, in: *III Symposium on Peat in Horticulture* 26. pp. 37–44.
- De Costa, W., Dennett, M.D., 1992. Is canopy light extinction coefficient a species-specific constant. *Trop. Agric. Res.* 4, 123–137.
- Demrati, H., Boulard, T., Fatnassi, H., Bekkaoui, A., Majdoubi, H., Elattir, H., Bouirden, L., 2007. Microclimate and transpiration of a greenhouse banana crop. *Biosyst. Eng.* 98, 66–78. doi:10.1016/j.biosystemseng.2007.03.016

- Draoui, B., Bounaama, F., Boulard, T., Bibi-Triki, N., 2013. In-situ Modelisation of a Greenhouse Climate Including Sensible Heat, Water Vapour and CO<sub>2</sub> Balances. EPJ Web Conf. 45, 1023.
- Eamus, D., 2006. Ecohydrology: vegetation function, water and resource management. Csiro Publishing.
- Egea, G., Verhoef, A., Vidale, P.L., 2011. Towards an improved and more flexible representation of water stress in coupled photosynthesis–stomatal conductance models. *Agric. For. Meteorol.* 151, 1370–1384. doi:10.1016/j.agrformet.2011.05.019
- Eymard, R., Gallouët, T., Herbin, R., 2000. Finite volume methods, in: *Handbook of Numerical Analysis*. Elsevier, pp. 713–1018.
- Fatnassi, H., Boulard, T., Poncet, C., Chave, M., 2006. Optimisation of Greenhouse Insect Screening with Computational Fluid Dynamics. *Biosyst. Eng.* 93, 301–312. doi:10.1016/j.biosystemseng.2005.11.014
- Ferziger, J.H., Peric, M., 2012. *Computational methods for fluid dynamics*. Springer Science & Business Media.
- Fidaros, D.K., Baxevanou, C.A., Bartzanas, T., Kittas, C., 2010. Numerical simulation of thermal behavior of a ventilated arc greenhouse during a solar day. *Spec. Sect. IST Natl. Conf.* 2009 35, 1380–1386. doi:10.1016/j.renene.2009.11.013
- Fitz-Rodríguez, E., Kubota, C., Giacomelli, G.A., Tignor, M.E., Wilson, S.B., McMahon, M., 2010. Dynamic modeling and simulation of greenhouse environments under several scenarios: A web-based application. *Comput. Electron. Agric.* 70, 105–116. doi:10.1016/j.compag.2009.09.010
- Fletcher, A.L., Sinclair, T.R., Allen Jr., L.H., 2007. Transpiration responses to vapor pressure deficit in well watered “slow-wilting” and commercial soybean. *Environ. Exp. Bot.* 61, 145–151. doi:10.1016/j.envexpbot.2007.05.004
- Fluent, A., 2014. *Theory Guide and User’s Guide*. Ansys Inc USA.
- Fonteno, W.C., 1996. Growing media: types and physical/chemical properties. *Grow. Guide Water Media Nutr. Greenh. Crops Batavia Ill.* 93–122.
- Fouquart, Y., 2003. *Le climat de la Terre*. Presses Univ. Septentrion.

- Gerosa, G., Mereu, S., Finco, A., Marzuoli, R., 2012. Stomatal Conductance Modeling to Estimate the Evapotranspiration of Natural and Agricultural Ecosystems.
- González-Dugo, M.P., Moran, M.S., Mateos, L., Bryant, R., 2006. Canopy temperature variability as an indicator of crop water stress severity. *Irrig. Sci.* 24, 233–240.
- Granate, P., Coelho, P.J., Roger, M., 2016. Radiative heat transfer in strongly forward scattering media using the discrete ordinates method. *Eurotherm Conf. No 105 Comput. Therm. Radiat. Particip. Media V 172*, 110–120. doi:10.1016/j.jqsrt.2015.12.011
- Granier, A., Loustau, D., 1994. Measuring and modelling the transpiration of a maritime pine canopy from sap-flow data. *Agric. For. Meteorol.* 71, 61–81. doi:10.1016/0168-1923(94)90100-7
- Grant, C.D., Groenevelt, P.H., Robinson, N.I., 2010. Application of the Groenevelt–Grant soil water retention model to predict the hydraulic conductivity. *Soil Res.* 48, 447–458.
- Gras, R., 1987. Propriétés physiques des substrats. Les cultures hors sol.
- Groenevelt, P.H., Grant, C.D., 2004. A new model for the soil-water retention curve that solves the problem of residual water contents. *Eur. J. Soil Sci.* 55, 479–485.
- Guyot, G., 1999. Climatologie de l'environnement. De la plante aux écosystèmes. Masson Paris Fr.
- Hallema, D.W., Périard, Y., Lafond, J.A., Gumiere, S.J., Caron, J., 2015. Characterization of water retention curves for a series of cultivated Histosols. *Vadose Zone J.* 14.
- Hatem, Z., Kathy, S., Raoul, L., 2007. Étude des caractères morphologiques des plantes de tomate soumises à un déficit hydrique en milieu hydroponique. *Sci. Chang. Planétaires Sécher.* 18, 57–64. doi:10.1684/sec.2007.0069
- Haxaire, R., 1999a. Caractérisation et modélisation des écoulements d'air dans une serre. Thèse Dr. Univ. Nice - Sophia Antipolis Nice FRA.
- Haxaire, R., 1999b. Caractérisation et modélisation des écoulements d'air dans une serre. Thèse Dr. Univ. Nice - Sophia Antipolis Nice FRA.



- He, K., Chen, D., Sun, L., Liu, Z., Huang, Z., 2015. The effect of vent openings on the microclimate inside multi-span greenhouses during summer and winter seasons. *Eng. Appl. Comput. Fluid Mech.* 9, 399–410. doi:10.1080/19942060.2015.1061553
- Hopkins, W., 2003. *Physiologie végétale*. Boeck Brux.
- Hsiao, T.C., Acevedo, E., 1974a. Plant modification for more efficient water use Plant responses to water deficits, water-use efficiency, and drought resistance. *Agric. Meteorol.* 14, 59–84. doi:10.1016/0002-1571(74)90011-9
- Hsiao, T.C., Acevedo, E., 1974b. Plant modification for more efficient water use Plant responses to water deficits, water-use efficiency, and drought resistance. *Agric. Meteorol.* 14, 59–84. doi:10.1016/0002-1571(74)90011-9
- Hu, H., Boisson-Dernier, A., Israelsson-Nordström, M., Böhmer, M., Xue, S., Ries, A., Godoski, J., Kuhn, J.M., Schroeder, J.I., 2010. Carbonic anhydrases are upstream regulators of CO<sub>2</sub>-controlled stomatal movements in guard cells. *Nat. Cell Biol.* 12, 87–93.
- Irmak, S., Mutiibwa, D., 2009. On the dynamics of stomatal resistance: relationships between stomatal behavior and micrometeorological variables and performance of Jarvis-type parameterization. *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.* 1923–1939.
- Jackson, R.D., Center, L.B.J.S., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator.
- Jarvis, P.G., 1976a. The Interpretation of the Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in the Field. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 273, 593–610. doi:10.1098/rstb.1976.0035
- Jarvis, P.G., 1976b. The Interpretation of the Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in the Field. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 273, 593–610. doi:10.1098/rstb.1976.0035
- Jaynes, J., Ding, X., Xu, H., Wong, W.K., Ho, C.-M., 2013. Application of fractional factorial designs to study drug combinations. *Stat. Med.* 32, 307–318. doi:10.1002/sim.5526
- Jones, H.G., 1999. *Physicochemical and Environmental Plant Physiology*, 2nd edn. *J. Appl. Ecol.* 36, 1076–1077. doi:10.1046/j.1365-2664.1999.00459-5.x

- Katerji, N., Hallaire, M., Perrire, A., 1983. Transfert hydrique dans le végétal. 1. Modélisation à l'échelle du couvert végétal en conditions naturelles. *Acta Oecologie Oecologie Plant.* 4(18)2, 171–117.
- Katsoulas, N., Baille, A., Kittas, C., 2001. Effect of misting on transpiration and conductances of a greenhouse rose canopy. *Agric. For. Meteorol.* 106, 233–247. doi:10.1016/S0168-1923(00)00211-2
- Katsoulas, N., Bartzanas, T., Boulard, T., Mermier, M., Kittas, C., 2006. Effect of Vent Openings and Insect Screens on Greenhouse Ventilation. *Biosyst. Eng.* 93, 427–436. doi:10.1016/j.biosystemseng.2005.01.001
- Katsoulas, N., Kittas, C., 2011. Greenhouse crop transpiration modelling. INTECH Open Access Publisher.
- Katsoulas, N., Kittas, C., 2008. Impact of greenhouse microclimate on plant growth and development with special reference to the Solanaceae. *Eur. J. Plant Sci. Biotechnol.* 2, 45–61.
- Kaufmann, M.R., 1982. Leaf Conductance as a Function of Photosynthetic Photon Flux Density and Absolute Humidity Difference from Leaf to Air. *Plant Physiol.* 69, 1018–1022.
- Kaufmann, M.R., 1982. Evaluation of season, temperature, and water stress effects on stomata using a leaf conductance model. *Plant Physiol.* 69, 1023–1026.
- Keane, P.J., 2000. Diseases and pathogens of eucalypts. Csiro publishing.
- Kempkes, F., Stanghellini, C., Hemming, S., Dai, J., 2008. Cover materials excluding near infrared radiation: effect on greenhouse climate and plant processes, in: *International Workshop on Greenhouse Environmental Control and Crop Production in Semi-Arid Regions* 797. pp. 477–482.
- Kent, M., 2000. *Advanced biology*. Oxford University Press.
- Kichah, A., Bournet, P.-E., Migeon, C., Boulard, T., 2012a. Corrigendum to “Measurement and CFD simulation of microclimate characteristics and transpiration of an Impatiens pot plant crop in a greenhouse” [*Biosyst. Eng.* 112 (1) (2012) 22–34]. *Biosyst. Eng.* 112, 252. doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.04.006

- Kichah, A., Bournet, P.-E., Migeon, C., Boulard, T., 2012b. Measurement and CFD simulation of microclimate characteristics and transpiration of an Impatiens pot plant crop in a greenhouse. *Biosyst. Eng.* 112, 22–34. doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.01.012
- Kichah, A., Bournet, P.-E., Migeon, C., Boulard, T., 2012c. Measurement and CFD simulation of microclimate characteristics and transpiration of an Impatiens pot plant crop in a greenhouse. *Biosyst. Eng.* 112, 22–34. doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.01.012
- Kichah, A., Bournet, P.-E., Migeon, C., Boulard, T., 2012d. Measurement and CFD simulation of microclimate characteristics and transpiration of an Impatiens pot plant crop in a greenhouse. *Biosyst. Eng.* 112, 22–34. doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.01.012
- Kim, T.-H., Böhmer, M., Hu, H., Nishimura, N., Schroeder, J.I., 2010. Guard cell signal transduction network: advances in understanding abscisic acid, CO<sub>2</sub>, and Ca<sup>2+</sup> signaling. *Annu. Rev. Plant Biol.* 61, 561.
- Kittas, C., Baille, A., Giaglaras, P., 1999. Influence of Covering Material and Shading on the Spectral Distribution of Light in Greenhouses. *J. Agric. Eng. Res.* 73, 341–351. doi:10.1006/jaer.1999.0420
- Kittas, C., Bartzanas, T., 2007. Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations. *Build. Environ.* 42, 3774–3784. doi:10.1016/j.buildenv.2006.06.020
- Kittas, C., Katsoulas, N., Bartzanas, T., 2012. Greenhouse climate control in mediterranean greenhouses. *Cuad. Estud. Agroaliment.* 89–114.
- Lemaire, F., 2003. Cultures en pots et conteneurs: Principes agronomiques et applications. Editions Quae.
- Li, G., Lin, L., Dong, Y., An, D., Li, Y., Luo, W., Yin, X., Li, W., Shao, J., Zhou, Y., Dai, J., Chen, W., Zhao, C., 2012a. Testing two models for the estimation of leaf stomatal conductance in four greenhouse crops cucumber, chrysanthemum, tulip and lilium. *Agric. For. Meteorol.* 165, 92–103. doi:10.1016/j.agrformet.2012.06.004.

- Li, G., Lin, L., Dong, Y., An, D., Li, Y., Luo, W., Yin, X., Li, W., Shao, J., Zhou, Y., Dai, J., Chen, W., Zhao, C., 2012b. Testing two models for the estimation of leaf stomatal conductance in four greenhouse crops cucumber, chrysanthemum, tulip and liliun. *Agric. For. Meteorol.* 165, 92–103. doi:10.1016/j.agrformet.2012.06.004
- Livingston, N.J., Topp, G.C., 1993. Soil water potential. *Soil Sampl. Methods Anal.* Ed. MR Carter Lewis Publ. Boca Raton Fla 559–568.
- Lundstedt, T., Seifert, E., Abramo, L., Thelin, B., Nyström, Å., Pettersen, J., Bergman, R., 1998. Experimental design and optimization. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 42, 3–40. doi:10.1016/S0169-7439(98)00065-3
- Majdoubi, H., Boulard, T., Fatnassi, H., Bouriden, L., 2009. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: An experimental and CFD assisted study. *Agric. For. Meteorol.* 149, 1050–1062. doi:10.1016/j.agrformet.2009.01.002
- Majdoubi, H., Boulard, T., Fatnassi, H., Senhaji, A., Elbahi, S., Demrati, H., Mouqallid, M., Bouriden, L., 2016. Canary Greenhouse CFD Nocturnal Climate Simulation. *Open J. Fluid Dyn.* 6, 88.
- McDonald, P.W., 1971. The computation of transonic flow through two-dimensional gas turbine cascades, in: *ASME 1971 International Gas Turbine Conference and Products Show*. American Society of Mechanical Engineers, p. V001T01A089-V001T01A089.
- McDonough, J.M., 2007. *Introductory Lectures on Turbulence: Physics. Math. Model.* [Httpwww Engr Uky Edu Acfdlctr-Notes634 Pdf Solid Fields Speed Press. Are Constr. Aspirating Contain. Basis Numer. Decis. RANS-Reynolds Averaged Navier-Stokes Use Fluent Program.](http://www.Engr.Uky.Edu/Acfdlctr-Notes634/Pdf/SolidFields/SpeedPress.AreConstr.AspiratingContain.BasisNumer.Decis.RANS-ReynoldsAveragedNavier-StokesUseFluentProgram)
- Mengel, K., Kirkby, E.A., 1978. *Principles of plant nutrition. Princ. Plant Nutr.*
- Mesmoudi, K., Soudani, A., Serir, L., 2008. Modèle de bilan énergétique d'une serre sans couvert végétal. *Énerg. Renouvelables* 11.
- Misson, L., Panek, J.A., Goldstein, A.H., 2004. A comparison of three approaches to modeling leaf gas exchange in annually drought-stressed ponderosa pine forests. *Tree Physiol.* 24, 529–541.

- Mistriotis, A., Arcidiacono, C., Picuno, P., Bot, G.P.A., Scarascia-Mugnozza, G., 1997a. Computational analysis of ventilation in greenhouses at zero- and low-wind-speeds. *Agric. For. Meteorol.* 88, 121–135. doi:10.1016/S0168-1923(97)00045-2
- Mistriotis, A., Bot, G.P.A., Picuno, P., Scarascia-Mugnozza, G., 1997b. Analysis of the efficiency of greenhouse ventilation using computational fluid dynamics. *Agric. For. Meteorol.* 85, 217–228. doi:10.1016/S0168-1923(96)02400-8
- Modest, M.F., 2003. Radiative heat transfer. *Amst. Acad.*
- Moe, R., Grimstad, S.O., Gislerod, H.R., 2005. The use of artificial light in year round production of greenhouse crops in Norway, in: V International Symposium on Artificial Lighting in Horticulture 711. pp. 35–42.
- Mohammadi, B., Pironneau, O., 1993. Analysis of the k-epsilon turbulence model. *Fr. Ed. MASSON.*
- Molina-Aiz, F.D., Fatnassi, H., Boulard, T., Roy, J.C., Valera, D.L., 2010. Comparison of finite element and finite volume methods for simulation of natural ventilation in greenhouses. *Comput. Electron. Agric.* 72, 69–86. doi:10.1016/j.compag.2010.03.002
- Monteith, J., Unsworth, M., 2013. Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere. Academic Press.
- Monteith, J.L., 1995. A reinterpretation of stomatal responses to humidity. *Plant Cell Environ.* 18, 357–364.
- Monteith, J.L., 1977. Resistance of a partially wet canopy: Whose equation fails? *Bound. Layer Meteorol* 12, 375–383.
- Monteith, J.L., 1973. Principles of Environmental Physics. *Phys. Today* 27.
- Monteith, J.L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. Appl. Ecol.* 9, 747–766.
- Monteith, J.L., Unsworth, M.H. (Eds.), 2013. Principles of Environmental Physics, in: Principles of Environmental Physics (Fourth Edition). Academic Press, Boston, p. i.
- Montero, J.I., Anton, A., Biel, C., Franquet, A., 1990. Cooling of greenhouses with compressed air fogging nozzles, in: *Acta Horticulturae*. International Society for

- Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, pp. 199–210.  
doi:10.17660/ActaHortic.1990.281.22
- Montero, J.I., Muñoz, P., Antón, A., Iglesias, N., 2005. Computational fluid dynamic modelling of night-time energy fluxes in unheated greenhouses, in: *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, pp. 403–410. doi:10.17660/ActaHortic.2005.691.48
- Montgomery, D.C., 2008. *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons.
- Morard, P., 1995. *Les cultures végétales hors sol*. SARL Publ. Agric. 80–83.
- Morille, B., 2012. *Elaboration of distributed climate model at shelter and plant scale in under greenhouse ornamental culture field : analyse of mass and heat tranfers, heat balance*. Agrocampus - Centre d'Angers.
- Morille, B., Migeon, C., Bournet, P.E., 2013. Is the Penman–Monteith model adapted to predict crop transpiration under greenhouse conditions? Application to a New Guinea Impatiens crop. *Sci. Hortic.* 152, 80–91. doi:10.1016/j.scienta.2013.01.010
- Morille, B., Migeon, C., Bournet, P.E., 2012. Effect of the heterogeneity of the radiation distribution on the crop activity, in: *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, pp. 755–762. doi:10.17660/ActaHortic.2012.952.95.
- Morot-Gaudry, J.-F., Moreau, F., Maurel, C., Sentenac, H., 2009. *Biologie Végétale-Nutrition et Métabolisme*.
- Motzo, R., Pruneddu, G., Giunta, F., 2013. The role of stomatal conductance for water and radiation use efficiency of durum wheat and triticale in a Mediterranean environment. *Eur. J. Agron.* 44, 87–97. doi:10.1016/j.eja.2012.09.002
- Murthy, J.Y., Mathur, S.R., 1998. Finite volume method for radiative heat transfer using unstructured meshes. *J. Thermophys. Heat Transf.* 12, 313–321.
- Nadeau, J.-P., Puiggali, J.-R., 1995. *Séchage: des processus physiques aux procédés industriels*.

- Nebbali, R., Roy, J.C., Boulard, T., 2012a. Dynamic simulation of the distributed radiative and convective climate within a cropped greenhouse. *Renew. Energy* 43, 111–129. doi:10.1016/j.renene.2011.12.003
- Nebbali, R., Roy, J.C., Boulard, T., 2012b. Dynamic simulation of the distributed radiative and convective climate within a cropped greenhouse. *Renew. Energy* 43, 111–129. doi:10.1016/j.renene.2011.12.003
- Nederhoff, E.M., 1994. Effects of CO<sub>2</sub> concentration on photosynthesis, transpiration and production of greenhouse fruit vegetable crops. Landbouwniversiteit Te Wageningen.
- Nikolov, N.T., Massman, W.J., Schoettle, A.W., 1995. Coupling biochemical and biophysical processes at the leaf level: an equilibrium photosynthesis model for leaves of C<sub>3</sub> plants. *Ecol. Model.* 80, 205–235. doi:10.1016/0304-3800(94)00072-P
- Nkongolo, N.V., Caron, J., 1999. Bark particle sizes and the modification of the physical properties of peat substrates. *Can. J. Soil Sci.* 79, 111–116.
- Nobel, P.S., 1999. *Physicochemical and environmental plant physiology*. Academic press.
- Okushima, L., Sase, S., Nara, M., 1989. A support system for natural ventilation design of greenhouses based on computational aerodynamics, in: *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, pp. 129–136. doi:10.17660/ActaHortic.1989.248.13.
- Ould Khaoua, S.-A., 2006. Modelling of the microclimate in a naturally-ventilated large multi-span glasshouse under the oceanic climate. Université d'Angers.
- Ould Khaoua, S.A., Bournet, P.E., Migeon, C., Boulard, T., Chassériaux, G., 2006. Analysis of Greenhouse Ventilation Efficiency based on Computational Fluid Dynamics. *Biosyst. Eng.* 95, 83–98. doi:10.1016/j.biosystemseng.2006.05.004
- Pang, T., 1992. Dynamic analysis of water and nutrient uptake for New Guinea Impatiens. The Ohio State University.
- Panković, D., Sakač, Z., Kevrešan, S., Plesničar, M., 1999. Acclimation to long-term water deficit in the leaves of two sunflower hybrids: photosynthesis, electron transport and carbon metabolism. *J. Exp. Bot.* 50, 128–138. doi:10.1093/jxb/50.330.128.

- Papadakis, G., Frangoudakis, A., Kyritsis, S., 1992. Mixed, forced and free convection heat transfer at the greenhouse cover. *J. Agric. Eng. Res.* 51, 191–205. doi:10.1016/0021-8634(92)80037-S.
- Patankar, S., 1980. *Numerical heat transfer and fluid flow*. CRC press.
- Payan, J.-C., Salançon, E., 2003. Outils de diagnostic du stress hydrique et application d'un modèle de bilan hydrique., in: *Etat Actuel Des Résultats*. IFV, Forum Aredvi. ITV Montpellier, pp. 8–13.
- Peet, M.M., Welles, G.W.H., 2005. Greenhouse tomato production. *Crop Prod. Sci. Hortic.* 13, 257.
- Penman, H.L., 1948. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proc. R. Soc. Lond. Math. Phys. Eng. Sci.* 193, 120–145. doi:10.1098/rspa.1948.0037
- Pieters, J.G., Deltour, J.M., 1999. Modelling solar energy input in greenhouses. *Sol. Energy* 67, 119–130. doi:10.1016/S0038-092X(00)00054-2
- Piscia, D., Montero, J.I., Baeza, E., Bailey, B.J., 2012a. A CFD greenhouse night-time condensation model. *Biosyst. Eng.* 111, 141–154. doi:10.1016/j.biosystemseng.2011.11.006
- Piscia, D., Montero, J.I., Baeza, E., Bailey, B.J., 2012b. A CFD greenhouse night-time condensation model. *Biosyst. Eng.* 111, 141–154. doi:10.1016/j.biosystemseng.2011.11.006
- Richards, P.J., Hoxey, R.P., 1993. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- $\epsilon$  turbulence model. *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 46, 145–153.
- Richards, P.J., Norris, S.E., 2011. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models revisited. *Fifth Int. Symp. Comput. Wind Eng.* 99, 257–266. doi:10.1016/j.jweia.2010.12.008
- Rico-Garcia, E., Reyes-Araiza, J.L., Herrera-Ruiz, G., 2006. Simulations of the climate in two different greenhouses, in: *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, pp. 325–332. doi:10.17660/ActaHortic.2006.719.36



- Rivière, L.M., 1992. Contribution à l'étude du fonctionnement hydrique du système substrat-plante en culture hors sol. Univ. D'Angers.
- Rivière, L.M., 1980. Importance des caractéristiques physiques dans le choix des substrats pour les cultures hors sol. *Pepinieristes Hortic. Maraichers*.
- Rivière, L.M., Morel, P., Loiseau, M., Laury, J.C., 1991. Mesure du potentiel hydrique des substrats de plantes en pots au moyen de tensiometres. *PHM Rev. Hortic*.
- Roy, J.C., Boulard, T., 2005. CFD prediction of the natural ventilation in a tunnel-type greenhouse: influence of wind direction and sensibility to turbulence models, in: *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, pp. 457–464. doi:10.17660/ActaHortic.2005.691.55.
- Roy, J.C., Boulard, T., Kittas, C., Wang, S., 2002. PA—Precision Agriculture. *Biosyst. Eng.* 83, 1–20. doi:10.1006/bioe.2002.0107
- Roy, J.C., Boulard, T., Lee, L.B., Chave, M., Nieto, C., 2006. CFD prediction of the distribution and deposition of fungal spores in a greenhouse, in: *Acta Horticulturae*. International Society for Horticultural Science (ISHS), Leuven, Belgium, pp. 279–286. doi:10.17660/ActaHortic.2006.719.31
- Sack, L., Holbrook, N.M., 2006. Leaf hydraulics. *Annu Rev Plant Biol* 57, 361–381.
- Schultz, H.R., 2003. Differences in hydraulic architecture account for near-isohydric and anisohydric behaviour of two field-grown *Vitis vinifera* L. cultivars during drought. *Plant Cell Environ.* 26, 1393–1405.
- Sevila, F., Dauple, P., 1990. Liaison recherche agronomique-industries plastiques.
- Siegel, R., Spuckler, C.M., 1994. Approximate solution methods for spectral radiative transfer in high refractive index layers. *Int. J. Heat Mass Transf.* 37, 403–413. doi:10.1016/0017-9310(94)90040-X.
- Sourgnès, M., Migeon, C., Bouhoun Ali, H., Bournet, P., Cannavo, P., Chantoiseau, E., 2015. Ability of multiplicative models to simulate stomatal resistance along plant growth : application to the New Guinea Impatiens grown in greenhouse. *Acta Hort Press*.
- Stanghellini, C., 1993. Mixed convection above greenhouse crop canopies. *Agric. For. Meteorol.* 66, 111–117. doi:10.1016/0168-1923(93)90085-V

- Stanghellini, C., 1987. Transpiration of greenhouse crops; an aid to climate management.
- Stewart, J., 1988a. Modelling surface conductance of pine forest. *Agric. For. Meteorol.* 43, 19–35. doi:10.1016/0168-1923(88)90003-2
- Stewart, J., 1988b. Modelling surface conductance of pine forest. *Agric. For. Meteorol.* 43, 19–35. doi:10.1016/0168-1923(88)90003-2
- Tardieu, F., Simonneau, T., 1998. Variability among species of stomatal control under fluctuating soil water status and evaporative demand: modelling isohydric and anisohydric behaviours. *J. Exp. Bot.* 49, 419–432.
- Thorpe, M.R., Warrit, B., Landsberg, J.J., 1980. Responses of apple leaf stomata: a model for single leaves and a whole tree. *Plant Cell Environ.* 3, 23–27. doi:10.1111/1365-3040.ep11580508
- Tuzet, A., Perrier, A., Leuning, R., 2003. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant Cell Environ.* 26, 1097–1116. doi:10.1046/j.1365-3040.2003.01035.x
- Van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892–898.
- van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892–898.
- Verhoef, A., Egea, G., 2014. Modeling plant transpiration under limited soil water: Comparison of different plant and soil hydraulic parameterizations and preliminary implications for their use in land surface models. *Agric. For. Meteorol.* 191, 22–32. doi:10.1016/j.agrformet.2014.02.009
- Vicente, G., Coteron, A., Martinez, M., Aracil, J., 1998. Application of the factorial design of experiments and response surface methodology to optimize biodiesel production. *Ind. Crops Prod.* 8, 29–35. doi:10.1016/S0926-6690(97)10003-6
- Vico, G., Porporato, A., 2008. Modelling C3 and C4 photosynthesis under water-stressed conditions. *Plant Soil* 313, 187–203.
- Von Elsner, B., Briassoulis, D., Waaijenberg, D., Mistriotis, A., Von Zabeltitz, C., Gratraud, J., Russo, G., Suay-Cortes, R., 2000. Review of structural and functional

- characteristics of greenhouses in European Union countries: Part I, design requirements. *J. Agric. Eng. Res.* 75, 1–16.
- Wang, C., Guo, L., Li, Y., Wang, Z., 2012. Systematic comparison of C3 and C4 plants based on metabolic network analysis. *BMC Syst. Biol.* 6, S9.
- Wang, S., 1998. Measurement and modelling of natural ventilation in a large Venlo-type greenhouse.
- Wang, S., Boulard, T., Haxaire, R., 1999. Air speed profiles in a naturally ventilated greenhouse with a tomato crop. *Agric. For. Meteorol.* 96, 181–188.
- Wang, X., LUO, J., LI, X., 2013. CFD Based Study of Heterogeneous Microclimate in a Typical Chinese Greenhouse in Central China. *J. Integr. Agric.* 12, 914–923. doi:10.1016/S2095-3119(13)60309-3
- Wang, Y.-P., Leuning, R., 1998. A two-leaf model for canopy conductance, photosynthesis and partitioning of available energy I: Model description and comparison with a multi-layered model. *Agric. For. Meteorol.* 91, 89–111. doi:10.1016/S0168-1923(98)00061-6
- Warrit, B., Landsberg, J.J., Thorpe, M.R., 1980. Responses of apple leaf stomata to environmental factors. *Plant Cell Environ.* 3, 13–22.
- Wei, Z., Liu, Y., Xu, D., Cai, J., Zhang, B., 2013. Application and comparison of winter wheat canopy resistance estimation models based on the scaling-up of leaf stomatal conductance. *Chin. Sci. Bull.* 58, 2909–2916. doi:10.1007/s11434-013-5858-3
- Weiss, R., Alm, J., Laiho, R., Laine, J., 1998. Modeling moisture retention in peat soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62, 305–313.
- White, J.M., 1964. The concept of container capacity and its application to soil moisture fertility regime in the production for container crops. Thèse Dr. State Univ. Park USA.
- Wilfried, B., Remi, N.-W., Nebambi, L., Alison, H., Nicolás, C., Cherubino, L., Stefania, D.P., Muien, Q., 2013. Good agricultural practices for greenhouse vegetable crops: principles for mediterranean climate areas.
- Woodward, F.I., Sheehy, J.E., 2013. Principles and measurements in environmental biology. Elsevier.

- Yang, X., 1995. Greenhouse Micrometeorology and Estimation of Heat and Water Vapour Fluxes. *J. Agric. Eng. Res.* 61, 227–238. doi:10.1006/jaer.1995.1050
- Yin, X., Struik, P.C., 2009. C3 and C4 photosynthesis models: An overview from the perspective of crop modelling. *Recent Adv. Crop Growth Model.* 57, 27–38. doi:10.1016/j.njas.2009.07.001.
- Yong, J.W.H., Wong, S.C., Farquhar, G.D., 1997. Stomatal responses to changes in vapour pressure difference between leaf and air. *Plant Cell Environ.* 20, 1213–1216.
- Yu, G.-R., Nakayama, K., Matsuoka, N., Kon, H., 1998. A combination model for estimating stomatal conductance of maize (*Zea mays* L.) leaves over a long term. *Agric. For. Meteorol.* 92, 9–28. doi:10.1016/S0168-1923(98)00087-2
- Yunus, A.C., 2003. Heat transfer: a practical approach. MacGraw Hill N. Y.
- Zhang, S.Q., Outlaw, W.H., 2001. The guard-cell apoplast as a site of abscisic acid accumulation in *Vicia faba* L. *Plant Cell Environ.* 24, 347–355.
- Zhang, X., Wang, H., Zou, Z., Wang, S., 2016. CFD and weighted entropy based simulation and optimisation of Chinese Solar Greenhouse temperature distribution. *Biosyst. Eng.* 142, 12–26. doi:10.1016/j.biosystemseng.2015.11.006.

**Annexe 1: CFD simulations of the night-time condensation inside a closed glasshouse:  
sensitivity analysis to outside external conditions, heating and glass properties**

**Article publié dans Biosystems Engineering.**

---

Hacène Bouhoun Ali, Pierre-Emmanuel Bournet<sup>2\*</sup>, Vianney Danjou, Benjamin Morille, and  
Christophe Migeon

EPHor, Environmental Physics and Horticulture Research Unit,

Agrocampus Ouest, Centre d'Angers, Institut National d'Horticulture et de Paysage

2, rue Le Nôtre, 49045 Angers, France; E-mail: Pierre-Emmanuel.Bournet@agrocampus-  
ouest.fr

Tel.: +33 (0)2 41 22 55 04; Fax: +33 (0)2 41 22 55 53

---

<sup>2</sup> [Pierre-Emmanuel.Bournet@agrocampus-ouest.fr](mailto:Pierre-Emmanuel.Bournet@agrocampus-ouest.fr)

\* *Corresponding author*

### Abstract

Humidity and temperature are key factors in greenhouse climate management since they impact crop growth. For example, under high humidity and low temperatures, condensation may occur and lead to crop damage.

In order to assess the condensation mechanism inside a closed greenhouse during the night, a closed monospan 100-m<sup>2</sup> Venlo glasshouse was considered and 2D transient CFD simulations were conducted with particular attention paid to condensation and crop transpiration since this combination had rarely been considered in CFD models. Radiative exchanges were included through a specific submodel and a user-defined function was activated to take account of both heat and mass transfers induced by crop transpiration and by condensation along the greenhouse walls.

The aim of this work was, first, to validate the CFD model by comparing simulations with experimental results and, second, to analyse in detail the influence of external conditions, heating and glass properties on the greenhouse climate. Five parameters were successively tested: external temperature, wind velocity, sky temperature, emissivity of the glass and ground heat flux. Results reveal the ability of the model to predict both the air and wall temperatures of the greenhouse. RMS < 1 K for all temperatures and < 11% for relative humidity were obtained. Condensation appears to have a strong impact on the resulting relative air humidity inside the greenhouse. Finally, the sensitivity analysis shows that low external or sky temperatures may enhance condensation because they lead to a considerable decrease in wall temperature.

**Keywords:** Crop transpiration, condensation, radiation, unsteady simulations, climate control, CFD

### Nomenclature

$A_{\text{cellwall}}$  surface area of a computational cell at the wall, m<sup>2</sup>

$C_D$  drag coefficient

$C_p$	specific heat of air, $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$
$G_a$	density of absorbed radiation, $\text{W m}^{-3}$
$D$	diffusion coefficient of water vapour, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$
$VPD$	vapor pressure deficit (Pa)
$h$	heat transfer coefficient, $\text{W m}^{-2} \text{K}^{-1}$
$H$	plant height, m
$LAI$	leaf area index, $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ( $\text{m}^2$ of leaves per $\text{m}^2$ of ground covered by the crop)
$LAD$	leaf area density, $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$
$L_w$	latent heat of water vaporisation, $\text{J kg}_{\text{water}}^{-1}$
$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$	volumetric mass source of water vapour in a computational cell, $\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$
$M_i$	molecular weight of species $i$ , $\text{kg mol}^{-1}$
$n$	refractive index
$Pop$	Operating pressure, Pa
$Q_{conv}$	convective heat flux, $\text{W m}^{-2}$
$Q_{cond}$	condensed heat flux, $\text{W m}^{-2}$
$Q_g$	ground heat flux, $\text{W m}^{-2}$
$Q_l$	latent heat flux density, $\text{W m}^{-3}$
$Q_{rad}$	radiative heat flux, $\text{W m}^{-2}$
$Q_s$	sensible heat flux density, $\text{W m}^{-3}$
$Q_{trans}$	transpiration flux, $\text{W m}^{-2}$

$r_a$	leaf aerodynamic resistance, $s\ m^{-1}$
$r_s$	leaf stomatal resistance, $s\ m^{-1}$
$R$	universal gas constant (=8.31), $J\ Mol^{-1}\ K^{-1}$
$RH$	relative air humidity, %
$S_{\square}$	source term
$T$	temperature, K
$U, V$	components of the velocity vector, $m\ s^{-1}$
$V_{cell}$	volume of a computational cell at the wall, $m^3$
$V_{wind}$	wind velocity, $m\ s^{-1}$
$w$	absolute humidity of the leaf and air in $kg_{water}\ kg_{air}^{-1}$
$W$	absolute humidity, $kg\ kg^{-1}_{dry\ air}$
$x$	horizontal axis coordinate, m
$y$	vertical axis coordinate, m
$\Gamma$	diffusion coefficient, $m^2\ s^{-1}$
$\lambda$	thermal conductivity, $W\ m^{-1}\ K^{-1}$
$\varepsilon$	emissivity
$\rho$	density, $kg\ m^{-3}$
$\Phi$	concentration of transported quantity
$\omega$	mass fraction, $kg\ kg^{-1}$



## Subscripts

*a* air

*l* leaf

*out* outside the greenhouse

*r* roof

*sky* at sky level

*w* wall

## 1. INTRODUCTION

Humidity appears to be a key factor in the management of greenhouse climate. The amount of moisture inside the air is generally expressed through the relative humidity (RH), which is the ratio of the weight of moisture actually present in the air to the total moisture-holding capacity of a unit volume of air at a specific temperature and pressure. Relative humidity can sometimes be misleading because it is temperature-dependent. Warm air has a higher moisture-holding capacity than cooler air, meaning that as the air temperature increases, the relative humidity decreases, even though the amount of water remains constant.

Controlling humidity inside greenhouses is essential since it directly affects crop quality and yield. High humidity levels are generally combined with low vapour pressure deficits that tend to reduce the transpiration rate and, as a result, the translocation of some elements such as calcium, which may cause physiological disorders (Kittas and Bartzanas, 2007). Excessive humidity is sometimes combined with the appearance of free water (condensation), creating favourable conditions for the development of fungal diseases (e.g. *Botrytis cinerea*) and increasing the occurrence of leaf necrosis as well as soft and thin leaves (Katsoulas et al., 2007). Droplets may also affect light transmission by modifying the optical properties of the cover material and, consequently, photosynthesis activity (Jaffrin and

Makhlouf, 1990). Consequently, air humidity and condensation deserve great attention, given their impact on crops and the energy required to control them.

Basically, the humidity inside the greenhouse is the result of a moisture balance between moisture transpired by the crops and lost through condensation and leakage. Transpiration depends on local climate, solar radiation intensity and on convective exchanges that control the aerodynamic and stomatal resistances (Boulard and Wang, 2002). Condensation occurs when the partial pressure of the water vapour reaches the saturation point. In closed greenhouses, this phenomenon may take place under low outside temperature conditions because, in this case, the inside relative humidity strongly increases due to crop transpiration, until the dew point is reached and condensation begins. It is therefore generally observed on cold surfaces, i.e., along the walls and roof, which become colder than the rest of the greenhouse. Such conditions are often encountered at night under clear skies (Montero et al., 2005). Campen and Bot (2002) reported that the amount of condensation on the cover mainly depends on the temperature of the greenhouse cover. The change of phase of water, from vapour to the liquid state through condensation, is also known to extract moisture from the air. According to Pieters and Deltour (1997), this process is shown to be the most important sink of water from the inside air at night and may contribute to 85% to 89% of the removed water vapour. This is accompanied by heat release that, in turn, increases the temperature of the walls and neighbouring air.

CFD appears to be powerful numerical tool among those available to analyse humidity inside greenhouses. During the last decade, modelling the crop interaction with the local climate inside the greenhouse deserved a particular attention. The crop causes a pressure drop inside the flow which gives rise to a sink of momentum. To estimate the corresponding term source, the crop is generally considered as a porous medium in which the Darcy–Forchheimer equation is solved (Molina-Aiz et al., 2004; Teitel et al., 2008). It is however, generally assumed that pressure forces contribute the major portion of total canopy drag and, consequently, that the viscous resistance of the crop may be neglected (Bartzanas et al., 2004). The crop also acts as a sink or source of heat or water vapour, which means that

specific sensible heat and latent heat fluxes should be estimated. These fluxes are balanced by the radiation. The crop submodel was first developed by Boulard and Wang (2002) and then re-used and improved by many authors (Bartzanas et al., 2004; Fatnassi et al., 2006, Majdoubi et al., 2009, Kichah et al., 2012, Nebbali et al., 2012). Conversely, up until now, very few CFD studies of the greenhouse climate include water vapour transport and/or change of phase (Piscia et al., 2012a,b). To our knowledge, Tong et al. (2009) were probably among the first to take account of condensation in their CFD approach applied to greenhouses. They did not explicitly solve the equation for water vapour mass fraction transport, but they estimated the latent heat flux due to condensation from a formula provided by Garzoli (1985). The latent heat was then applied as an equivalent heat source to the roof where condensation occurred. In more recent studies, a specific subroutine (Bell, 2003) was activated to take account of the condensation occurring along the inner roof or wall surfaces (Piscia et al., 2012a). The water uptake from the ambient air was expressed as a mass flux sink term in the water vapour transfer equation. The total rate of mass condensation flux was calculated from the equation provided by Bird et al. (1960). The corresponding source term for the energy equation could be obtained by multiplying the mass flux by the latent heat of vaporisation. These source terms were applied to the inside domain cells in contact with the roof or walls. In their study, however, Piscia et al. (2012a) considered the crop as a constant source of water vapour, thus neglecting the interaction of the crop with the ambient climatic conditions. Moreover, they activated a condensation model that determined the water uptake from the air, but that omitted the associated heat flux along the walls.

The present study focuses on the evolution of the air water vapour content of a glasshouse compartment on the basis of 2D unsteady simulations carried out with the commercially available software Ansys Fluent<sup>TM</sup> 13. 2D simulations were chosen although 3D are now widespread for several reasons:

(i) Experiments conducted inside a closed monospan greenhouse evidenced typical single-cell Rayleigh Benard convection patterns with two dimensional characteristics (Lamrani et al., 2001).

(ii) Many CFD studies of very specific mechanisms (ventilation, radiation, condensation) have first been conducted in 2D and then only been transposed in 3D (Bournet and Boulard, 2010, 2014), because 2D makes it easier to assess specific mechanisms, and their coupling by offering a better and easier control of the system.

(iii) Concerning simulations including a crop submodel, most of the conducted 3D studies were undertaken under steady state conditions (Fatnassi et al., 2006; Bartzanas et al., 2004; Roy and Boulard, 2005; Majdoubi et al., 2009; Kichah et al., 2012 and Pouillard et al., 2012). Only recently, Nebbali et al. (2012) conducted a transient 3D study including a crop submodel but ignoring condensation, and without any validation. Tong et al. (2009) conducted 2D unsteady simulations and Piscia et al. (2012) conducted 3D unsteady simulations including condensation, but neglecting the crop impact.

(iv) Validation of CFD models remains hard, due to the difficulty to map the parameters of interest (temperature, relative humidity, leaf temperature...) inside the whole building. In the literature, validation has been undertaken for a few parameters: ventilation rate and/or temperature plus relative humidity, generally considering only one vertical profile, and validation of leaf temperatures remains scarce (Pouillard et al., 2012).

(v) Even if the power of computers continuously increases, the CPU time required to carry out transient 3D simulations remains prohibitive, at least with operational computers used by producers.

The model quantifies the impact of condensation on the inside air and wall temperatures as well as on the leaf temperature and takes account of radiative transfers, heating from the ground and from heat pipes, sensible and latent heat contributions of the crop to the ambient air as well as condensation on the inner surface of the greenhouse cover. Validation is then undertaken on the basis of data collected at night inside a 100 m<sup>2</sup> Venlo greenhouse equipped with Impatiens New Guinea grown on shelves. Several variables were considered to check the model accuracy, including roof, air and leaf temperatures, relative humidity and transpiration rate. Another objective is to analyse in detail the influence of

different external conditions on the climate inside the greenhouse and on the condensation process: external temperature, external wind speed, sky temperature, emissivity of the cover glass material and ground heat flux inside the greenhouse.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### CFD modelling

CFD is based on the resolution of the transient distribution of physical quantities such as mass (air and water vapour), momentum and energy, which, in 2D form and under unsteady conditions, is governed by the following convection diffusion transport equation:

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{\partial U \phi}{\partial x} + \frac{\partial V \phi}{\partial y} = \Gamma \Delta \phi + S_{\phi} \quad (1)$$

where  $U$  and  $V$  are the components of the velocity vector,  $\Gamma$  is the diffusion coefficient, and  $S_{\phi}$  is the source term. The turbulence was modelled using the standard  $k$ - $\epsilon$  turbulence closure, which is widely used and was validated in several greenhouse CFD studies (Bournet and Boulard, 2010). Buoyancy effects were included considering the mixture as an ideal gas and computing the density as a function of the temperature and mass fractions of the components of the mixture according to:

$$\rho = \frac{P_{op}}{RT \sum_i \frac{\omega_i}{M_i}} \quad (2)$$

where  $R$  ( $=8.31 \text{ J Mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ) is the universal gas constant,  $P_{op}$  (Pa) is the operating pressure,  $\omega_i$  ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) is the mass fraction of species  $i$  and  $M_i$  ( $\text{kg mol}^{-1}$ ) is the molecular weight of species  $i$ . The settings of the CFD simulations are gathered in Table 1, and a flowchart of the CFD modelling approach is provided in Fig.1. The model includes specific submodels for radiation, crop and condensation which are described hereafter.

## Radiative submodel

A radiative submodel was activated to take account of long wavelength radiative transfers occurring both between the components of the greenhouse and between the atmosphere and the roof. The Discrete Ordinate (DO) method (Bournet et al., 2007) was chosen to calculate the radiation component since it is particularly suitable for semi-transparent materials. It solves the equation for the luminance for a set of  $n$  different directions for a finite number of discrete solid angles, each associated with a vector direction fixed in the global Cartesian system. The optical properties of the glass within the far infrared wavelength range [3-100  $\mu\text{m}$ ] were chosen as: absorptivity = 0.9 (corresponding to a power absorption coefficient =  $10^4 \text{ m}^{-1}$ ); reflectivity = 0.1, and transmissivity = 0. The refractive index for the glass was set to 1.52. The net contribution of radiation per unit volume in the heat balance (energy equation) was then expressed by the divergence of the total radiative flux deduced from the spatial integration of the monochromatic luminance over the whole wavelength spectrum (Bournet et al., 2007)

### *Crop submodel*

A specific User Defined Function was developed to take account of the interaction of the crop with the ambient environment. The plants were assimilated to an equivalent homogenous porous medium that induces a drag force calculated from the Darcy Forchheimer law (Boulard and Wang, 2002). The corresponding sink of momentum by unit of volume of the canopy was expressed by the commonly used formula established by Thom (1971), which involves a drag coefficient:

$$S_{\phi} = -\rho_a LAD C_D V^2 \quad (3)$$

where,  $\rho_a$  is the air density ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $LAD$  is the leaf area density ( $\text{m}^2 \text{ m}^{-3}$ ) defined as the leaf area index divided by the canopy height,  $C_D$  is the drag coefficient and  $V$ , the air velocity. Molina-Aiz et al. (2006) showed that the values of this coefficient obtained for tomato, sweet pepper, eggplant and bean were similar (i.e. 0.32), which suggests that the effect of leaf shape

and size was not significant. For that reason, the frequently used value of  $C_D = 0.32$  was adopted in the present study.

Moreover, a sensible heat term was added in the energy equation and a water vapour mass term was added in the water vapour transport equation. They were calculated from an energy balance over the crop:

$$G_a + Q_s + Q_l = 0 \quad (4)$$

where  $G_a$  ( $\text{W m}^{-3}$ ) is the density of net radiation (i.e., radiative flux divided by cell height) absorbed in each canopy cell,  $Q_l$  ( $\text{W m}^{-3}$ ) is the latent heat flux density associated with the transpiration process, and  $Q_s$  ( $\text{W m}^{-3}$ ) is the sensible heat flux density transferred between the leaves and the ambient air. The net radiation was obtained by dividing the difference between the downward and upward long-wave radiation by the height of the canopy. The canopy-to-air sensible heat flux density  $Q_s$  is a function of the difference in temperature between the leaves and the ambient air, as well as of the leaf density. It is governed by the following equation (Boulard & Wang, 2002):

$$Q_s = 2LAD \frac{\rho_a C_p}{r_a} (T_l - T_a) \quad (5)$$

where  $C_p$  is the specific heat of air under constant pressure ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ),  $r_a$  is the leaf aerodynamic resistance ( $\text{s m}^{-1}$ ), and  $T_l$  and  $T_a$  are the temperatures of leaves and air, respectively, inside each cell. The leaf aerodynamic resistance is expressed from the formula provided by Bailey *et al.* (1993):  $r_a = \rho_a C_p / h$  where  $h$  is the heat transfer coefficient calculated from the formula provided by Montero *et al.* (2001). The latent heat flux  $Q_l$  (transpiration rate) depends on the water evacuated through the stomatal apertures. Using the balance expressed through Eq. 4, the model makes it possible to deduce the leaf temperature. Provided that transpiration only occurs along the underside of the Impatiens leaves (Baille *et al.*, 1994a),  $Q_l$  may be written as:

$$Q_l = LAD \frac{L_w \rho_a}{r_s + r_a} (w_l - w_a) \quad (6)$$

where  $L_w$  is the latent heat of water vaporisation ( $2500 \text{ kJ kg}_{\text{water}}^{-1}$ ), and  $w_l$  and  $w_a$  are the absolute humidity of the leaf and air in  $\text{kg}_{\text{water}} \text{kg}_{\text{air}}^{-1}$ .  $w_a$  is deduced from the resolution of the species transport equation for the water vapour mass fraction.  $r_s$  is the stomatal resistance of the leaves ( $\text{s m}^{-1}$ ) which is assumed to be mainly dependant on the water pressure deficit at night and is given by  $r_s = r_{s,min} [1 + a(VPD - VPD_0)^2]$  where  $a$  ( $=0.02 \text{ kPa}^{-2}$ ) is a specific model parameter,  $r_{s,min}$  is the minimal leaf stomatal resistance ( $1540 \text{ s m}^{-1}$ ),  $D$  is the vapour pressure deficit of the air (kPa), and  $D_0$  ( $=2\text{kPa}$ ) is the vapour pressure deficit corresponding to the minimal resistance (Kichah et al., 2012).

The leaf temperature is then deduced from the combination of Eqs. (4), (5) and (6):

$$T_l = \frac{r_a}{2LAI_v \rho_a C_p} (G_a - Q_l) + T_a \quad (7)$$

The shelves were made of aluminium with a thermal conductivity  $= 202.4 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , an emissivity  $= 0.2$  and a thickness  $= 5 \text{ mm}$ . In addition, the ground of the greenhouse was made of concrete, meaning that no evaporation occurred along the floor. Preliminary field surveys were also carried out to estimate the relative weight of the evaporation from the pots compared to the transpiration of the plants. They showed that evaporation represented less than 2% of the total evapotranspiration and could therefore be neglected in the simulations.

### Condensation submodel

A specific submodel was also activated to take account of the condensation occurring along the inner roof surfaces. No condensation was expected along the vertical walls in the present case due to the fact that they remain warmer than the saturation temperature. It was also assumed that no fog appeared inside the greenhouse. The water uptake from the ambient air along the roof surface, which happens when the local temperature goes beyond the dew point, is expressed as a mass flux sink term in the water vapour transfer equation. The



submodel on which the User Defined Function (UDF) is established contains several assumptions: (i) the vapour phase contains a binary ideal gas mixture of air and water vapor; (ii) the liquid phase consists of only water; (iii) a local thermodynamic equilibrium exists at the liquid-vapour interface; (iv) only film condensation is considered and dropwise condensation does not take place; and (v) the thermal resistance of the liquid film is neglected.

The total rate of mass condensation flux along the roof is calculated according to Eq. 8 (Bird et al., 1960; Bell, 2003):

$$\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{1}{(\omega_{\text{H}_2\text{O}} - 1)} \rho D \frac{\partial \omega_{\text{H}_2\text{O}}}{\partial n} \frac{A_{\text{cell wall}}}{V_{\text{cell}}} \quad (8)$$

where  $\dot{m}_{\text{H}_2\text{O}}$  is the volumetric mass source of water vapour in a computational cell ( $\text{kg m}^{-3} \text{s}^{-1}$ ),  $\omega_{\text{H}_2\text{O}}$  is the mass fraction of water vapour,  $\rho$  is the mixture density ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $D$  is the diffusion coefficient ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ),  $n$  is the direction normal to the wall and assumed to be the  $y$  direction in the formulation,  $A_{\text{cell wall}}$  is the surface area of a computational cell at the wall ( $\text{m}^2$ ), and  $V_{\text{cell}}$  is the volume of a computational cell at the wall ( $\text{m}^3$ ). The corresponding source term for the energy equation can be obtained by multiplying the mass flux by the latent heat of vaporisation.

These source terms were applied to the volume along the inner roof surfaces where the condensation phenomenon was assumed to occur. The thickness of this volume was calculated according to the Nusselt theory for flat plates that assumes that: (i) the flow is laminar along the film condensation; (ii) the temperature of the interface air liquid is equal to the saturation temperature; (iii) the friction force at the interface liquid vapour/air is negligible; (iv) the physical properties of liquid are independent of temperature; and (v) the transfer of heat only occurs by conduction in the film.

### Initial and boundary conditions

The characteristics of the initial and boundary conditions are gathered in Table 2. Initial conditions (velocity, pressure and temperature) were inferred from a steady state simulation performed with the boundary conditions recorded at 11 pm. Following Nebbali et al. (2012), this time was chosen as the start of the simulations because the radiation flux would be at a minimum and temperature and humidity could be considered as quasi-uniform inside the entire greenhouse space at that time. Given that steady-state simulations lead to an established value for the relative humidity that is different from that at midnight, the initial relative humidity was reset from the value recorded at midnight. The boundary conditions (Fig. 2) were established from measurements and updated at each time step. Fixed temperatures were set on the lateral walls, while a heat flux was imposed both along the ground surface (average of the data from the two flux meters) and locally inside the greenhouse to account for overhead heating. A fixed temperature and air velocity were set at the upwind vertical boundary domain, and an outlet condition was retained at the exit of the calculation domain (all horizontal gradients were equal to zero except for the pressure). The infrared radiation measured was imposed along the inlet, outlet and upper boundaries of the calculation domain, through a sky temperature.

### Measurements and experimental procedure

For the purpose of the study, an experimental greenhouse was equipped with sensors (Fig. 3) to provide input and validation data to the CFD model. The device consisted of a 100-m<sup>2</sup> compartment of a Venlo-type greenhouse located in Angers (47° 28' North, 0° 33' East) and covered with a 4-mm-thick glass. The compartment was surrounded by two other adjacent compartments. It was filled with 30-cm-high potted Impatiens (Novae-Guinea, cv. 'Sonic Scarlet') plants uniformly placed on four aluminium shelves (at a height of 80 cm) over an area of 18 m<sup>2</sup>. During the measuring period, the plants covered the totality of the shelves, with a density of 10.6 plants per m<sup>2</sup> and a mean leaf area index (LAI) of 4.2 m<sup>2</sup> m<sup>-2</sup>. Plants were watered once a day by flooding the shelves. Heating was provided from pipes

located inside the ground. It was supplemented by overhead heating when ground heating was insufficient to maintain the set point temperature.

Measurements were undertaken in winter from February to March 2011. Inside the greenhouse, the air temperature ( $T_a$ ) was measured under the shelves ( $T_{a1}$ ) as well as inside the crop ( $T_{a2}$ ) and 15 cm above the crop ( $T_{a3}$ ), together with the relative humidity ( $RH_{a2}$  and  $RH_{a3}$ , respectively), by aspirated sensors (Vaisala HMP45C, Campbell Scientific Ltd., Antony, France). The wall ( $T_{w1}$  and  $T_{w2}$ ) and roof ( $T_{r1}$  and  $T_{r2}$ ) temperatures were measured by thermocouples fastened with adhesive tape on the inner side of the cover. The ground surface heat fluxes ( $Q_{g1}$  and  $Q_{g2}$ ) were measured at two locations by flux meters (Captec, France) and a mean value was deduced ( $Q_g$ ). The crop evapotranspiration was estimated by a scale bearing a tray with five plants, while the temperatures of the leaves of the upper ( $T_{l1}$ ), middle ( $T_{l2}$ ) and bottom ( $T_{l3}$ ) part of the crop were recorded with copper-constantan (Cu-Cs) thermocouples glued to the underside of plant leaves. Outside the greenhouse, a platinum probe (Pt100, Correge, France) measured the air temperature ( $T_{out}$ ), whereas the downward and upward long-wave radiations were recorded by a CNR1 pyrradiometer (Kipp & Zonen, The Netherlands).

All the above-mentioned parameters were measured every 3 s and averaged online over 10-min periods with a data logger system (CR5000 and CR7, Campbell Scientific Ltd., Antony, France). Data considered for this study were recorded at night between 11 pm and 6 am.

Several parameters were used to establish the initial and boundary conditions of the model: this is the case for the outside, wall and sky (deduced from CNR1 measurements) temperature as well as for the ground heat flux. Other parameters such as air temperature and humidity, mean leaf temperature, roof temperature and the plant transpiration flux were used as validation data (Fig. 3).

### 3. RESULTS

#### Validation of the model

The CFD simulations were carried out with the commercially available CFD package, Ansys Fluent™ 13. The calculation domain was divided into 36900 cells restricted to the experimental greenhouse compartment plus the adjacent one leeward (to avoid interference with the outlet), and to the outside air just above. Preliminary simulations were undertaken to get grid independent results. Five grids with respectively 9200, 15000, 25800, 36900 and 47700 cells were tested. From the velocity vertical profile analysis, it was concluded that the grid with 36900 cells was a good choice (less than 0.2% difference with the higher density grid). Calculations were then carried out from midnight to 6 am. A 1-hour time step was retained because preliminary simulations conducted with a 10-min time step, showed almost no difference with a 1-hour time step. The convergence criteria were fixed to  $10^{-3}$  for the continuity, turbulent kinetic energy and dissipation rate, whereas they were equal to  $10^{-6}$  for the energy, radiation and water vapour mass fraction (Table 1). Convergence was reached after about 2000 iterations at each time step.

For the validation of the model, simulations of a clear night (March 3<sup>rd</sup>, 2011) were undertaken. The corresponding prescribed boundary conditions are plotted in Fig. 4. The average outside velocity was set to  $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , which is the average value provided by the meteorological station located on the roof of the greenhouse. During the night, the air, lateral wall and sky temperature remained relatively stable with a decrease of less than 3 K over a 6-hour period. The ground heating increased continuously until it reached a heat flux of  $45 \text{ W m}^{-2}$  at 6 am. The overhead heating started at the beginning of the night and was modelled through volumetric source terms at the level of the pipes, corresponding to an equivalent heat flux of  $60 \text{ W m}^{-2}$  of ground. The purpose was to analyse the time evolution of the climate inside the greenhouse and to clarify the condensation process.

The main results of the validation stage are described in Figs. 5 to 9. The air temperature and humidity at three levels, the mean leaf temperature, the roof temperature at

two locations and the plant transpiration flux were used as validation data (Fig. 3). Since measured leaf temperatures showed small deviations from the bottom to the top, the average value of this variable was analysed ( $T_l$ ) and compared with numerical results.

### Temperature and humidity

The time evolution of the inside air at three locations is shown in Fig. 5. Both measured and predicted air temperatures inside and above the crop followed the same trend with a slight temperature drop over the night (around 0.5 K). Nevertheless, the simulated air temperature inside the canopy ( $T_{a2}$ ) was slightly higher than just above ( $T_{a3}$ ), which is not in agreement with measurements. This may be due to the fact that in the simulations, an overestimated amount of warm air from the ground directly warmed the inside air of the canopy. Simulations, however, clearly show that the air remained warmer under the shelves than above, with a difference of up to 1 K for the measurements and 1.7 K for the simulations.

On the basis of measurements and simulations (Figs. 5 and 6), it can be seen that the local inside canopy air remained warmer than the leaves (by about 0.5 K on average), meaning that the inside air gave up heat to the plants (Fig. 6). Even if the evolution of these temperatures followed the same trend and similar differences were reported between canopy air and leaf temperatures, recorded values remained 0.7 K lower on average than numerical ones.

As shown in Fig. 7, both measured and predicted roof temperatures followed the same trend, decreasing by about 0.7 K to 1.7 K from the beginning to the end of the night, mainly because of radiative losses. As expected, the temperature of the windward roof was lower than that of the leeward roof due to the fact that convective losses were enhanced along the wall directly exposed to the wind. The predicted roof temperatures were nevertheless slightly higher (about 0.7 K) than the measured ones. Finally, predicted roof temperatures remained lower than the greenhouse air temperature (Figs. 6 and 7), the maximum difference between these temperatures being 10 K, which is in agreement with the measurements.

The time evolution of the measured and predicted relative humidity is plotted in Fig. 8. As expected, relative humidity was higher inside the canopy than inside the air just above for both predicted and experimental values. Even if predicted and experimental values of the relative humidity were globally in good agreement above the canopy, the model slightly underestimated humidity inside the crop (by about 10 points, corresponding to less than 1  $\frac{\text{g}_{\text{water vapour}}}{\text{kg}_{\text{dry air}}}$  absolute humidity difference between measurements and simulations: Fig. 9), showing that the model underestimated plant transpiration (which is confirmed by Fig.10) and/or overestimated the flow inside the canopy.

To estimate the model performance, the RMS (Root Mean Square) was calculated for each variable (Table 3):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\bar{y}_i - y_i)^2} \quad (4)$$

where  $y_i$  and  $\bar{y}_i$  are the measured and simulated values, respectively. For the roof temperatures as well as for the greenhouse air and leaf temperatures, very low RMS were obtained: RMS=0.72 K, 0.75 K and 0.82 K, respectively. For the relative humidity, a RMS of 6.4% was calculated. Predicted results are therefore very close to the measurements for most of the climatic parameters. These RMS values are also on the same order of magnitude as those obtained by Piscia et al. (2012a) who found RMS = 0.89 K for roof temperatures, 0.37 K for inside temperature and 6.5% for relative humidity.

### Transpiration and condensed flux

The simulated transpiration fluxes ( $Q_{trans}$ ) were on the same order of magnitude as the measured ones ( $10^{-6} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , Fig. 10). Even if the model appeared to slightly underestimate the transpiration rate, both measured and predicted transpiration fluxes followed the same trend, increasing with time and reaching a steady-state value at 5 am:  $2.52 \cdot 10^{-6} \text{ Kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  and  $3.5 \cdot 10^{-6} \text{ Kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , respectively. The estimated condensation flux ( $Q_{cond}$ ) increased with time from midnight to 5 am, until it reached a stable level, more or less corresponding to an

equilibrium state ( $2.27 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) between condensation and transpiration. This balance expresses the conservation of the mass flow, given that no leakage was included in the model in the present case.

#### 4. DISCUSSION

In order to analyse the response of the model to the variation of different parameters, and to investigate in detail the influence of these parameters on the greenhouse climate and especially on the condensation rate, a sensitivity analysis was carried out. The considered geometry and calculation domain were identical to those used for the validation stage. Initial conditions were again obtained from a steady state run and only the initial water vapour content was reinitiated. Five parameters that may strongly affect the thermal and hydrous behaviour of the greenhouse were chosen: external temperature, wind speed, sky temperature, optical wall properties and heat flux. To assess the influence of each parameter, a reference case was chosen. Its characteristics in terms of boundary conditions are described in Table 4. Only one parameter varied in each sensitivity analysis and all the parameters used for the boundary conditions were considered to be constant during the night. The overhead heating was switch off, meaning that only ground heating was considered for these simulations. To minimise the influence of the initial conditions, the results presented here were obtained after 6 hours of simulation (i.e. at 6 am).

Three values of each parameter were studied. The external temperature varied between 275 and 285 K (i.e., cases of frost were excluded). The external wind speed varied between 1 and 5  $\text{m s}^{-1}$ . The sky temperature varied within a range  $\in [250, 270 \text{ K}]$ , i.e., from a clear to a cloudy sky. The heat flux from the ground was comprised between 50 and 150  $\text{W m}^{-2}$  (overhead heating with pipes was not considered in the sensitivity analysis). Finally, the emissivity of the glass was tested, considering values between 0.8 and 1. The transmissivity was always set to 0 since the glass is opaque to long wavelength radiation.

To compare these cases, the temperature and the heat fluxes (radiative  $Q_{rad}$ , convective  $Q_{conv}$  and condensed  $Q_{cond}$ ) along the roof wall were simulated and plotted in Figs. 11 to 20.

The graphs (Figs. 11, 13, 15, 17 and 19) represent the temperatures: the external temperature is shown at the top, the roof temperature is shown in the middle, and the mean inside air temperature is shown at the bottom. The dark horizontal grey zone represents the roof of the greenhouse. In Figs. 12, 14, 16, 18 and 20, the bars above are the thermal fluxes between the glass and the outside, and the bars below are the thermal fluxes between the glass and the inside of the greenhouse. A negative flux represents a loss for the roof, whereas a positive flux corresponds to a gain; all results are expressed in  $\text{W m}^{-2}$  of roof area.

### **Influence of the external temperature and wind speed**

Three external temperatures were tested: 275 K, 280 K, and 285 K. Figures 11 and 11 show the predicted results. The external temperature directly influences the convective transfer above the roof; this flux could be a gain or a loss. For the lowest external temperature tested, the roof loses heat ( $T_{out} < T_r$ ). Conversely, when the external temperature increases, the roof and the inside greenhouse temperatures increase while the roof gains heat. As shown before, the condensation more or less balances the transpiration, meaning that the transpiration flux decreases when the roof temperature increases.

The influence of the wind speed was also tested with the following values:  $1 \text{ m s}^{-1}$ ,  $3 \text{ m s}^{-1}$  and  $5 \text{ m s}^{-1}$ . Since the external temperature was greater than that of the roof, increasing the wind speed (Figs. 13 and 14) contributed to an increase in the external heat flux, thus decreasing the temperature difference both between the roof and the external air and between the roof and the inside air, once again reducing the condensed flux and transpiration rate of the canopy.

### **Influence of the sky temperature and glass properties**

The sky temperature (Figs. 15 and 16) exerts a big influence on the radiative flux exchanged between the wall and the sky. In the present case, predicted results show that the sky temperature always remains lower than the glass temperature and the radiative thermal loss is high compared with the convective flux. Increasing the sky temperature reduces the radiation flux loss, leading to a rise in the roof temperature. As expected, the condensation



flux therefore increases as the sky temperature decreases. The optical properties of the roof play a similar role on the radiative heat flux, and the wall temperature increases when the emissivity decreases (Fig. 17 and 18). Similarly to the previous case, an increase in the roof temperature consecutive to a reduction of the emissivity is followed by a reduction of the condensation and transpiration fluxes.

### **Influence of the ground heat flux**

The greenhouse air temperature is a key parameter that has to be carefully controlled. It is highly dependent on the ground heat flux (Figs. 19 and 20), which is provided through the heating system. When the ground heat flux rises, the internal temperature increases, which implies an increase in the roof temperature and radiative heat loss. In the present case, an increase in the ground heat flux from 50 to 150 W m<sup>-2</sup> only raises the greenhouse air temperature by about 2 K and reduces the condensation flux.

### **CONCLUSION**

A comprehensive study of the air, roof and leaf temperature and air humidity inside a glasshouse during the night was undertaken through CFD simulation. Specific submodels were included to take account of radiative transfers, crop transpiration and condensation. In the first step, the model was validated against experimental data for a set of variables including roof, air and leaf temperatures, relative humidity and transpiration rate. The model was shown to provide very realistic results capable of predicting the general variation trends of most quantities and warranting a RMS < 1 K for all temperatures and RMS < 11% for relative humidity values (Table 3).

Once the model was validated, a number of test cases were conducted in order to study the behaviour of the climate inside the greenhouse under specific conditions. The sensitivity analysis helps to understand the response of the model to variations of the outside climatic conditions, outside wind velocity, sky temperature, ground heat flux and emissivity of the glass. All the simulations revealed that these parameters strongly affect the resulting roof temperature that, in turn, appears to be a key parameter controlling condensation. It was

concluded that some parameters prevailed in the climate conditions established inside the greenhouse. For example, low outside temperature or sky temperature may increase condensation because they involve large heat losses (both convective and radiative), which are accompanied by a strong decrease of the wall temperature. Wind velocity and glass emissivity seem to have less of an impact on roof temperature and condensation, at least for the reference case and range of variation of the parameters chosen in the present study. A range of techniques exists to reduce condensation risks, such as increasing the ground heat flux in the greenhouse in order to maintain high wall temperatures. Natural ventilation could also be a solution since it involves the renewal of the greenhouse air with air that contains less water vapour. These techniques, however, have important drawbacks, including their high energy cost. Dehumidification techniques using cooled finned pipes or heat pumps are promising devices. Nevertheless, they still need to be studied in detail, especially since they have barely been analysed through CFD up until now (Campen, 2009).

### **Literature Cited**

- Bell, B. 2003. Application Brief: Film Condensation of Water Vapor. Lebanon, New Hampshire: Fluent, Inc.
- Bird, R.B., W.E. Stewart, and Lightfoot, E.N. 1960. Transport Phenomena, New York: John Wiley & Sons.
- Bartzanas, T. Boulard, T. and Kittas, C 2004. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosystems Engineering*, 88(4), 479–490
- Boulard, T. and Wang, S. 2002. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34, 173-190.
- Bournet, P.E. 2014. Assessing Greenhouse Climate Using CFD: a Focus on Air Humidity, *Acta Hort.* 1037: 971-985.

- Bournet, P.E. and Boulard, T. 2010. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: a review of experimental and CFD studies. *Comput. Electron. Agric.* 74, 195–217.
- Bournet, P.E., Ould Khaoua, S.A. and Boulard, T. 2007. Numerical prediction of the effect of vent arrangements on the ventilation and energy transfers in a multi-span glasshouse using a bi-band radiation model. *Biosystems Engineering* 98:224-234.
- Campen J B; Bot G P A. 2002. Dehumidification in greenhouses by condensation on finned pipes. *Biosystems Engineering*. 82(2):177–185.
- Campen, J. 2009. Dehumidification of Greenhouses, PhD Thesis, Wageningen University, Wageningen, NL, 117 pages.
- Fatnassi, H., Boulard, T. Poncet, C., Chave, M. 2006. Optimisation of Greenhouse Insect Screening with Computational Fluid Dynamics. *Biosystems Engineering*, 93, 301-312.
- Garzoli, K.V., 1985. A simple greenhouse climate model. *Acta Hort.* 174: 393–400.
- Jaffrin, A. and Makhlouf, S. 1990. Mechanism of light transmission through wet polymer films. *Acta Hort.* 281:11-24.
- Katsoulas, N., Manoloaraki, C., Kittas, C. and Bartzanas, T. 2007. Effects of Anti-Drip Cover Materials on Microclimate and Production of a Hydroponic Cucumber Crop. *Acta Hort.* 801 (2):267\_274.
- Kichah A., Bournet P.E., Migeon C. 2012. Measurement and CFD simulations of the transpiration and leaf temperatures of an Impatiens pot plant crop in a greenhouse. *Biosystems Engineering* 112, 22-34.
- Kittas, C. and Bartzanas, T. 2007. Greenhouse microclimate and dehumidification effectiveness under different ventilator configurations. *Build. Env.* 42:3774-3784.

- Lamrani, M.A., Boulard, T., Roy, J.C., Jaffrin, A., 2001. Airflow and temperature patterns induced in a confined greenhouse. *Journal of Agricultural Engineering Research* 78, 75–88.
- Launder, B. E. and Spalding, D. B. 1974. The numerical computation of turbulent flows. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 3(2): 269-289.
- Majdoubi, H., Boulard, T., Fatnassi, H. and Bourden, L. 2009. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: An experimental and CFD assisted study. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1050–1062.
- Molina-Aiz, F.D., Valera, D.L., and Álvarez, A.J. 2004. Measurement and simulation of climate inside Almería-type greenhouses using computational fluid dynamics. *Agricultural and Forest Meteorology* 125, 33–51.
- Montero, J.I., Munoz, P., Anton, A. and Iglesias, N. 2005. Computational fluid dynamic modelling of night-time energy fluxes in unheated greenhouses. *Acta Hort.* 691(1): 403-410.
- Morille, B., Genez, R., Migeon, C., Bournet, P.E. and Bouhoun Ali, H. 2012. CFD Simulations of the Distributed Climate Time-Evolution inside a Glasshouse at Night, *Acta Horticulturae*, 1008, 201-206
- Nebballi, R., Roy, J.C. and Boulard, T. 2012. Dynamic simulation of the distributed radiative and convective climate within a cropped greenhouse *Renewable Energy* 43:111-129.
- Piscia, D., Montero, J.I., Baeza, E. and Bailey, B.J. 2012a. A CFD greenhouse night-time condensation model. *Biosystems Engineering* 111:141-154.
- Piscia, D., Montero, J.I. and Flores, J. 2012b. Predicting Night-Time Condensation in a Multi-Span Greenhouse Using Computational Fluid Dynamic Simulations. *Acta Hort.* 927: 627-634.

- Pouillard, J.B., Boulard, T., Fatnassi, H., Grisey, A. and Roy, J.C. 2012. Preliminary experimental and CFD results on airflow and microclimate patterns in a closed greenhouse. *Acta Hort.* 952:191-200.
- Roy, J.C., Boulard, T., 2005. CFD Prediction of the natural ventilation in a tunnel-type greenhouse: Influence of wind direction and sensibility to turbulence models. *Acta Horticulturae* 691, 457–464.
- Thom A S 1971. Momentum absorption by vegetation. *Quarterly J. of Royal Meteorol.Soc.* 97: 414–428.
- Teitel, M., Ziskind, G, Lirana, O., Dubovsky, V. and Letan, R. 2008. Effect of wind direction on greenhouse ventilation rate, airflow patterns and temperature distributions, *Biosystems Engineering*, 101, 351–369.
- Tong, G., Christopher, D.M. and Li, B. 2009. Numerical modelling of temperature variations in a Chinese solar greenhouse. *Computers and Electronics in Agriculture* 68: 129-139.

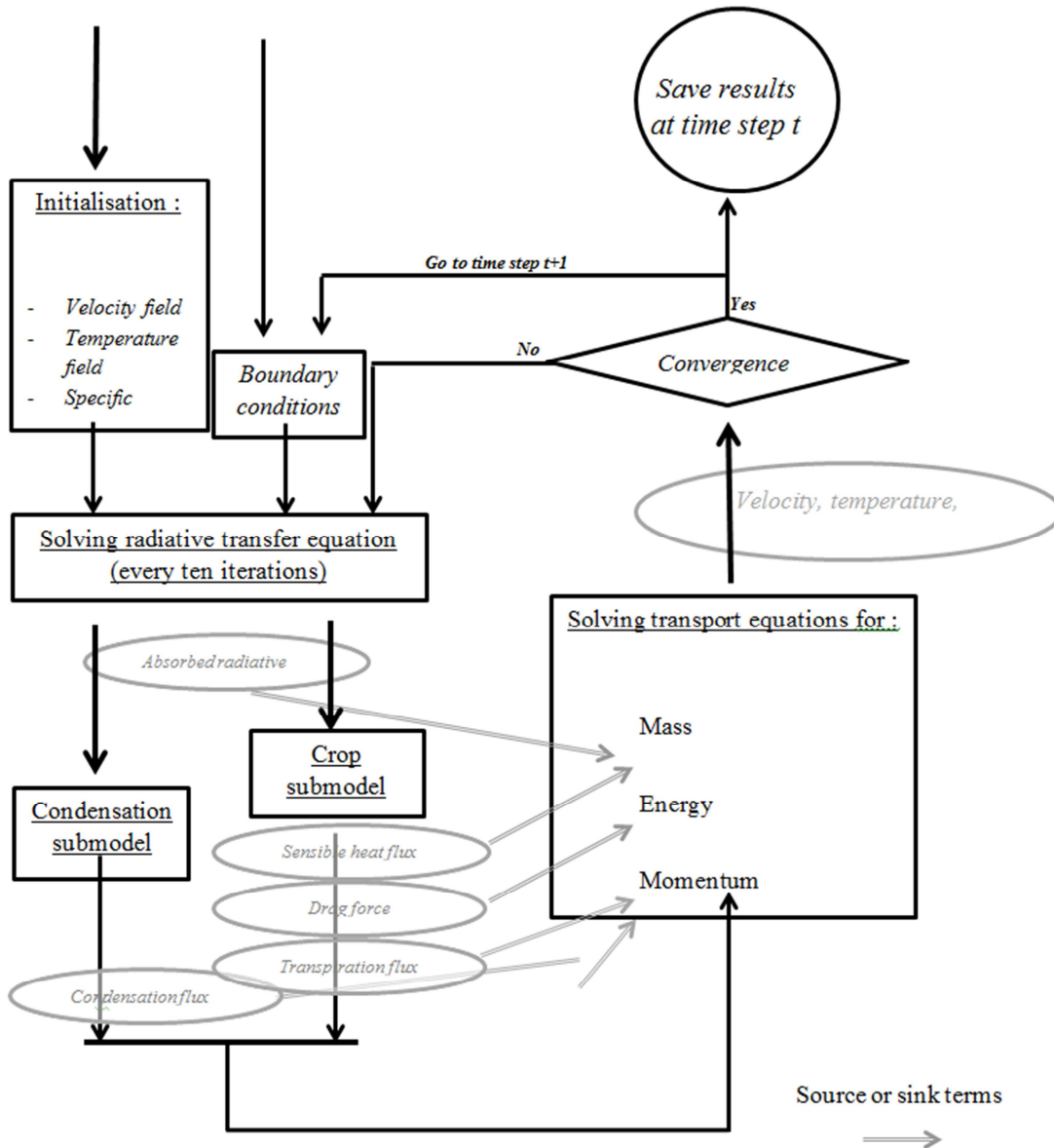


Figure 1. Flowchart of the CFD model.

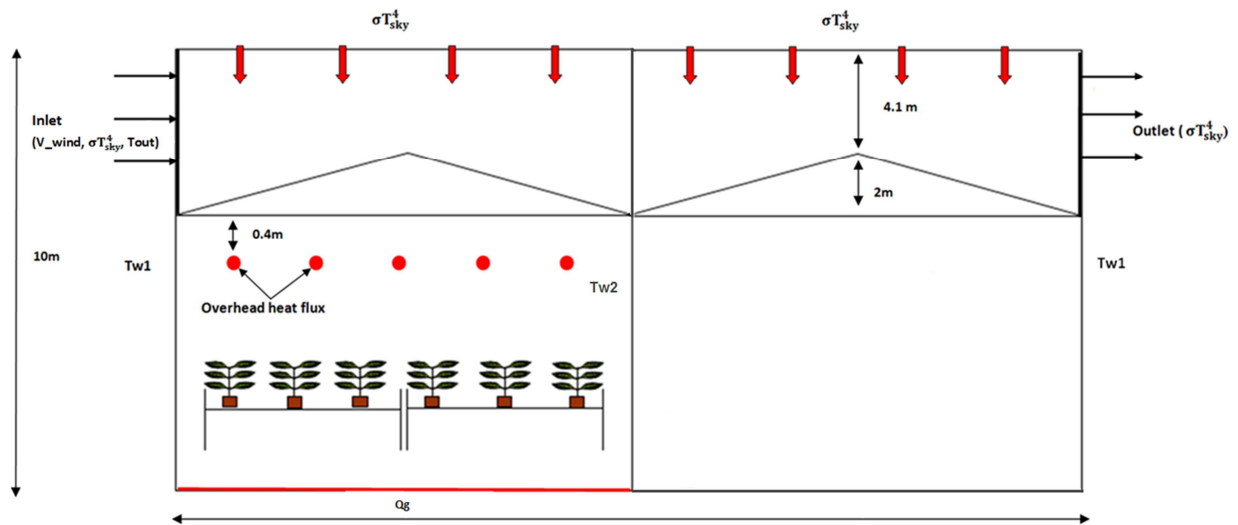


Figure 2. Boundary conditions ( $T_w$ : wall temperature,  $T_{out}$ : outside temperature,  $T_{sky}$ : sky temperature  $V_{wind}$ : wind velocity)

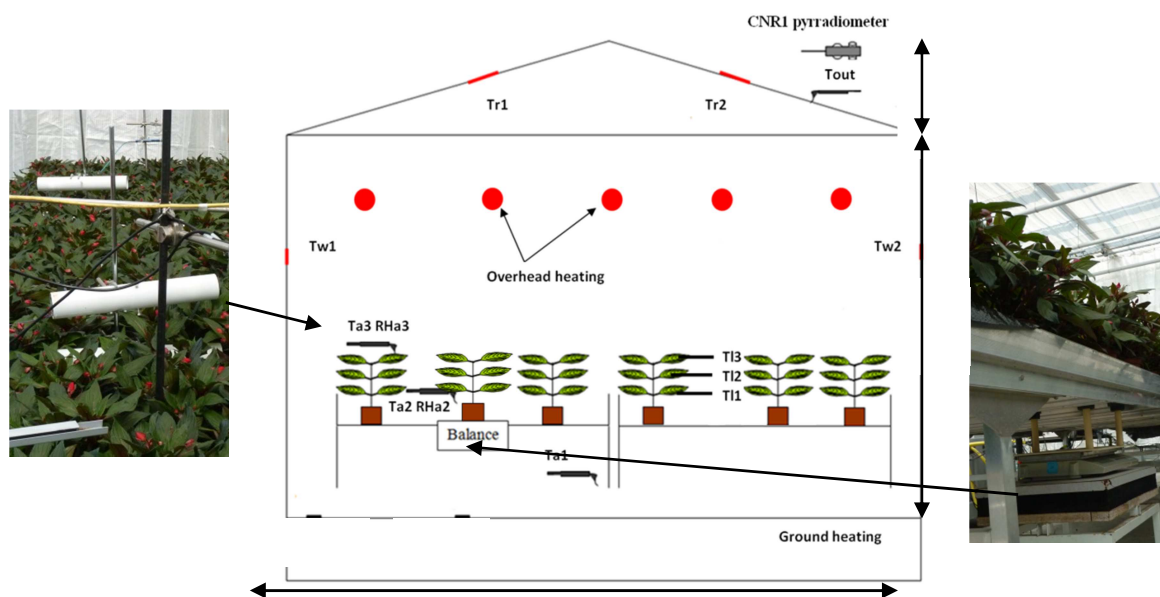


Figure 3. Experimental setup with  $T_r$ : roof temperature ;  $T_w$ : wall temperature;  $T_a$ : air temperature;  $T_l$ : leaf temperature;  $T_{out}$ : outside temperature; RH: relative humidity, and  $Q_g$ : ground heat flux.

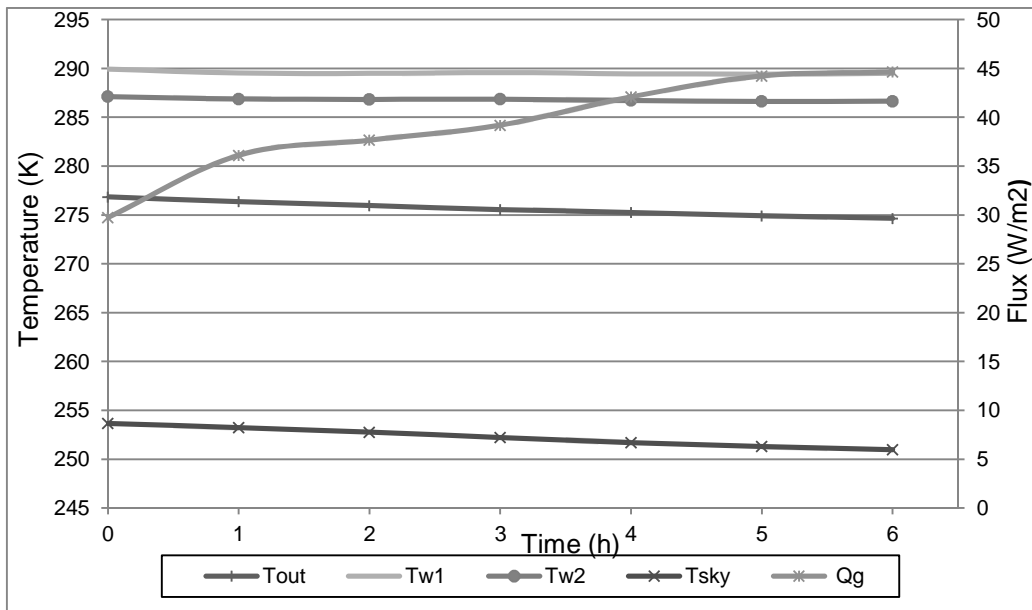


Figure 4. Time evolution of the boundary conditions (March 3<sup>rd</sup>, 2011) with  $T_r$ : roof temperature;  $T_w$ : wall temperature;  $T_{sky}$ : sky temperature and  $Q_g$ : ground heat flux.

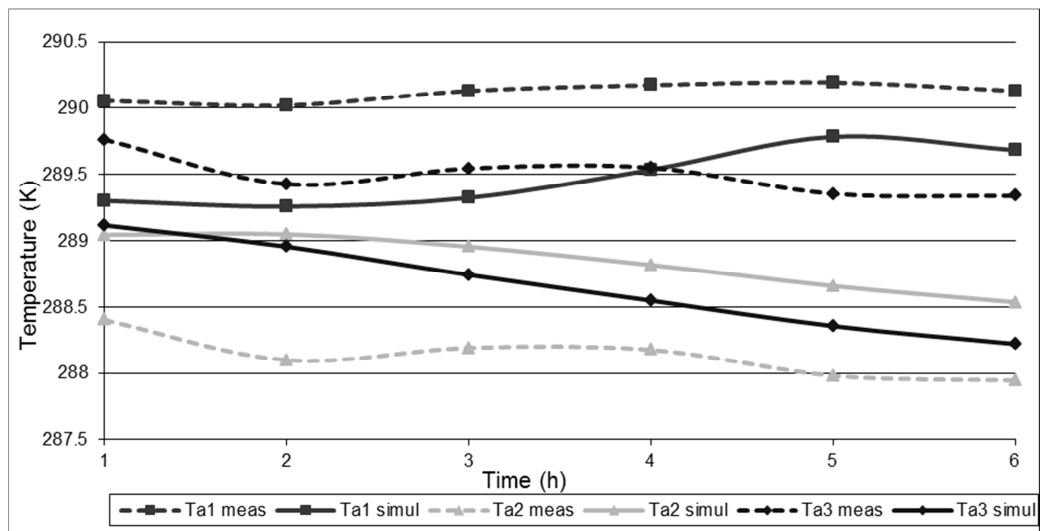


Figure 5. Time evolution of the measured (meas) and simulated (simul) inside air temperatures  $T_a$  at three locations under (1), inside (2) and above (3) the canopy.



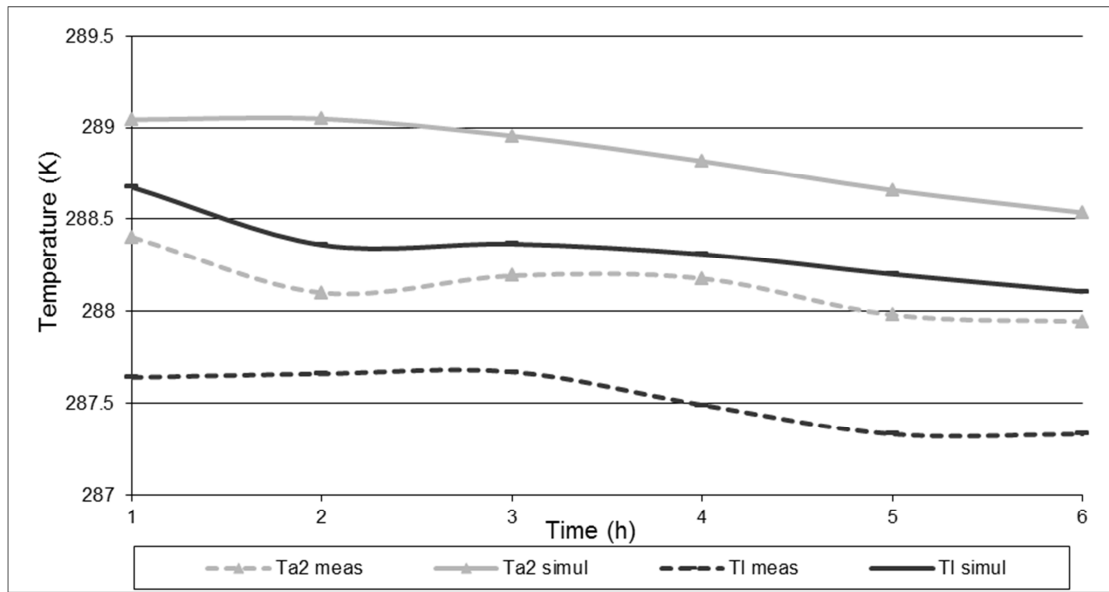


Figure 6. Time evolution of the measured (meas) and simulated (simul) inside crop air ( $T_{a2}$ ) and average leaf temperatures ( $T_l$ ).

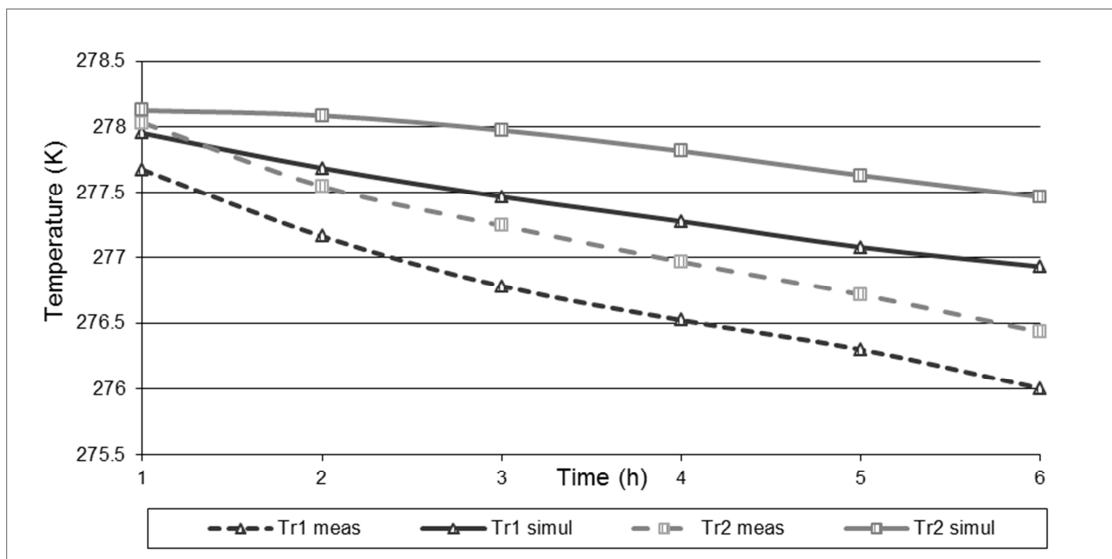


Figure 7. Time evolution of the measured (meas) and simulated (simul) roof temperatures  $T_r$ .

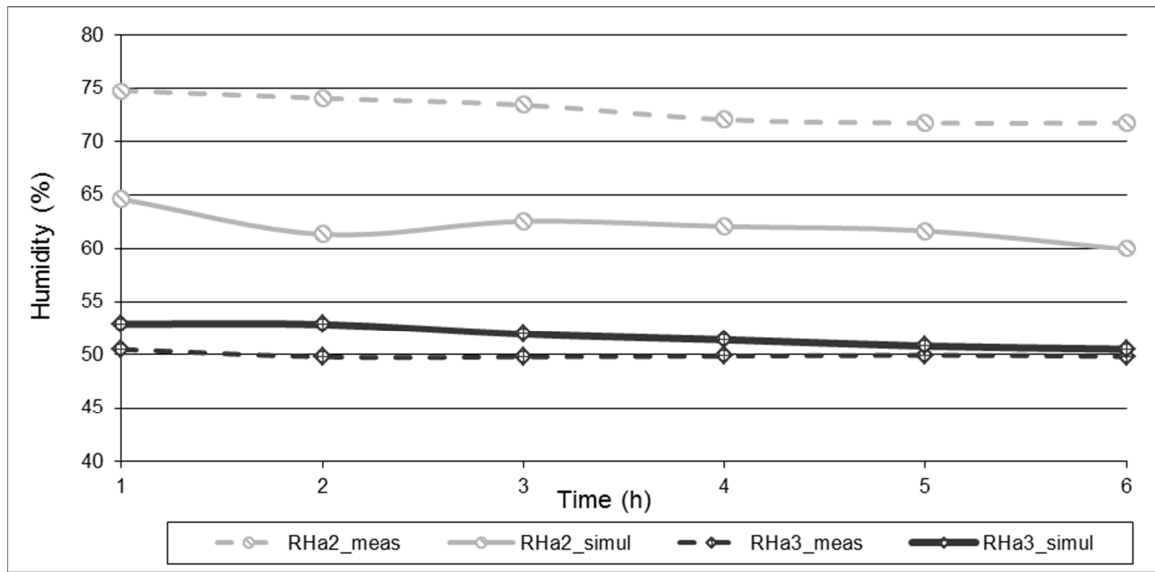


Figure 8. Time evolution of the measured (meas) and simulated (simul) inside air relative humidity inside ( $RH_{a2}$ ) and above ( $RH_{a3}$ ) the crop.

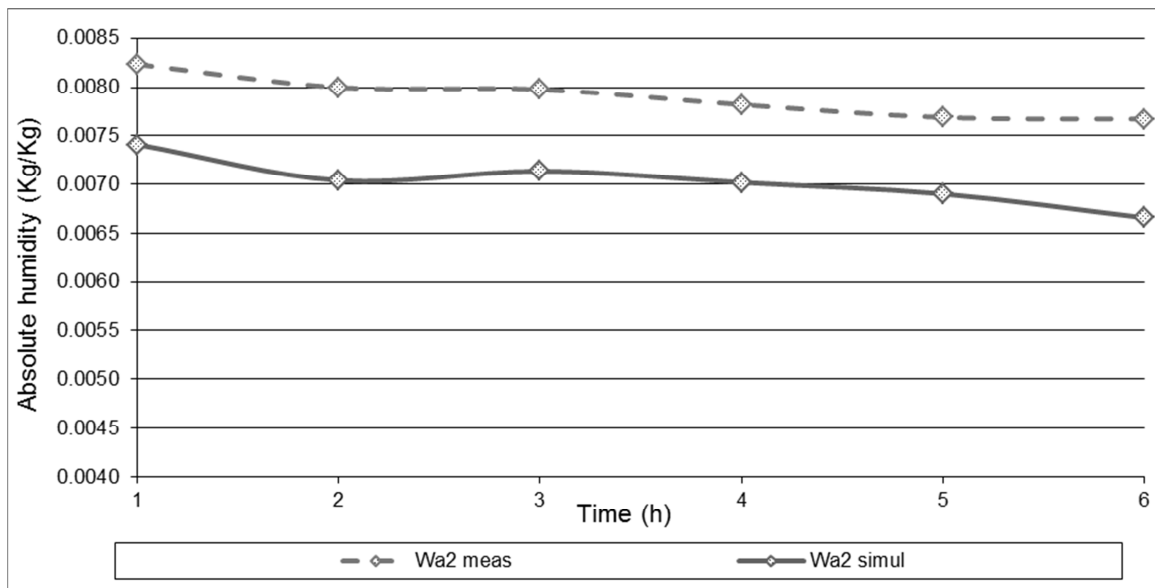


Figure 9. Time evolution of absolute humidity  $W_{a2}$  of the inside canopy air measured (meas) and simulated (simul).

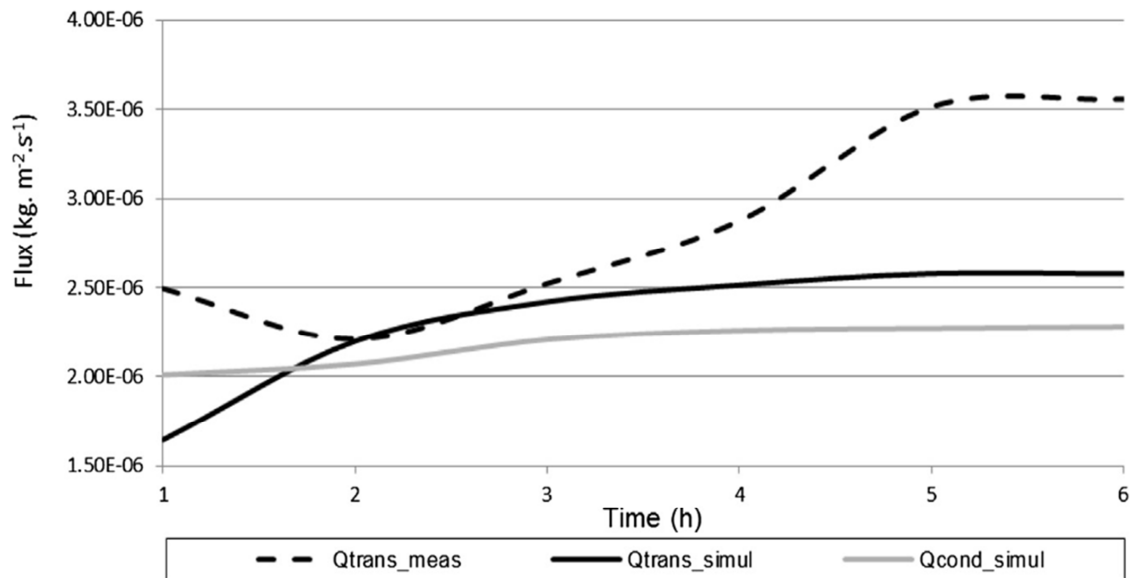


Figure 10. Time evolution of simulated (simul) and measured (meas) transpiration flux  $Q_{trans}$ , and simulated condensation flux  $Q_{cond}$ .

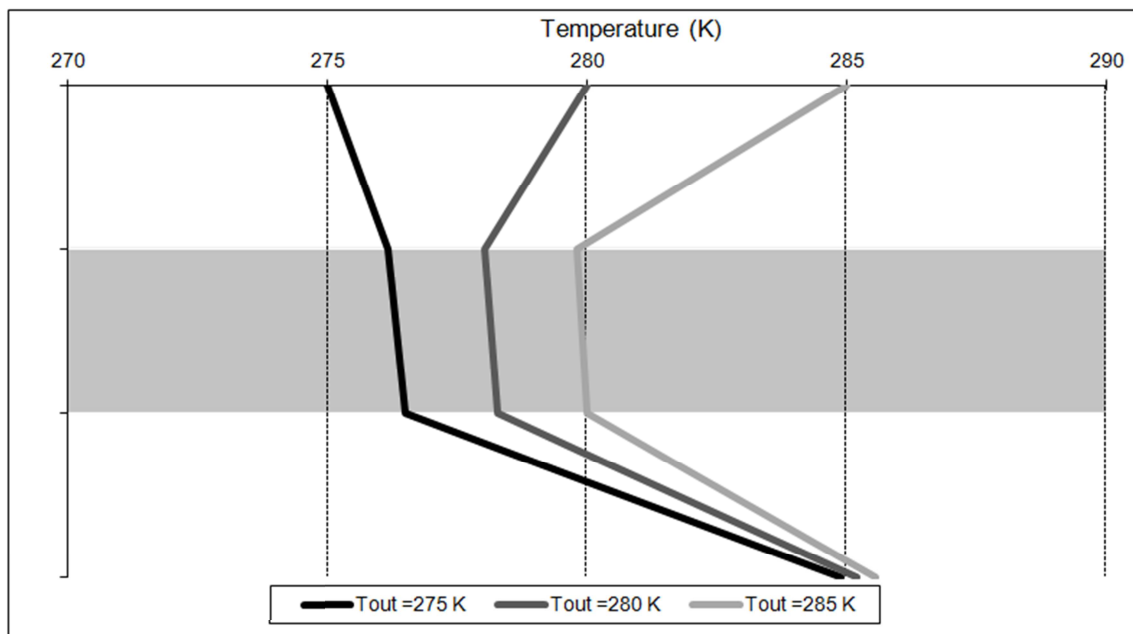


Figure 11. Mean temperature along the roof for a range of external temperatures  $T_{out}$ .

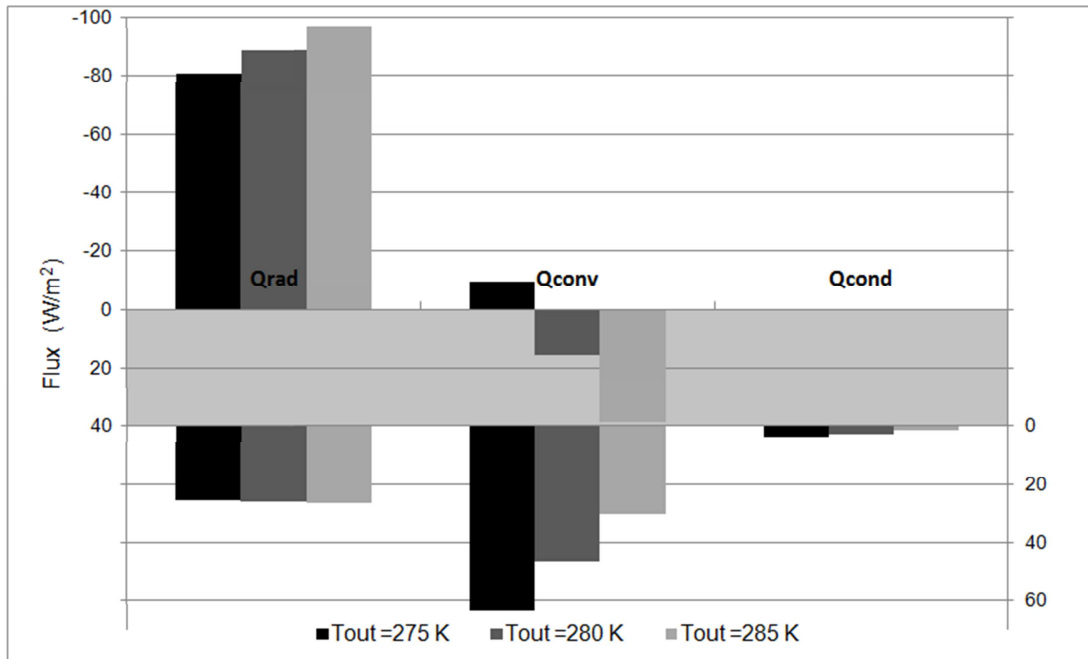


Figure 12. Heat fluxes along the roof for a range of external temperatures  $T_{out}$  with  $Q_{rad}$ : radiative flux;  $Q_{conv}$ : convective flux and  $Q_{cond}$ : condensed flux.

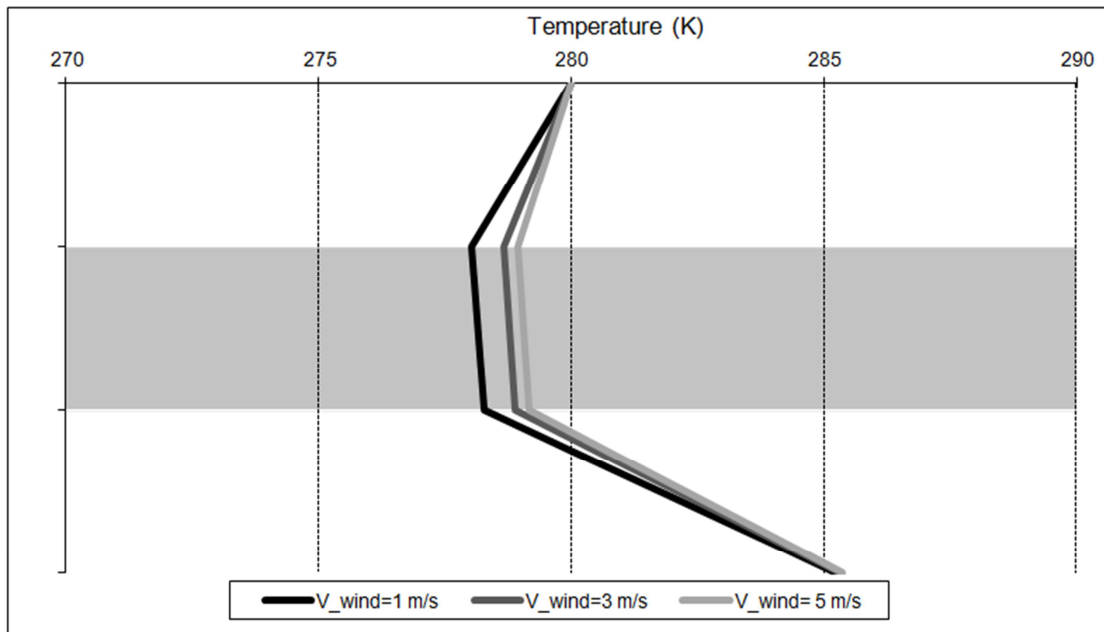


Figure 13. Mean temperature along the roof for a range of wind speeds  $V_{wind}$ .

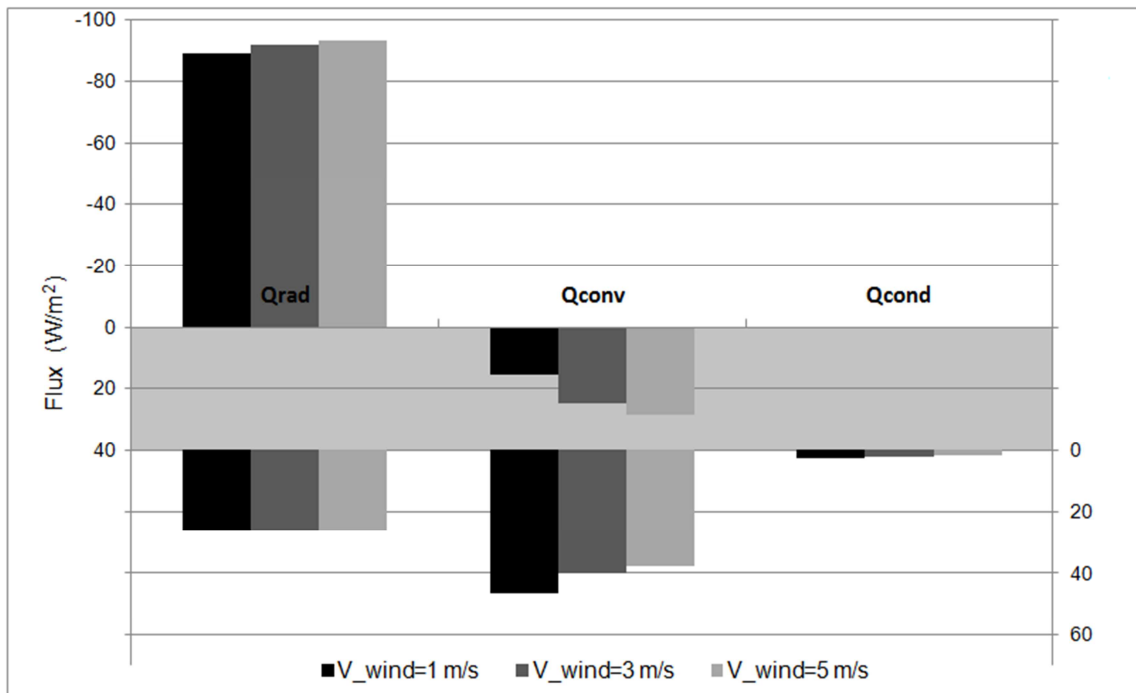


Figure 14. Heat fluxes along the roof for a range of wind speeds  $V_{wind}$  with  $Q_{rad}$ : radiative flux;  $Q_{conv}$ : convective flux and  $Q_{cond}$ : condensed flux.

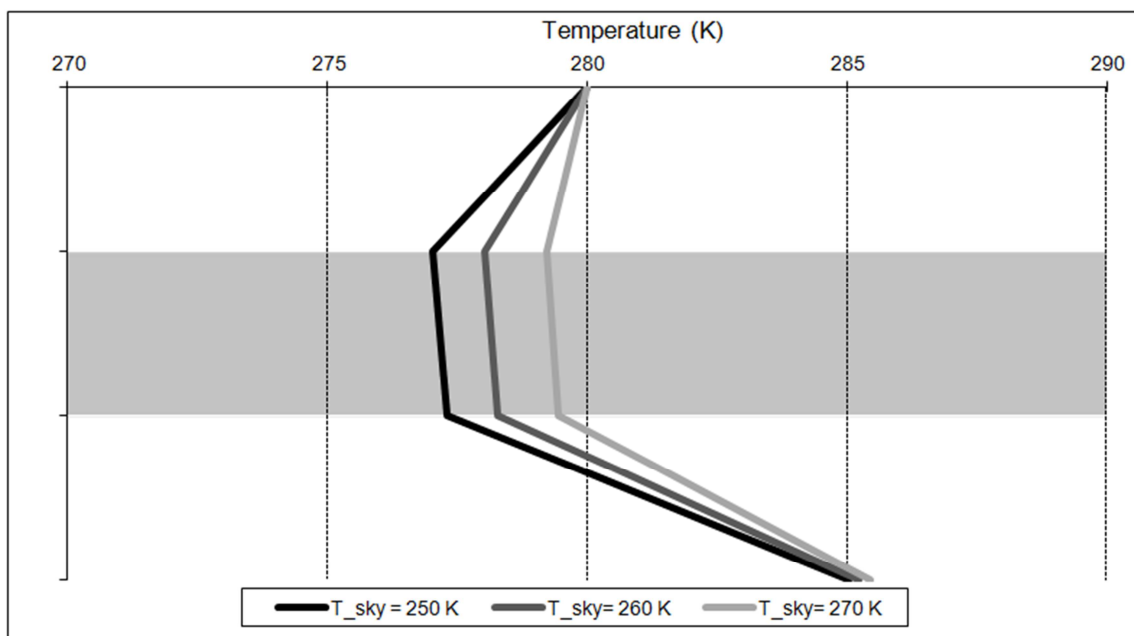


Figure 15. Mean temperature along the roof for a range of sky temperatures  $T_{sky}$ .

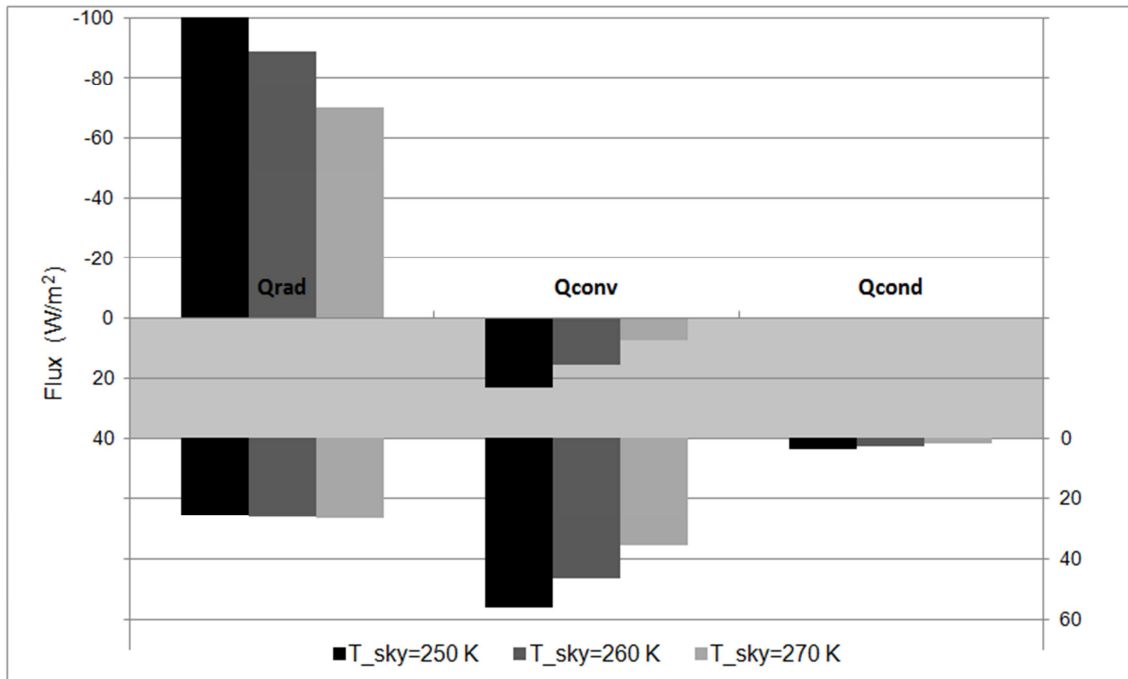


Figure 16. Heat fluxes along the roof for a range of sky temperatures  $T_{sky}$  with  $Q_{rad}$ : radiative flux;  $Q_{conv}$ : convective flux and  $Q_{cond}$ : condensed flux.

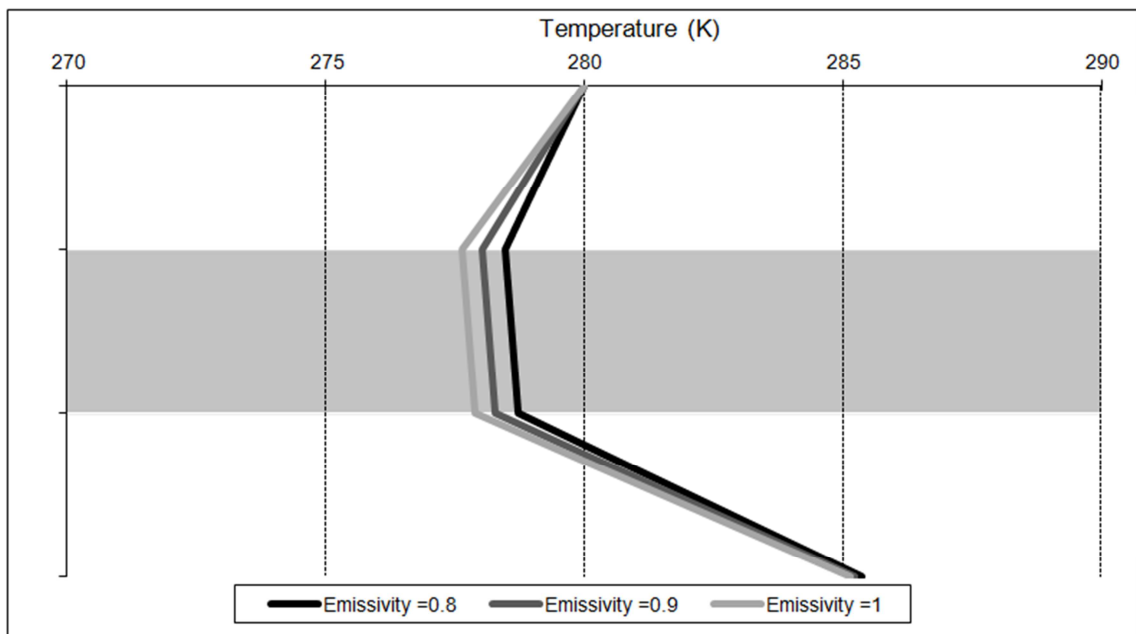


Figure 17. Mean temperature along the roof for a range of emissivities.

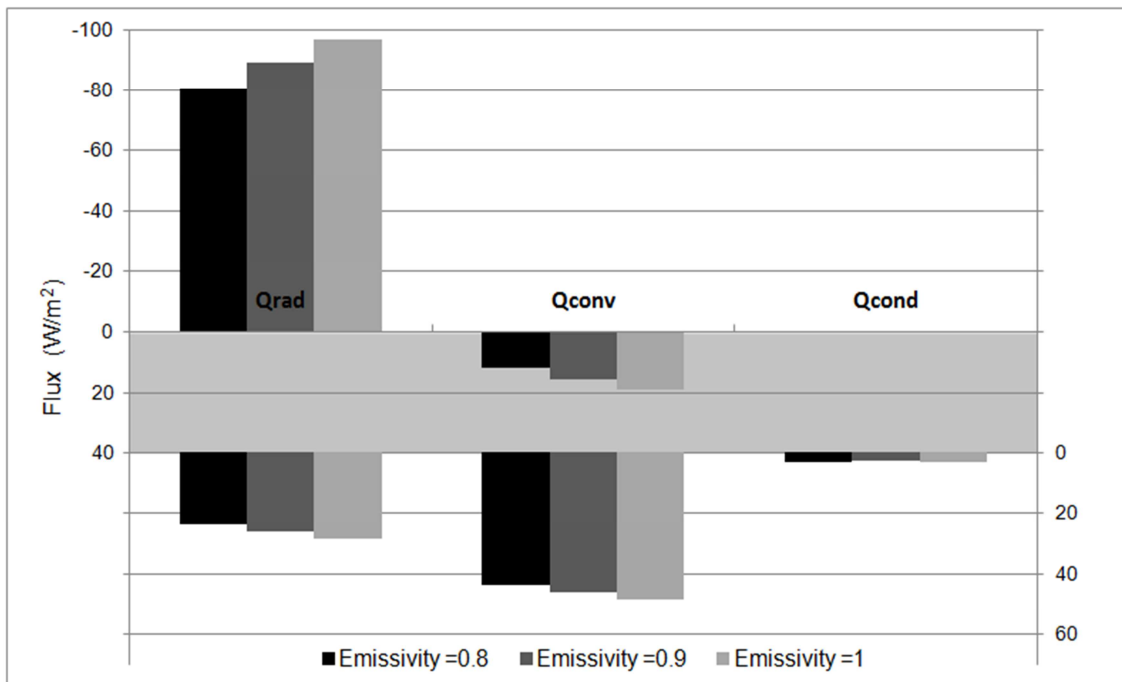


Figure 18. Heat fluxes along the roof for a range of emissivities with  $Q_{rad}$ : radiative flux;  $Q_{conv}$ : convective flux and  $Q_{cond}$ : condensed flux.

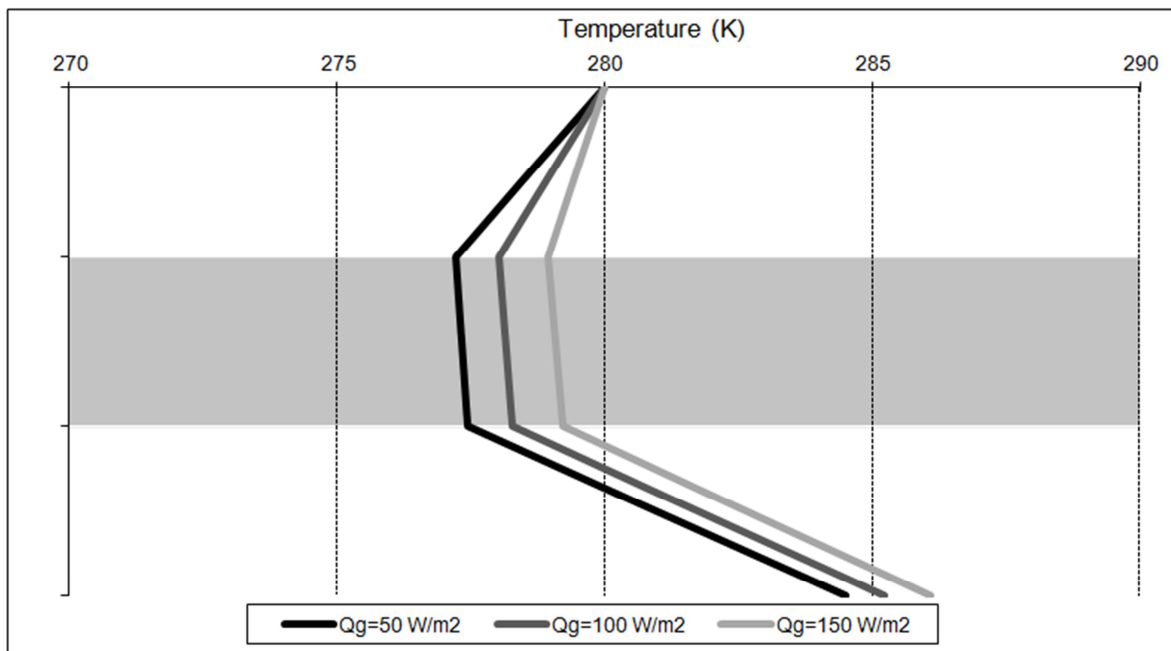
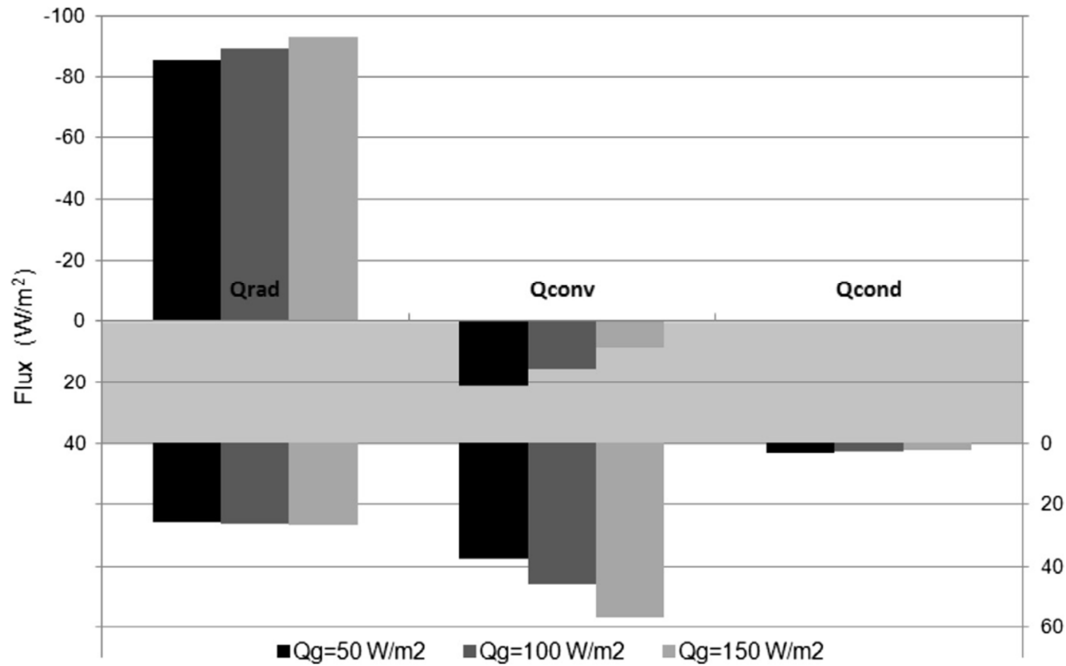


Figure 19. Mean temperature along the roof for a range of ground heat fluxes  $Q_g$ .



Figure

20. Heat fluxes along the roof for a range of ground heat fluxes  $Q_g$  with  $Q_{rad}$ : radiative flux;  $Q_{conv}$ : convective flux and  $Q_{cond}$ : condensed flux.

Table 1. Settings of the CFD simulations

CFD component	Setting
Solver	Pressure based segregated algorithm 2D 2 <sup>nd</sup> order implicit upwind scheme for space discretisation First order implicit scheme for time discretisation
Viscous model	Standard k- $\epsilon$ Standard wall functions Ideal gas law to compute density
Radiation model	DO (discrete ordinates) Theta divisions: 4 Iteration ratio (flow/radiation): 10
Species model	Air + water vapour
Convergence criteria	Mass, kinetic energy, dissipation rate: $10^{-3}$ Energy, Water vapour mass fraction, radiation: $10^{-6}$



Table 2. Initial conditions, boundary conditions and source terms

Initial condition	Value
Velocity, temperature, kinetic energy, dissipation rate and radiation	Deduced from steady state simulations using for boundary conditions values recorded at time step -1 hr
Water vapour mass fraction	Calculated from recorded relative humidity at time step 0
Boundary condition	Value
Left domain surface (inlet)	Outside wind velocity Outside temperature Radiative flux $\varepsilon\sigma T_{sky}^4$ No water content
Left domain surface (wall)	Wall temperature
Right domain surface (outlet)	Null gradients (except pressure) Radiative flux $\varepsilon\sigma T_{sky}^4$
Right domain surface (wall)	Wall temperature (same as left)
Bottom domain surface	Ground heat flux
Top domain surface	Moving wall (at wind velocity) Radiative flux $\varepsilon\sigma T_{sky}^4$
Specific source term	Value
Inside pipes	Heat flux

Table 3. RMS of different variables

	$T_{a1}$	$T_{a2}$	$T_{a3}$	$T_{r1}$	$T_{r2}$	$T_1$	$RH_{a2}$	$RH_{a3}$	$W_{a2}$	$W_1$	$Q_{trans}$
RM	0.66	0.72	0.87	0.69	0.76	0.82	10.96	1.98	$8.9 \cdot 10^{-4}$	$5.7 \cdot 10^{-04}$	$7.9 \cdot 10^{-06}$ ,
S	K	K	K	K	K	K	%	%	Kg Kg <sup>-1</sup>	Kg Kg <sup>-1</sup>	Kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup>

Table 4. Reference case and tested value

---

	Reference case	Lowest value	Highest value
$T_{out}$ (K)	280	275	285
$T_{sky}$ (K)	260	250	270
$V_{wind}$ (m s <sup>-1</sup> )	3	1	5
$Q_g$ (W m <sup>-2</sup> )	100	50	150
$\varepsilon$	0.9	0.8	1

---

---

## Annexe 2 : CFD Analysis of the Climate inside a Closed Greenhouse at Night Including Condensation and Crop Transpiration

Article présenté au congrès Greensys 2015 au Portugal (présentation orale).

---

H. Bouhoun Ali, P.E. Bournet<sup>3</sup>, V. Danjou and C. Migeon

Agrocampus Ouest, UP EPHor Environmental Physics and Horticulture Research Unit,  
F-49045 Angers, France.

**Keywords:** CFD, crop transpiration, condensation, radiation, unsteady, climate control

### Abstract

Humidity control is a key factor in greenhouse management as it impacts the growth and quality of most greenhouse crops. Low temperature accompanied with high humidity levels for instance may lead to condensation which in turn may create favourable conditions for fungal diseases like botrytis. CFD (Computational Fluid Dynamics) is today widely used to predict the climate inside greenhouses. But up until now, the condensation phenomenon has been hardly addressed in CFD studies. The aim of this work is to analyse into details the heat and mass transfers inside a closed monospan glasshouse compartment thanks to CFD simulations focusing on night-time cases. A 2D transient model which solves the classical RANS equations in combination with the k- $\epsilon$  closure for turbulence was considered. Radiative exchanges between the sky and the components of the greenhouse were considered through a specific submodel. User defined functions were implemented to take account of both condensation along the roof and crop transpiration. The validation of the model was undertaken on the basis of experiments conducted for a 100 m<sup>2</sup> Venlo-greenhouse with Impatiens pot plants grown on shelves. Results showed the ability of the model to predict air

---

<sup>3</sup> *Pierre-Emmanuel.Bournet@agrocampus-ouest.fr*

and leaf temperatures inside the greenhouse as well as air humidity levels. Then, the influence of the external conditions, heating and glass properties on the greenhouse climate and especially on the condensation process was investigated through a sensitivity analysis. For each case, the heat gain and loss along the inside and outside greenhouse roof were analysed and compared. The results of the simulations clearly show the influence of these parameters on the greenhouse air temperature and condensation flux.

## INTRODUCTION

In closed greenhouses, under low outside temperature conditions, relative humidity inside greenhouses may strongly increase until the dew point is reached and condensation starts. This may happen when the wall temperature is low or when the air humidity is high. During the night in winter in particular, in order to reduce the heat losses, greenhouses are often closed. The consequence is that the inside air is not well ventilated, which may favour high levels of humidity and cause damages to the crop.

Humidity therefore deserves a particular attention given its impact on the crop. Among numerical tools available to analyze its characteristics, CFD appears to be powerful. But only few CFD studies of greenhouse climate include humidity, or condensation processes. In their study, Piscia et al. (2012) considered the crop as a constant source of water vapour, thus neglecting the interaction of the crop with the ambient climatic conditions. Moreover, they activated a condensation model determining the water uptake from the air, but omitting the associated heat flux along the walls.

The present work focuses on the evolution of the air water vapour content of a glasshouse compartment, taking account of radiative transfers, heating from the ground and from heat pipes, sensible and latent heat contributions of the crop to the ambient air, and condensation. The model is first validated on the basis of several parameters including air and leaf temperatures as well as humidity. Then sensitivity tests to the outside conditions, heating and glass properties are conducted. The resulting heat fluxes (convective, radiative and condensed) along the walls are analysed and discussed.

## MATERIALS AND METHOD

### Experimental greenhouse and measurements

An experimental study was launched during winter 2013 to validate the CFD model. The device consisted of a 100 m<sup>2</sup> compartment of a Venlo type greenhouse located in Angers (47° 28' North, 0° 33' Est), covered with a 4 mm thickness glass and equipped with 30 cm high potted Impatiens (Novae-Guinea, cv. 'Sonic Scarlet') plants grown on four shelves, covering 18 m<sup>2</sup> and uniformly placed at 80 cm height. The greenhouse was heated using ground heating and overhead pipes. The compartment was surrounded by two other adjacent compartments limiting heat losses through the vertical walls and therefore preventing from risks of condensation along these walls. The measurement of external conditions (temperature – Pt100, Correge, France – and radiative fluxes – CNR1, Kipp & Zonen, Netherlands –), wall temperatures and ground heat fluxes (Captec, France) made it possible to get the model inputs (Fig. 1). Four temperature sensors on the roof and inside the greenhouse (Pt100, Correge, France), two humidity sensors (Vaisala HMP45C, Campbell Scientific Ltd., Antony, France) and a balance (evapotranspiration measurement) were used for the model validation. All the above-mentioned parameters were measured every 3 s and averaged online over 10-min periods with a data logger system (CR5000 and CR7, Campbell Scientific Ltd., Antony, France).

### CFD model

The CFD model consisted in a 2D unsteady model which solves the conservation equations of mass, energy and momentum for each node of the calculation domain. The standard  $k-\varepsilon$  turbulence model was chosen because it was validated in a number of studies considering similar greenhouses (Bournet et al., 2010). A specific specie submodel was activated distinguishing water vapour and air. In order to link the fluid density to other variables, the ideal gas law was considered. The radiation distribution was calculated from a specific radiative submodel based on the resolution of the radiative transfer equation (Bournet et al., 2007). The discrete ordinate method (DO) was retained in the numerical model. Given

that only night time conditions were considered, only long wavelength radiation was taken into account. An absorptivity=0.9; a reflectivity=0.1, a 0 transmissivity (power absorption coefficient= $10^4 \text{ m}^{-1}$ ) and a refractive index =1.52 for the glass were set as parameters. The crop was considered as a porous zone inducing a drag force which was calculated from the Darcy Forchheimer law (Boulard and Wang, 2002) with a drag factor=0.32. The sensible and the latent flux were deduced from an energy balance inside the crop using a specific submodel based on the Penman-Monteith formalism and using the formulations suggested by Baille et al. (1994) for the aerodynamic and stomatal resistances.

A specific submodel was also activated to take account of the condensation which may occur along the inner roof surfaces. This model was developed from the formulation provided by Bird et al. (1960). The water uptake from the ambient air, which happens when the local temperature goes beyond the dew point, was expressed as a mass flux sink term in the water vapour transfer equation. The corresponding source term for the energy equation was obtained by multiplying the mass flux by the latent heat of vaporization.

The calculation domain was divided into 36900 cells restricted to the experimental greenhouse compartment plus the adjacent one leeward (to avoid interference with the outlet), and to the outside air just above. Preliminary simulations were undertaken to get grid independent results. Calculations were carried out under unsteady conditions considering a 1 hour time step from midnight to 6 am. Initial conditions (velocity, pressure and temperature) were calculated from a steady state simulation performed with the boundary conditions recorded at 11 pm. The initial relative humidity was reset from the value recorded at midnight. The boundary conditions (Fig. 2) were established from measurements and updated at each time step. Fixed temperatures were set on the lateral walls while a heat flux was imposed both along the ground surface and locally inside the greenhouse to account for overhead heating. A fixed temperature was set at the upwind vertical boundary domain and an outflow condition at the exit of the calculation domain. The measured infrared radiation was imposed along the inlet, outlet and upper boundaries of the calculation domain, through a sky temperature.

## RESULTS AND DISCUSSION

The CFD simulations were carried out with the commercially available CFD package, Ansys Fluent 13. For the validation of the model, a clear night (March 3<sup>rd</sup>) was analysed. Between 0 and 6 am, the temperatures remained relatively stable with a decrease of less than 3 K over a 6 hour period :  $T_{out}= 276\pm 1$  K;  $T_{w1}=289.8\pm 0.2$ K;  $T_{w2}=287.1\pm 0.2$   $T_{sky}=251.5\pm 1.5$ K respectively for the outside, lateral walls and sky temperature. The ground heating started rapidly followed by the overhead heating. The total heating grew from 30 to 45 W m<sup>-2</sup> during the night. In a second stage, a sensitivity analysis was conducted considering five parameters which may strongly impact the thermal and hydrous behaviour of the greenhouse: the outside temperature, the wind speed, the sky temperature, the optical wall properties and the ground heat flux.

### Validation of the model

The time evolution of the inside air at three locations is shown in Fig. 3. Both measured and predicted air temperatures inside and above the crop follow the same trend with a slight temperature drop over the night (around 0.5 K). The order of magnitude of predicted temperatures is in fair agreement with measurements. Nevertheless, the simulated air temperature inside the cover ( $T_{a2}$ ) is slightly higher than just above ( $T_{a1}$ ), which is not in agreement with measurements. This may be due to the fact that in the simulations, warm air from the ground directly moves inside the canopy. Moreover, predicted roof temperatures (Fig. 3) remain lower than the greenhouse air temperature, the maximum difference between these temperatures being 10 K, which is also in agreement with measurements. The time evolution of the measured and predicted relative humidity is plotted in Fig. 4. As expected, relative humidity is higher inside the canopy than inside the air just above. To estimate the model performance, the RMS (Root Mean Square) was calculated for each variable. The following results were obtained: RMS=0.72 K for roof temperature, RMS=0.82 K for greenhouse air temperature, RMS=0.82 K for leaf temperatures and RMS=1.98 % and 10.96 % for relative humidity measured above (RH<sub>a1</sub>) and inside the canopy (RH<sub>a2</sub>). Predicted results are therefore globally very close to the measurements. The simulated transpiration flux

is also close to the measured one with the same order of magnitude of  $10^{-6} \text{ kg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Fig. 5), even if the model seems to underestimate transpiration. The transpiration increases from 0 to 6 am, which may be explained by the decrease in the relative humidity inside the greenhouse (which increases the gap between the humidity of air inside the crop ( $\text{RH}_{a2}$ ) and leaves; the relative humidity of air inside the substomatic chamber of leaves being assumed to be equal to 100% RH). The condensed flux (Fig. 5) increased with time all over the night until it almost balances the transpiration flux.

### **Impact of external conditions, glass properties and heating on condensation**

In order to assess the influence of each parameter, a reference case was chosen. Its characteristics are described in Table 1. All the parameters used for the boundary conditions were considered as constant during the night. To reduce the influence of the initial conditions, the results presented here were obtained after 6 hours of simulation (i.e. at 6 am). Three values for each parameter were studied (Table 2). Cases from clear (low  $T_{\text{sky}}$ ) to cloudy sky (high  $T_{\text{sky}}$ ) were considered and cases of frost were excluded. Finally only cases with ground heating were included in the analysis, i.e. overhead heating with pipes was not considered.

To compare these cases, the inside and roof temperatures as well as the thermal fluxes along the roof were simulated. They are plotted in Figures 6 to 10. The bars show the thermal fluxes between the glass and the outside and between the glass and the inside of the greenhouse. A negative flux represents a loss for the roof while a positive flux corresponds to a gain. All results are provided in  $\text{Watt m}^{-2}$  of ground area.

The outside temperature directly influences the convective transfer above the roof; this flux could be a gain or a loss (Fig. 6). For the lowest outside tested temperature, the roof loses heat by convection while it gains heat by convection for the two other cases. Simulations also show that condensation decreases when the roof temperature increases i.e. when outside temperature increases (Table 2). As condensation more or less balances the transpiration, it means that the transpiration flux reduces when the outside temperature increases. The influence of the wind speed was also tested. Since the external temperature was greater than



that of the roof, increasing the wind speed (Fig. 7) contributed to an increase in the external heat flux, thus decreasing the temperature difference both between the roof and the external air and between the roof and the inside air, once again reducing the condensed flux and transpiration rate of the canopy (Table 2). The sky temperature (Fig. 8) strongly influences the radiative flux exchanged between the wall and the sky. In the present case, the sky temperature always remains lower than the glass temperature and the radiative thermal loss is high compared with the convective flux. Increasing the sky temperature reduces the radiation flux loss, leading to a rise in the roof temperature. Consequently, the condensation flux reduces as the sky temperature rises. The optical properties of the roof play a similar role on the radiative heat flux, and the wall temperature increases when the emissivity decreases (Fig. 9), thus reducing the condensation and transpiration fluxes. Finally, it can be seen that when the ground heat flux rises (Fig. 10), the internal temperature increases which implies an increase of the roof temperature and heat loss. In the present case, an increase of the ground heat flux from 50 to 150 W m<sup>-2</sup> only raises the greenhouse air temperature from about 2 K.

### CONCLUSION

A comprehensive study of the air, roof and leaf temperature and air humidity inside a glasshouse during the night was undertaken. The present study combines a radiative submodel, together with a crop and a condensation submodel.

The CFD model showed its ability to correctly predict the evolution of the main characteristics of the inside air, the greenhouse cover and the canopy: temperature and humidity in particular. The condensation process occurred mainly along the roof which was cooler than the outside and ambient air, due to important radiative losses. The roof clearly appears as a key factor regulating the inside relative humidity and thus inside water content as it participates to water uptake from the ambient air. The influence of external parameters on the climate inside a greenhouse and on condensation in particular was analysed. Several parameters prevailed in the climate conditions which established inside the greenhouse. Low outside temperature or sky temperature for instance may enhance the condensation because they involve an important decrease of the wall temperature. To avoid the condensation inside

the greenhouse it appears necessary to limit the external heat losses for instance by choosing a glass with appropriated optical properties (low emissivity). A second less economical solution could be to increase the ground heat flux in the greenhouse in order to keep high wall temperatures.

### Literature cited

- Baille, M., Baille, A. and Laury, J.C. 1994. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of 9 ornamental species vs climate factor and leaf area. *Sci. Hortic. Amsterdam* 59, 217-232.
- Bell, B. 2003. Application Brief: Film Condensation of Water Vapor. Lebanon, New Hampshire: Fluent, Inc.
- Boulard, T. and Wang, S. 2002. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34, 173-190.
- Bournet, P.E. and Boulard, T. 2010. Effect of ventilator configuration on the distributed climate of greenhouses: a review of experimental and CFD studies. *Comput. Electron. Agric.* 74, 195–217.
- Bournet, P.E., Ould Khaoua, S.A. and Boulard, T. 2007. Numerical prediction of the effect of vent arrangements on the ventilation and energy transfers in a multi-span glasshouse using a bi-band radiation model. *Biosystems Engineering* 98:224-234.
- Piscia, D., Montero, J.I., Baeza, E. and Bailey, B.J. 2012. A CFD greenhouse night-time condensation model. *Biosystems Engineering* 111:141-154.

**List of Tables**

Table 1. Reference case and tested values

	Reference case	Lowest value	Highest value
Outside temperature $T_{out}$ (K)	280	275	285
Sky temperature $T_{sky}$ (K)	260	250	270
Wind velocity $V_{wind}$ ( $m\ s^{-1}$ )	1	1	5
Ground heat flux $Q_g$ ( $W\ m^{-2}$ )	100	50	150
Emissivity $\varepsilon$	0.9	0.8	1

Table 2. Condensed flux and heat fluxes balance over the roof for each tested case.

$T_{out}$ (K)	$T_{sky}$ (K)	$V_{wind}$ ( $m\ s^{-1}$ )	$Q_g$ ( $W\ m^{-2}$ )	$\varepsilon$	Condensed flux ( $W\ m^{-2}$ )	Balance ( $W\ m^{-2}$ )
280	260	1	100	0.9	2.84	1.80
275	"	"	"	"	4.04	3.0
285	"	"	"	"	1.61	0.68
280	260	3	100	0.9	2.12	1.36
"	"	5	"	"	1.68	0.94
280	250	1	100	0.9	3.54	2.46
"	270	"	"	"	1.83	0.91
280	260	1	100	0.8	2.66	2.03
"	"	"	"	1	3.09	1.56
280	260	1	50	0.9	3.29	2.65
"	"	"	150	"	2.13	1.25

List of Figures

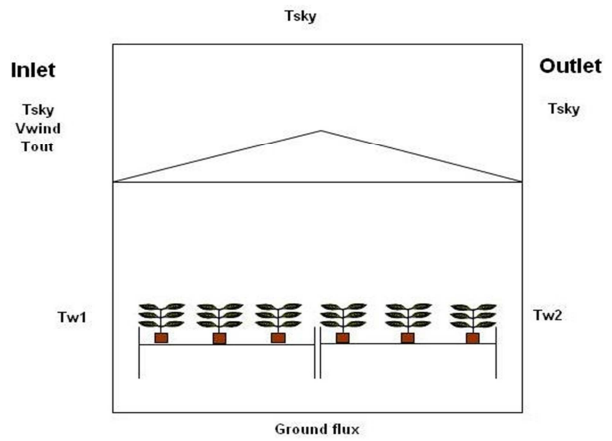
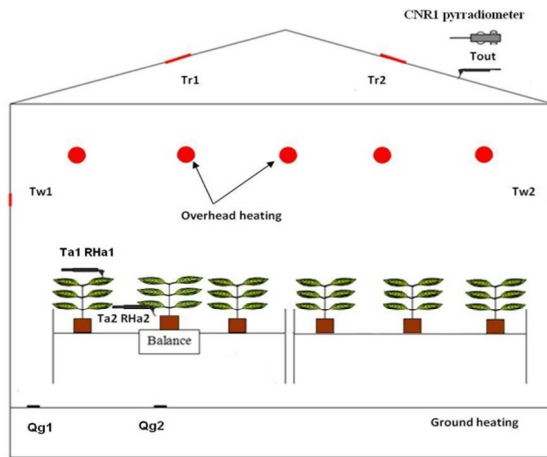


Fig. 1. Experimental setup.

Fig. 2. Boundary conditions.

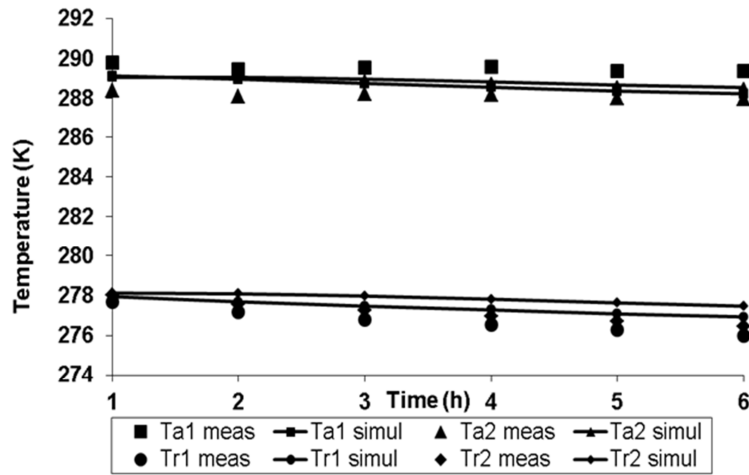


Fig. 3. Time evolution of the measured (meas) and simulated (simul) inside air temperatures  $T_a$  above (1) and inside (2) the canopy and roof temperatures  $T_{r1}$  and  $T_{r2}$ .

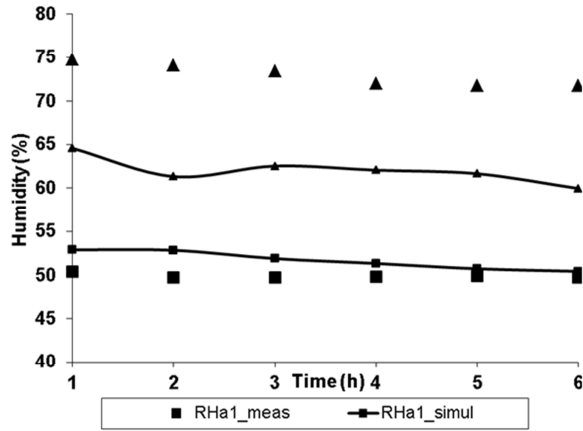


Fig. 4 Time evolution of the measured (meas) and simulated (simul) air relative humidity above ( $RH_{a1}$ ) and inside ( $RH_{a2}$ ) the crop.

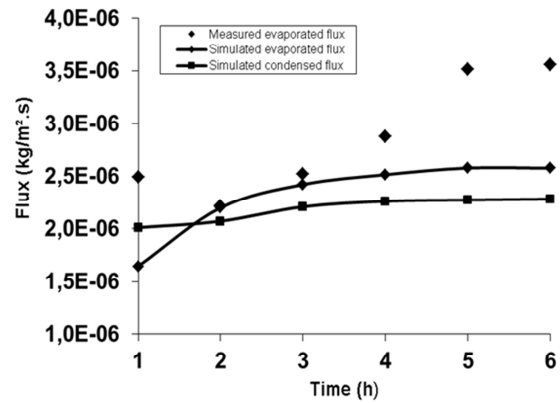


Fig. 5. Time evolution of simulated (simul) and measured (meas) transpiration flux, and simulated condensation flux.

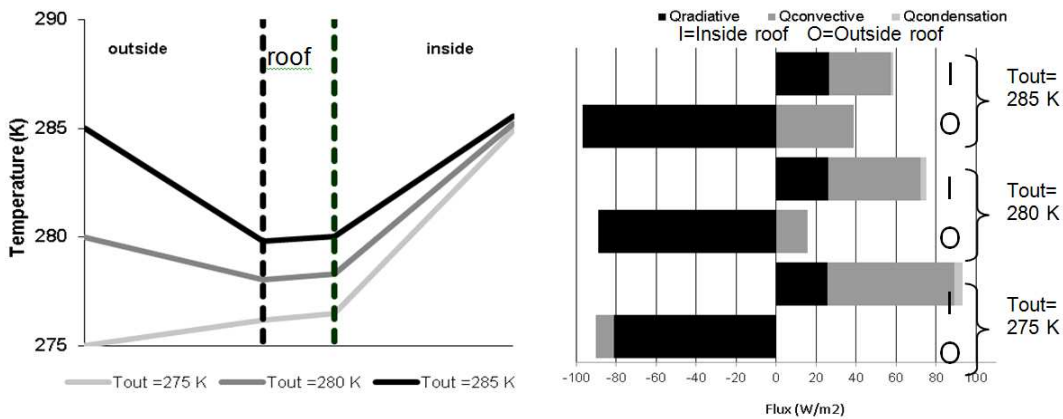


Fig. 6. Temperature and heat fluxes along the roof for a range of external temperatures  $T_{out}$ .

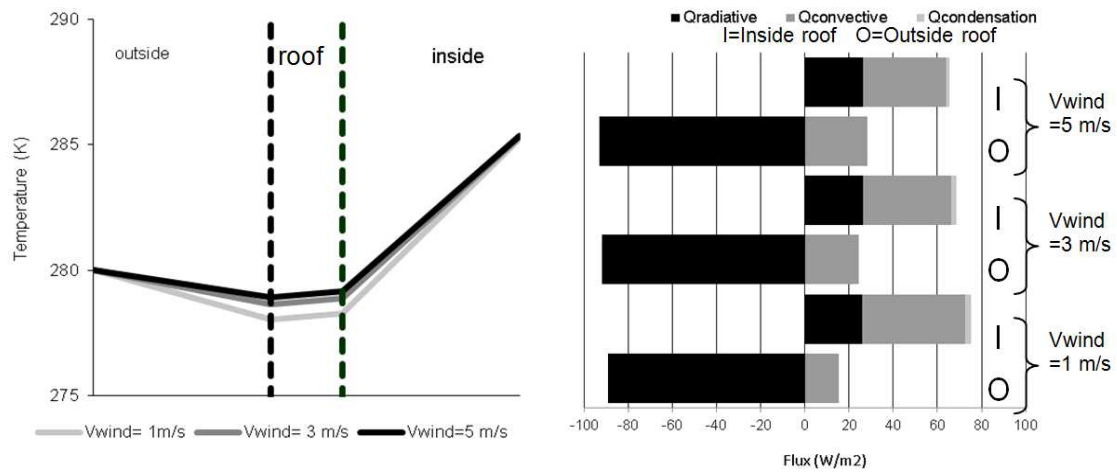


Fig. 7. Temperature and heat fluxes along the roof for a range of wind speeds  $V_{wind}$ .

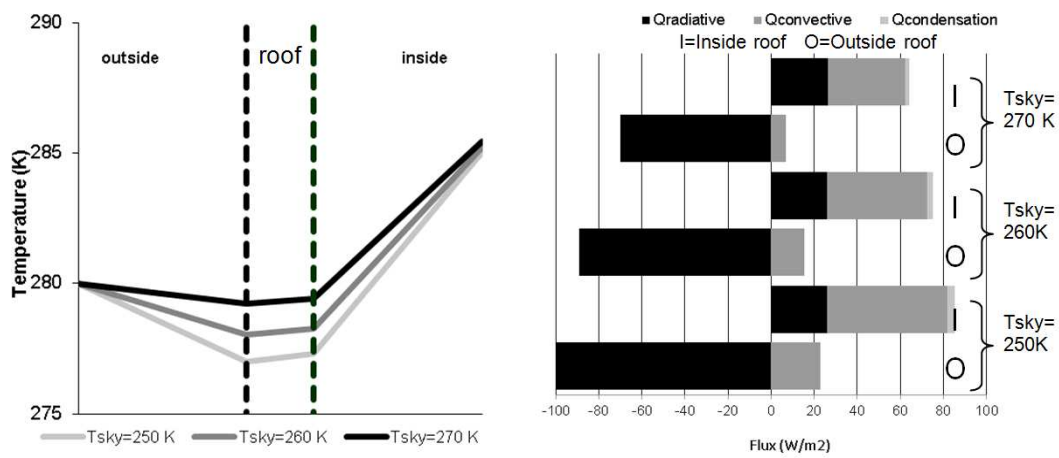


Fig. 8. Temperature and heat fluxes along the roof for a range of sky temperatures  $T_{sky}$ .

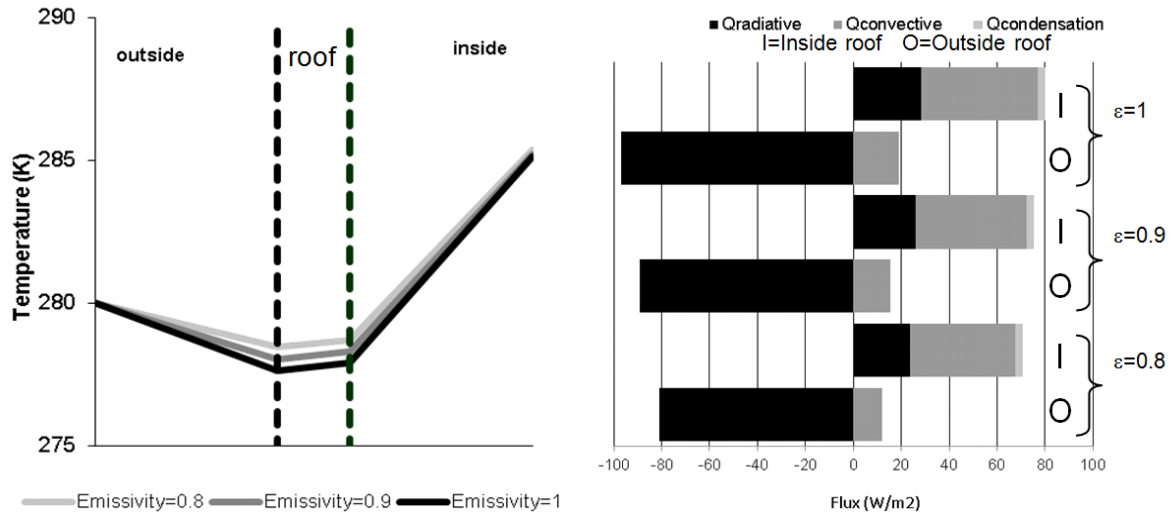


Fig. 9. Temperature and heat fluxes distribution along the roof for a range of emissivities  $\epsilon$ .

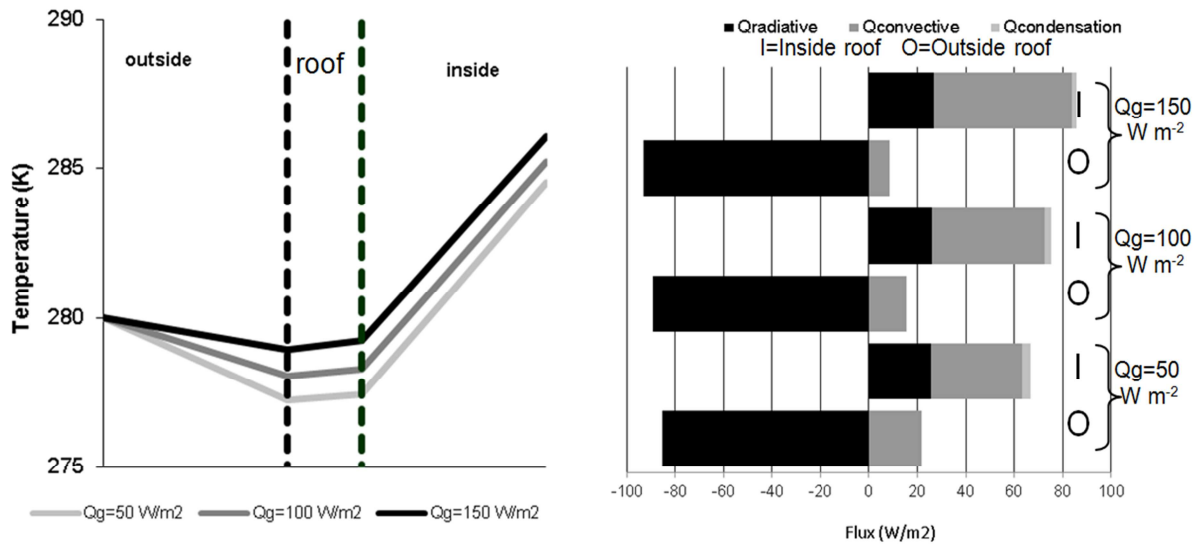


Fig. 10. Temperature and heat fluxes distribution along the roof for a range of ground heat fluxes  $Q_g$ .





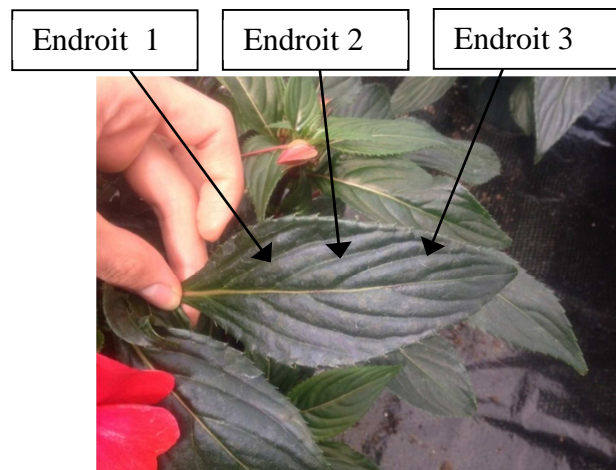
### Annexe 3 : Test statistique sur la précision des mesures par le poromètre

#### Objectif du test

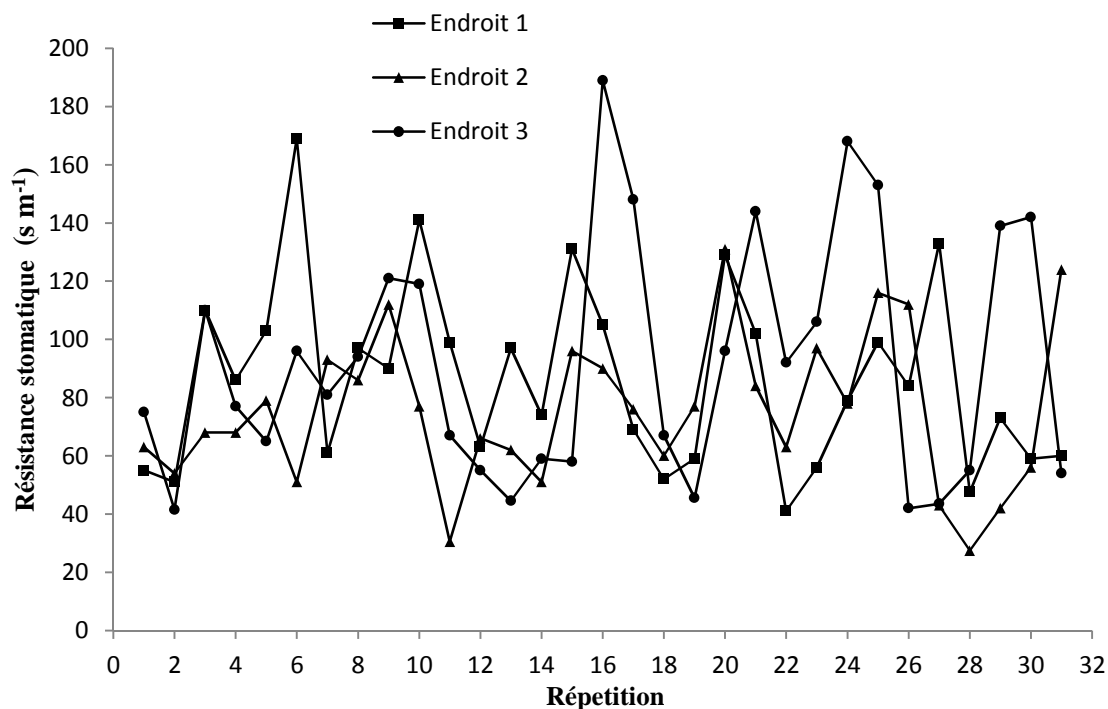
L'objectif de ce test était d'investiguer la précision des mesures de résistance stomatique par le poromètre et aussi de voir si une différence de mesure était observée en plaçant l'appareil en différents points d'une même feuille

#### Description et résultats des mesures

Plusieurs mesures ont été prises sur différentes feuilles du haut des plantes d'impatiens de Nouvelle Guinée (les mesures ont été prises sur 5 plantes différentes), et en différents endroits sur une même feuille : au milieu de la feuille et sur les bords (Fig. 1). Les mesures ont été prises le 11 avril 2014 avec un ciel nuageux, et une température moyenne de 25°C donnée par le capteur du poromètre. 93 répétitions en différents endroits ont été réalisées en 1h30 de temps. Les résultats sont présentés sur la Fig 2.



**Figure 1: Positions de prise des mesures de la résistance stomatique.**



**Figure 2 : Résistance stomatique mesurée aux trois endroits sur les feuilles.**

D'après la Fig. 2 on constate que les mesures de la résistance stomatique  $R_s$  prises sur les bords (endroit 1 et endroit 3) sont légèrement supérieures à celles prises au milieu de la feuille (endroit 2), le Tab.1 explique plus clairement cet état de fait : cela est dû probablement à la densité des stomates qui est différente entre le milieu de la feuille et les bords.

**Tableau 1 : Incertitude des mesures de résistance stomatique.**

Endroit de la mesure de $R_s$	Moyenne (s / m)	Écart type standard ( $\sigma$ )	Incertitude ( $2\sigma/\sqrt{n}$ ) n=31
Endroit 1	84.59	43.22	10.71
Endroit 2	75.25	26.35	9.04
Endroit 3	94.19	31.35	15.28

Les incertitudes qui ont été calculées pour un intervalle de confiance de 95% restent acceptables (Tab. 1) vu que l'erreur donnée par le constructeur pour le poromètre (i.e.  $\pm 20 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$  pour  $R_s \in [20-50 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}]$  et  $\pm 10\%$  pour  $R_s \in [50-4000 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}]$ ) est bien supérieure aux incertitudes trouvées. La précision est donnée pour les conditions normales de fonctionnement du poromètre, c'est-à-dire en supposant que l'appareil est bien calibré avec une erreur de calibration inférieure à 5% et une différence de la température entre la cuvette du poromètre et la feuille où la mesure est effectuée inférieure à 1 °C. L'incertitude obtenue pour les mesures effectuées au milieu des feuilles est la plus faible ; elle reste cependant comparable aux autres.

### **Conclusion :**

Pour avoir une bonne précision de mesure de  $R_s$  avec le poromètre il importe de respecter les consignes suivantes :

- Procéder à une calibration avec une erreur inférieure à 5%
- Respecter une différence de température entre la cuvette et la feuille où la mesure est effectuée inférieure à 1°C
- Vérifier que la tête de mesure du poromètre reste bien à l'ombre
- Accepter la mesure par le poromètre après la 4ème ou la 5ème mesure afin d'éviter de laisser la pince du poromètre trop longtemps sur la feuille et limiter ainsi le stress mécanique des feuilles.

La position où la mesure est prise n'a pas une grande influence sur la précision des mesures de  $R_s$ , puisque l'on obtient presque  $20 \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$  d'écart entre les mesures prises au milieu et sur les bords des feuilles (Tab. 1). Il a été constaté que les mesures prises au milieu de la feuille sont un peu plus fiables que les autres. Par conséquent toutes les mesures de  $R_s$  seront réalisées au milieu des feuilles lors des campagnes expérimentales.



---

**Annexe 4 : Modelling New Guinea Impatiens Leaf Stomatal Resistance from Experimental Values.**

**Article présenté au congrès Greensys 2015 au Portugal (poster).**

---

M. Sourgnès, C. Migeon, H. Bouhoun Ali, P.E. Bournet, P. Cannavo and E. Chantoiseau  
Agrocampus Ouest, UP EPHor Environmental Physics and Horticulture Research Unit,  
F-49045 Angers,  
France.

**Keywords:** stomatal resistance, porometer, container, greenhouse, multiplicative model, water comfort

**Abstract**

In greenhouses, optimized plant crop management is crucial for environmental reasons and for maintaining the competitiveness of the horticultural sector. In particular, optimizing water consumption is of high interest but requires predictive models needing leaf stomatal resistance  $R_s$  estimation. Until now, most studies deduced  $R_s$  by inverting the energy balance equation. On contrary, the objective of the present study is to model  $R_s$  for leaves on the entire height of the canopy from direct measurements with a porometer. The model was first established and validated for the upper leaves and then tested for the within-canopy leaves. In this prospect, New Guinea Impatiens plants were cultivated in containers inside a greenhouse during 16 weeks under water-comfort irrigation management. Global radiation, temperature and relative humidity of the air were continuously recorded while the stomatal resistance was measured at the top and in the middle of the canopy. Two models involving global radiation and vapor pressure deficit (Jarvis multiplicative models) were tested by using two parameterization methods. The first method consisted in deducing the model parameters independently for each week. Results showed significant differences between the parameters and a generic model could not be obtained. In the second method the model parameters were obtained from a subset of experimental data. Validating the model on the remaining datasets was quite conclusive. By extrapolating the obtained model from the upper leaves to the

middle canopy leaves using the Beer-Lambert law to estimate the global radiation, acceptable correlations were reached between estimated and measured  $R_s$ . Results were however not as good as those obtained for the upper leaves.

## INTRODUCTION

At a time when ecological concerns are growing, a better management of water resources in the horticultural sector appears to be necessary to remain competitive. In this prospect, understanding water transfers inside the soil-plant-atmosphere continuum is essential. Plants act as pumps, withdrawing water from the soil to compensate the loss caused by transpiration. This foliar transpiration is controlled by the stomata. Therefore, predicting the state of stomata according to the weather using a modelling approach would help better understand the interactions between the plant and its environment. Nevertheless, few efficient models exist for greenhouse pot plant crops compared with the open-field conditions (Damour et al., 2010). Moreover, very few authors focus on actual measurements of stomatal resistance under such conditions (Boulard et al., 1991; Morales et al., 2013). In most existing publications (Baille et al., 1994; Kichah et al., 2012), the stomatal resistance is calculated by reversing the Penman-Monteith equation and not measured directly as it is in the present study.

The aim of this study is to model the stomatal resistance of New Guinea Impatiens plants from experimental data provided by a porometer. The model is based on the climate parameters on which the opening of the stomata mainly depends, namely the solar radiation and the vapour pressure air-air deficit (calculated from the temperature and relative humidity of the air inside the greenhouse). The model is then applied not only to the upper leaves but also to the leaves at mid height of the canopy.

## MATERIALS AND METHOD

### Plant material, growing conditions and experimental treatments

In order to establish an empirical model and test it on another independent set of experimental data, a great number of stomatal resistance values and climatic parameters had

to be collected. Experiments were conducted during 16 weeks (from March 26<sup>th</sup> to July 18<sup>th</sup> 2014) inside a 100 m<sup>2</sup> (10 m×10 m) glasshouse compartment (with shading screens) in Angers (47°28' North, 0°33' East and 39 m altitude) in north-western France. New Guinea Impatiens (*Impatiens x novae-guinea* 'Paradise® Orona') crop was chosen as plant model as it is very sensitive to climate variations. Moreover, as mentioned by Morille (2012), it is hypostomatic (stomata can only be found on the underside of leaves) which simplifies stomatal resistance measurements. Seedlings (3-4 leaves) were potted during the last week of March in plastic pots filled in with blond Sphagnum peat. The pots were equally distributed over four metallic shelves representing a total area of 18 m<sup>2</sup>. During the experiment, the plants were spaced out to insure a normal growth (as plants which are put too close to one another tend to grow upright with longer internodes). On July 18<sup>th</sup>, the final density on each shelf was 10 plants per m<sup>2</sup>. Plants were watered by flooding the shelves with a complete nutrient solution. Irrigation was first activated once a day (at 6 am) but was then adapted to the summer conditions (two to three times a day, at 6 am, 2 pm and 11 pm).

### **Data collection**

Only one of the four shelves was instrumented. The global radiation (incident and reflected) was measured with a radiometer (CNR1, Kipp&Zonen, Delft, The Netherlands, ±10 W/m<sup>2</sup>) above the crop canopy. The temperature (Ta, ±0.1 °C) and relative humidity (HR, ±2%) of the air above and at mid height inside the crop were measured by sheltered ventilated Vaisala HMP45C sensors (Campbell Scientific Ltd., Antony, France). These two parameters were used to assess the air-air vapour pressure deficit. All data were recorded every 3 seconds and then averaged over 10 min periods using a data acquisition processor (CR5000, Campbell Scientific Ltd., Antony, France).

The stomatal resistance measurements were undertaken with a porometer (AP4-UM-3, Delta-T Devices Ltd., Cambridge, England) during the 10<sup>th</sup>, 11<sup>th</sup>, 12<sup>th</sup> and 14<sup>th</sup> week after plantation. Measurements were repeated on five different leaves for each level inside the canopy (level 1 – top and level 2 – middle) throughout the whole day (either every 30 minutes or every hour). Repetitions were then averaged. Contrary to measurement on level 1, level 2 was only investigated during the 10<sup>th</sup> and 11<sup>th</sup> weeks.

### Modeling method

Some of the previous studies on modeling stomatal resistance (Jarvis, 1976; Thorpe et al., 1980) showed that, under water-comfort,  $R_s$  depends mostly on the global radiation, vapour pressure deficit and air temperature. In the case of Impatiens crop, it can however be considered independent of the temperature and expressed according to Baille et al. (1994) as:

$$R_s = R_{s,min} \frac{(c_1 + R_g)}{c_2 + R_g} f_2(VPD) \quad (1)$$

$R_{s,min}$  is the minimal stomatal resistance measured for a given period. Concerning the  $f_2$  function, two expressions mentioned by Baille et al. (1994) were successively tested, leading to Eq. (2) and (3):

$$R_s = R_{s,min} \frac{(c_1 + R_g)}{c_2 + R_g} (1 + c_3(VPD - VPD_0)^2) \quad (2)$$

$$R_s = R_{s,min} \frac{(c_1 + R_g)}{c_2 + R_g} (1 + d_1 \exp(d_2(VPD - VPD_0))) \quad (3)$$

where  $VPD_0$  is the vapour pressure deficit for which the stomatal resistance is minimal, so it was defined at the same time as  $R_{s,min}$ . Coefficients  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $c_3$ ,  $d_1$  and  $d_2$  were fitted to better adjust to the measured  $R_s$  by minimizing the sum square difference between the measured stomatal resistance ( $R_{s,mes}$ ) and the calculated stomatal resistance ( $R_{s,calc}$ ) for both Eq. 2 ( $c_1$ ,  $c_2$  and  $c_3$ ) and Eq. 3 ( $c_1$ ,  $c_2$ ,  $d_1$  and  $d_2$ ). To do so, the GRG (Generalized Reduced Gradient) nonlinear algorithm was used for optimizing  $c_1$ ,  $c_2$  and  $c_3$  in Eq. 2 or  $c_1$ ,  $c_2$ ,  $d_1$  and  $d_2$  in Eq. 3.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Climate inside the greenhouse

The climatic parameters were recorded over 16 weeks.

Fig. 1 and 2 show the corresponding graphs for the relative air humidity, temperature, global solar radiation and vapour pressure deficit (calculated with the air temperature and relative humidity) both above and inside the canopy during week 11. During the four weeks, when  $R_s$  was measured (10<sup>th</sup>, 11<sup>th</sup>, 12<sup>th</sup> and 14<sup>th</sup> week), the climatic conditions were similar, with sun and high temperatures during the afternoon, despite partly cloudy skies throughout



the day. The temperature inside the compartment was neither lower than 15°C nor higher than 37°C. The relative humidity was within the range 29-98 % and the global solar radiation within the range 0-130 W m<sup>-2</sup>.

### Evolution of stomatal resistances

Fig. 3 shows the values of stomatal resistances obtained for 2 days of week 11, during which a complete night of measurements was operated. Error bars represent the standard deviation obtained for the five repetitions of stomatal resistance measurements. Both for the upper and lower layer of the canopy, the stomatal resistance increases throughout the day from 8 am, together with the temperature. Stomata are open to capture CO<sub>2</sub> for photosynthesis, but closed during the hottest hours of the day to reduce water loss through transpiration. Thus at 15:20 the growth of stomatal resistance accelerates until it reaches a peak at 20:10 corresponding to values of almost 2500 s m<sup>-1</sup> (lower layer) and 1700 s m<sup>-1</sup> (upper layer). Then the stomatal resistances decrease until the morning when the coolest temperatures are measured and the global solar radiation starts growing (Fig. 3). In order to evaluate the relationship between stomatal resistances, global solar radiation and vapor pressure deficit, Fig. 4

Fig. left and right were analyzed. They depict the daily dynamics of  $R_s$  showing a marked hysteresis between two periods: the morning and the early hours of the afternoon (almost from 06:00 to 15:00); and the late afternoon and the night (almost from 15:00 to 05:00). This hysteresis is more pronounced for the evolution of stomatal resistance as a function of vapor pressure deficit than as a function of global solar radiation, but can be clearly observed for the two parameters.

### Modeling the stomatal resistance of upper leaves

The stomatal resistances were estimated for weeks 10, 11, 12 and 14 (Tab.1) considering first independent weekly datasets. The match between modeled and measured values for each set of weekly data both for Eq. 2 and 3 is shown using the RMSE, the slope of the linear regression obtained for  $R_{s,mes} = f(R_{s,calc})$ , and the linear correlation coefficient ( $R^2$ ). The parameterization method provides good results (with an average  $R^2$  of 0.69). The

parameterization coefficients that were found for a given week were however very different from the ones found for another. A hypothesis could be the influence of the physiological stage of the plant as reported by Jones (1992). Consequently, when the modelling equation with a set of parameters obtained for a given week was applied to another week, the predicted values of  $R_s$  were very far from the measured ones. To get a better model, all data sets from the first three weeks (10, 11 and 12) were used to estimate coefficients  $c_1, c_2, c_3$  (Eq. 2) and  $c_1, c_2, d_1, d_2$  (Eq. 3). The obtained values are displayed at the bottom of Tab. 1. The minimum stomatal resistance ( $R_{s,min}$ ) was also fixed, choosing the lowest value of all weeks ( $48.1 \text{ s m}^{-1}$ ) and the  $VPD_0$  associated to this value was 2.839 kPa. Finally, the obtained model was tested on another week (14) as a validation test. The linear regression  $R_{s,mes} = f(R_{s,calc})$  led to  $R^2 = 0.756$  for Eq. 2 and 0.227 for Eq. 3, clearly stating that Eq. 2 was actually the best model.

### Application of the model to the mid-height leaf stomatal resistance

In order to assess the robustness of the model, it was then applied to the leaves located at mid height inside the canopy. The global solar radiation inside the canopy required in Eq. 2 was first calculated using the Beer's law (exponential decay):  $R_g(z) = R_g(z_0) \exp(-k LAI z/z_0)$  where  $R_g(z)$  is the global radiation at a depth  $z$  inside the crop,  $R_g(z_0)$  is the global radiation at the top of the crop,  $k$  is the extinction coefficient and  $z_0$  is the height of the crop. An extinction coefficient  $k = 1.15$  was used corresponding to the value found by Morille et al. (2013) for Impatiens. The lower-layer was considered in the middle of the crop:  $z/z_0 = 1/2$  and the LAI was measured each week. The vapor pressure deficit inside the canopy was calculated using the air temperature and the relative humidity that were given by sensors inside the canopy at the lower layer. Then the model was tested on the data sets of weeks 10 and 11 separately. Results are shown in Fig. 6 The errors bars (representing the standard deviation obtained for the five repetitions of stomatal resistance measurements) are bigger than for the upper-layer measurements and the model seems less adapted to this layer than to the upper one. In fact for weeks 10 and 11, Eq. 3 provides better results than Eq. 2 with  $R^2 = 0.538$  (week 10) and 0.658 (week 11), while Eq. 2 leads respectively to  $R^2 = 0.507$  and 0.395. Moreover, the "night peak" was also less well modeled than for the upper-layer by

Eq. 2, and negative values of stomatal resistance could be obtained, showing that the model was not relevant for this layer.

Consequently none of the two tested models seems to be optimal to predict the stomatal resistance of the upper (Fig. 5) or mid-height (Fig. 6) leaves. First, it was reported that during the night, as the global solar radiation was zero, in both equations the stomatal resistance became only a function of the vapor pressure deficit, which seems not to be appropriate to correctly predict the observed “night peak” (Fig. 2). Second, an explanation of the discrepancies of the model during daytime could be the daily hysteresis loop that was evidenced (Fig. 4). This hysteresis was already observed by Prenger et al. (2002) and Medrano et al. (2005) and could explain why the multiplicative models that do not take this phenomenon into account are not ideal to estimate properly the stomatal resistance, despite their common use. As explained by Tuzet et al. (2003), hysteresis arises because of the dependence of the stomatal resistance on multiple environmental and physiological factors (light, temperature, humidity, intercellular CO<sub>2</sub> concentration) which are not all considered in the present study.

### CONCLUSION

The aim of this study was to model the stomatal resistance using experimental measurements from a porometer while most studies use an inversion method from evapotranspiration measurements. Two multiplicative models were tested considering two methods. In the first method, parameters of the models were established for 4 independent weeks, leading to a strong variability of the coefficients. In the second method, the parameters were assessed from data collected on 3 weeks. Pretty good results were obtained when applying the corresponding model to a fourth week. However, some discrepancies were observed at night, when models assume that  $R_s$  only depends on the VPD. The present study also concludes that multiplicative models are perhaps not the best way to model stomatal resistance. Practically, they could be improved by taking into account other parameters and phenomenon, like hysteresis between  $R_s$  and VPD, or  $R_s$  and  $R_g$ .

### Literature cited

- Baille, M., Baille, A., Laury, J.C., 1994. Canopy surface resistances to water vapour transfer for nine greenhouse pot plant crops. *Scientia Hort.* 57, 143–155.
- Boulard, T., Baille, A., Mermier, M., Vilette, F., 1991. Mesures et modélisation de la résistance stomatique foliaire et de la transpiration d'un couvert de tomate de serre. *Agron.* 11, 259–274.
- Damour, G., Simonneau, T., Cochard, H., Urban, L., 2010. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant Cell Environ.* 33, 1419–1438.
- Jarvis, P. G. (1976). The interpretation of the variation in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society, London, Series B*, 593–610.
- Jones H.G. (1992) Stomata. In *Plants and Microclimate: A Quantitative Approach to Environmental Plant Physiology* (ed. H.G. Jones) pp. 131–162. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Medrano, E., Lorenzo, P., Sánchez-Guerrero, M.C., Montero, J.I., 2005. Evaluation and modelling of greenhouse cucumber-crop transpiration under high and low radiation conditions, *Scientia Hort.* 105, 163–175.
- Morales, C. G., Pino, M. T., & del Pozo, A. (2013). Phenological and physiological responses to drought stress and subsequent rehydration cycles in two raspberry cultivars. *Scientia Horticulturae*, 162, 234–241.
- Morille, B., 2012. Élaboration d'un modèle du climat distribué à l'échelle de l'abri et de la plante en cultures ornementales sous serres : Analyse des transferts de masse et de chaleur, bilans énergétiques. Ph.D Thesis, Agrocampus Ouest Angers, Angers, France.
- Morille, B., Migeon, C. and Bournet, P.E., 2013. Is the Penman-Monteith model adapted to predict transpiration under greenhouse conditions? Application to a New Guinea Impatiens crop. *Scientia Hort.* 152, 80–91.
- Prenger, J. J., Fynn, R. P., Hansen, R. C., 2002. A comparison of four evapotranspiration models in a greenhouse environment. *Transactions of the ASAE* 45(6), 1779–1788

Thorpe, M.R., Warrit, B. and Landsberg, J.J., 1980, Responses of apple leaf stomata: a model for single leaves and a whole tree. *Plant Cell Environ.* 3, 23-27.

Tuzet, A., Perrier, A., Leuning, R., 2003. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant Cell Environ.* 26, 1097–1116.

**Tables**

Table 1. Results of the fit for different equations and different weeks

Week N°	$R_{s,min}$ [s/m]	$VPD_0$ [kPa]	Equation 1		Equation 2	
			Coefficient	Value	Coefficients	Value
10	48.1	2.839	$c_1$	188.349	$c_1$	56.374
			$c_2$	6.506	$c_2$	5.048
			$c_3$	-0,141	$d_1$	1.249
					$d_2$	0.690
			<b>RMSE</b>	88.490	<b>RMSE</b>	114.853
			<b>Slope</b>	1.061	<b>Slope</b>	1.081
		<b>R<sup>2</sup></b>	0.796	<b>R<sup>2</sup></b>	0.655	
11	59.4	1.935	$c_1$	223.806	$c_1$	49.001
			$c_2$	10.694	$c_2$	6.361
			$c_3$	-0.350	$d_1$	1.275
					$d_2$	0.818
			<b>RMSE</b>	185.844	<b>RMSE</b>	243.889
			<b>Slope</b>	1.066	<b>Slope</b>	1.316
		<b>R<sup>2</sup></b>	0.747	<b>R<sup>2</sup></b>	0.609	
12	49.3	2.125	$c_1$	371.739	$c_1$	97.708
			$c_2$	7.842	$c_2$	4.793
			$c_3$	-0.372	$d_1$	1.748
					$d_2$	1.297
			<b>RMSE</b>	172.386	<b>RMSE</b>	209.525
			<b>Slope</b>	1.150	<b>Slope</b>	1.310
		<b>R<sup>2</sup></b>	0.736	<b>R<sup>2</sup></b>	0.640	
14	50.82	2.392	$c_1$	304.050	$c_1$	130.625
			$c_2$	5.181	$c_2$	2.603
			$c_3$	-0.178	$d_1$	0.538
					$d_2$	0.482
			<b>RMSE</b>	203.992	<b>RMSE</b>	202.604
			<b>Slope</b>	1.0288	<b>Slope</b>	1.1274
		<b>R<sup>2</sup></b>	0.658	<b>R<sup>2</sup></b>	0.679	
10, 11, 12	48.1	2.839	$c_1$	316.667	$c_1$	73.110
			$c_2$	8.869	$c_2$	7.264
			$c_3$	-0.150	$d_1$	2.745
					$d_2$	0.851
			<b>RMSE</b>	208.536	<b>RMSE</b>	351.956
			<b>Slope</b>	1.618	<b>Slope</b>	0.629
		<b>R<sup>2</sup></b>	0.756	<b>R<sup>2</sup></b>	0.227	

Figures

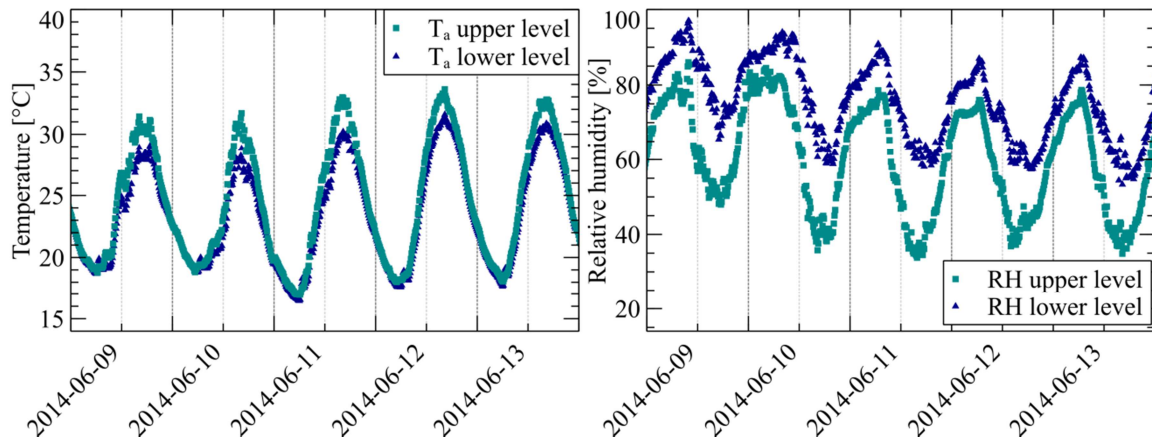


Fig. 1. Time evolution of the air temperature (left) and relative humidity (right) inside the greenhouse during week 11.

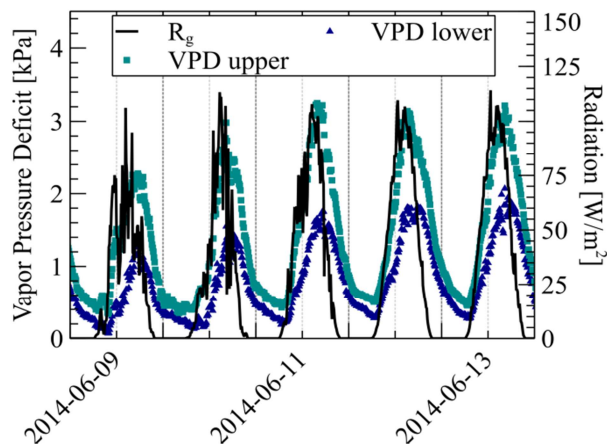


Fig. 2. Time evolution of global solar radiation and vapor pressure deficit on week 11.

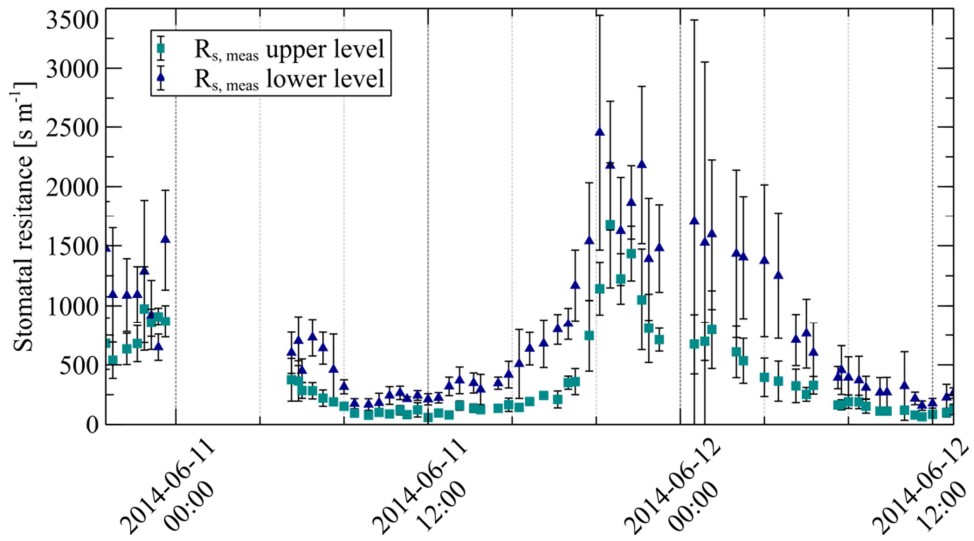


Fig. 3. Time evolution of stomatal resistances during week 11.

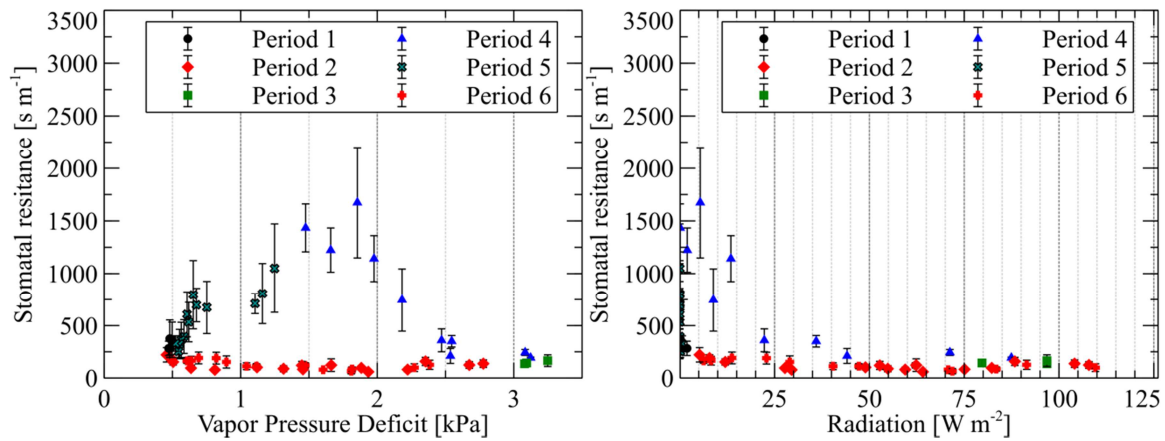


Fig. 4. Evolution of stomatal resistance in the upper canopy layer on June the 11<sup>th</sup> and 12<sup>th</sup> as a function of vapor pressure deficit (left), and as a function on global solar radiation (right).

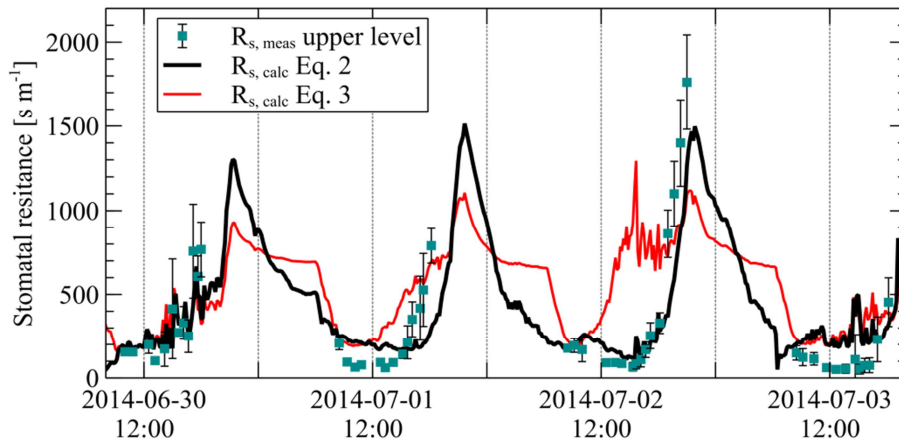


Fig. 5. Comparison between measured values of stomatal resistance during week 14 and calculated values using the model parameterized on the weeks 10, 11 and 12.

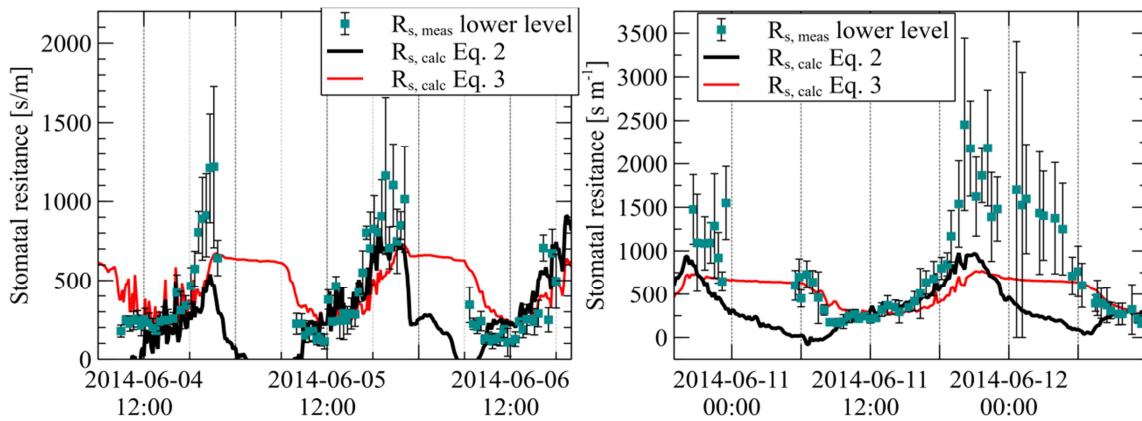


Fig. 6. Comparison between measured and simulated values of  $R_s$  in the lower-layer on week 10 (left) and 11 (right).



## **Annexe 5 : Modelling the Stomatal Resistance under Water Comfort and Restriction to Assess the Transpiration of a Greenhouse New Guinea Impatiens Crop**

**Article présenté au congrès Greensys 2015 au Portugal (présentation orale)**

---

H. Bouhoun Ali, E. Chantoiseau, P.E. Bournet, P. Cannavo, C. Migeon and M. Sourgnès  
Agrocampus Ouest, UP EPHor Environmental Physics and Horticulture Research Unit,  
F-49045 Angers,  
France.

**Keywords:** soil-plant-atmosphere, pots, peat, matric potential, porometer, Penman Monteith, direct method

### **Abstract**

In greenhouses, reducing water consumption by increasing water efficiency is of high interest. To reach this goal, predictive models of soil-plant-atmosphere water transfers may be used. Such models are however presently mainly developed for open field conditions and very few models exist for greenhouse plants grown in pots. Implementing these models requires an accurate estimate of the stomatal resistance  $R_s$ . The aim of this work is to implement and adapt the multiplicative Jarvis model (1976) to calculate  $R_s$  for greenhouse potted plants not only under water comfort but also under water restriction, through the introduction of a new multiplicative function depending on the growing media matric potential. The obtained model could then be tested to evaluate transpiration. To establish the model parameters, an experiment was conducted during sixteen weeks inside a greenhouse with ornamental plants grown in containers on shelves. Both water comfort and water restriction conditions were applied. The peat matric potential, radiation, temperature and humidity were continuously recorded while  $R_s$  was measured and transpiration was assessed with scales. Data collected on four weeks were used to fit the parameters of  $R_s$  depending on radiation and water pressure

deficit under water comfort. The multiplicative matrix potential function was then deduced from  $R_s$  measured on stressed plants. The model was validated against data and showed its ability to assess  $R_s$  both under comfort and restriction conditions. The developed model of  $R_s$  could therefore help assess transpiration under various irrigation regimes.

## INTRODUCTION

At a time when ecological concerns are growing, a better management of water resources in the horticultural sector appears to be necessary to remain competitive. The control of irrigation requires an understanding of transpiration processes to adjust the amount of water available to plants to their transpiration. In this context, the development of models to predict water transfers in the soil-plant-atmosphere continuum could help optimize water inputs.

Generally speaking, the estimation of transpiration is based on a representative model of the stomata behavior according to the climatic parameters (solar radiation, air temperature, vapor pressure deficit) and to the water availability in the substrate (Monteith, 1973; Gerosa et al., 2012). Stomata opening and closing can be assessed through the evolution of the stomatal resistance ( $R_s$ ). According to Kaufmann (1982), in the case of water comfort the major determinants of  $R_s$  are radiation, and vapor pressure deficit, while for water restriction cases the availability of water inside the soil intervenes in addition to these determinants. Modeling  $R_s$  for open field conditions was extensively undertaken over the past 50 years with the help of new sensors that made it possible the direct measurement of  $R_s$ , such as porometers and gas exchange analyzers (Damour et al., 2010). Almost all models for open field were deduced from two seminal works by Jarvis (1976) and Ball et al. (1987) but very few models exist for plant cultivated in container under greenhouse conditions (Casaroli et al., 2010). Moreover, most models found for  $R_s$  under such conditions focused on the soil-plant system, or the plant-atmosphere system and very few take into account real coupling between the three compartments. For those, adaptation to water restriction conditions was achieved by adding a function expressing the water status of the soil or plant as performed by Gang et al. (2012).

The aim of this work is to develop a model able to estimate  $R_s$  and then use this model to assess the transpiration. First,  $R_s$  was modeled under water comfort conditions using the multiplicative model of Jarvis for potted Impatiens. It was then adapted to water restriction conditions by adding a multiplicative function based on the matric potential of the substrate. Finally, the complete  $R_s$  models (for water comfort and restriction) were used in the Penman Monteith (PM) and Direct Method (DM) to estimate transpiration under comfort and water restriction conditions. Although PM model is the reference method to estimate evapotranspiration, the simpler DM (Morille et al., 2012) was also tested to assess its efficiency.

## MATERIALS AND METHODS

### Experimental setup

Experiments were conducted inside a 100 m<sup>2</sup> glasshouse compartment located in Angers (47° 28' N, 0° 33' E) in north-western France. Experiments were carried out during 16 weeks from 26<sup>th</sup> March to 20<sup>th</sup> July 2014 with Impatiens (*Novae-guinea*, cv. 'Sonic Scarlet') as plant model. Young Impatiens plants were potted in 0.74 L containers (8.7 cm height) filled in with fine peat with homogeneous peat bulk density (i.e. 0.12 g cm<sup>-3</sup>). Plants were equally distributed on four shelves with an initial density of 28 plants per m<sup>2</sup> (18 m<sup>2</sup> total area). During the experiment, the plant density was decreased to favor plant growth, but insuring that plants covered entirely the shelves (final density of 15 plants per m<sup>2</sup>). Plants were irrigated by periodically flooding with a nutrient solution, and flowers were regularly removed. For the purpose of the study irrigation was periodically stopped on one shelf until plants evidenced water stress visual signs. For the plants on the three other shelves, water-comfort conditions were applied with water potential in peat kept higher than -2 kPa. In order to avoid excessive temperatures, a shading screen was used and the roof vents were fully open as soon as external temperatures exceeded 20°C.

## Experimental measurements

Water-comfort and water-restricted crop transpirations were measured by two scales (Melter-Toledo, Greifensee, Switzerland,  $\pm 0.1$  g) located approximately at the center of the shelves (Fig. 1) and carrying several containers. The above canopy global radiation was measured by a radiometer (CNR1, Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands,  $\pm 10$  %). The air temperature ( $T_a$ ,  $\pm 0.1$  °C) and relative humidity (RH<sub>a</sub>,  $\pm 2$ % HR) above the canopy were measured by shielded and ventilated sensors (Vaisala HMP45C, Campbell Scientific Ltd., Antony, France). The leaf temperatures were measured by thermocouples at two levels. Peat matric potential ( $\Psi$ , kPa) was measured at the middle height of ten containers with tensiometers (SDEC 1300, France). Among them, four were placed in the water-comfort shelf and the six others in the water-restricted shelf. All measurements were performed every 3 seconds, averaged over 10 minute periods and recorded by a data logger system (CR5000, Campbell Scientific Ltd., Antony, France).

Stomatal resistances were measured on leaves of the upper part of the canopy (or sunlit leaves) as well as on leaves of the bottom part (or shaded leaves) with a porometer (AP4, Delta-T Device, United Kingdom). The accuracy of this instrument is  $\pm 20$  s m<sup>-1</sup> for  $R_s$  in the range [20-40 s m<sup>-1</sup>] and  $\pm 10$ % for  $R_s$  in the range [50-4000 s m<sup>-1</sup>]. Five measurements were done for each sunlit and shaded leaves of different plants for each water condition. The measurements of  $R_s$  were replicated every half an hour from 8:00 am to 8:00 pm for weeks 10, 12, 14, 16 and from 5:30 am to 23:00 pm for week 11 after plantation

## MODELLING METHODOLOGY

### Stomatal resistance

According to Jarvis (1976),  $R_s$  can be expressed using a multiplicative model (Eq. 1):

$$R_s = R_{s,\min} \cdot f_1(R_g) \cdot f_2(VPD_a) \cdot f_3(\Psi) \quad (1)$$

where  $R_{s,\min}$  is the minimal measured stomatal resistance,  $R_g$  (W m<sup>-2</sup>) is the global radiation measured above the canopy,  $\Psi$  (kPa), the substrate water potential and,  $VPD_a$  (Pa), the vapor

pressure deficit.  $VPD_a$  is deduced from measurements of humidity and temperature above the canopy. The influence of these different factors may be quantified through the identification of three functions  $f_1(R_g)$ ,  $f_2(VPD_a)$  and  $f_3(\Psi)$ .

For function  $f_1$  Baille, (1994a) recommended the use of Eq. 2, while Boulard et al. (1991) recommended Eq. 3 for  $f_2$ , and Nikolov et al. (1995) Eq. 4 for  $f_3$ :

$$f_1(R_g) = \frac{a_1 + R_g}{b_1 + R_g} \quad (2)$$

$$f_2(VPD) = 1 + a_2 \exp(b_2 (VPD - VPD_0)) \quad (3)$$

$$f_3(\Psi) = 1 + \left(\frac{\Psi}{\Psi_1}\right)^{a_3} \quad (4)$$

where  $VPD_0$  is the vapor pressure deficit for which  $R_s$  is minimal.  $\Psi_1$  is the water potential for which  $R_s$  under water restriction is twice the stomatal resistance under water comfort.  $a_i$  and  $b_i$  are parameters to be determined using linear regressions for instance.

### Transpiration

The models usually implemented to estimate transpiration in the case of hypostomatic plants are the Penman-Monteith (PM) and the so-called Direct Method (DM). The PM has been widely used and proved its accuracy for both hydric water comfort and restriction conditions (Caspari et al. 1993). The DM was also tested as it is easier than PM to implement because of its lower number of parameters. One of its drawbacks however, is that it requires the knowledge of the leaf temperature.

**1. Direct Method model.** According to the DM approach, the transpiration may be expressed as a function of the leaf-to-air vapor pressure deficit (Eq.5)

$$E = \frac{\rho_a \cdot LAI \cdot C_{pa} \frac{P_{vsat,l} - P_{v,a}}{r_a + r_c}}{\gamma} \quad (5)$$

where  $E$  is the canopy transpiration rate ( $W m^{-2}$ ),  $\rho_a$  is the air density ( $kg m^{-3}$ ),  $C_{pa}$  is the specific heat of air ( $J kg^{-1} K^{-1}$ ),  $\gamma$  is the psychrometric constant.  $r_a$  and  $r_c$  are the leaf aerodynamic resistance and the canopy stomatal resistances ( $s m^{-1}$ ), respectively.  $LAI$  is the

Leaf Area Index ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ),  $P_{vsat-l}$  is the vapor pressure of the air at saturation in the stomata chamber (Pa) and  $P_{v-a}$  is the water vapor pressure of the air (Pa).

**1. Penman-Monteith model.** The Penman-Monteith model is derived from the combination of the energy balance equation and the latent/sensible heat flux expressions (Eq. 6):

$$E = \frac{\Delta R_n + 2 \rho_a LAI c_{pa} VPD_a / r_a}{\Delta + 2 \gamma \left(1 + \frac{r_c}{r_a}\right)} \quad (6)$$

where  $R_n$  is the net radiation flux absorbed by the crop ( $\text{W m}^{-2}$ ). It is systematically assumed to be equal to the net radiation measured above the crop, thus neglecting the radiation exchanges below the canopy and to the ground.  $VPD_a$  is the vapor pressure deficit (Pa) and  $\Delta$  is the slope of the saturated water vapor pressure curve according to temperature.

## RESULTS AND DISCUSSION

### Fit of $R_s$ models

The parameters of functions  $f_1$  and  $f_2$ , (Eq. 2-5) were fitted on the values recorded on the 10<sup>th</sup>, 11<sup>th</sup>, 14<sup>th</sup> and 16<sup>th</sup> weeks of experiments after transplanting for well-irrigated plants. Once the model was established under water comfort, it was adapted to water restriction cases by fitting the parameters of function  $f_3$  (Eq. 5) on measurements of weeks 10, 11, 14 and 16 undertaken for water restricted plants. The general model of  $R_s$  obtained under both hydric conditions is given by Eq. 7.

$$R_s = 42 \left( \frac{R_g + 148.9}{R_g + 11.71} \right) \left( 1 + 0.47 \exp(0.64 (VPD - 1.84)) \right) \left( 1 + \left( \frac{\psi}{-11.41} \right)^{1.05} \right) \quad (7)$$

From results concerning  $f_3$  (Fig. 2) it can be seen that the agreement between calculated and measured values is quite poor with  $r^2 = 0.47$ . This weak value of  $r^2$  is mainly due to the gap between high values of  $R_s$  (mainly recorded at night) and the  $f_3$  curve. Nevertheless the fit appears to be quite acceptable for rather low values of  $R_s$ , which are mainly recorded during daytime (8 am to 6 pm) when the transpiration of the plants is significant. In addition to this,  $R_s$  depends not on the soil water potential but on the leaf water potential (Jarvis, 1976). In the present case, the soil water potential was used because technically it was easier to assess than

the leaf water potential. In general, both potentials vary in the same manner all day long, but during summer days the plants cannot absorb water from the substrate fast enough to balance their transpiration. The leaf water potential thus decreases rapidly and the proportionality with soil potential is lost (Tuzet et al., 2003). Such conditions lead to a closure of the stomata that is not taken into account by the present model (Eq. 7).

The  $R_s$  model was validated against data collected for week 12 under comfort (Fig. 3A) and water restriction (Fig. 3B). It was applied for the sunlit leaves and showed its ability to simulate  $R_s$  under water comfort conditions with  $r^2 = 0.64$  and  $RMSE = 242.33 \text{ s m}^{-1}$ , for  $R_s$  between 49 and  $1128 \text{ s m}^{-1}$ . During most of the day, the agreement between measured and calculated data was quite good, but the model failed to depict the sharp increase of  $R_s$  in the evening. This increase was due to the closure of the stomata when the unbalance between water transpiration and absorption led to a decrease of the leaf water potential. As  $R_s$  was used to estimate the transpiration, which in such conditions was limited, the developed model of  $R_s$  can be considered as satisfactory (i.e. the model of  $R_s$  has some limits to calculate high  $R_s$  values; but for such values, the transpiration is negligible).

On the first two days after the end of irrigation, measured stomatal resistances for water restriction (displayed on Figure 3B) are of the same order of those under comfort conditions. From the third day, water restriction starts to cause an increase of  $R_s$ . The agreement between the measured and the calculated  $R_s$  is very good with  $r^2 = 0.86$  and  $RMSE = 348.22 \text{ s m}^{-1}$  for  $R_s$  in the range  $[92 - 3825 \text{ s m}^{-1}]$ . Introducing a supplementary multiplicative function of the substrate water potential makes it possible to predict the increase of  $R_s$  along the investigated week. Incidentally, the stomata closure in the evening is better represented by using a substrate water restriction function.

### Transpirations models

The modeled  $R_s$  were then used to estimate the plants transpiration using the direct model (DM) and the Penman-Monteith (PM) model. Again, both comfort and water restriction cases were investigated.

Both models of transpiration require the estimation of  $r_a$  and  $r_c$ . In the present study  $r_a$  was considered constant (Baille et al., 1994b):  $r_a = 271 \text{ s m}^{-1}$ .  $r_c$  was calculated by taking the average of parallel sum of the individual  $R_s$  of shaded and sunlit leaves (Caspari et al., 1993). The measurements of  $R_s$  indicated that the value of  $R_s$  for shaded leaves was twice that of sunlit leaves for both water comfort and restriction, as confirmed by Caspari et al. (1993). As the canopy was dense ( $\text{LAI}=2.36 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$  for a plant height of 24 cm), the part of sunlit leaves in  $r_c$  was negligible, hence we assumed that  $r_c = R_s$  (shaded leaves).

The results of measured and calculated transpiration for comfort and water restriction conditions are presented on Figures 4 (comfort) and 5 (water restriction). As predicted, the transpiration under water restriction was lower than the one under comfort. The transpiration predicted for water comfort with both PM and DM models were in good agreement with measured transpiration with  $r^2 = 0.92$  for PM and  $r^2 = 0.82$  for DM. As expected from the  $R_s$  modeling that did not take into account the leaf water dynamics during the day, the transpiration was underestimated by both models in the morning, and overestimated in the afternoon. Overall, the agreement between both models was good, with PM model being slightly better, as stated by the higher  $r^2$ . The relative error for accumulated transpiration was also estimated, leading to a 7.4 % error for PM, and 17 % for DM. Under water restriction, the agreement between measured values and both models was slightly lower with  $r^2$  equal 0.72 for PM model and 0.69 for DM. However, these results evidenced good results of the investigated models. In this case, the relative error for cumulated transpiration was 2.74 % for PM, and only 6.27 % using DM.

### CONCLUSIONS

In this study the stomatal resistance was modeled with the Jarvis method both for comfort and water restriction conditions. In the second case, a multiplicative function describing the stomatal closure according to the soil water potential was developed. Model parameters were estimated from  $R_s$  measurement during four weeks. The validation against data recorded during a fifth week showed good agreement.



The good results of predicted transpiration for both hydric conditions confirm that the model established for  $R_s$  is relevant to depict the evolution of  $R_s$  under water restricted conditions. Moreover, results show that the direct model could be used to calculate transpiration for both hydric conditions. It provides even better results than the Penman-Monteith model for cumulative transpiration under water restriction. As it is easier to apply with less mandatory input, it is a good candidate for transpiration forecasting for greenhouse crop.

Nevertheless, the accuracy of  $R_s$  model can still be increased in order to get better prediction of the temporal evolution of  $R_s$  by including leaf water potential. This improvement of  $R_s$  model would help get more accuracy for the hourly dynamics prediction of transpiration, and would be a powerful tool for precision horticulture.

### Literature cited

- Baille, M., Baille, A. and Laury, J.C. 1994a. Simplified model for predicting evapotranspiration rate of 9 ornamental species vs climate factor and leaf area. *Sci.Hortic. Amsterdam* 59:217-232.
- Baille, M., Baille, A., Laury, J.C. 1994b. Canopy surface resistances to water vapour for nine greenhouse pot plant crops. *Sci.Hortic. France* 57:143-155.
- Ball, M.C, Woodrow, I.E. and Berry J.A. 1987. A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental conditions. In *Progress in Photosynthesis Research*, Ed I. Biggins. Martinus Nijhoff Publishers. Netherlands. p.221-224.
- Bartzanas, T., Boulard, T. and Kittas, C. 2004. Effect of vent arrangement on windward ventilation of a tunnel greenhouse. *Biosystems Engineering* 88:479-490.
- Boulard, T., Baille, A., Mermier, M. and Villette, F. 1991. Measurement of stomatal resistance and transpiration in a greenhouse tomato canopy - Comparison between a 1 layer and a multilayer model. *Agronomie* 11:259-274.

- Caspari, H.W., Green S.R. and Edwards, W.R.N. 1993. Transpiration of well-watered and water-stressed Asian pear trees as determined by lysimetry, heat-pulse, and estimated by a Penman-Monteith model. *Agricultural and Forest Meteorology* 67:13-27.
- Damour, G., Simonneau, T., Cochard, H. and Urban, L. 2010. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant Cell Environ* 33:1419–1438.
- Gang, L., Lu L, Yongyi, D., Dongsheng, A., Yongxiu, L., Weihong, L., Xinyou, Y., Wenwen, L., Jingqing, S., Yanbao, Z., Jianfeng, D., Weiping, C. and Chunjiang, Z. 2012. Testing two models for the estimation of leaf stomatal conductance in four greenhouse crops cucumber, chrysanthemum, tulip and liliun. *Agricultural and Forest Meteorology* 165:92-103.
- Jarvis, P.G. 1976. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Serie B* 273:593-610.
- Kaufmann, M.R. 1982. Leaf conductance as a function of photosynthetic photon flux density and absolute humidity difference from leaf to air. *Plant Physiol* 69:1018-1022.
- Monteith, J.L. 1973. *Principles of environmental physics*. Edward Arnold, London. p.241.
- Morille, B., Migeon, C. and Bournet, PE. 2012. Is the Penman–Monteith model adapted to predict crop transpiration under greenhouse conditions? Application to a New Guinea Impatiens crop. *Scientia Horticulturae* 152:80-91.
- Nikolov, N.T., Massman, W.J., and Schoettle, A.W. 1995. Coupling biochemical and biophysical processes at the leaf level: an equilibrium photosynthesis model for leaves of C3 plants. *Ecol. Model.* 80:205–235.
- Tuzet, A., Perrier, A. and Leuning, R. 2003. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant Cell and Environment* 26:1097-1116.

Figures

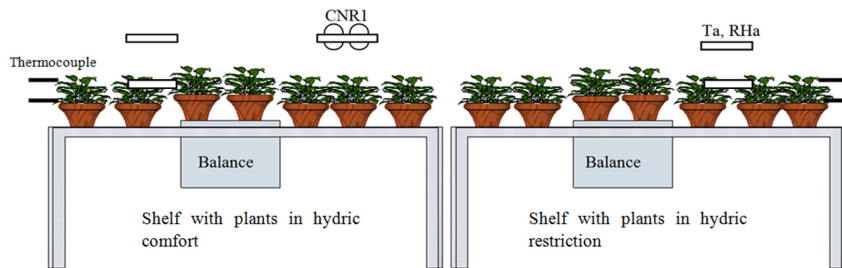


Fig.1. Experimental device.

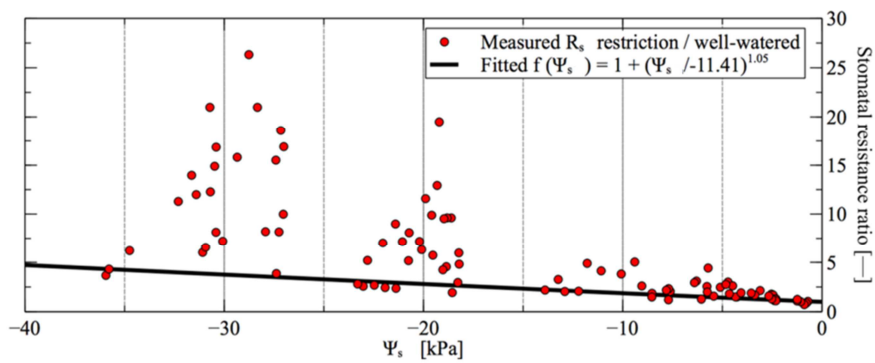


Fig.2. Fitted function of stress  $f_3(\Psi)$ .

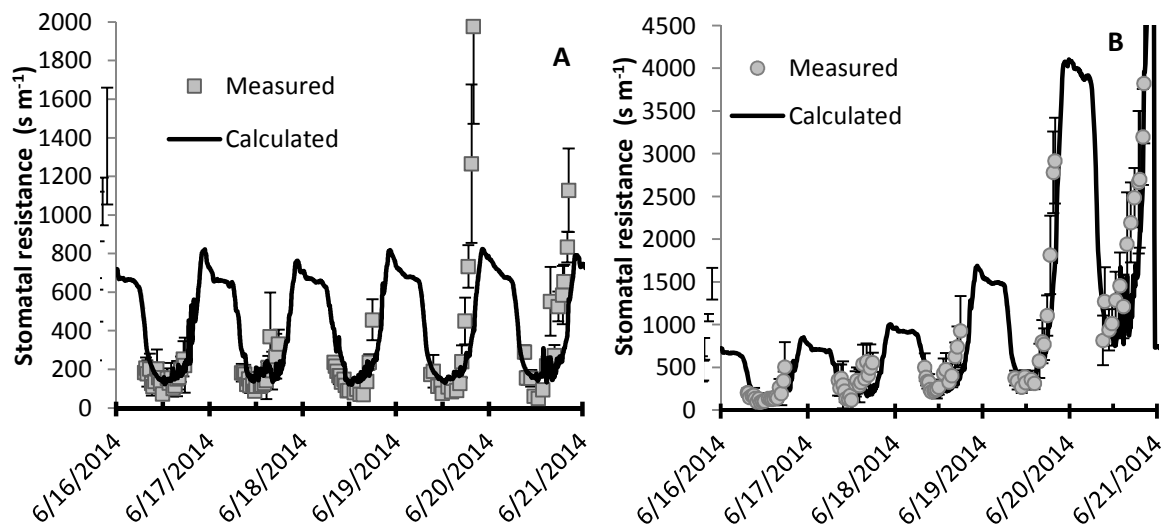


Fig. 3. Measured and calculated  $R_s$  for plants under comfort (A) and water restriction (B) conditions 12 weeks after plantation.

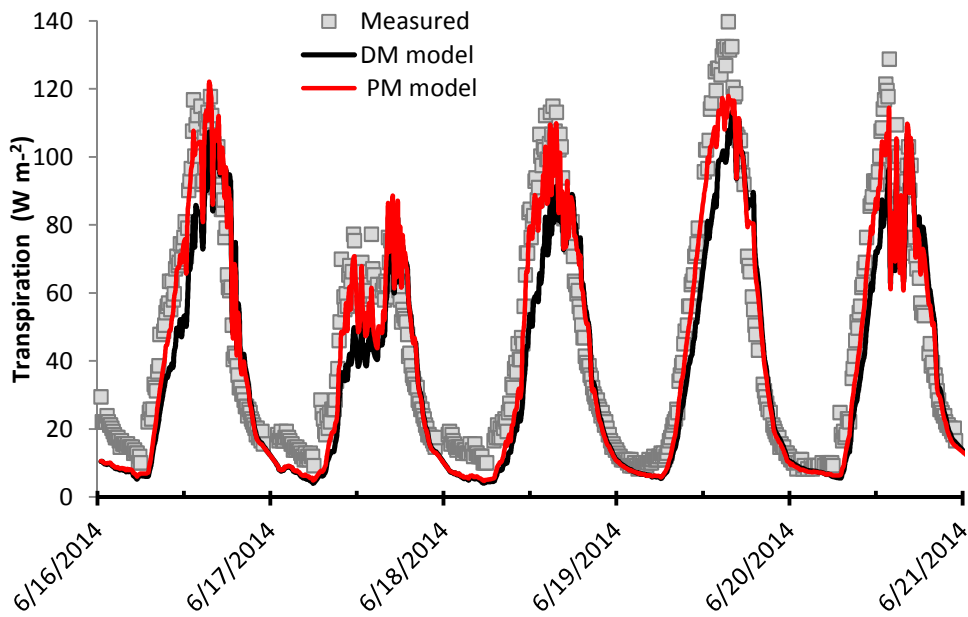


Fig. 4. Measured and calculated transpiration for plants under water comfort conditions 12 weeks after plantation.

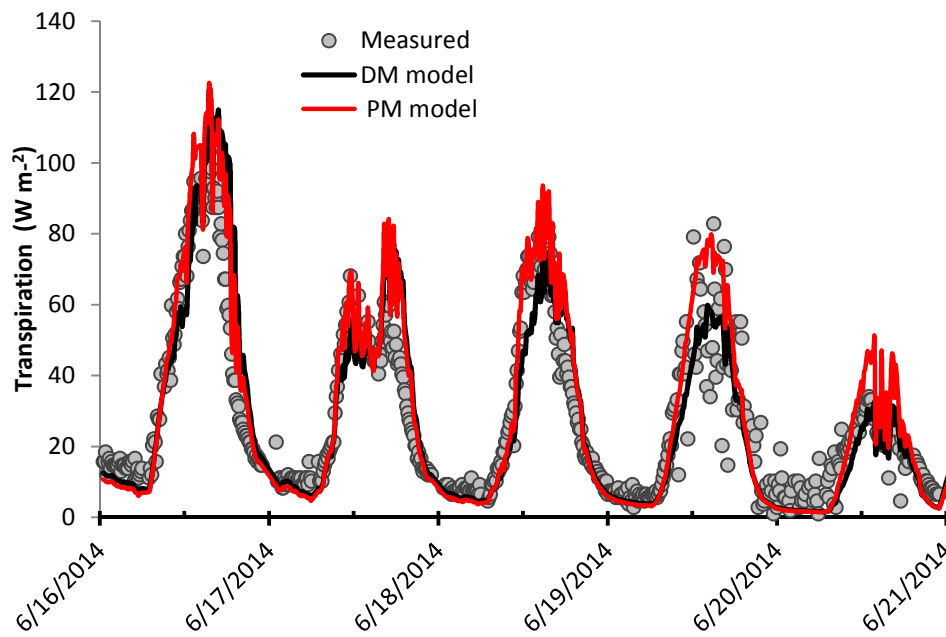


Fig. 5. Measured and calculated transpiration for plants under water restriction conditions 12 weeks after plantation.

---

**Annexe 6 : Stomatal Resistance Modelling using the Full Factorial Design: Application to the New Guinea Impatiens.**

**Article présenté au congrès Greensys 2015 au Portugal (présentation orale).**

---

H. Bouhoun Ali, P.E. Bournet, P. Cannavo, C. Migeon, E. Chantoiseau and M. Sourgnès  
Agrocampus Ouest, UP EPHor Environmental Physics and Horticulture Research Unit,  
F-49045 Angers,  
France.

**Keywords:** transpiration, growth stage, greenhouse, growth chamber, containers, porometer, polynomial model, climatic parameters

**Abstract**

The stomatal resistance  $R_s$  appears as a key parameter governing plant transpiration. For that reason, it deserved a particular attention of modelers. Up to now however, most models were multiplicative models established at a given plant growth stage and not valid at another growth stage. In this prospect, the objective of the present work is (1) to develop a dynamic model of  $R_s$  based on the full factorial design FFD, and (2) to validate the model at several plant growth stages inside a production greenhouse. The FFD is based on an optimization process which makes it possible to establish a polynomial relationship between  $R_s$  and the radiation, humidity and temperature. To implement the model, a set of experiments was conducted inside a 10 m<sup>2</sup> growth chamber equipped with 4 Impatiens New Guinea pots.  $R_s$  was directly measured with a porometer on 5 leaves. Nine scenarios were tested with extreme values for the 3 considered parameters: radiation  $\in [0-150]$  W m<sup>-2</sup>, humidity  $\in [55-75]$  % and temperature  $\in [15-26]$ °C. These values were chosen from real conditions observed inside a greenhouse and taking account of the operational constraints of growth chambers. The polynomial model deduced from the experiments evidenced its ability to predict  $R_s$  from the climatic parameters ( $R^2= 0.99$ ). It was then applied at several growing stages of a

greenhouse Impatiens crop. Again, the model was able to correctly simulate the stomatal resistance ( $RMSE \in [186-309] \text{ s m}^{-1}$  and  $R^2 \in [0.41-0.76]$  for measured  $R_s \in [40-2000] \text{ s m}^{-1}$ ). It also showed the prevailing role played on  $R_s$  by radiation during daytime and by humidity at night. The influence of the temperature however, seemed to be negligible. The FFD therefore appears to be a powerful tool to simulate satisfactorily the stomatal resistance at different growth stages. It could be useful to predict accurately the evolution of the plant transpiration.

## INTRODUCTION

Cultivated potted plants inside greenhouses currently develop rapidly, requiring improved irrigation especially in locations where water resources are scarce. The control of irrigation necessitates a good understanding of water transfers inside the plants, and at the level of the stomata apertures in particular. Indeed, stomata control gas fluxes (water vapor and  $\text{CO}_2$ ) between the leaf surface and the atmosphere (Buckley and Mott, 2013). The key parameter governing the stomata apertures is the stomatal resistance which strongly depends on the environmental factors, and which has been extensively studied in open field conditions over the past 50 years by modelers. In the last decade, the understanding of stomata dynamics improved with the advent of new technologies that make it possible the direct measurement of stomatal resistance (porometer diffusion or gas exchange analyzer) (Damour et al., 2010). However, very few models exist for plant cultivated in pots under greenhouse conditions (Casaroli et al., 2010). Most of these models are based on the multiplicative approach proposed by Jarvis (1976). The main disadvantage of the Jarvis approach is that many data covering a wide range of environmental conditions are required to estimate the model coefficients, and these coefficients often change over the time life of a leaf (Buckley and Mott, 2013).

In the present study, a new technique is used to model  $R_s$  by the design of experiments (DOE) which was originally developed by Box and Wilson (1951). Many designs are available, such as fractional or factorial, and two or three level designs (Mayers and Montgomery, 1995). All of them can be augmented by the center point. For the purpose of this work, the full factors design (FFD) was implemented (Lundstedt et al., 1998). To establish the model of  $R_s$  by

FFD, different scenarios were conducted inside a growth chamber, the number of scenarios depending on the retained type of FFD. The model of  $R_s$  was then validated against data collected inside a greenhouse for several growth stages of Impatiens New Guinea plants. The FFD was finally applied to assess the main parameters impacting  $R_s$  and to determine the combined and individual effects of these parameters on the  $R_s$  response.

## MATERIALS AND METHODS

### Modelling methodology

FFD is a collection of mathematical and statistical techniques which uses a sequence of designed experiments to obtain an optimal response. In the present case, FFD was applied to estimate the response of  $R_s$  to the variation of climatic parameters. Three parameters were chosen (global radiation, relative humidity and temperature) and each parameter had two levels. The  $2^3$  FFD was chosen by considering the time required to perform this experiment and a center point was added to take account of the non-linear relationships between the response and parameters. These non-linear relationships were evidenced in previous works conducted inside a greenhouse (Gang et al., 2012). For each parameter the maximum and minimum value were fixed by considering the growth chamber operating limits together with real conditions observed inside the greenhouse: the global radiation varied within the range  $\in [0-150]$   $W m^{-2}$ , humidity  $\in [55-75]$  % and temperature  $\in [15-26]$  °C. In order to simplify the calculation, it is appropriate to use coded variables with an interval  $[-1, 1]$ , therefore 0 is in the middle of the design. The conversion of the original variables (rg, rh, tr) to the coded variables (RG, RH, Tr) and vice versa is given by the following formula (Eq. 1):

$$A = \frac{a_0 - a}{step} \text{ with } a_0 = \frac{a_{max} + a_{min}}{2} \text{ and } step = \frac{a_{max} - a_{min}}{2} \quad (1)$$

where  $A$  is the coded variable corresponding to  $a$  as the original variable.

A non-linear mathematical model was used to estimate the response of  $R_s$  to the variations of the climatic parameters. This model was deduced from the original model of  $2^3$  FFD given in Eq. 2.

$$R_s = a_0 + b_1.RG + b_2.RH + b_3.Tr + b_{12}.RG.RH + b_{13}.RG.Tr + b_{23}.RH.Tr + b_{123}.RG.RH.Tr \quad (2)$$

where RG is the coded global radiation, RH the coded relative humidity, and Tr the coded air temperature. This polynomial model contains a number of unknown coefficients ( $a_0$ ,  $b_1$ ,  $b_2$ ,  $b_3$ ,  $b_{11}$ ,  $b_{12}$ ,  $b_{13}$ ,  $b_{23}$ , and  $b_{123}$ ) to be determined by specific experiments. These experiments were based on different scenarios specified by the  $2^3$  FFD with one center point, meaning 9 different scenarios as described in Table 1. To implement the FFD, the Jmp<sup>TM</sup> software was used with the input data obtained from experiments conducted inside a growth chamber.

### Experimental setup

The experiments were launched both inside a 10 m<sup>2</sup> (5 m x 2 m) growth chamber located in Angers, France and inside a 100 m<sup>2</sup> (10 m x 10 m) greenhouse. A growth chamber was used because it offers the possibility to make the climatic factors (radiation, humidity, temperature) vary within a controlled range of values. Inside the growth chamber four Impatiens pots (*Novae-guinea*, cv. ‘Sonic Scarlet’) were used, after the 16<sup>th</sup> week of plantation. The experiments inside the growth chamber were systematically performed in the morning in order to keep the same conditions for the different scenarios, and the plants were irrigated once before starting experiment. Experiments were also conducted during 16 weeks inside a greenhouse from March to July 2014 with Impatiens in order to collect the data to be used for validating the Rs model. Young plants were potted inside 0.74 l containers (8.7 cm height) filled in with fine peat (5-20 mm particle size) with peat bulk density = 0.12 g cm<sup>-3</sup>. Plants were equally distributed over four shelves, representing a total area of 18 m<sup>2</sup>, and with an initial density of 28 plants per m<sup>2</sup>. During the experiment the canopy covered 100% of shelves, and the plant density was decreased to favor plant growth (final density of 15 plants per m<sup>2</sup>). Plants were irrigated twice a day at the beginning (6 am, 12 am) and three times (6 am, 2 pm, 12 am) at the end of the experiment because it was warmer. The irrigation was conducted by flooding the shelves with a complete nutrient solution. In addition, a shading screen was used and the roof vents were fully open to avoid high temperatures.



### **Climate and stomatal resistance measurements**

Inside the growth chamber, the above canopy global radiation  $r_g$  was measured by a radiometer (CNR1, Kipp&Zonen, Delft, The Netherlands,  $\pm 10\%$ ). The temperature ( $t_r$ ) and relative humidity ( $rh$ ) of the above canopy air were measured by shielded and ventilated sensors (Vaisala HMP45C, Campbell Scientific Ltd., Antony, France, accuracy  $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$  for  $t_r$  and  $\pm 2\%$  for  $rh$ ). They were directly connected to a computer in order to check simultaneously the value of different parameters.  $R_s$  was measured only for the upper leaves of the canopy by a porometer (AP4, Delta-T Device, United Kingdom). Five measurements were taken for different leaves in four pots at each scenario. A time interval of one hour was estimated to stabilize measurements of  $R_s$  from one climatic scenario to another.

Inside the greenhouse, the global radiation, relative humidity and temperature were measured. The same sensors were used as the ones used inside the growth chamber. All the above-mentioned parameters were measured every 3 s and averaged online over 10 min periods with a data logger system (CR5000, Campbell Scientific Ltd., Antony, France).  $R_s$  was measured for leaves of the upper part of canopy (or sunlit leaves) and also for leaves of the bottom part (or shaded leaves). Five measurements were done for each sunlit and shaded leaves of different plants. The measurements of  $R_s$  were replicated every half an hour.

## **RESULTS AND DISCUSSION**

### **Stomatal resistance modelling under growth chamber conditions**

Table 1 shows the experimental design matrix with the 9 scenarios considered to provide the input information for DOE models (by Eq. 2). This table also provides the value of  $R_s$  measured for each scenario and the corresponding standard deviation. The experiments were carried out in order to determine the effect of the climatic parameters on the  $R_s$  response. Table 1 clearly indicates that the effect of  $r_g$  on the  $R_s$  response is the most significant. A simple comparison between scenarios ( $150\text{ W m}^{-2}$ , 55%,  $15^\circ\text{C}$ ) and ( $0\text{ W m}^{-2}$ , 55%,  $15^\circ\text{C}$ ) shows that  $R_s$  increases from 267 to  $1410\text{ s m}^{-1}$  just in response to a variation of  $r_g$ . The regression equation based on the first-order model with three parameters and their interaction terms (Eq. 3) confirms that  $R_G$  is the most important parameter with the highest coefficient.

$$R_s = 590 - 454.RG - 104.RH - 58.Tr + 124.RG.RH - 35.RG.Tr + 20.HR.Tr - 8.RG.RH.Tr \quad (3)$$

$$\text{with } RG = (rg - 75)/75; \quad HR = (hr - 65)/10; \quad Tr = (tr - 20.5)/5.5$$

The accuracy of the model (Eq. 3) was assessed from the coefficient of determination ( $R^2$ ). A value of  $R^2 = 0.83$  was obtained. In a second step, some improvements of the model were undertaken in order to increase its accuracy. The first modification was to consider that the highest order multiplicative interaction term ( $RG.RH.Tr$ ) was negligible (Myers, 1995). This term was replaced by  $RG^2$  because  $RG$  represents the most important parameter impacting the  $R_s$  response. The second modification was suggested after several sensitivity tests showing that the intercept  $= 590 \text{ s m}^{-1}$  would be better replaced by a  $RG^3$  term. Taking account of these modifications, a new model (Eq. 4) was obtained with  $R^2 = 0.99$  far better than the model given by Eq. 3.

$$R_s = -115.RG - 139.HR - 39.Tr + 139.RG.HR + 43.RG.Tr + 11.HR.Tr + 661.RG^2 - 368.RG^3 \quad (4)$$

This model therefore evidences that  $RG$  is the prevailing parameter influencing the  $R_s$  response with higher coefficient.  $HR$  appears to have a less degree of influence.

### Analysis of the interaction effects

To understand how the three parameters impact the  $R_s$  response, a further analysis was conducted. The interaction plot shown in Figure 1 depicts the effect of a given parameter on the  $R_s$  response for the highest and lowest level of another parameter. Interaction occurs when one parameter does not produce the same effect on the  $R_s$  response at different levels of another parameter. Therefore, if the curves of the same graph are parallel, there is no interaction. On the contrary, when the curves are far from being parallel, the two parameters interact. Thus Figure 1 confirms the significance of  $rg/hr$  (Fig. 1 A and C) and  $rg/tr$  (Fig. 1 B and E) interactions. It can be observed that in both cases ( $rg/hr$  and  $rg/tr$  interactions),  $R_s$  decreased when the curve moved from lower to higher level. From Figure 1 it can also be seen that  $hr$  effect is small when  $rg$  is at high level and large when the  $rg$  is at low level (Fig. 1

A and C). By contrast,  $t_r$  effect is small when  $r_g$  is weak and large when  $r_g$  is high (Fig. 1 B and E).

### Surface response ( $R_s$ )

Figure 2 shows a 3D plot of the response of  $R_s$  according to  $r_g$  and  $h_r$  which are the most significant parameters;  $t_r$  was fixed at the center value. It helps visualize the shape of the  $R_s$  response and its non-linearity. It can be seen also that both  $r_g$  and  $h_r$  have a negative effect on  $R_s$  response, i.e when  $r_g$  and  $h_r$  increase,  $R_s$  decreases.

### Validation of model with data collected inside a greenhouse for different growth stages

Once the coefficient of the polynomial model were adjusted and discussed, the second step consisted in the model (Eq. 4) validation with data collected at different growth stages from plants grown inside a greenhouse. The results of  $R_s$  measured with a porometer and predicted by the model (Eq. 4) are shown for weeks 5, 11, 12 and 16 after plantation in Figures 3, 4, 5 and 6, respectively. They globally demonstrate the capacity of the model to correctly predict  $R_s$  with value of  $R^2$  greater than 0.58 for weeks 11, 12, 16 although a lower value of  $R^2=0.41$  was obtained for the 5<sup>th</sup> week. This poor performance of the model for week 5 may be explained by the fluctuations of the measured  $r_g$  (Fig. 7) caused by clouds. These fluctuations of  $r_g$  are taken into account by the model of  $R_s$ , but in reality for week 5, the stomata did not have time enough to respond to these fluctuations of  $r_g$ . From previous experiments, it was shown that the time required by  $R_s$  to answer to a variation of the climatic parameters was estimated before in the growth chamber and equal to 1 hour minimum. This aspect was not taken into consideration in the model given by Eq. 4, which could be considered as one of the model limits.

### CONCLUSIONS

In this study, the FFD methodology was used to estimate  $R_s$  as a function of several climatic parameters, and also to understand how these parameters impact  $R_s$ . To reach this goal, a set of nine scenarios was established inside a growth chamber under controlled climatic conditions. Results revealed that the global radiation is the most important parameter, while the relative humidity only becomes a significant parameter for low values of the

radiation. The model was then validated against data collected for plants cultivated inside a greenhouse. It provided good agreement with measured values of  $R_s$  for different growth stages except for cases of overcast days when fluctuations in the radiation were recorded. In the present work, a simple FFD with just two levels was tested and although it showed pretty good prediction of  $R_s$ , other designs could also be tested with more levels and therefore more scenarios in order to improve the accuracy of the model to predict  $R_s$ .

### Literature cited

- Box, J. and Wilson, W. 1951. Central composite designs. *J. R. Stat. Soc.* X111 (1):1-35.
- Buckley, T.N. and Mott, K.A. 2013. Modelling stomatal conductance in response to environmental factors. *Plant Cell Environ* 36(9): 1691-1699.
- Casaroli, D., de Jong van Lier, Q. and Dourado Neto, D. 2010. Validation of a root water uptake model to estimate transpiration constraints. *Agric. Wat. Manage.* 97:1382-1388.
- Damour, G., Simonneau, T., Cochard, H. and Urban, L. 2010. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant Cell Environ* 33:1419-1438.
- Gang, L., Lu, L., Yongyi, D., Dongsheng, A., Yongxiu, L., Weihong, L., Xinyou, Y., Wenwen, L., Jingqing, S., Yanbao, Z., Jianfeng, D., Weiping, C. and Chunjiang, Z. 2012. Testing two models for the estimation of leaf stomatal conductance in four greenhouse crops cucumber, chrysanthemum, tulip and liliun. *Agricultural and Forest Meteorology* 165:92-103.
- Lundstedt, T., Seifert, E., Abramo, L., Thelin, B., Nyström, A., Pettersen, J. and Bergman, R. 1998. Experimental design and optimization. *Chemometrics And Intelligent Laboratory Systems* 42:3-40.
- Mayers, R.H., and Montgomery, D.C. 1995. *Response Surface Methodology: Process and Product Optimization Using Designed Experiments*. New York: John Wiley & Sons.

**Tables**

Table1. Scenarios and input data

Scenario (rg, hr, tr)	Mean Rs value ( $s\ m^{-1}$ )	Standard deviation ( $s\ m^{-1}$ )
150 $W\ m^{-2}$ , 55%, 15°C	267	36
150 $W\ m^{-2}$ , 55%, 26°C	91	10
150 $W\ m^{-2}$ , 75%, 15°C	254	31
150 $W\ m^{-2}$ , 75%, 26°C	102	38
45 $W\ m^{-2}$ , 60%, 22°C	265	18
0 $W\ m^{-2}$ , 55%, 15°C	1434	315
0 $W\ m^{-2}$ , 55%, 26°C	1410	381
0 $W\ m^{-2}$ , 75%, 15°C	848	33
0 $W\ m^{-2}$ , 75%, 26°C	885	189

Figures

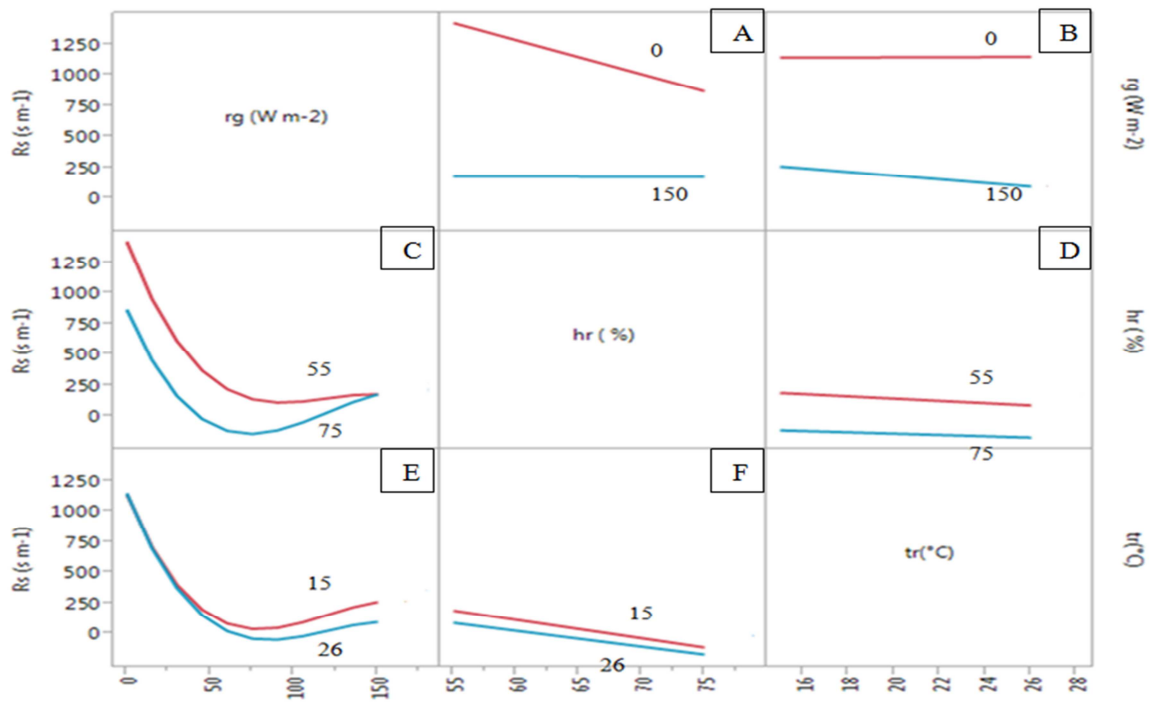


Fig.1. Interaction plot for the three considered parameters: rg, hr and tr.

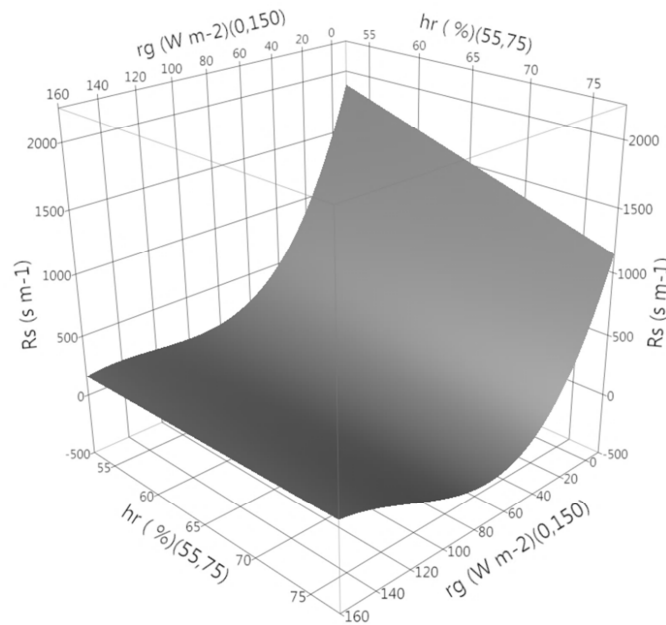


Fig.2. Response surface of Rs to rg and hr.

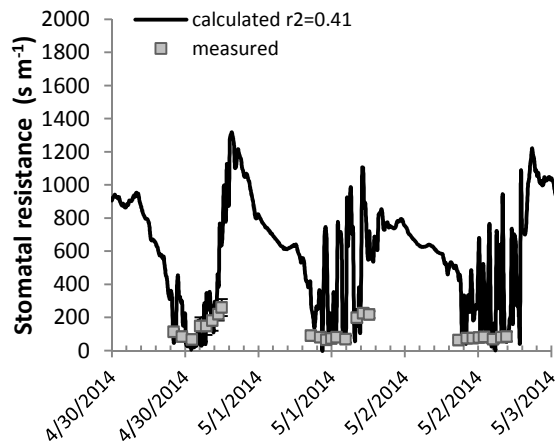


Fig. 3. Validation of the model of  $R_s$  against data collected inside a greenhouse 5 weeks after plantation

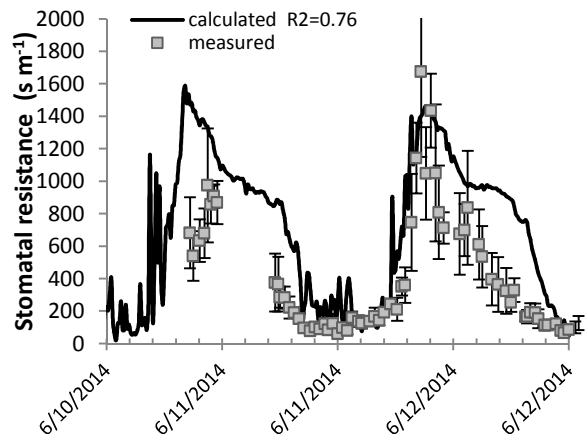


Fig. 4. Validation of the model of  $R_s$  against data collected inside a greenhouse 11 weeks after plantation.

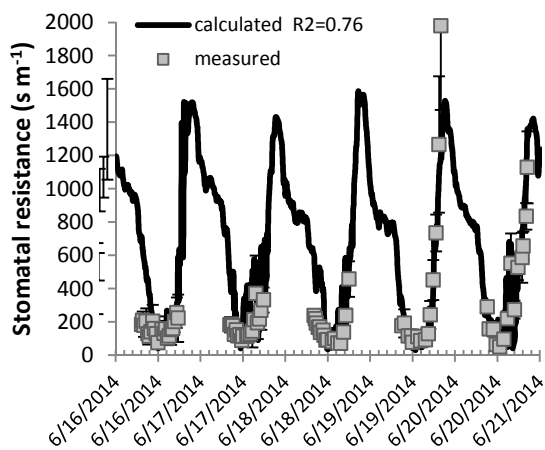


Fig. 5. Validation of the model of  $R_s$  against data collected inside a greenhouse 12 weeks after plantation.

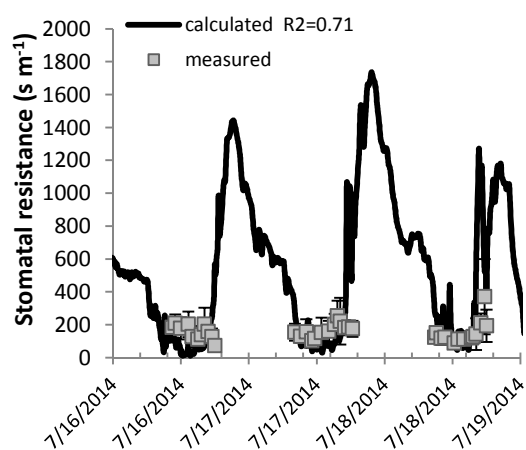


Fig. 6. Validation of the model of  $R_s$  against data collected inside a greenhouse 16 weeks after plantation.

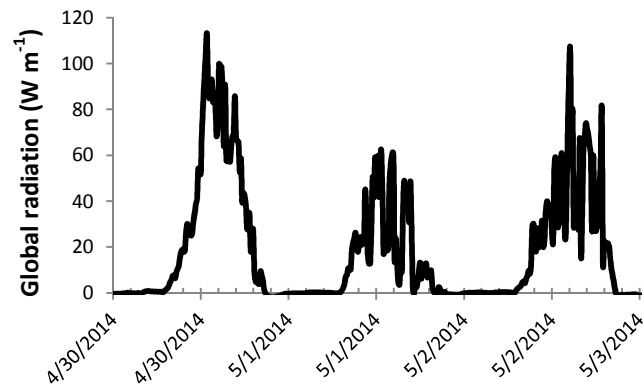


Fig. 7. Global radiation 5 weeks after plantation.



---

**Annexe 7 : Article 3, Stomatal resistance of New Guinea Impatiens pot plants. Part 2:  
Model extension for water restriction and application to irrigation scheduling****Article publié dans Biosystems Engineering.**

---

Cannavo P., Bouhoun Ali H., Chantoiseau E., Migeon C., Charpentier S., Bournet P.E.

UP EPHor,IRSTV - Agrocampus Ouest, 2 rue André Le Nôtre, Angers, F-49042, France

@: corresponding author: *patrice.cannavo@agrocampus-ouest.fr*

**Abstract**

In greenhouses, reducing water consumption by increasing water efficiency is of high interest. To reach this goal, predictive models of soil-plant-atmosphere water transfers could be helpful. However, such models have been mainly developed for open field conditions, and very few models exist for greenhouse plants grown in pots. Moreover, most of these models were implemented under well-watered conditions, but very few are available under water restriction.

The aim of this study is to develop an integrated soil-plant-atmosphere water balance model applied to potted plants grown in greenhouses, to predict plant transpiration under different restrictive irrigation regimes. Implementing such a model requires an accurate estimation of stomatal resistance  $R_s$  under water restriction conditions.  $R_s$  is then used in the Penman-Monteith model to evaluate transpiration. To establish the model parameters, an experiment was conducted for sixteen weeks inside a greenhouse with ornamental plants (New Guinea Impatiens) grown in containers on shelves. Well-watered and water restriction conditions were applied. The peat matric potential, radiation, temperature and humidity were continuously recorded, while  $R_s$  was measured and transpiration was assessed every half-hour from 8:00 am to 8:00 pm 10, 11, 12, 14, and 16 weeks after plantation.

The resulting model was first validated against experimental measurements during the twelfth week of the experiment. It displayed good correlations for both the instantaneous data and integrated total transpiration. Then different scenarios of irrigation reduction (frequency x volume) were tested. Interesting prospects for water use reduction were obtained. Indeed, by reducing water irrigation by 50% and by applying one irrigation per day, transpiration was not affected.

**Keywords:** New Guinea impatiens, peat, matric potential, stomatal resistance, Penman Monteith, water restriction

### Nomenclature

#### Latin

$C_{pa}$	: specific heat of air [ $J\ kg^{-1}\ K^{-1}$ ]
$E$	: Canopy transpiration rate Evapotranspiration [ $W\ m^{-2}$ ]
$g$	: Stomatal conductance [ $m\ s^{-1}$ ]
$I$	: Irrigation [ $m^3$ ]
$LAI$	: Leaf Area Index [ $m^2\ m^{-2}$ ]
$m$	: Parameter [-]
$n$	: Parameter [-]
$P$	: Fitting parameter [-]
$R_a$	: Aerodynamic resistance [ $s\ m^{-1}$ ]
$R_c$	: Canopy stomatal resistance [ $s\ m^{-1}$ ]
$r_g$	: Global radiation [ $W\ m^{-2}$ ]
$R_g$	: Non dimensional global radiation [-]
$R_n$	: Net radiation [ $W\ m^{-2}$ ]
$R_s$	: Stomatal resistance [ $s\ m^{-1}$ ]
$rh$	: Relative humidity [%]
$RH$	: Non-dimensional relative humidity [-]
$t$	: Temperature [ $^{\circ}C$ ]
$T$	: Non-dimensional temperature [-]

V : Volume of stored water [ $\text{m}^3$ ]

VPD : Vapour Pressure Deficit [Pa]

### Greek

$\alpha$  : Parameter [ $\text{kPa}^{-1}$ ]

$\gamma$  : Psychrometric constant [ $66 \text{ Pa K}^{-1}$ ]

$\Delta$  : Slope of the saturated water vapour pressure curve [ $\text{Pa K}^{-1}$ ]

$\lambda$  : Water latent heat [ $\text{kJ kg}^{-1}$ ]

$\theta$  : Water content

$\theta_s$  : Soil saturation volumetric water content [ $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ]

$\Psi$  : Matric potential [kPa]

$\Psi_2$  : Matric potential

$\rho$  : Density [ $\text{kg m}^{-3}$ ]

### Subscript

air : in the air

w : water

ww : well-watered

cont : container

i : iteration index

r : restriction

vol : volume

### Highlights

- A soil matric potential corrective function improved the stomatal resistance model
- A soil-plant-atmosphere model was developed for potted plants inside a greenhouse
- The model was validated against experimental data for a New Guinea Impatiens crop

- The model showed that reducing irrigation by 50% did not strongly affect plant transpiration

## 1. Introduction

Optimal crop management in greenhouses is crucial for environmental reasons as well as for competitiveness of the horticultural sector. Sustainability involves reducing most of the inputs used in the greenhouse, that is, not only fertilizers, but also energy and water. Water in particular deserves specific attention. With the global climate change, water resources are more and more unevenly distributed around the world (Bligh (1997)). According to the United Nations and the World Health Organization, the global water crisis is only expected to worsen: by 2025 there will be shortages of drinking water in more than half of the countries in the world.

Competition between their agricultural use and other uses is becoming harsher and harsher, hence the need to better manage the water resources available for agriculture while ensuring a high level of quality. One possible solution could consist of improving irrigation on the basis of agronomic and agro-technical considerations by increasing its efficiency in precision horticulture.

Such a goal can be achieved by using predictive water consumption models to simulate plant transpiration in the soil-plant-atmosphere continuum for well-watered crops or under water restriction conditions. Water restriction reduces the plant's water content and transpiration by inducing stomatal closure. Stomatal closure in turn reduces the CO<sub>2</sub> absorption process and thus photosynthesis, so it may affect plant quality and/or size. Hence, conservative irrigation scheduling for potted plants under the greenhouse tends to err on the side of caution, and thus overestimate water needs. A compromise must therefore be found between transpiration and photosynthesis to cope with the contradiction between (i) a lower transpiration rate for an optimal management of the water resources, and (ii) the expected vegetative development resulting from photosynthetic activity (Kim, Oren, & Hinckley, 2006 ; Monteith, 1977). In other words, a minimum amount of water is required to ensure a good yield. The estimation of transpiration is generally based on a representative model of stomatal behaviour in response

to the plant's environment (solar radiation, air temperature, vapour pressure deficit, and soil or substrate) (Monteith, 1973 ; Gerosa, Mereu, Finco, & Marzuoli, 2012). Stomatal opening and closing can be assessed through the evolution of stomatal resistance ( $R_s$ ) or stomatal conductance ( $g_s = 1/R_s$ ).

$R_s$  has been extensively modelled under open field conditions over the past 50 years (Damour, Simmoneau, Cochard, & Urban, 2010). Almost all open field models were deduced from the work of two researchers, i.e. either (Jarvis, 1976), who depicted stomatal resistance as the product of several functions of environmental variables, or Ball, Woodrow, & Berry (1987), who linked  $R_s$  to the air  $\text{CO}_2$  concentration and to the rate of its assimilation. Nevertheless, up until now, models for plants cultivated in containers under greenhouse conditions have been scarce (Casaroli, de Jong van Lier, & Dourado Neto, 2010). Under greenhouse conditions, the behaviour of the substrate with respect to water is different from what it is in natural soil, and substrate volume can be a limiting factor. Moreover, most models for  $R_s$  under such conditions focus on the soil-plant system, or the plant-atmosphere system, but very few of them take into account the coupling between all three compartments. In addition, most of these models were established for the case of well-watered conditions. Under such conditions, according to Thorpe, Warrit, & Landsberg (1980), Jarvis, Edwards, & Talbot (1981), Kaufmann (1982), the main environmental factors controlling stomatal resistance are the vapour pressure deficit ( $VPD$ ) and solar radiation ( $r_g$ ).

Under water restriction conditions, a commonly used approach consists of adding a function expressing the water status of the soil or the plant to the model of Jarvis (1976) or Ball et al. (1987), as Gang et al. (2012), Buckley, Mott, & Farquhar, (2003), Lhomme (2001) and Raab, Meza, Franck, & Bambach (2015) did. However, this kind of adaptation was again mostly tested for open field crops.

The aim of the present study is to develop an integrated soil-plant-atmosphere water balance model applied to potted plants grown in the greenhouse, so as to predict plant transpiration under different restrictive irrigation regimes. This model is novel in that it is adapted to water restriction conditions. To our knowledge, such a complete model does not exist for this

system. Casaroli et al. (2010) developed a transpiration model focusing on soil-plant relationships (root density, soil hydrodynamic properties), but without any connection with greenhouse climate or plant stomatal behaviour. The present model was established for a *Novae-Guinea Impatiens* crop. It is based on the stomatal resistance model developed by Bouhoun Ali, Bournet, Cannavo, Chantoiseau, & Sourgnès (2016) under well-watered conditions, but we introduced the growing medium matric potential to calculate stomatal resistance under water restriction. Following Baille, Baille, & Laury (1994a) and Caspari, Green, & Edwards (1993), the ensuing stomatal resistance model was included into the Penman-Monteith model to predict plant transpiration.

## 2. Measurements

### 2.1. Experimental setup

The experiments were conducted inside a 100-m<sup>2</sup> glasshouse compartment located in Angers (47° 28' N, 0° 33' E) in north-western France, over a 16 week period from March 26<sup>th</sup> to July 20<sup>th</sup>, 2014, with *Impatiens* (*Novae-Guinea*, cv. 'Sonic Scarlet') as a plant model. Young *Impatiens* plants were potted in 0.74 L containers (8.7 cm height) filled in with fine peat with homogeneous bulk density (0.12 g cm<sup>-3</sup>). The plants were equally distributed on four shelves (18 m<sup>2</sup> total surface) with an initial density of 28 plants per m<sup>2</sup>. During the experiment, plant density was decreased to favour plant growth, while making sure that they covered the shelves entirely (final density of 15 plants per m<sup>2</sup>). To avoid excessive temperatures and to ensure a homogeneous distribution of solar radiation, a shading screen was used and the roof vents were fully opened as soon as outdoor temperatures exceeded 20°C. The night temperature set point was fixed at 16°C. The plants were irrigated by periodically flooding the shelves with a 2N-3P-6K + 0.6MgO nutrient solution (9.6 mmol N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> L<sup>-1</sup>, 1.8 mmol PO<sub>4</sub><sup>3-</sup> L<sup>-1</sup>, 6.1 mmol K L<sup>-1</sup>, and 0.9 mmol Mg L<sup>-1</sup>), and flowers were regularly removed. For the purpose of the study, irrigation was periodically stopped on one shelf (called restriction shelf hereafter, cf. Figure 1) until the plants displayed visual signs of water stress. For the plants on

the other three shelves, well-watered conditions were applied with the water potential in peat kept higher than -2 kPa.

After several weeks to ensure sufficient growth of the plants, the experiments started in the 10<sup>th</sup> week of growth (June 2<sup>nd</sup>, 2014). Irrigation was cut off on the restriction shelf on weeks 10, 12, 14, and 16.

## 2.2. Experimental measurements

Well-watered and water-restricted crop transpiration levels were measured by two scales (Melter-Toledo, Greifensee, Switzerland,  $\pm 0.1$  g) located approximately at the centre of the shelves (Figure 1 and Figure 2) carrying several containers (four to six containers along the growth period to keep the same plant density as on the rest of the shelf). Global radiation above the canopy ( $r_g$ ) was measured by a radiometer (CNR1, Kipp & Zonen, Delft, The Netherlands,  $\pm 10$  %). The air temperature ( $t_{air}$ ) and relative humidity ( $rh_{air}$ ) above the canopy were measured by shielded and ventilated sensors (Vaisala HMP45C, Campbell Scientific Ltd., Antony, France,  $\pm 0.1^\circ\text{C}$  of  $t_{air}$  and  $\pm 2$  % of  $rh$ ). The peat matric potential ( $\Psi$ , kPa) and volumetric water content ( $\theta$ , v/v) were measured at mid-height of six containers with tensiometers (SDEC 1300, France,  $\pm 0.2$  % kPa), and volumetric water content sensors (EC-5, Decagon, Dardilly, France,  $\pm 3$  %  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ). Among them, three were placed inside the well-watered containers, and the other three inside the water-restricted containers. All measurements were performed every 3 seconds, averaged over 10-minute periods and recorded by a data logger system (CR5000, Campbell Scientific Ltd., Antony, France).

Stomatal resistance ( $R_s$ ) was measured on leaves of the upper part of the canopy (sunlit leaves) as well as on leaves of the bottom part (shaded leaves) with a porometer (AP4, Delta-T Device, United Kingdom). The accuracy of this instrument was  $\pm 20 \text{ s m}^{-1}$  in the  $[20-40 \text{ s m}^{-1}]$  range and  $\pm 10\%$  in the  $[50-4000 \text{ s m}^{-1}]$  range. For each water condition, five measurements were done on different plants for both sunlit and shaded leaves.  $R_s$  measurements were replicated on five leaves (5 on sunlit leaves and 5 on shaded leaves) every half-hour from 8:00 am to 8:00 pm in weeks 10, 11, 12, 14, and 16.

### 2.3. Peat water retention curve

Every month, three containers were taken from the well-watered shelves and used to establish the peat water retention curve. Each container was instrumented with one tensiometer and one volumetric water content sensor at mid-height of the container. First, the plant was cut, and the containers were saturated with water for 24h. Then, the containers were left to dry in the air until tensiometers switched off. Experimental data were modelled using the van Genuchten (1980) model:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + (\alpha\Psi)^n)^m} \quad [1]$$

where  $\theta_s$  is the soil saturation volumetric water content ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), and  $\alpha$  ( $\text{kPa}^{-1}$ ),  $n$  (dimensionless) and  $m = 1 - 1/n$  (dimensionless) are parameters to be calibrated.

The initial container water volume was  $547 \text{ cm}^3$  (water volume at peat water field capacity,  $\Psi = -1 \text{ kPa}$ ).

## 3. Modelling methodology

### 3.1. Stomatal resistance

An original stomatal resistance model based on the full factor design (FFD) was initially developed by Bouhoun Ali, Bournet, Cannavo, Chantoiseau, & Sourgues (2016) and used in the present study. FFD is a set of experiments designed to obtain an optimal response for a limited number of experiments (Montgomery, 2008). The model was developed for a *Novea-Guinea Impatiens* crop from  $R_s$  measurements in a climatic chamber, under well-watered conditions. FFD was applied to estimate the response of  $R_s$  to climate variation. Stomatal resistance under well-watered conditions ( $R_{sww}$  in  $\text{s m}^{-1}$ ) was then calculated by

$$R_{sww} = -115 \times R_g - 139 \times RH + 139 \times R_g \times RH + 661 \times R_g^2 - 368 \times R_g^3 \quad [2]$$

Where  $R_g$ ,  $RH$  and  $T$  are the reduced centred global radiation, relative humidity and air temperature, respectively calculated from actual measurements by:



$$R_g = \frac{r_g - 75}{75} \quad [3]$$

$$RH = \frac{rh_{air} - 65}{10} \quad [4]$$

$$T = \frac{t_{air} - 20.5}{5.5} \quad [5]$$

with  $r_g$ ,  $rh_{air}$  and  $t_{air}$  global solar radiation, relative humidity and temperature of the air, respectively.

Stomatal resistance under water restriction ( $R_{sr}$ ) was finally obtained by multiplying eq.[2] by a corrective function derived from Nikolov, Massman, & Schoettle (1995), taking into account the peat matric potential:

$$R_{sr} = R_{sww} * \left( 1 + \left( \frac{\Psi}{\Psi_2} \right)^P \right) \quad [6]$$

where  $\Psi$  is the peat matric potential (kPa),  $\Psi_2$  and  $P$  are fitting parameters, with  $\Psi_2$  the matric potential corresponding to an  $R_{sr}$ -over- $R_{sww}$  ratio of 2. This function was calibrated using measurement data from weeks 10, 12, 14 and 16.

### 3.2. Transpiration

Transpiration was estimated from the Penman-Monteith model, which is derived from the combination of the energy balance equation and the latent/sensible heat flux expressions:

$$\lambda E = \frac{\Delta R_n + 2 \rho_{air} LAI C_{pa} VPD / R_a}{\Delta + 2 \gamma \left( 1 + \frac{R_c}{R_a} \right)} \quad [7]$$

where  $\lambda$  is the water latent heat ( $\text{kJ kg}^{-1}$ ),  $E$  is the canopy transpiration rate ( $\text{kg s}^{-1} \text{m}^{-2}$ ).  $R_n$  is the net radiation flux absorbed by the crop ( $\text{W m}^{-2}$ ), it is systematically assumed to be equal to the net radiation measured above the crop, thus neglecting the radiation exchanges below the canopy and to the ground. Thus, net radiation above the crop is almost equal to incoming global radiation during the day.  $\rho_{air}$  is the air density ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $C_{pa}$  is the specific heat of the air ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ),  $\gamma$  is the psychrometric constant.  $R_a$  and  $R_c$  are leaf aerodynamic resistance and

canopy stomatal resistance ( $\text{s m}^{-1}$ ), respectively.  $LAI$  is the Leaf Area Index ( $\text{m}^2 \text{m}^{-2}$ ),  $VPD$  is the air-air vapour pressure deficit (Pa), and  $\Delta$  is the slope of the saturated water vapour pressure curve according to temperature. In the present study  $r_a$  was considered constant, following Baille, Baille, & Laury (1994b):  $R_a = 271 \text{ s m}^{-1}$ .

Canopy stomatal resistance  $R_c$  was deduced from leaf stomatal resistance using parallel summation of  $R_{sww}$  at different levels weighted by  $LAI$  (Caspari et al., 1993). As the canopy was dense ( $LAI = 2.36 \text{ m}^2 \text{m}^{-2}$  for a plant height of 24 cm), we assumed that  $R_c$  equalled  $R_{sww}$  for the leaves inside the cover. Measurements conducted at the same time steps for sunlit and shaded leaves in the present study showed that in average  $R_{sww}(\text{inside}) = 2.367 * R_{sww}(\text{top})$ , hence:

$$R_c = 2.367 * R_{sww} \quad [8]$$

### 3.3. Plant properties

The leaf area index ( $LAI$ ) was calculated as follow: First, the mean leaf area was estimated from three plants. This area was then multiplied by the number of plants on the shelf. Finally, this result was divided by the surface of the shelf ( $18 \text{ m}^2$ ). Such  $LAI$  evaluation was performed at the beginning of each week using image analysis, and the result was considered constant over the entire following week. The proposed model supposed that plant growth was negligible at a one-week scale. We also assumed that fine root distribution was homogeneous in the container; therefore that water extraction was homogeneous across the container.

### 3.4. Water balance model

The water balance model was established to describe potted plant transpiration under greenhouse conditions. Due to the availability of validation data, only mature plants were considered (12<sup>th</sup> week of the experiment in the present case).

For this purpose, a dynamic model integrating the climate, transpiration and substrate water content was implemented (Excel 2013, Microsoft, U.S.A.). For each time step, transpiration was calculated from eq.[7], and the water volume in the substrate was estimated from:

$$V_{i+1} = V_i + I_i - E_{vol,i} \quad [9]$$

where  $V_i$  and  $V_{i+1}$  are the water volume at times  $i$  and  $i+1$  ( $m^3$ ),  $I_i$  and  $E_{vol,i}$  are irrigation and transpiration between time  $i$  and  $i+1$  ( $m^3$ ), for a time step of 10 minutes.  $E_{vol,i}$  was calculated as follows:

$$E_{vol,i} = \frac{E_i}{\rho_w} \quad [10]$$

where  $\rho_w$  is water density.

The algorithm used to calculate  $E$  is presented in Figure 3, and the characteristic parameters in Table 1.

### 3.5. Irrigation scenario tests

To assess the impact of water restriction on the transpiration of New Guinea Impatiens plants, a reference case was chosen, and typical scenarios were tested. The reference corresponded to the irrigation regime in week 12: two irrigations per day (at 6 am and 11 pm) that brought the substrate to its water holding capacity. This practice was chosen to ensure a peat matric potential above -2 kPa under well-watered conditions. In the present case, 0.65 L of water was supplied per container and per day. The three scenarios are described in Figure 4. The first one was a reduced water supply, with unchanged irrigation frequency (twice a day). The second one consisted in applying the same quantity of water as the reference, but at a reduced frequency, i.e. with only one irrigation at 11 pm. The third one corresponded to a mix of the two previous scenarios, i.e. both reduction of frequency and water supply. For each scenario, we present the cumulated water supply, and the percentage of transpiration relative to the reference during 5 days (i.e. two irrigations per day bringing the peat to its water holding capacity).

### 3.6. Statistical analysis

Mean difference and correlation significance were tested using R software (R Core Team, 2015). The root mean square error was calculated to evaluate the accuracy of the fit between the recorded values and the simulated ones obtained from eq.[1] and [6], and to validate the

simulation based on the Penman-Monteith model for transpiration, as well as peat volumetric water content simulations. For the other results, standard errors were calculated.

## 4. Results and discussion

### 4.1. Climatic factors

Climatic factors throughout week 12 are presented in Figure 5. Over the 5 days of the experiment, the air temperature was within the [15.9 - 32.2] °C range, relative humidity [29.9 – 81] %, and global radiation [0 – 118.5] W m<sup>-2</sup>. Important variations in  $r_g$  occurred, particularly during day 5, due to numerous clouds.

Global solar radiation remained well within the range of the experiments conducted inside the growth chamber to determine the stomatal resistance model from the FFD experiment, but temperature and air relative humidity sometimes exceeded FFD values (air temperature above 26°C, relative humidity below 55% or above 75%). Therefore, the model will have to be extrapolated to determine stomatal resistance when factor values are outside the range of the intervals within which the FFD model was established.

### 4.2. Stomatal resistance and peat matric potential relationships

Stomatal resistance under well-watered ( $R_{sww}$ ) and water restriction ( $R_{sr}$ ) conditions became significantly different 42 hours after irrigation stopped (Figure 6,  $p < 0.01$ ):  $R_{sr}$  became higher than  $R_{sww}$ , and these differences increased in the following days.  $R_{sww}$  ranged from 62 to 1128 s m<sup>-1</sup>, while  $R_{sr}$  increased up to 3825 s m<sup>-1</sup> on the fifth and last day of the experiment. Significant differences in stomatal resistance related to the water regime appeared when the peat matric potential was below -10 kPa (Figure 7). This threshold can be associated with the lower matric potential limit for plants to easily extract available water from the substrate, as usually considered for growing media (Caron, Elrick, Michel, & Naasz, 2008). Under well-watered conditions, this potential was steady and ranged between 0 and -2 kPa. Under water restriction, the matric potential continuously decreased, more quickly after the third day. Tensiometers switched off at cavitation at a mean value of -51 kPa, corresponding to the fifth day without irrigation.

The correction function for water restriction to calculate  $R_{sr}$  is shown in Figure 8. The  $R_{sr}$ -over-  $R_{sww}$  ratio doubled when the matric potential was about -11 kPa ( $\Psi_2 = -11.26 \text{ kPa}$ ), and P parameter from eq. [6] was 1.24. Model fitting was acceptable with an RMSE of 7.9 and an  $R^2$  of 0.38 ( $p < 0.1$ ). The proposed formulation for stomatal resistance under water restriction conditions appears to be quite acceptable for high values of the matric potential (0 to -15 kPa), but displayed large discrepancies for lower potentials (-15 kPa). From an ecophysiological point of view,  $R_s$  depends on the leaf water potential rather than on the soil water potential (Jarvis, 1976). As stated before, the soil water potential was used because it was technically easier to assess than the leaf water potential. We know from the literature (Tuzet, Perrier, & Leuning, 2003) that both potentials vary in the same manner throughout the day, but during warm summer days, the plants may not absorb water from the substrate fast enough to balance their transpiration. The leaf water potential thus decreases rapidly and stomata close, but that is not taken into account by the model developed in the present study. As the matric potential in the substrate decreases, water is less available, and this occurs earlier and more frequently. This may be the cause of the large values of the stomatal resistance ratio in Figure 8.

### 4.3. Plant transpiration

Measured plant transpiration values under well-watered and restriction conditions are presented in Figure 9. Differences in plant transpiration started to appear two days after irrigation stopped. These differences increased with time thereafter. On day 5, maximal transpiration under well-watered was 3.7 times higher than under water restriction. Cumulated transpiration reached 6.5 and 12  $\text{L m}^{-2}$  (i.e. 1.8 times higher) under water restriction and well-watered conditions respectively. The stomatal resistance model was tested against measured stomatal resistance under water restriction ( $R_{sr}$ ) (Figure 10). It gave a representation of the measured data with a good agreement ( $R^2 = 0.82$ ,  $p < 0.01$ ,  $\text{RMSE} = 422 \text{ s m}^{-1}$ ). Then, the adapted Penman-Monteith model was tested against water restriction transpiration data, by introducing the  $R_{sr}$  model in the Penman-Monteith model (Figure 11). This model gave a satisfactory representation of the measured data ( $R^2 = 0.58$ ,  $p < 0.01$ ,  $\text{RMSE} = 31.5 \text{ W m}^{-2}$ ). This demonstrates that quantifying the influence of water restriction on stomatal resistance is

sufficient to correctly predict the reduction in transpiration caused by water restriction. Hence, modifications made directly in the transpiration formula such as the stress coefficient proposed by Allen, Pereira, Raes, & Smith (1998) can be avoided and replaced by a more biologically-linked formula.

Furthermore, although this study lasted only one week (week 12 after planting), when plants were mature, the stomatal resistance model under well-watered conditions was initially validated over two weeks (14 and 16) by Bouhoun Ali et al. (2016), proving its generality. Moreover, the water restriction function (Eq.[2]) was established by integrating data from weeks 10, 14, and 16, ensuring its robustness. The approach could therefore be extended to other field surveys in the near future, or even to other ornamental plants. It could also be used to define irrigation strategies for better water use efficiency.

#### **4.4. Irrigation scenario tests**

Validating the Penman-Monteith model made it possible to use it for water balance modelling, using the predicted peat matric potential from eq.[1]. The Van Genuchten parameters established for the peat water retention curve are presented in Table 2. Water balance modelling was validated by comparing measured and predicted peat volumetric water contents (Figure 12). The model gave a good representation of the measured data ( $R^2 = 0.97$ ,  $p < 0.01$ ,  $RMSE = 0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ). Based on these results, the above-mentioned scenarios were tested during a 5-days period, from June 16 to June 20, and considering well-watered initial conditions.

##### **4.4.1 Reduced water inputs**

First, plant transpiration depending on the reduction of water irrigation is presented in Figure 13. Four situations were compared to the reference (2 irrigations per day): water quantity was reduced to 75, 50, 25, and 0 % of the reference. Missing data represent irrigation periods when transpiration was not evaluated because measured values were not available. The results show that irrigation with 75% of the initial supply had little impact on plant transpiration. Deeper impacts appeared when the water supply was reduced to 50, 25, or 0%, with a

decrease in transpiration from day 3. Cumulated transpiration represented 96, 83, 62, and 39% of the reference for the 75, 50, 25, and 0% modalities, respectively (Table 3).

#### 4.4.2 Reduced irrigation frequency

The second scenario consisted in reducing irrigation frequency as follows: one per day, then one every 2, 3 and 4 days (Figure 14). Compared to the reference (2 irrigations per day), only one irrigation per day did not affect plant transpiration (Figure 14-A). Differences appeared when irrigation was performed every 2 or more days (Figure 14-B, C & D). In these cases, the transpiration ratio decreased with decreasing irrigation frequency from 76 to 55% as compared to the reference (Table 3).

#### 4.4.3 Reduced water inputs and irrigation-frequency

The third and last scenario combined the two previous scenarios (i.e. reduced frequency and reduced water supply) (Figure 15). In the case of one irrigation per day and 50% of irrigation, hardly any difference with the reference was observed: cumulated transpiration was 97% of the reference (Table 3). With irrigation every 2 days, transpiration decreased from day 3, and decreased all the more as water reduction was stronger. Calculated transpiration represented 68 and 59% of the reference for the 75% and 50% water supplies, respectively (Table 3).

#### 4.4.4 Increasing water use efficiency

Irrigation tests provide interesting perspectives to reduce water irrigation. If producers want optimal transpiration (i.e. a  $Tr$ -over- $Tr$  reference ratio of 100%) to ensure the proper development of the crop, they can implement scenario 3 by reducing irrigation frequency to one irrigation per day, and thereby water supply by 50%. Water consumption for irrigation would amount to 0.54 litre per container (or  $9.7 \text{ l m}^{-2}$  with our plant density), corresponding to a saving of 17% of the water resource. Another more efficient strategy would correspond to scenario 1, with 2 irrigations per day, but with 25% reduction. The  $Tr$ -over- $Tr$  reference ratio would be slightly reduced (96%), but water resource consumption would decrease by 25%, with more substantial savings (0.16 l per container).

These results are based on 5 days of plant transpiration and provide perspectives for saving the water resource. However, several limitations of this work need to be underlined. First, a more accurate estimation of water use would be welcome, by combining our water balance model to a plant growth model. In our case, the LAI would be sufficient to run eq.[7] as it hardly varied throughout the experiment. But modelling LAI variation would be necessary for the experiment to be complete. Second, we supposed that root distribution inside the containers was homogeneous, and therefore the peat matric potential too. This is a preliminary simplification of the hydrodynamic functioning of growing media. But the heterogeneous root spatial distribution leads to heterogeneous root water extraction, and may have a significant impact on water and air availability (Cannavo & Michel, 2013). Finally, it must be stated that the stomatal resistance model obtained from Bouhoun Ali, Bournet, Cannavo, Chantoiseau, & Sourgues (2016) was established from the same *Impatiens* plants, and during the same year as for the present study. And *Impatiens* plants used for establishing the stomatal resistance model were subject to the same technical operations as those considered in this work. The validation of our transpiration model however was undertaken with data that are partly independent of the data used for the stomatal resistance model calibration.

## 5. Conclusion

This study presents an original approach for modelling water fluxes in the soil-plant-atmosphere continuum under water restriction for plants grown in containers under greenhouse conditions. The main originality of this study is to present a water balance model driven by a new model of stomatal resistance obtained from a polynomial model established under well-watered conditions. It was adapted to water restriction, using a corrective multiplicative function taking into account the matric potential of the growing medium. The resulting model was validated against experimental measurements and displayed good correlations for both the instantaneous data and the cumulated total transpiration on a 5-day period.



Once the model was validated, it was used to test several irrigation scenarios leading to interesting prospects for water use reduction. Transpiration was not affected when reducing the water supply by 50% or dividing irrigation frequency by two.

The next step will consist in (1) validating the transpiration model on new Impatiens growth experiments using the formerly established stomatal resistance model, (2) verifying experimentally the accuracy of the two best scenarii for Impatiens plants, and (3) modelling stomatal resistance by taking into account the leaf water potential. Coupling this model to a plant growth model will also give more realistic estimates of plant biomass production depending on the water irrigation regime. Finally, such models should be tested on other ornamental plants to check their genericity

### Acknowledgments

This study was carried out within the EPHor research unit at Agrocampus Ouest, campus of Angers. The authors would like to thank all of the people who contributed to this work. First, we would like to thank Premier Tech for providing the peat. Second, we would like to express our gratitude to Dominique Lemesle, Yvette Barraud-Roussel, Sylviane Delépine-Bourgeois and Claudie Mazzega who performed the laboratory measurements.

### 6. References

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration—Guidelines for Computing Crop Water Requirements, FAO Irrigation and drainage paper 56*. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy.
- Baille, M., Baille, A., & Laury, J.C. (1994b). Canopy surface resistances to water vapour for nine greenhouse pot plant crops. *Scientia Horticulturae*, 57, 143–155.
- Baille, M., Baille, A., & Laury, J.C. (1994a). Simplified model for predicting evapotranspiration rate of 9 ornamental species vs climate factor and leaf area. *Sci. Hortic. Amsterdam*, 59, 217–232.
- Ball, M.C., Woodrow, I.E., & Berry, J.A. (1987). A model predicting stomatal conductance and its contribution to the control of photosynthesis under different environmental

- conditions. In *Progress in Photosynthesis Research* (Martinus Nijhoff, pp. 221–224). Netherlands: Biggings, I.
- Bligh, G.E. (1997). Interactions between the atmosphere and the earth. *Géotechnique*, 47, 715–767.
- Bouhoun Ali, H., Bournet, P.E., Cannavo, P., Chantoiseau, E., & Sourgnès, M. (2016). Stomatal resistance of New Guinea Impatiens pot plants. Part 1: Model development for well-watered plants based on design of experiments. *Biosystems Engineering*, in press.
- Buckley, T.N., Mott, K.A., & Farquhar, G.D. (2003). A hydromechanical and biochemical model of stomatal conductance. *Plant Cell Environ*, 26, 1767–1785.
- Cannavo, P., & Michel, J. C. (2013). Peat particle size effects on spatial root distribution, and changes on hydraulic and aeration properties. *Scientia Horticulturae*, 151, 11–21.
- Caron, J., Elrick, D. E., Michel, J. C., & Naasz, R. (2008). Physical properties of organic soils and growing media: water and air storage and flow dynamics. In M. R. Carter (Ed.), *Soil sampling and methods of analysis*. Boca Raton, Florida: CRC press.
- Casaroli, D., de Jong van Lier, Q., & Dourado Neto, D. (2010). Validation of a root water uptake model to estimate transpiration constraints. *Agric. Wat. Manage.*, 97, 1382–1388.
- Caspari, H.W., Green, S., & Edwards, W.R.N. (1993). Transpiration of well-watered and water-stressed Asian pear trees as determined by lysimetry, heat-pulse, and estimated by a Penman-Monteith model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 67, 13–27.
- Damour, G., Simmoneau, T., Cochard, H., & Urban, L. (2010). An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant Cell Environ*, 33, 1419–1438.
- Gang, L., Yongyi, D., Dongsheng, A., Yongxiu, L., Weihong, L., Xinyou, Y., ... Chunjiang, Z. (2012). Testing two models for the estimation of leaf stomatal conductance in four greenhouse crops cucumber, chrysanthemum, tulip and liliun. *Agricultural and Forest Meteorology*, 165, 92–103.

- Gerosa, G., Mereu, S., Finco, A., & Marzuoli, R. (2012). Stomatal Conductance Modeling to Estimate the Evapotranspiration of Natural and Agricultural Ecosystems. In *Evapotranspiration - Remote Sensing and Modeling*. Ayse Irmak.
- Jarvis, P.G. (1976). The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductance found in canopies in the field. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Serie B 273*, 593–610.
- Jarvis, P.G., Edwards, W.R.N., & Talbot, H. (1981). *Models of plant and crop water use* (Vol. Mathematics and Plant Physiology. Academic.). Rose, D.A. and Charles-Edwards, D.A.
- Kaufmann, M.R. (1982). Leaf conductance as a function of photosynthetic photon flux density and absolute humidity difference from leaf to air. *Plant Physiology*, 69, 1018–1022.
- Kim, H.S., Oren, R., & Hinckley T.M. (2006). Actual and potential transpiration and carbon assimilation in an irrigated poplar plantation (Vol. 28, pp. 559–577). Presented at the International Traveling Workshop on Regional Forest Responses to Environmental Change, Tree Physiology.
- Lhomme, J.P. (2001). Stomatal control of transpiration: Examination of the Jarvis-type representation of canopy resistance in relation to humidity. *Water Resources Research*, 37, 689–699.
- Monteith, J.L. (1973). *Principles of environmental physics*. London: Edward Arnold.
- Monteith, J.L. (1977). Resistance of a partially wet canopy: Whose equation fails? *Boundary Layer Meteorol.*, 12, 375–383.
- Montgomery, D.C. (2008). *Design and Analysis of Experiment*. New Jersey: John Wiley and Sons, Inc.
- Nikolov, N.T., Massman, W.J., & Schoettle, A.W. (1995). Coupling biochemical and biophysical processes at the leaf level - An equilibrium photosynthesis model for leaves of C-3 plants. *Ecological Modelling*, 80, 205–235.

- R Core Team. (2015). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. Retrieved from <http://www.R-project.org>
- Raab, N., Meza, F.J., Franck, N., & Bambach, N. (2015). Raab, N., Meza, F.J., Franck, N., Bambach, N., 2015. Empirical stomatal conductance models reveal that the isohydric behavior of an *Acacia caven* Mediterranean Savannah scales from leaf to ecosystem. *Agric. For. Meteorol.* 213, 203–216. doi:10.1016/j.agrformet.2015.06.018. *Agricultural and Forest Meteorology*, 213, 203–216.
- Thorpe, M.R., Warrit, B., & Landsberg, J.J. (1980). Responses of apple leaf stomata: a model for single leaves and a whole tree. *Plant Cell Environ*, 3, 23–27.
- Tuzet, A., Perrier, A., & Leuning, R. (2003). A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration. *Plant Cell & Environ.*, 26, 1097–1116.
- Van Genuchten, M. T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892–898.

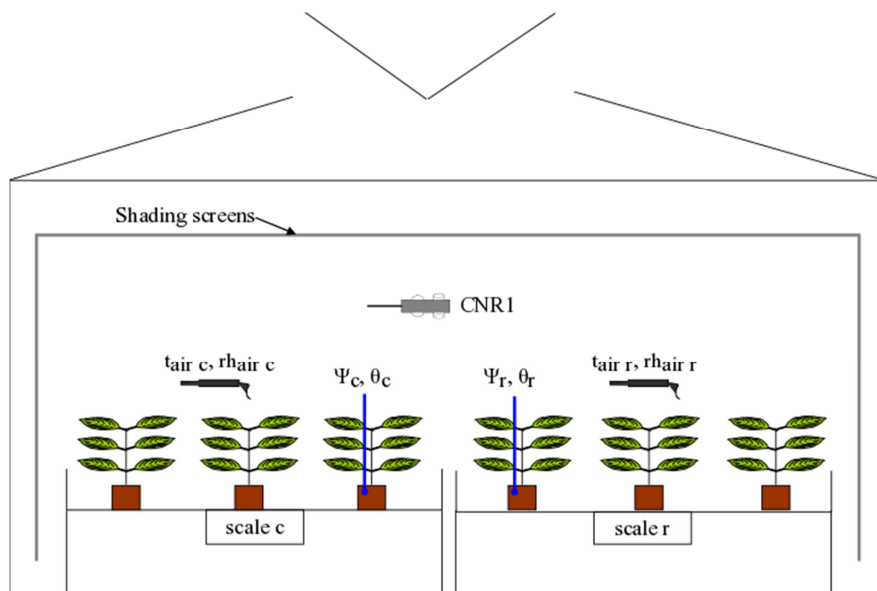


Figure 1: Sketch of the experimental device.

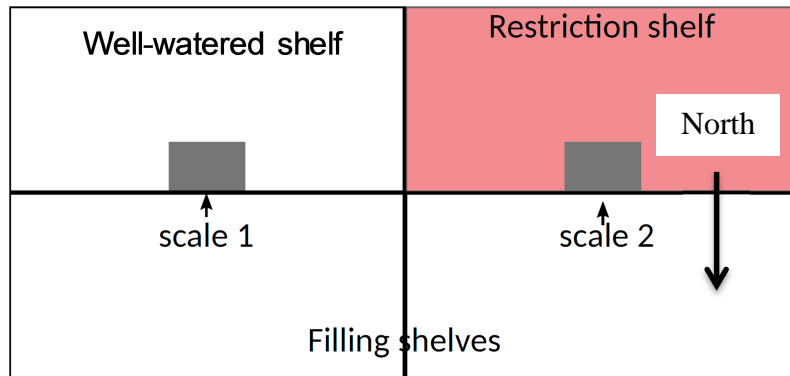


Figure 2: Map of the experimental shelves.

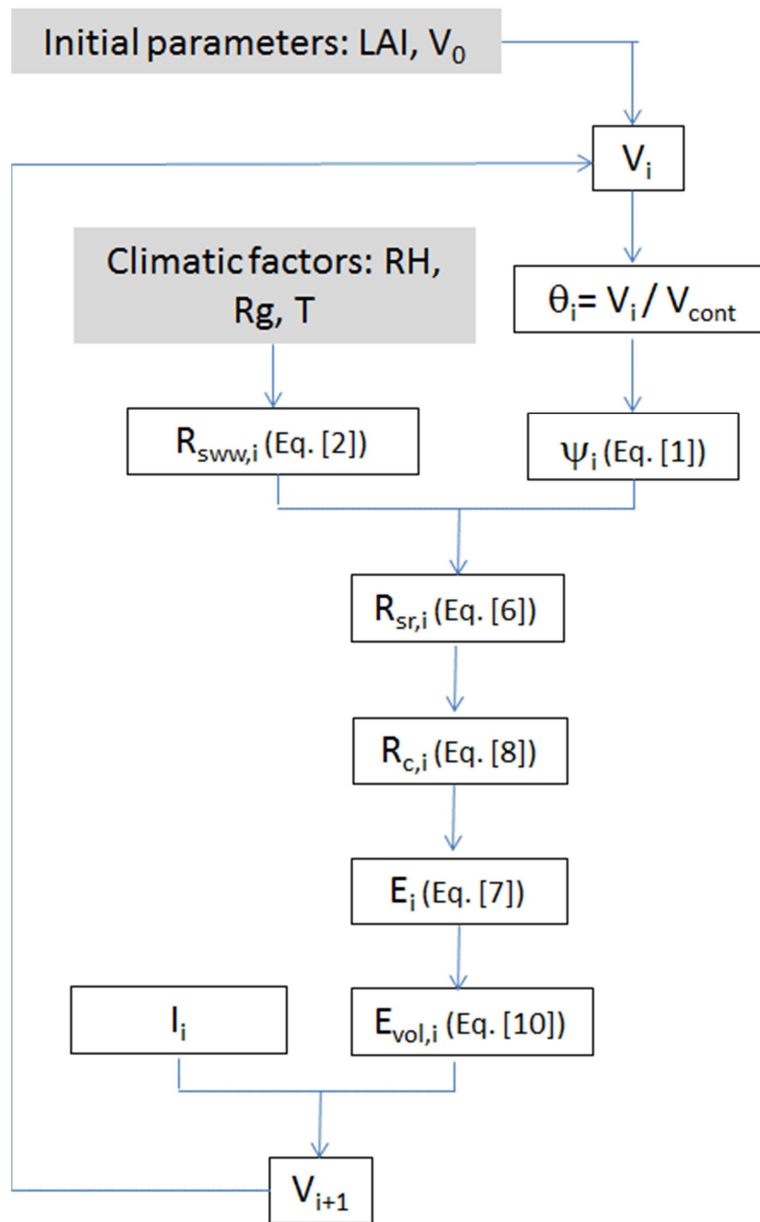


Figure 3: Water balance conceptual model. *LAI*: Leaf Area Index, *V<sub>0</sub>*: initial water volume, *V<sub>cont</sub>*: container volume, *R<sub>sww</sub>*: stomatal resistance under well-watered conditions, *ψ*: peat matric potential, *R<sub>sr</sub>*: stomatal resistance under restriction conditions, *R<sub>c</sub>*: canopy stomatal resistance, *I*: irrigation, *E*: canopy transpiration

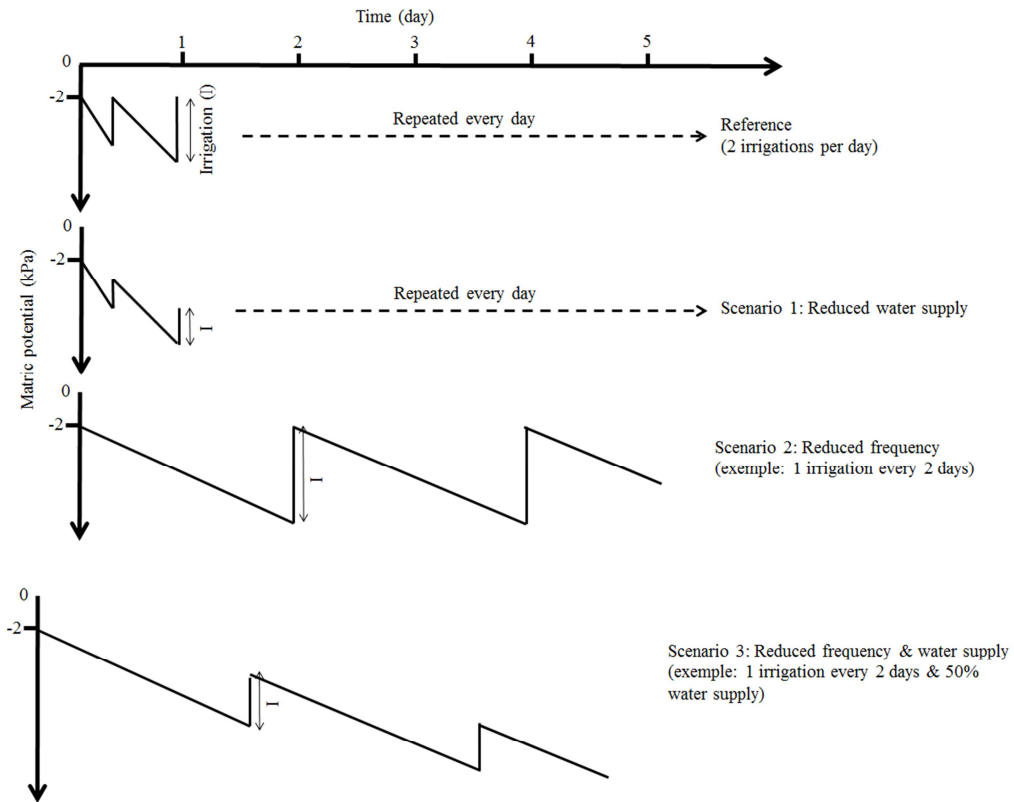


Figure 4: Irrigation scenarios.

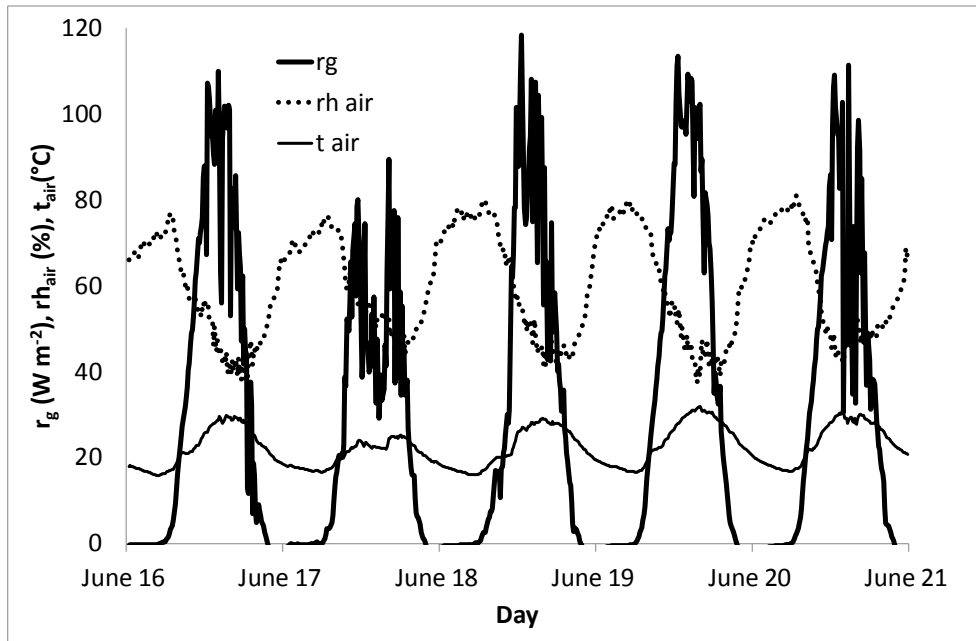


Figure 5: Evolution of climatic factors throughout week 12.  $r_g$ , global radiation ( $\text{W m}^{-2}$ );  $rh_{air}$ , relative air humidity (%);  $t_{air}$ , air temperature above the canopy ( $^{\circ}\text{C}$ ).

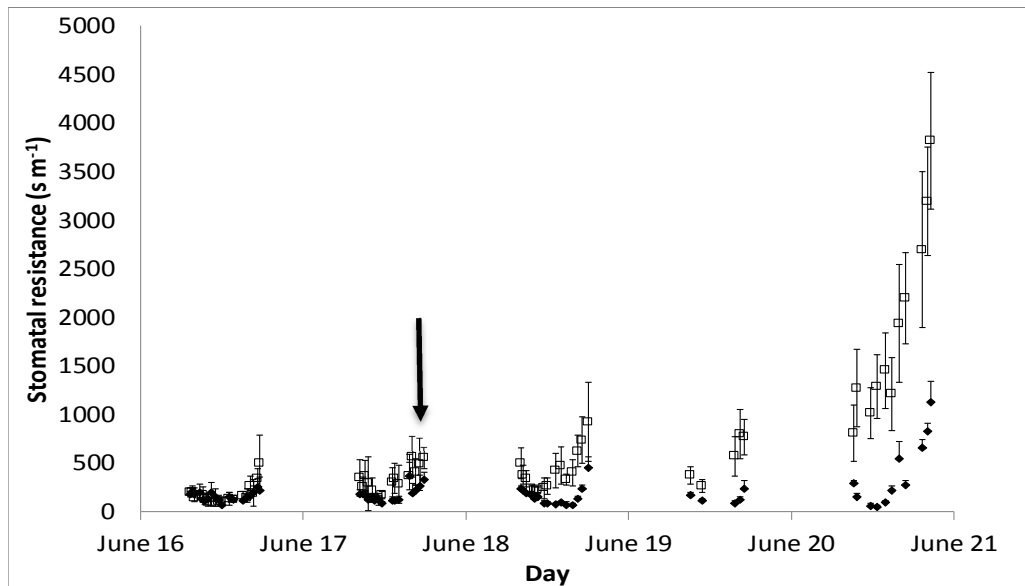


Figure 6: Stomatal resistance throughout week 12 under well-watered ( $\blacklozenge$ ) and restriction conditions ( $\square$ ). The arrow indicates when stomatal resistances between modalities starts to be significantly different.



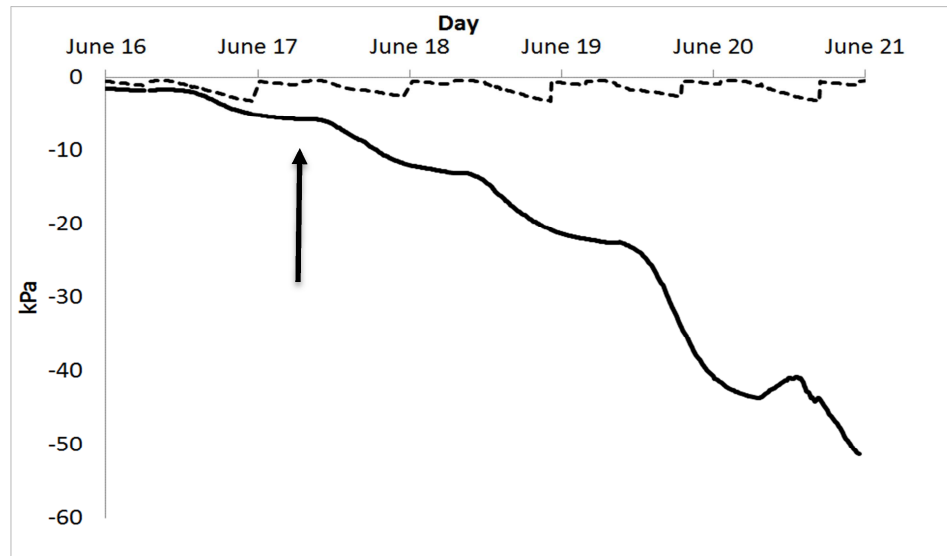


Figure 7: Evolution of the matric potential under well-watered (dashed line) and restriction conditions (solid line). The arrow indicates when the peat matric potential under water restriction regime modifies significantly stomatal resistance between irrigation modalities.

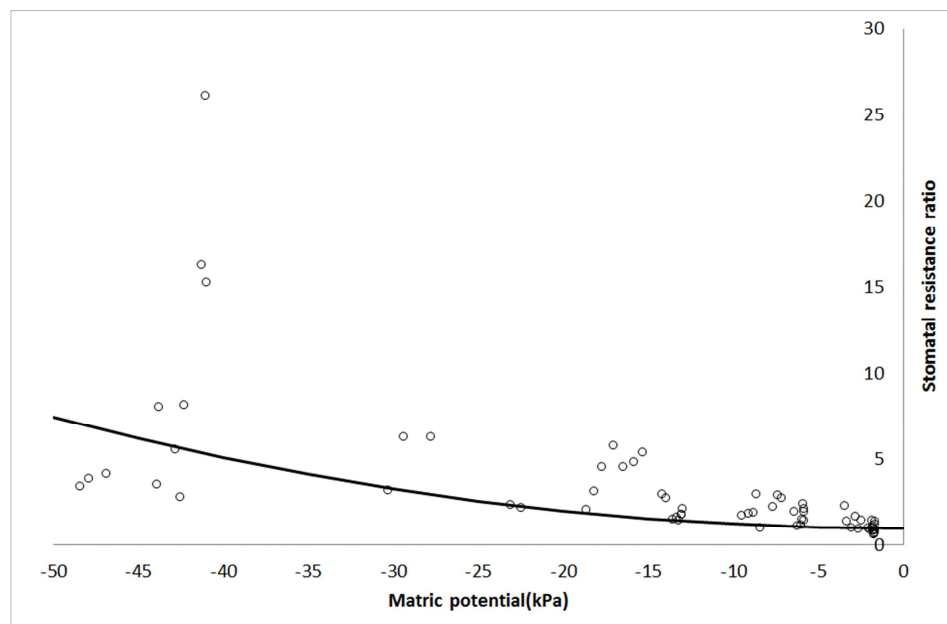


Figure 8: Ratio of stomatal resistance under water restriction over stomatal resistance under well-watered conditions throughout week 12. Comparison between experimental (○) and modelled (solid line) data (eq.[2]). Model parameters are  $\Psi_2 = -11.26$  kPa and  $P = 1.24$  ( $R^2 = 0.38$ ,  $p < 0.1$ ,  $RMSE = 7.9$ ).

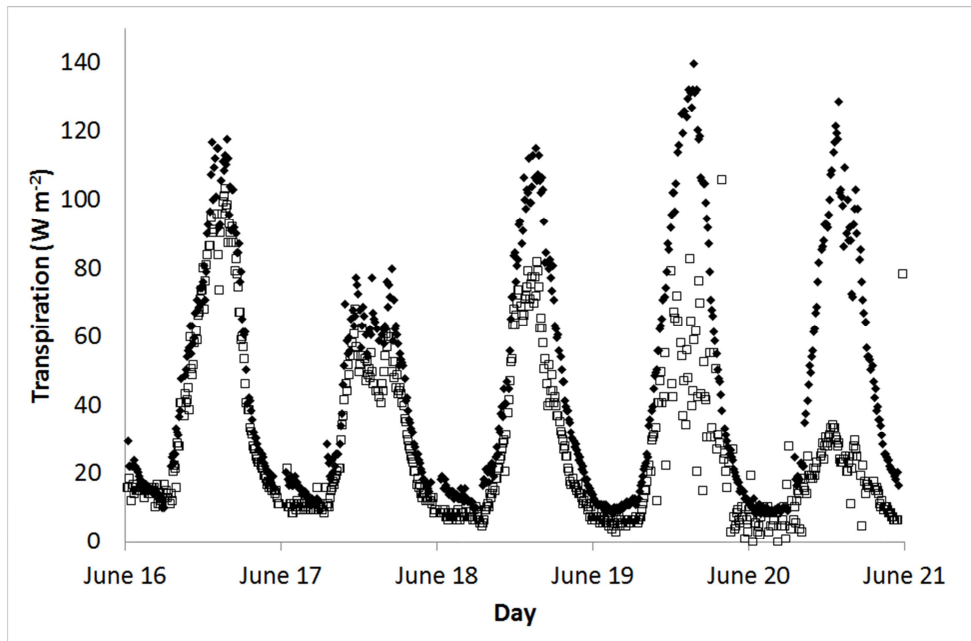


Figure 9: Measured transpiration values under well-watered (◆) and restriction conditions (□) throughout week 12.

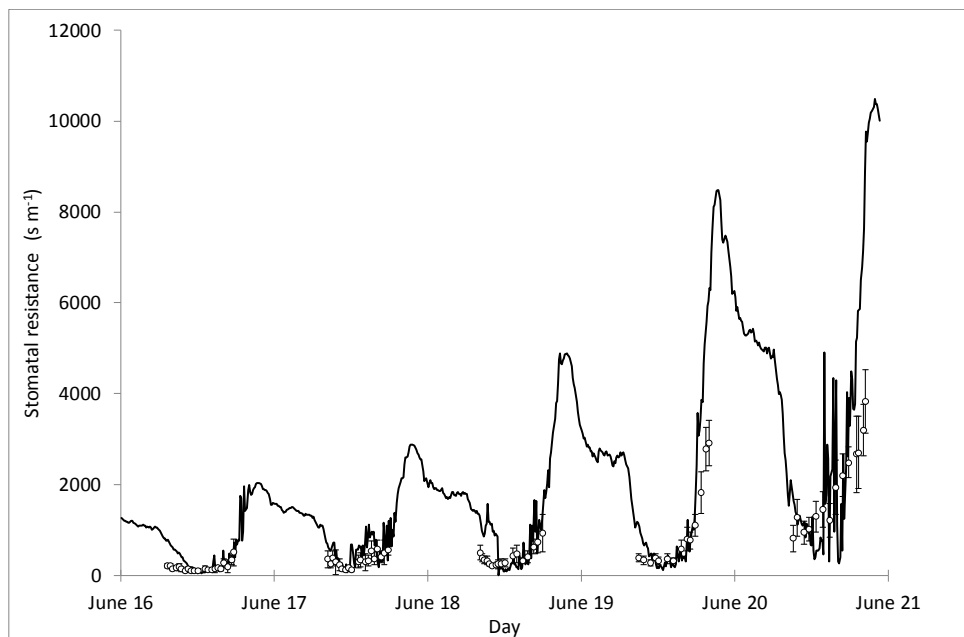


Figure 10 : Validation of the stomatal resistance model (solid line) throughout week 12 for plants under water restriction. o symbol represents the measured data.  $R^2 = 0.82$ ,  $p < 0.01$ ,  $RMSE = 422 \text{ s m}^{-1}$ .

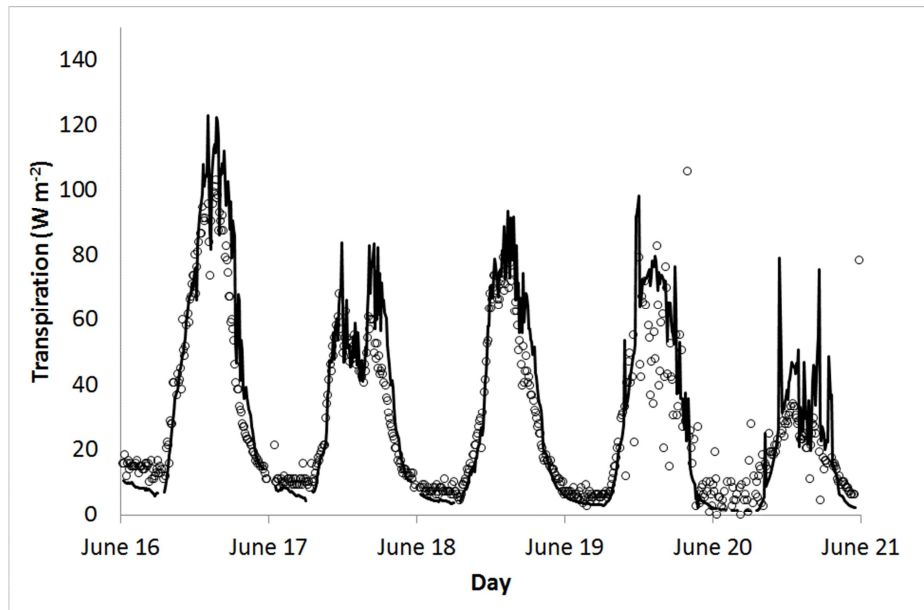


Figure 11: Validation of the transpiration model (solid line) throughout week 12 for plants under water restriction.  $\circ$  symbol represents the measured data.  $R^2 = 0.58$ ,  $p < 0.01$ ,  $RMSE = 31.5 \text{ W m}^{-2}$ .

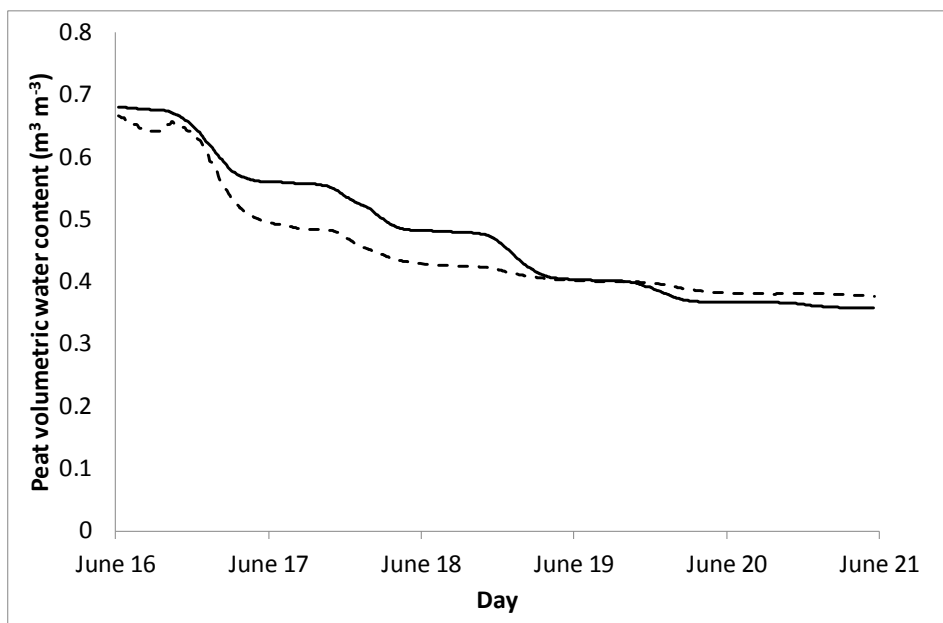


Figure 12 : Validation of the water balance model: comparison of calculated (solid line) and measured (dashed line) peat volumetric water contents throughout week 12 ( $R^2 = 0.97$ ,  $p < 0.01$ ,  $RMSE = 0.03 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) on the water restriction shelf.

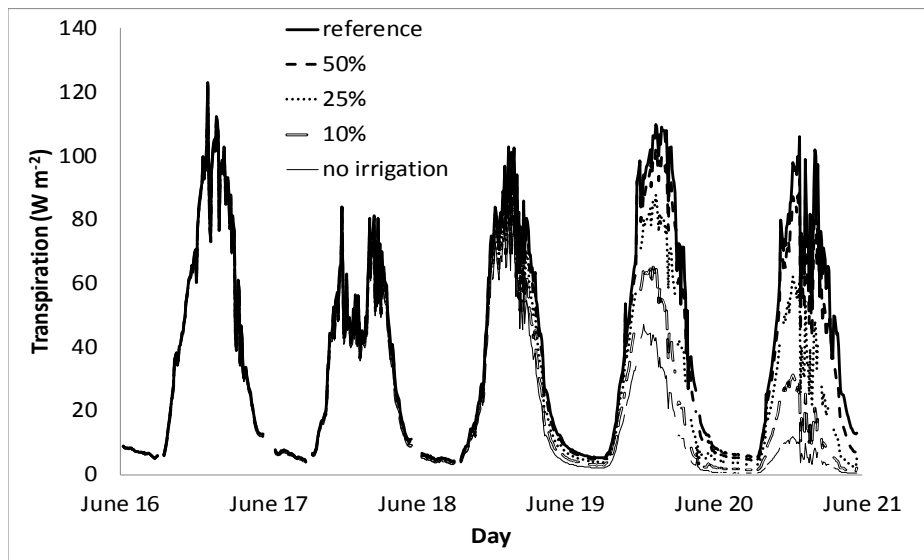


Figure 13: Plant transpiration and reduction in water irrigation: no reduction (reference), water quantity reduced to 70 %, 50%, 25 %, and 0% of the reference.

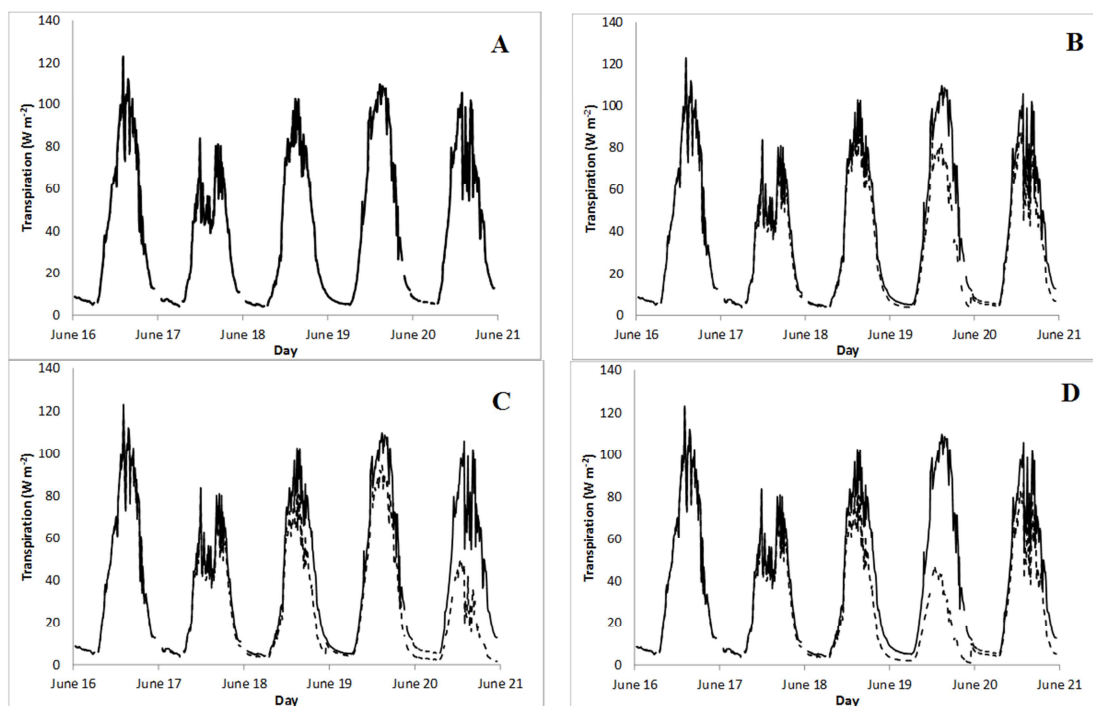


Figure 14: Plant transpiration and water irrigation frequency: (A) 2 supplies (reference, solid line) per day and 1 supply per day (dashed line), (B) reference and 1 supply every 2 days, (C) reference and 1 supply every 3 days, and (D) reference and 1 supply every 4 days.

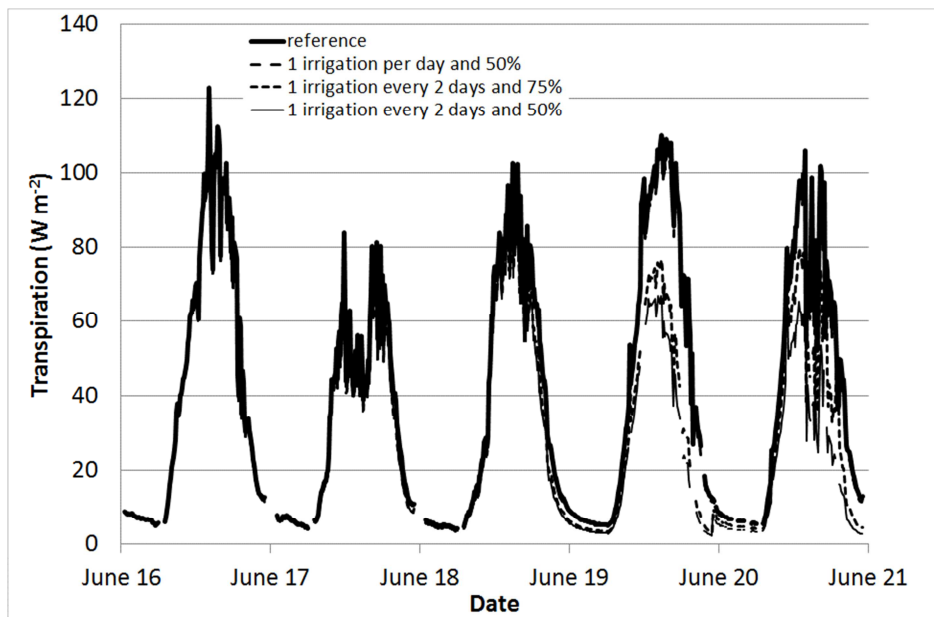


Figure 15: Plant transpiration, irrigation frequency and water supply: 2 supplies per day without any reduction (reference), 1 supply per day and water quantity reduced to 50 % of the reference, and 1 supply every 2 days with water quantity reduced to 75 % and 50 % of the reference.

Table 1: Characteristics of the experimental design in week 12

Parameter	Value
LAI	2.36
Number of containers per m <sup>2</sup>	9.2
Initial water reservoir volume (cm <sup>3</sup> )	547
Number of irrigations per day	2 (6 am, 11 pm)
Specific heat of the air J kg <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup>	2 675 10 <sup>3</sup> at 100 kPa

Table 2: Van Genuchten parameters for the peat water retention curve in week 12

Water retention model (eq.[1])

$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	$n$	RMSE
0.892	0.35	1.102	1.741	0.018

Table 3: Effect of the water restriction regime on cumulated transpiration. Reference  $Tr$  corresponds to cumulated transpiration when irrigation is supplied twice a day.

Scenario	Cumulated irrigation (L / container)	$Tr / \text{reference } Tr$
Scenario 1: same frequency, reduced water supply		
Reference	0.65	100
75%	0.49	96
50%	0.32	83
25%	0.16	62
No irrigation	0.00	39
Scenario 2: reduced frequency		
1 irrigation per day	0.65	100
1 irrigation every 2 days	0.26	76
1 irrigation every 3 days	0.18	65
1 irrigation every 4 days	0.09	55
Scenario 3: reduced frequency & water supply		
1 irrigation per day & 50% water supply	0.54	97
1 irrigation every 2 days & 75% water supply	0.19	68
1 irrigation every 2 days & 50% water supply	0.13	59





---

**Annexe 8 : CFD simulation of greenhouse microclimate and crop transpiration under water restriction****Article présenté au congrès CIGR AGenG 2016 au Danemark (présentation orale).**

---

**Bouhoun Ali H<sup>a,\*</sup>, Bournet P.E<sup>a</sup>, Cannavo P<sup>a</sup>, Chantoiseau E<sup>a</sup>.**<sup>a</sup> Agrocampus Ouest, UP EPHor Environmental Physics and Horticulture Research Unit, F-49045 Angers, France.

\* Corresponding author. Email: hacene.bouhounali@agrocampus-ouest.fr

**Abstract**

In greenhouses, reducing water consumption by increasing water efficiency is of high interest. To reach this goal, predictive models of soil-plant-atmosphere water transfers may be helpful. However, almost all numerical microclimate simulations for potted plants grown in greenhouse were conducted under well-watered condition. Moreover, most models were developed for open field conditions. The aim of this work is to simulate transpiration and microclimate for plants grown in pots inside greenhouses for well-watered and water restriction conditions. In this prospect a 2D transient CFD (Computational Fluid Dynamics) model was implemented. User defined functions were implemented to take account of the crop interactions with the climate inside the greenhouse. The crop was considered as a porous medium and specific source terms for transpiration and sensible heat transfers were added. A specific submodel was also implemented to calculate the substrate water content based on the water balance between irrigation and transpiration. A particular care was paid to the modelling of the stomatal resistance. In order to get the input data and to validate the CFD simulations, an experiment was conducted during sixteen weeks inside a greenhouse equipped with ornamental plants (New Guinea Impatiens) grown in containers on shelves. Both well-watered and restriction conditions were analyzed. The results of the CFD simulations showed the ability of the model to correctly predict transpiration, air and leaf temperatures as well as

air humidity inside the greenhouse for both water conditions. The CFD model could therefore be useful to test different irrigation scenarios and better manage water inputs.

**Keywords:** Crop model, irrigation, matric potential, Penman Monteith, stomatal resistance, unsteady.

### **Introduction**

At a time when ecological concerns are growing, a better management of water resources in the horticultural sector appears to be necessary to remain competitive. Up to now, the question of an optimal control of irrigation for ornamental crops grown under greenhouses has not been investigated to the same extent as it has been for open field crops. The physiological mechanisms associated with irrigation may be assessed through a representative model of the response of plants to different irrigation regimes. The idea is to reduce the water consumption of the plants without significantly impacting their transpiration and growth rate. The rate of transpiration is controlled by the opening and closing of stomata, which are themselves governed by the so-called stomatal resistance ( $R_s$ ). Furthermore, the transpiration impacts the distribution of several climatic variables under greenhouses such as temperature and humidity (Kichah et al., 2012).

Computational Fluid Dynamics is a powerful tool which makes it possible the prediction of the distribution of the climatic variables inside the greenhouse. The numerical device also enables to test different situations without expensive costs. Modeling the microclimate and transpiration rate distribution under greenhouse has been extensively investigated through CFD tool (Boulard and Wang, 2002; Majdoubi et al., 2009) but only for well-watered conditions. To simulate the stomatal resistance, almost all of these works used the Jarvis (1976) model, that was initially developed for open field condition. Up until now however, there is still no CFD work simulating the microclimate and transpiration rate for water restriction conditions.

The objective of this work is to develop an accurate unsteady 2D CFD model able to simulate the transpiration rate evolution and the microclimate distribution under greenhouses for well-watered and water restriction conditions. In this model, the interaction of plants with

the microclimate, the radiative transfers as well as the substrate water content impact on the transpiration will be integrated.

## **Materials and Methods**

### **Experimental setup**

Experiments took place in Angers (47° 28' N, 0° 33' E), in north-western France in 2014. They were conducted inside a 100 m<sup>2</sup> glasshouse compartment. Young Impatiens plants (Novae-Guinea, cv. 'Sonic Scarlet') were potted in 0.74 L containers (8.7 cm height) filled in with fine peat with homogeneous peat bulk density (i.e. 0.12 g cm<sup>-3</sup>) grown on shelves. During the measurement period in June 2014, the leaf area index (LAI) was 2.36, the plant density was 15 plants per m<sup>2</sup> (18 m<sup>2</sup> total area of shelves) and the plant average height was 24 cm. The whole area of shelves was covered by the crop and the shading screen was closed. Plants were irrigated by periodically flooding with a nutrient solution. Plants under well watered condition were irrigated twice a day (6 am, 11 am) on three shelves with water potential in peat kept higher than -2 kPa, while the irrigation was periodically stopped on one shelf until plants evidenced water stress visual signs. In order to avoid excessive temperatures, a shading screen was used and the roof vents were fully open as soon as external temperatures exceeded 20°C. The flowers were regularly removed for the purpose of the study.

### **Climate, stomatal resistance and transpiration measurements**

A set of sensors was used to measure the climate characteristics inside the greenhouse (Figure 1). The temperature (Ta) and relative humidity (RH<sub>a</sub>) of the air were measured by ventilated sensors (Vaisala HMP45C, Campbell Scientific Ltd., Antony, France, accuracy ±0.1 °C for T and ±2 % for RH) located at three positions 15 cm above the crop, inside the crop and under the shelves (Ta<sub>1</sub>, Ta<sub>2</sub>, Ta<sub>3</sub>, RH<sub>a1</sub>, RH<sub>a2</sub>, RH<sub>a3</sub>). The temperature of the leaves (T<sub>l</sub>) of the upper and bottom part of the crop were recorded with copper-constantan (Cu-Cs) thermocouples glued to the underside of plant leaves and then averaged. The average temperature measured for 6 leaves for each water condition was considered. The ground temperature under the shelves (Tw<sub>g</sub>) was also monitored with platinum probes PT100 (TC ONLINE, France). Well-watered and water-restricted crop transpiration rates were measured

by two scales (Melter-Toledo, Greifensee, Switzerland,  $\pm 0.1$  g) located approximately at the center of the shelves (Figure 1) and carrying several containers. The downward and the upward long and short wavelength radiation ( $R_{\text{atm}}$  and  $R_g$ ) were recorded by a CNR1 pyrrometer (Kipp&Zonen, Delft, The Netherlands,  $\pm 10$  %). The peat matric potential ( $\Psi$ , kPa) and volumetric water content ( $\theta$ , v/v) were measured at mid-height of six containers with tensiometers (SDEC 1300, France,  $\pm 0.2$  % kPa), and volumetric water content sensors (EC-5, Decagon, Dardilly, France,  $\pm 3$  %  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ). Among them, three were placed inside the well-watered containers, and the other three inside the water-restricted containers.

All the above-mentioned parameters were measured every 3 s and averaged online over 10 min periods with a data logger system (CR3000 and CR7, Campbell Scientific Ltd., Antony, France). The stomatal resistance of the leaves was measured using a porometer (AP4, Delta-T Device, United Kingdom). The accuracy of this device was  $\pm 20 \text{ s m}^{-1}$  for  $R_s$  in the  $[20-50 \text{ s m}^{-1}]$  range, and  $\pm 10$  % in the  $[50-4000 \text{ s m}^{-1}]$  range. Five measurements were undertaken for green, young, healthy, fully expanded leaves of different plants for each water condition and considering successively sunlit and shaded leaves. The measurements of  $R_s$  were replicated every half an hour from 8:00 am to 8:00 pm.

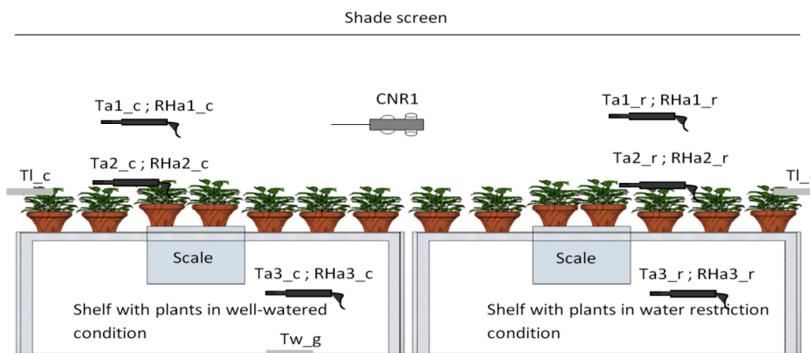


Figure 1. Experimental setup with the different sensors used: ventilated sensors for temperatures and relative humidities above (Ta1; RHa1), inside (Ta2;RHa2), and under (Ta3;RHa3) the canopy, CNR1 to measure radiation, thermocouples for leaf (Tl) and ground temperature (Tw\_g), and scales to measure the transpiration rate. “c” means well-watered, “r” means water restriction.

### Numerical Method

The CFD simulations were carried out with the commercially available CFD package, Ansys Fluent 15. This numerical tool solves the unsteady 2D convection diffusion equations with the finite volume technique. Assuming that the fluid is incompressible, the transport equations may be written in the general form (Eq 1):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial(U\Phi)}{\partial x} + \frac{\partial(V\Phi)}{\partial y} = \Gamma \Delta \Phi + S_{\Phi} \quad (1)$$

where  $\Phi$  represents the concentration of the non-dimensional transported quantity, namely momentum, mass and energy; U and V are the components of the velocity vector;  $\Gamma$  is the diffusion coefficient and  $S_{\Phi}$  is the source term. The k- $\epsilon$  turbulence model was chosen as closure model because it was validated in a number of studies considering similar greenhouses (Bournet et al., 2007).

The ideal gas law was activated, in order to link the fluid density with the other variables. Radiative transfers were simulated through the resolution of the radiative transfer equation using the Discrete Ordinate method.

### Crop model

The canopy gets a radiation  $R_g$  ( $W m^{-2}$ ), which results from the solar radiation, and exchanges both a latent heat flux density  $Tr_d$  ( $W m^{-3}$ ) by transpiration and a sensible heat flux density  $Q_s$  ( $W m^{-3}$ ) with the ambient air. The energy balance along the leaves may thus be written as follows (Eq 2):

$$R_{g_{abs}} - Tr_d - Q_s = 0 \quad (2)$$

where the absorbed radiation  $R_{g_{abs}}$  ( $W m^{-3}$ ) in each cell of the canopy can be directly deduced from the Beer's law (Eq 3) in a porous medium Eq (4):

$$R_g(y) = R_{g_0} \exp[-K_c LAD(H - y)] \quad (3)$$

$$R_{g_{abs}} = R_g(y_1) - R_g(y_2) \quad (4)$$

where LAD is the leaf area density ( $\text{m}^2 \text{m}^{-3}$ ),  $y_1$  and  $y_2$  are the upper and lower ordinates of the considered cell,  $R_{g0}$  is the above canopy global radiation in  $\text{W m}^{-2}$  and  $K_c$  is the extinction coefficient of radiation, estimated at a value of 0.95 for well-watered and 0.64 for water restriction condition in this study. This difference was explained by the hydric stress signs appearing on leaves for plants under water restriction. For short-term hydric stress, plants adapt by leaf rolling (Hattem et al., 2007; Hsiao and Acevedo, 1974). This physiological mechanism makes the plants absorb less solar radiation, thus limiting transpiration.

The amount of long wave length radiation ( $R_{\text{atm}}$ ) absorbed throughout the canopy was almost negligible. The sensible heat flux at a canopy level is governed by the following equation (Eq 5):

$$Q_s = 2LAD\rho_a C_p (T_l - T_a)/R_a \quad (5)$$

where  $\rho_a$  is the air density ( $\text{kg m}^{-3}$ ),  $C_p$  is the specific heat of air under constant pressure ( $\text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$ ),  $T_l$  and  $T_a$  are the temperatures of leaves and air..

The latent heat density (transpiration rate density) is given by Eq (6):

$$\text{Tr}_d = \frac{\Delta R_n/H + 2 \rho_a LAD C_p \text{VPDa}/R_a}{\Delta + 2 \gamma \left(1 + \frac{R_s}{R_a}\right)} \quad (6)$$

where  $R_n$  is the net radiation flux absorbed by the crop ( $\text{W m}^{-2}$ ). It was systematically assumed to be equal to the net radiation measured above the crop, thus neglecting the radiation exchanged between the canopy and ground. Thus, the net radiation above the crop was almost equal to the incoming global radiation during the day ( $R_g$ ).  $\gamma$  is the psychrometric constant. VPDa is the air-air vapor pressure deficit (Pa), and  $\Delta$  is the slope of the saturated water vapor pressure curve according to temperature. In the present study the aerodynamic resistance  $R_a$  was considered as constant according to Baille et al., (1994):  $R_a = 271 \text{ s m}^{-1}$ .  $R_s$  is the stomatal resistance ( $\text{s m}^{-1}$ ) calculated for each cell in the canopy domain.

The leaf stomatal resistance  $R_s$  for well-watered and water restriction condition was derived from the Full Factorial Design (FFD) method as described by Bouhoun Ali et al. (2016) (Eq 7).

$$R_s = (-115.rg - 139.rh - 39.t + 139.rg.rh + 43.rg.t + 11.rh.t + 661.rg^2 - 368.rg^3) \cdot \left(1 + \left(\frac{\Psi}{-11.41}\right)^{1.05}\right) \quad (7)$$

with  $rg=(Rg-75)/75$ ;  $rh=(RH-65)/10$ ;  $t=(T-20.5)/5.5$ , and  $\Psi$  is the soil matric potential (kPa) deduced from the van Genuchten (1980) model (Eq 8) knowing the soil water content  $\theta$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ).

$$\Psi = \frac{1}{\alpha} \left[ \left( \frac{\theta - \theta_{res}}{\theta_{sat} - \theta_{res}} \right)^{\frac{N}{1-N}} - 1 \right]^{1/N} \quad (8)$$

where  $\theta_{res}$ ,  $\theta_{sat}$  are the residual and saturation soil volumetric water content ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ), and  $\alpha$  ( $\text{kPa}^{-1}$ ) and  $N$  (dimensionless) are the parameters to be calibrated. From a multilinear fit, we found  $\theta_{sat}=0.887$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\theta_{res}=0.1$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\alpha=0.134$  ( $\text{kPa}^{-1}$ ), and  $N=1.469$  in the present study.

The leaf temperature  $T_l$  could then be deduced from Eq (2).

### 5.2.6 Water balance model

The soil matric potential was deduced from the volumetric water content by using Eq (8). Furthermore the volumetric water content was calculated at each time step (i) by Eq (9), integrating the transpiration and the initial volumetric water content ( $\theta_0$ ) (which depends on the amount of irrigation).

$$\theta_i = \theta_0 - \left( \frac{ts \ s_s \sum_{i=0}^{i=n} Tr_{avg,i}}{\lambda \ m \ \rho_w \ v_p} \right) \quad (9)$$

where  $\theta_i$  is the volumetric water content at the given current time step ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\theta_0$  is the initial substrate water content ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $ts$  is the time step interval (s) equal to 3600 s for this study,  $s_s$  is the total area of shelves ( $\text{m}^2$ ),  $Tr_{avg,i}$  is the volume weighted average for transpiration rate for all cells over the canopy domain at given current time  $i$  ( $\text{W m}^{-2}$ ),  $\lambda$  is the water latent heat ( $\text{J kg}^{-1}$ ),  $m$  is the total number of plants equal to 264,  $\rho_w$  is the water density ( $\text{Kg m}^{-3}$ ), and  $V_p$  is the volume of the container ( $\text{m}^3$ ).

### Porous medium model

The pressure loss induced by the crop resistance to air movement is represented by a source term  $S_\phi$  in the Navier-Stokes equations inferred from the resolution of the Darcy-Forchheimer equation (Eq 10):

$$S_\phi = -\left(\frac{\mu}{K}v + \left(C_F/K^{0.5}\right)v^2\right) \quad (10)$$

where  $\mu$  is the dynamic viscosity of the fluid (Pa s),  $K$  is the permeability of the porous medium ( $m^2$ ), and  $C_F$  is the non-linear momentum loss coefficient. Given the expression (Eq 11) suggested by Thom (1971):

$$S_\phi = -LADC_D v^2 \quad (11)$$

where  $C_D$  is the drag coefficient =0.32 according to Kichah et al. (2012) and  $v$  is the velocity magnitude of the air ( $m s^{-1}$ ).

### Mesh and boundary conditions

Due to the complexity and size of the multi-compartment greenhouse considered, the numerical study focused on a relatively small area around the canopy. The calculation domain ( $23*3.69 m^2$ ) included the ground of the greenhouse, the shelves, the pots and the plants (Figure 2). A structured mesh (9500 cells) was used for simulations with a refined grid in the vicinity of the ground and shelves. A particular attention was paid to check the independency of the numerical results from the grid. Uniform velocity, air temperature, soil temperature ( $T_{w\_g}$ ), sky temperature ( $T_{sky}$ ) and air absolute humidity (AHa) profiles were imposed at the inlet and inferred from the experimental values. The incoming radiation was also assumed to be uniform along the calculation domain boundaries.



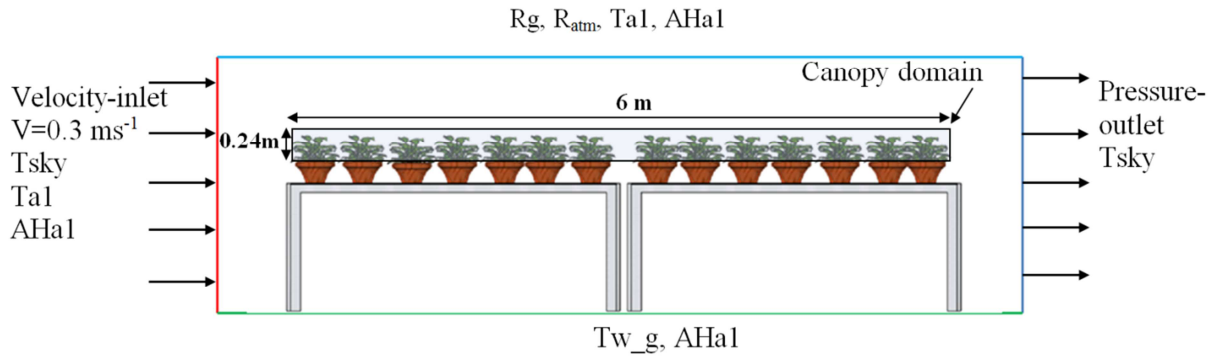


Figure 2: Boundary conditions.

### Results and Discussion

2D unsteady simulations with a 1 hour time step were carried out for two cases considering a 24h period from 23 pm on June 17<sup>th</sup> to 22 pm on June 18<sup>th</sup> 2014. The first case consisted of well-watered plants while the second one consisted in plants under water restriction condition. The irrigation was stopped on June 13<sup>th</sup> for plants under water restriction condition. The experimental measurements were used as input data for the initial and boundary conditions (Figure 3A, 3B). Initial conditions at 23 pm were obtained by running a preliminary simulation using the boundary conditions recorded at 22 pm and assumed to be uniformly distributed over the whole calculation domain. The initial water content for the water restriction case was deduced from the value recorded at 22 pm and equal to  $0.652 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . The sub model based on the water balance was used (Eq 8 and 9) to calculate the soil matric potential at each time step. For the well-watered case the soil matric potential was considered as constant and its value was fixed at -1 kPa.

As expected, for both cases, the boundary conditions evolution evidenced a correlation between the global radiation and the temperature with a peak of temperature at around 2 pm.

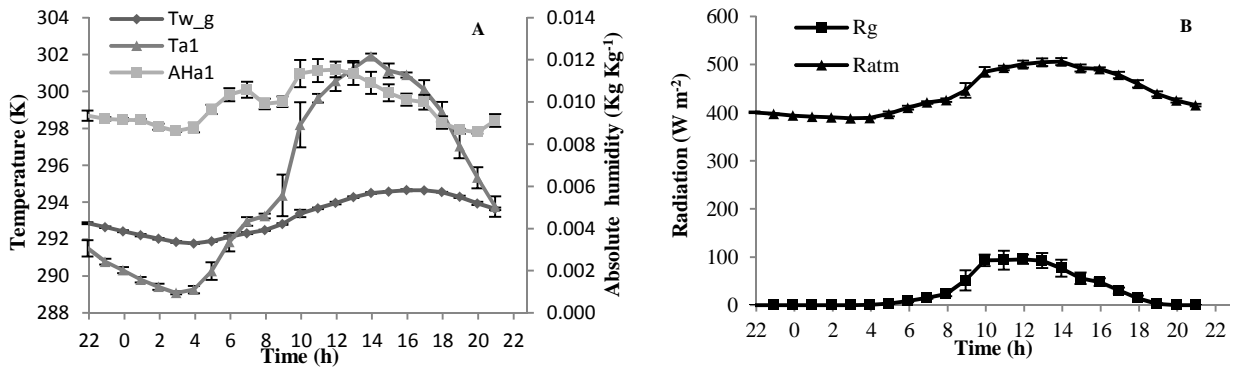


Figure 3 : Time evolution of the boundary conditions. A: ground temperature ( $T_{w\_g}$ ), air temperature ( $T_{a1}$ ), air absolute humidity ( $AH_{a1}$ ). B: long wave radiation ( $R_{atm}$ ), short wave radiation ( $R_g$ ), and soil matric potential ( $\Psi$ ).

## Validation of the model

### Temperature

The time evolutions of the air temperatures at three locations and leaf temperatures for well-watered and restriction conditions are shown in Figures 4A, 4B, 5A, and 5B. Both measured and predicted air temperatures inside, above and below the crop and leaf temperatures followed the same trend. The order of magnitude of the predicted temperatures was in fair agreement with measurements for both water regimes. For well-watered plants,  $r^2$  greater than 0.97 and RMSE less than 1.14 K for all temperatures were found. More or less the same results were found for temperatures for plants under water restriction condition with  $r^2$  greater than 0.94 and RMSE lower than 1.62 K. The same temperatures were found for temperatures measured and simulated above and below the canopy for both regimes as shown in Figures 4A, and 4B. Nevertheless, the effect of water restriction could be clearly seen on the temperatures measured and predicted inside the canopy and on the leaf temperatures as indicated in Figure 5A, and 5B. The measured and predicted temperatures inside the canopy and leaf temperatures for the water restriction case were greater by up to 1K than the observed and simulated temperatures under well-watered condition. This was due to the fact that the transpiration rate decreased for water restriction condition as presented hereafter. The transpiration cooled the leaves of plants and consequently refreshed the adjacent air. The

temperatures measured and predicted for the leaves were lower than the temperature of the air inside the canopy during daytime for the well-watered case (Figure 5A). This difference becomes very small in the case of water restriction (Figure 5B), the transpiration rate being too low to cool the leaves.

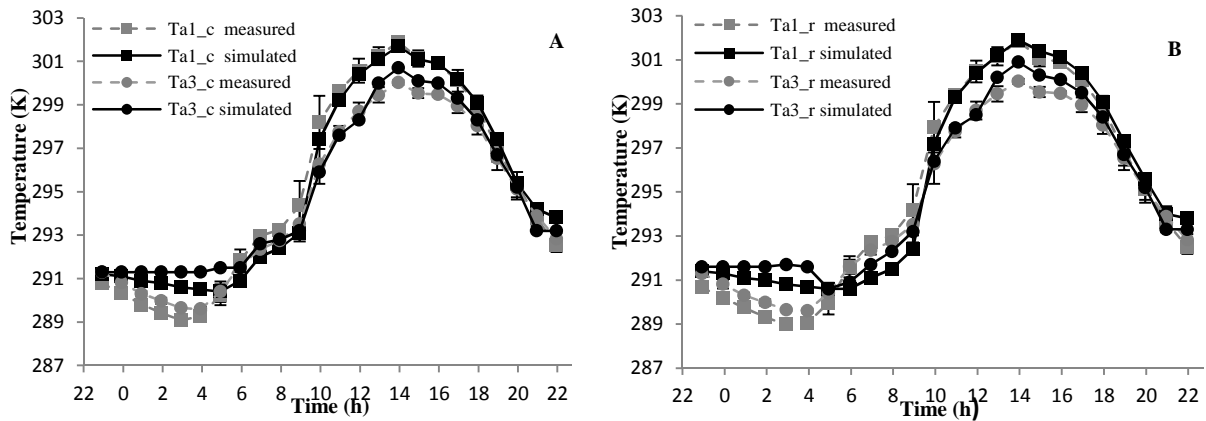


Figure 4: Time evolution of measured and simulated air temperatures above and below the crop, for well-watered plants (A), and for plants under water restriction condition (B)

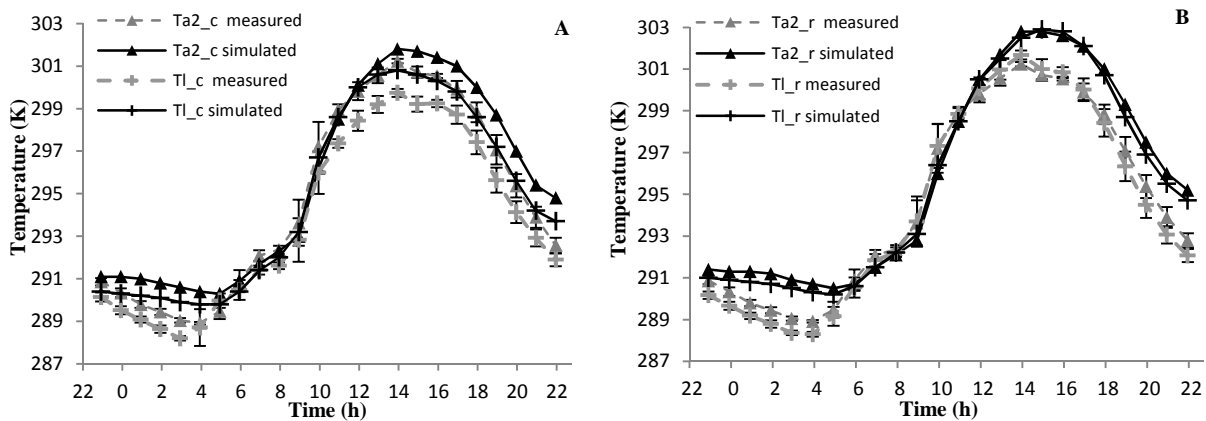


Figure 5 : Time evolution of measured and simulated air temperature inside the crop and average leaf temperatures, for well-watered plants (A), and for plants under water restriction condition (B)

## Humidity

The relative humidity was studied at three locations as it was done for temperatures, and for both regimes. The time evolution of the measured and predicted relative humidity is plotted in Figure 6A, and 6B. Predicted and measured RH were higher inside the canopy than inside the air just above or below the canopy. This is clearer for the well-watered case. For the water restriction case, the measured and predicted humidity at the three locations remained similar because of the decrease of the transpiration rate (explained below) and the higher temperature inside the canopy compared with the well-watered case. In general, good agreements were found between measured and calculated humidity for both water regimes. The following results were obtained for all relative humidities:  $r^2$  higher than 0.88 and RMSE less than 8.66 % for well-watered plants, and  $r^2$  more than 0.78 and RMSE lower than 6.69 % for the water restriction case.

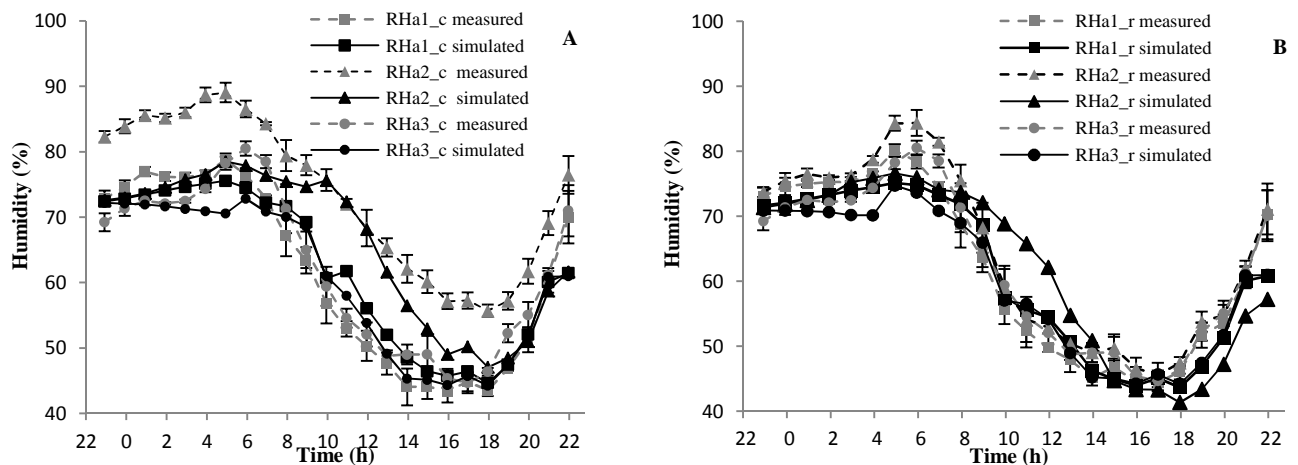


Figure 6: Time evolution of measured and simulated relative humidities above, inside and below the crops for well-watered plants (A), and for plants under water restriction condition(B)

### Stomatal resistance, soil matric potential, and transpiration rate:

Measured and predicted  $R_s$  for the water restriction case were higher than  $R_s$  for the well-watered case both for sunlit and shaded leaves as shown in Figures 7A, and 7B.

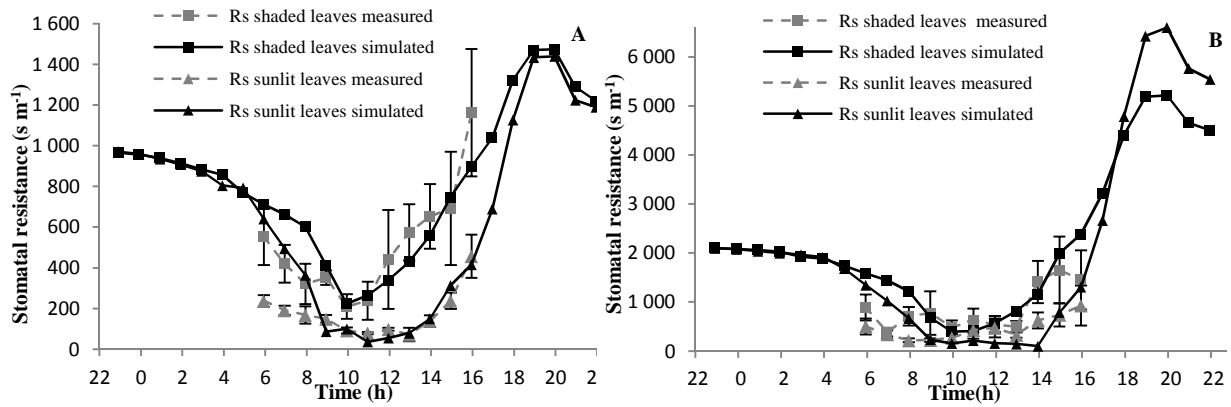


Figure 7: Time evolution of measured and simulated stomatal resistance of sunlit and shaded leaves for plants under well-watered (A) and water restriction (B) conditions.

This difference was related to the water regime and appeared when the peat matric potential started to decrease in the water restriction case. The stomatal resistance increased to limit the transpiration when the soil matric potential decreased and the extraction of available water from the substrate became more difficult (Verhoef and Egea, 2014). The measured and simulated soil matric potential under water restriction condition explained this decrease (Figure 8). Without irrigation, the amount of water into the soil decreased simultaneously with the amount of water lost from transpiration by plants. Good agreements between measured and simulated soil matric potential were found with  $r^2=0.99$  and  $RMSE=3.38$  kPa for water restriction case.

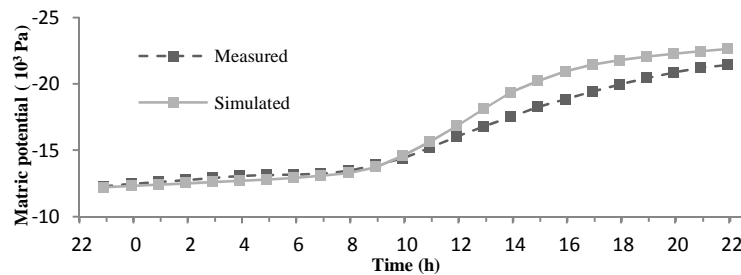


Figure 8 : Time evolution of measured and simulated soil matric potential for water restriction case.

The CFD model again showed its ability to predict the time evolution of  $R_s$  during the day for sunlit and shaded leaves and for both regimes. The agreement between measured and predicted  $R_s$  was acceptable with:  $r^2$  higher than 0.44 and RMSE less than  $168 \text{ s m}^{-1}$  for the well-watered case both for sunlit and canopy leaves (Figure 7A). For the water restriction case,  $r^2$  higher than 0.51 and RMSE less than  $527 \text{ s m}^{-1}$  for both sunlit and canopy leaves (Figure 7B) were obtained.

The results of the transpiration rate evolution are presented in Figures 9A (well-watered) and 9B (water restriction). The measured and simulated transpirations for the water restriction case were lower than the ones for the well-watered case. Globally, the model demonstrated its ability to correctly predict the time evolution of the transpiration rate with good accuracy for both regimes:  $r^2=0.98$  and  $\text{RMSE}=5.87 \text{ W m}^{-2}$  for the well-watered case, and  $r^2=0.97$  and  $\text{RMSE}=5.64 \text{ W m}^{-2}$  for the water restriction case. The relative error for accumulated transpiration over 24h was also estimated, leading to 3.32 % for the well-watered case and 4.82 % for the water restriction case.

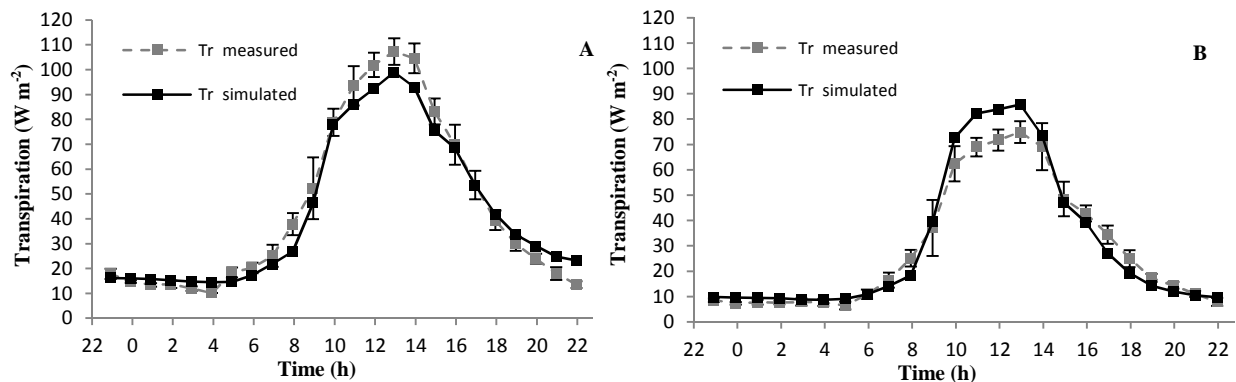


Figure 9: Time evolution of measured and simulated transpiration rate for plants under well-watered (A) and water restriction (B) conditions.

Simulations exhibited heterogeneities of the stomatal resistance and transpiration rate distribution both for the well-watered and water restriction cases inside the canopy mostly from the top to the bottom of the canopy as shown in Figures 10A, 10B, 11A and 11B.

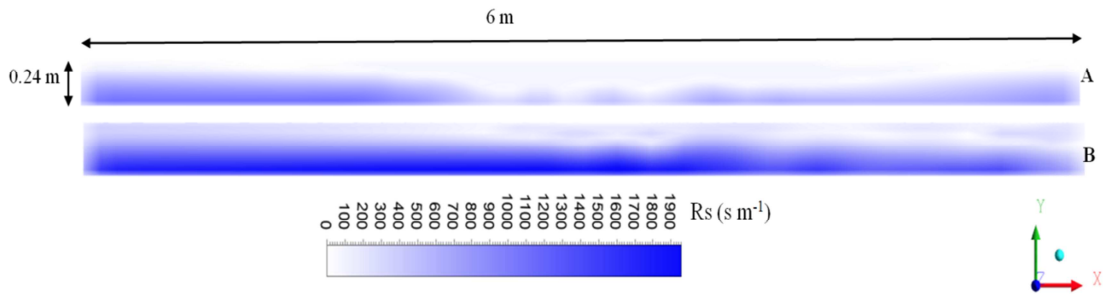


Figure 10 : Simulated distribution of the stomatal resistance ( $s\ m^{-1}$ ) inside the canopy domain at 1 pm on June 18<sup>th</sup> 2014, for well-watered (A), and water restriction (B) conditions.

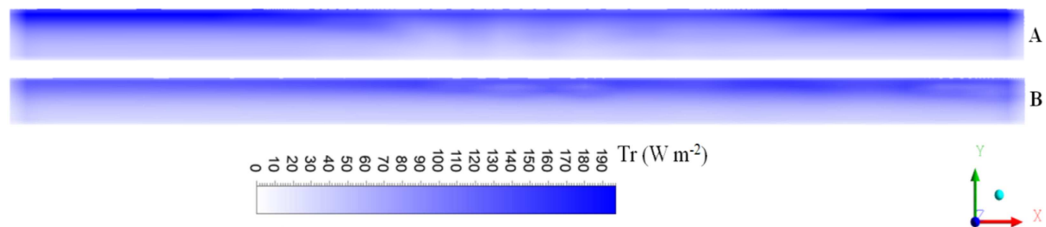


Figure 11: Simulated distribution of the crop transpiration rate ( $W\ m^{-2}$ ) inside the canopy domain at 1 pm on June 18<sup>th</sup> 2014 for well-watered (A), and water restriction (B) conditions.

The simulated stomatal resistance of the lower leaves was higher than that of the upper ones for both water regimes as indicated in Figures 10A and 10B, which is not surprising, provided the global radiation was much higher in the upper part of the canopy. The distribution of transpiration was affected also by the heterogeneous distribution of the  $R_s$ . The lowest leaves of the crop had the lowest rate of transpiration. Conversely, the highest values of the transpiration rate were simulated at the top of the crop (Figure 11A and 11B).

### Conclusions

In this study, the effect of two water regimes on plants and microclimate under greenhouse was studied. An unsteady CFD model combining a radiative submodel together with a crop submodel taking account of the water balance in the soil-plant-atmosphere continuum was developed. The CFD model showed its performance to correctly predict the evolution of the main characteristics of the system for both well-watered and water restriction

conditions. Good agreements were found between measured and simulated evolutions of temperatures, relative humidities, stomatal resistances, transpiration rates and soil matric potentials for both cases. The model also showed its ability to predict the difference between the well-watered and water restriction conditions. In particular, it showed its capacity to predict the decrease in the amount of water available in the soil as shown by the soil matric potential decay. In addition the stomatal resistance, the measured and simulated air temperatures inside the canopy and leaf temperatures were higher for the water restriction conditions than for the well-watered case. As expected also, the measured and simulated transpiration rates were lower for plants under water restriction than for the plants under well-watered condition. This was of course strongly correlated to the increase of the stomatal resistance for water restriction condition. The next step will consist to test several irrigation scenarios leading to interesting prospects for water use reduction. The idea will be to find an optimal scenario to decrease the amount of water supply without affecting transpiration and microclimate under greenhouse.

### References

- Baille, M., Baille, A., Laury, J.C., 1994. A simplified model for predicting evapotranspiration rate of nine ornamental species vs. climate factors and leaf area. *Sci. Hortic.* 59, 217–232. doi:10.1016/0304-4238(94)90015-9
- Bouhoun Ali, H., Chantoiseau, E., Bournet, P.E., Cannavo, P., Sourgnès, M., 2015. Modelling the stomatal resistance under water comfort and restriction to assess the transpiration of a greenhouse New Guinea Impatiens crop. In press
- Bouhoun Ali, H., Bournet, P.E., Cannavo, P., Chantoiseau, E., Sourgnès, M., 2016. A new method for modelling stomatal resistance under water comfort conditions by means of/using design of experiments. *Biosyst. Eng.* In press.
- Bournet, P.E., Ould Khaoua, S.A., Boulard, T., 2007. Numerical prediction of the effect of vent arrangements on the ventilation and energy transfer in a multi-span glasshouse using a bi-band radiation model. *Biosyst. Eng.* 98, 224–234. doi:10.1016/j.biosystemseng.2007.06.007



- Hatem, Z., Kathy, S., Raoul, L., 2007. Étude des caractères morphologiques des plantes de tomate soumises à un déficit hydrique en milieu hydroponique. *Sci. Chang. Planétaires Sécher.* 18, 57–64. doi:10.1684/sec.2007.0069
- Hsiao, T.C., Acevedo, E., 1974. Plant modification for more efficient water use Plant responses to water deficits, water-use efficiency, and drought resistance. *Agric. Meteorol.* 14, 59–84. doi:10.1016/0002-1571(74)90011-9
- Jarvis, P.G., 1976. The Interpretation of the Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in the Field. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 273, 593–610. doi:10.1098/rstb.1976.0035
- Kichah, A., Bournet, P.-E., Migeon, C., Boulard, T., 2012. Corrigendum to “Measurement and CFD simulation of microclimate characteristics and transpiration of an Impatiens pot plant crop in a greenhouse” *Biosyst. Eng.* 112, 22-34. doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.04.006
- Thom, A.S., 1971. Momentum absorption by vegetation. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 97, 414–428. doi:10.1002/qj.49709741404
- van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892–898.
- Verhoef, A., Egea, G., 2014. Modeling plant transpiration under limited soil water: Comparison of different plant and soil hydraulic parameterizations and preliminary implications for their use in land surface models. *Agric. For. Meteorol.* 191, 22–32. doi:10.1016/j.agrformet.2014.02.009



---

**Annexe 9 : CFD analysis of Impatiens crop irrigation scenarios inside a greenhouse****Article présenté au congrès CIGR AGenG 2016 au Danemark (poster).**

---

**Bouhoun Ali H.<sup>a,\*</sup>, Bournet P.E.<sup>a</sup>, Cannavo P.<sup>a</sup>, Chantoiseau E.<sup>a</sup>**<sup>a</sup> Agrocampus Ouest, UP EPHor Environmental Physics and Horticulture Research Unit, F-49045 Angers, France.\* Corresponding author. Email: [hacene.bouhounali@agrocampus-ouest.fr](mailto:hacene.bouhounali@agrocampus-ouest.fr)**Abstract**

Due to water scarcity, in greenhouses in particular, reducing water consumption by increasing water efficiency is of high interest. The aim of this study is to test different irrigation scenarios in order to find the best irrigation scenario for reducing the amount of water used. In this prospect, a CFD (Computational Fluid Dynamics) model integrating substrate-plant-atmosphere water transfers was developed. The difficulty arises from the strong coupling between the greenhouse climate and the crop behavior. The crop was considered as a porous medium exchanging latent and sensible heat with its environment. The stomatal resistance ( $R_s$ ), which is the key factor impacting the transpiration rate, was modeled. The water restriction effect was incorporated in the  $R_s$  model through a specific stress function based on the growing media water potential. It was calculated using the van Genuchten model and the water balance between irrigation and transpiration. The CFD model had been first validated against experiments conducted inside a 100 m<sup>2</sup> glasshouse with the same plant model and showed good agreement. Different irrigation scenarios were then tested reducing progressively the water supply by providing a lesser amount of water than the growing media water capacity. The simulations showed the ability of the model to predict the impact of reducing water inputs on the plant transpiration, growing media water potential and climate distribution inside the greenhouse. The tests also showed that the water supply could

be reduced by 20 % without significantly impacting the transpiration rate, and therefore potentially the plant growth.

**Keywords:** Crop model, irrigation, matric potential, Penman Monteith, stomatal resistance, unsteady.

### **Introduction**

Optimal crop management in greenhouses is crucial for environmental reasons as well as for competitiveness of the horticultural sector. Sustainability involves reducing most of the inputs used in the greenhouse, i.e. not only fertilizers, but also energy and water. Water in particular deserves a specific attention, all the more, as with the global climate change, water resources are more and more unevenly distributed around the world Bligh (1997), and water becomes sometimes scarce in places where it was abundant before.

The control of irrigation could be optimized from a representative model of microclimate distribution and transpiration rate ( $T_r$ ) of plants under greenhouse both for well-watered and restriction conditions. The idea is to reduce the water consumption of the plants without significantly impacting the transpiration rate. Furthermore, reducing irrigation without changing the transpiration rate would a priori not have significant impact on the local climate distribution nor on the leaf temperature. The transpiration is the key factor controlling the distribution of different climatic variables under greenhouse such as temperature and humidity (Kichah et al., 2012). Water restriction reduces the plant water content and transpiration by inducing stomatal closure. A compromise must therefore be found between transpiration and photosynthesis to cope with the contradiction between (i) a lower transpiration rate for an optimal management of the water resources, and (ii) the expected vegetative development resulting from photosynthetic activity (Monteith, 1977; Kim, et al., 2006). The estimation of transpiration is generally based on a representative model of stomatal behaviour in response to the plant environment (solar radiation, air temperature, air humidity, and growing media or substrate water content) (Monteith, 1973; Gerosa et al., 2012).

Computational Fluid Dynamics is a powerful tool that offers the possibility to assess the impact of different irrigation regimes on the distribution of the climatic variables inside

the greenhouse and in particular inside a crop. The numerical device also enables to test different situations without expensive costs. Modeling the microclimate and the transpiration rate distribution under greenhouses has been extensively investigated in the past through CFD tools but only for well irrigated plants (Boulard and Wang, 2002; Majdoubi et al., 2009). Almost all of these works used the Jarvis (1976) model (initially developed for open field condition) to simulate the stomatal resistance. To our knowledge however, up until now, there is still no CFD work assessing the impact of different irrigation regimes on the microclimate and plants under greenhouse.

The objective of this work is to develop an accurate unsteady 2D CFD model able to simulate the transpiration rate evolution and the microclimate distribution under different restrictive irrigation regimes. Specific routines are included to take the water content evolution of the substrate as well as the heat and mass transfers between plants and their local environment into account.

## Materials and Methods

### Experimental setup

Experiments took place in Angers (47° 28' N, 0° 33' E), in north-western France in 2014. They were conducted inside a 100 m<sup>2</sup> glasshouse compartment. Young Impatiens plants (Novae-Guinea, cv. 'Sonic Scarlet') grown on shelves were potted in 0.74 L containers (8.7 cm height) filled in with fine peat with homogeneous peat bulk density (i.e. 0.12 g cm<sup>-3</sup>). During the measurement period in June 2014, the leaf area index (LAI) was 2.36, the plant density was 15 plants per m<sup>2</sup> (18 m<sup>2</sup> total area of shelves) and the average plant height was 24 cm. The whole area of the shelves was covered by the crop. Plants were irrigated by periodically flooding with a nutrient solution, and flowers were regularly removed. For the purpose of the study, irrigation was periodically stopped on one shelf until plants evidenced water stress visual signs. For the plants on the three other shelves, well-watered conditions were applied with water potential in peat kept higher than -2 kPa. In order to avoid excessive temperatures, a shading screen was used and the roof vents were fully open as soon as external temperatures exceeded 20°C.

### Climate measurements

A set of sensors was used to measure the climate characteristics inside the greenhouse (Figure 1). The temperature ( $T_{a1}$ ) and relative humidity ( $RH_{a1}$ ) of the air were measured for both regimes by ventilated sensors (Vaisala HMP45C, Campbell Scientific Ltd., Antony, France, accuracy  $\pm 0.1$  °C for T and  $\pm 2$  % for RH) located 15 cm above the crop. The ground temperature under the shelves ( $T_{w\_g}$ ) was also monitored with platinum probes PT100 (TC ONLINE, France). The downward and the upward long wave radiation ( $R_{atm}$ ) and short wave radiation ( $R_g$ ) were recorded by a CNR1 pyrradiometer (Kipp&Zonen, Delft, The Netherlands,  $\pm 10$  %). The peat matric potential ( $\Psi$ , kPa) and volumetric water content ( $\theta$ , v/v) were measured at mid-height of six containers with tensiometers (SDEC 1300, France,  $\pm 0.2$  % kPa), and volumetric water content sensors (EC-5, Decagon, Dardilly, France,  $\pm 3$  % m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>). Among them, three were placed inside the well-watered containers, and the other three inside the water-restricted containers.

All the above-mentioned parameters were measured every 3 s and averaged online over 10 min periods with a data logger system (CR3000 and CR7, Campbell Scientific Ltd., Antony, France).

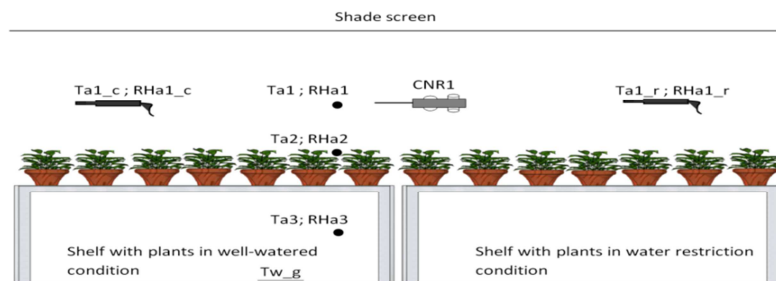


Figure 1. Experimental setup with the different sensors: HMP45C for temperatures and relative humidities above the canopy ( $T_{a1}$ ;  $RH_{a1}$ ), a CNR1 to measure radiation and a platinum probe for the ground temperature ( $T_{w\_g}$ ). “c” means well-watered, “r” means water restriction. The dots indicate the simulation positions: above ( $T_{a1}$ ;  $RH_{a1}$ ) inside ( $T_{a2}$ ;  $RH_{a2}$ ) and below ( $T_{a3}$ ;  $RH_{a3}$ ) the canopy.

### Numerical Method

CFD simulations were carried out with the commercially available CFD package,

Ansys™ Fluent 15. This numerical tool solves the unsteady 2D convection diffusion equations with the finite volume technique. Assuming that the fluid is incompressible, the transport equations may be written in the general form (Eq 1):

$$\frac{\partial \Phi}{\partial t} + \frac{\partial(U\Phi)}{\partial x} + \frac{\partial(V\Phi)}{\partial y} = \Gamma \Delta \Phi + S_{\Phi} \quad (1)$$

where  $\Phi$  represents the concentration of the non-dimensional transported quantity, namely momentum, mass and energy;  $U$  and  $V$  are the components of the velocity vector;  $\Gamma$  is the diffusion coefficient and  $S_{\Phi}$  is the source term. The  $k-\epsilon$  turbulence model was chosen as closure model because it was validated in a number of studies for similar greenhouses (Bournet et al., 2007).

The ideal gas law was activated, in order to link the fluid density to the other variables. Radiative transfers were simulated through the resolution of the radiative transfer equation using the Discrete Ordinate method. The crop model used in this study is presented into details in the work of Bouhoun Ali et al. (2016).

### Water balance model

The growing media matric potential  $\Psi$  (kPa) was deduced from the volumetric water content by using Eq (2) established from the van Genuchten (1980) model knowing the growing media water content  $\theta$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ):

$$\Psi = \frac{1}{\alpha} \left[ \left( \frac{\theta - \theta_{\text{res}}}{\theta_{\text{sat}} - \theta_{\text{res}}} \right)^{\frac{N}{1-N}} - 1 \right]^{1/N} \quad (2)$$

where  $\theta_{\text{res}}$ ,  $\theta_{\text{sat}}$  are the residual and saturation soil volumetric water content ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ );  $\alpha$  ( $\text{kPa}^{-1}$ ) and  $N$  (dimensionless) are the parameters to be calibrated. These parameters were established from tensiometer and volumetric water content sensor measurements for water restriction conditions. From a multilinear fit we found  $\theta_{\text{sat}}=0.887$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\theta_{\text{res}}=0.1$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\alpha=0.134$  ( $\text{kPa}^{-1}$ ), and  $N=1.469$ . Furthermore the volumetric water content was calculated at

each time step (i) by Eq (3), integrating the transpiration and the initial volumetric water content ( $\theta_0$ ) (which depends on the amount of irrigation).

$$\theta_i = \theta_0 - \left( \frac{ts \ s_s \sum_{i=0}^n Tr_{avg,i}}{\lambda \ m \ \rho_w \ v_p} \right) \quad (3)$$

where  $\theta_i$  is the volumetric water content at the given current time step ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $\theta_0$  is the initial substrate water content ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ),  $ts$  is the time step interval (s) equal to 3600 s for this study,  $s_s$  is the total area of shelves ( $\text{m}^2$ ),  $Tr_{avg,i}$  is the volume weighted average for transpiration rate for all cells over the canopy domain at given current time  $i$  ( $\text{W m}^{-2}$ ),  $\lambda$  is the water latent heat ( $\text{J kg}^{-1}$ ),  $m$  is the total number of plants equal to 264,  $\rho_w$  is the water density ( $\text{Kg m}^{-3}$ ), and  $V_p$  is the volume of the container ( $\text{m}^3$ ).

### Mesh and boundary conditions

Due to the complexity and size of the multi-compartment greenhouse considered, the numerical study focused on a relatively small area around the canopy. The calculation domain ( $23 \times 3.69 \text{ m}^2$ ) included the ground of the greenhouse, the shelves, the pots and the plants (Figure 2). A structured mesh (9500 cells) was used for simulations with a refined grid in the vicinity of the ground and shelves. A particular attention was paid to check the independency of the numerical results from the grid. Uniform velocity, air temperature, soil temperature ( $T_{w\_g}$ ), sky temperature ( $T_{sky}$ ) and air absolute humidity (AHa) profiles were imposed at the inlet and inferred from the experimental values. The incoming radiation was also assumed to be uniform along the calculation domain boundaries.

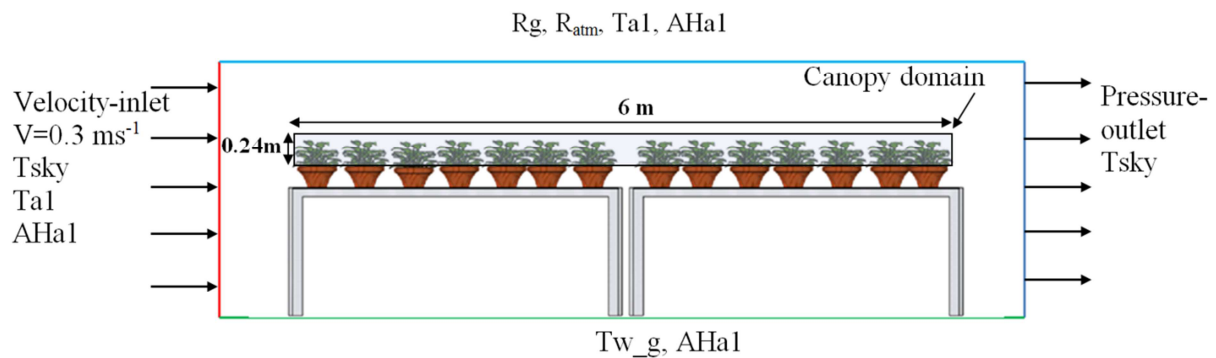


Figure 2 : Boundary conditions.



### Irrigation scenarios

The CFD simulations were based on a 2D unsteady model validated in a previous study of Bouhoun Ali et al. (2016) for well-watered and water restriction conditions. The simulations with 1 hour time step were carried out considering a 24h period from 23 pm on June 17<sup>th</sup> to 22 pm on June 18<sup>th</sup> 2014. Six irrigation regimes were tested and a reference case was chosen corresponding to a 100 % irrigation regime i.e. to a substrate retention capacity of  $0.870 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ . This value was set as initial condition inside the substrate at the beginning of the simulation at 22 pm. For the other irrigation regimes, the amount of initial water content was reduced by using 90 % of the water supply compared with the reference case ( $0.783 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), 80 % ( $0.696 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), 70 % ( $0.609 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), 60 % ( $0.522 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ), and 50 % ( $0.435 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ ).

### Statistical analysis

To estimate the difference between simulated variables for different irrigation regimes compared to the simulated variables for reference case, the RC given by Eq (4) were calculated for each variable together with the cumulated transpiration ratio (CTR) (i.e. cumulated Tr for a given irrigation regime divided by the cumulated Tr of the reference).

$$RC = \sqrt{\frac{1}{k} \sum_1^k (\bar{y}_i - y_i)^2} \quad (4)$$

With  $\bar{y}_i$ : variable for the reference case  $y_i$ : variable for a given irrigation regime. k: is total number of data.

### Results and Discussion

For the six irrigation scenarios, the boundary conditions were assumed to be the same. The boundary conditions were obtained from the experimental measurements as shown in the Figure 3. The initial conditions at 23 pm were obtained after running a 1 h simulation from 22 pm, assuming that all variables were uniformly distributed over the whole calculation domain at that time with values inferred from the boundary conditions (Figure 3).

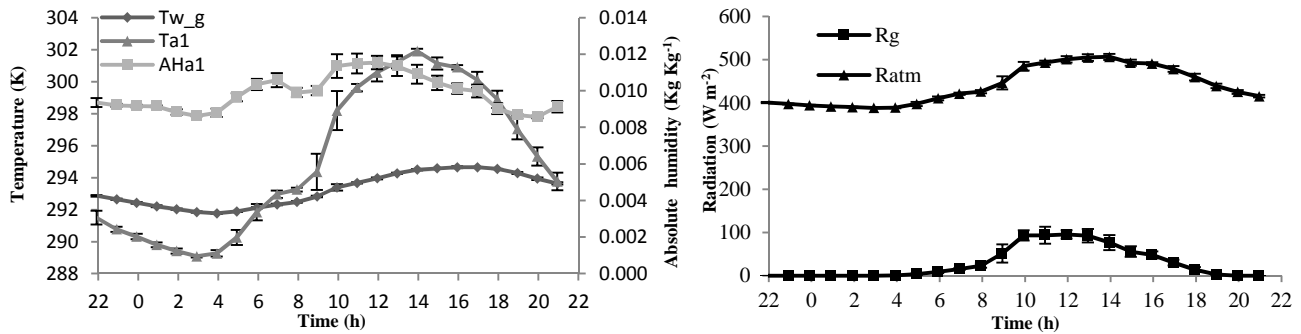


Figure 3: Time evolution of the boundary conditions. Left: ground temperature ( $T_{w\_g}$ ), air temperature ( $T_{a1}$ ), air absolute humidity ( $AH_{a1}$ ). Right: long wave radiation ( $R_{atm}$ ), short wave radiation ( $R_g$ ).

### Temperature:

The time evolutions of the simulated air temperatures at three locations (Figure 1) and simulated leaf temperatures for the six irrigation regimes are shown in Figures 4A, 4B, 4C, 4D, 4E, and 4F. The air temperatures inside, above and below the crop and leaf temperatures followed the same trend for all irrigation regimes. The air temperatures inside and above the canopy and leaf temperatures slightly increased when the water supply was reduced as shown in Figures 4A, 4B, 4C, 4D, 4E, and 4F. For instance, for a 50 % water supply, the air temperatures inside, above the canopy, and leaf temperatures were greater than the reference case by almost 2 K on average for air temperatures, and 7 K on average for leaf temperatures. This difference decreased with the increase of water supply. Indeed, a modification of the water regime strongly impacts the transpiration rate, the latent heat transfer and consequently the energy balance over the canopy. The transpiration rate was greater for the reference case and decreased with the decrease of water supply. Plant transpiration cools the leaves of plants and consequently refreshes the adjacent air. Comparing water restriction cases with the reference case, a  $RC = 0.35$  K was found for 90 % water supply,  $RC = 0.36$  K for 80 % and  $RC = 0.46$  K for 50 % for  $T_{a1}$  showing the increasing impact of water restriction on air temperature just above the canopy. This trend increased inside the canopy for  $T_{a2}$  with  $RC = 0.35$  K for 90 % water supply,  $RC = 0.35$  K for 80 % and  $RC = 1$  K for 50 %. The  $RC$  for  $T_{a3}$  remained almost the same  $\approx 0.31$  K for all irrigation regimes because  $T_{a3}$  was more impacted

by the air circulation coming from the outside of greenhouse than by the canopy. For TI it was found  $RC=0.43$  K for 90 % of water supply,  $RC=0.79$  K for 80 % and  $RC = 2.61$  K for 50 %.

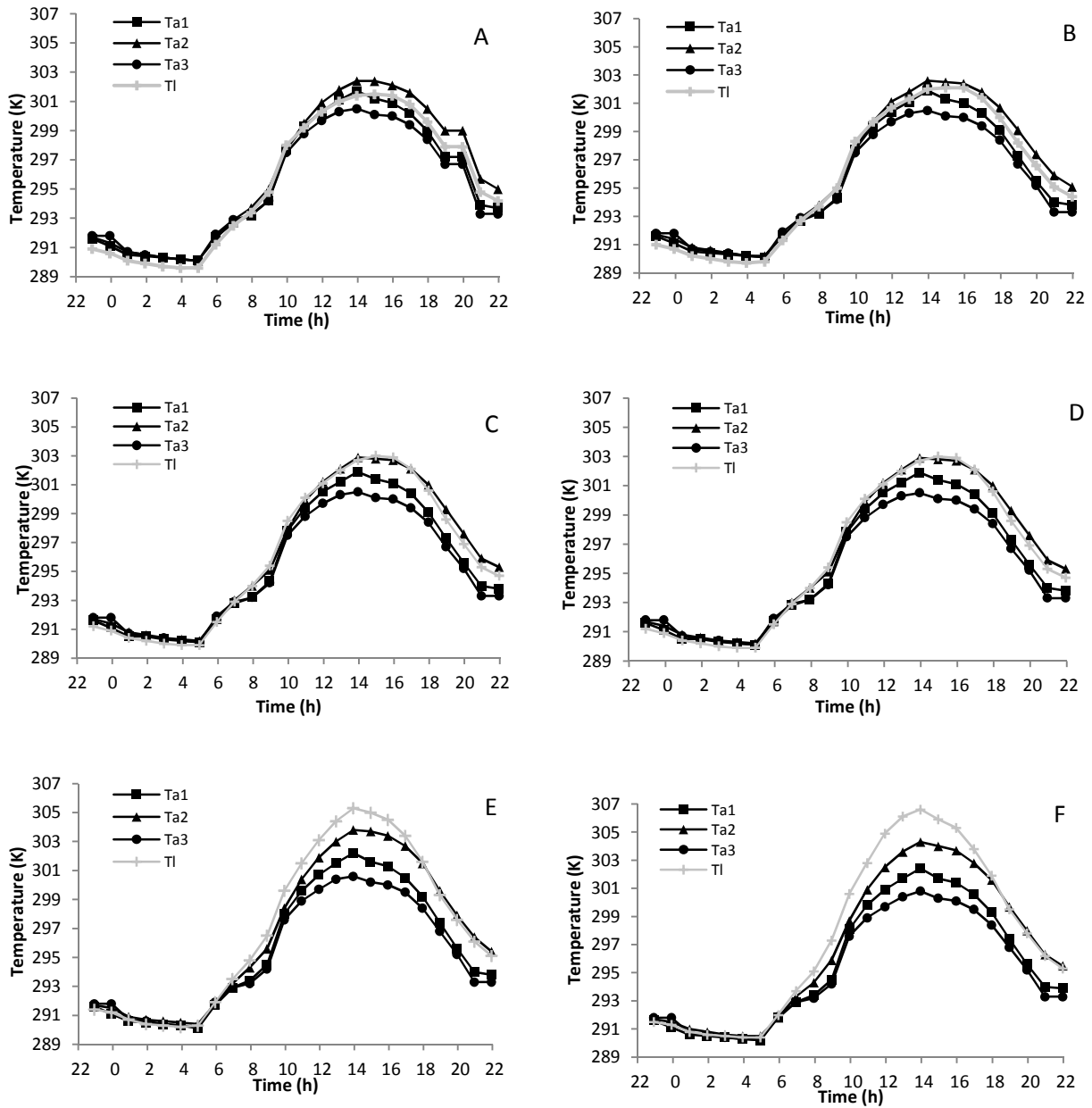


Figure 4: Time evolution of simulated air temperatures above (Ta1), inside (Ta2), below (Ta3) the crop, and average leaf temperatures (TI), for plants with 100 % water supply - reference case- (A), 90 % (B), 80 % (C), 70 % (D), 60 % (E), and 50 % (F).

The effect of water reduction may be assessed by comparing the leaf and air temperatures inside the canopy for different irrigation regimes. For the well-watered conditions corresponding to the reference case, the leaf temperatures in the middle of the day were smaller than the adjacent air temperatures simulated inside the canopy at location 2 (Figure 1). The gap between the air temperatures inside the canopy and leaf temperatures reduced with the increase of water restriction until the leaf temperatures became greater than the neighboring air temperature as indicated in Figures 4A, 4B, 4C, 4D, 4E, and 4F. This last situation was considered as a stress sign for plant and it could affect its quality. González-Dugo et al. (2006), and Jackson and Center (1981) used the difference between the leaf temperatures and the adjacent air temperatures as indicator of plant water stress. The average difference between the leaf temperatures and air temperatures inside the canopy were calculated for each irrigation regimes and the following results were obtained:  $T_l - T_{a2} = -0.63$  K for the reference case,  $T_l - T_{a2} = -0.45$  K for 90 % water supply,  $T_l - T_{a2} = -0.21$  K for 80 %,  $T_l - T_{a2} = 0.04$  K for 70 %,  $T_l - T_{a2} = 0.35$  K for 60 %,  $T_l - T_{a2} = 0.70$  K for 50 %. With the decrease of the water supply, the amount of water evacuated by transpiration decreased until it becomes too low to cool the leaves as presented hereafter. The results of the average difference between  $T_l$  and  $T_{a2}$  indicated that when the water supply was reduced to more than 80 %  $T_l$  became greater than  $T_{a2}$ , involving plant water stress.

### **Humidity :**

The relative humidity was studied at three locations (Figure 1) as it was done for temperatures, and for the six irrigation regimes. The predicted time evolution of the relative humidity is plotted in Figures 5A, 5B, 5C, 5D, 5E, and 5F.

As expected, the relative humidity was higher inside the canopy than inside the air just above or below the canopy. This is particularly true for the reference case. When the restriction degree increased, the humidity decreased at the three locations because of the decrease of the transpiration rate (as previously explained) and the higher temperatures inside the canopy. The predicted humidity inside the canopy during daytime was smaller than the humidity above and below the canopy when the water supply was reduced to less than 60 % of the reference case.

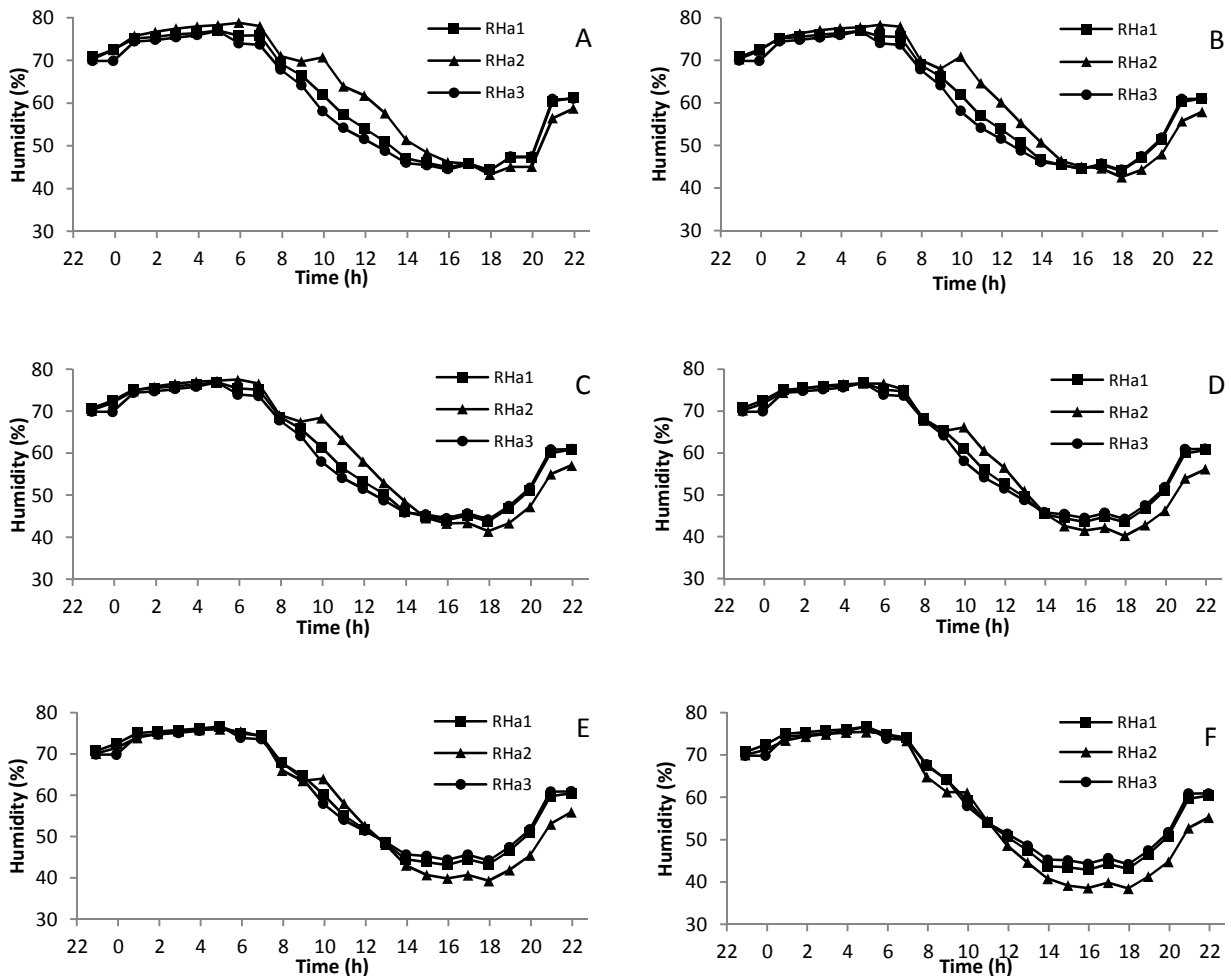


Figure 5 : Time evolution of simulated relative humidities above (RHa1), inside (RHa2), and below (RHa3) the crop, for plants with 100 % water supply -reference case- (A), 90 % (B), 80 % (C), 70 % (D), 60 % (E), and 50 % (F).

The RC calculated for each irrigation regime compared to the reference showed that the variation in humidity increased with the decreasing of water supply, the results found for RHa1 were:  $RC = 0.88\%$  for 90 % of water supply,  $RC = 0.98\%$  for 80 % and  $RC = 1.98\%$  for 50 % irrigation regime. For RHa2:  $RC = 1.15\%$  for 90 % of water supply,  $RC = 2.15\%$  for 80 % and  $RC = 6.65\%$  for 50 %. The RC for RHa3 remained almost constant  $\approx 0.88\%$  for all irrigation regimes because as explained in the temperature distribution analysis, at that location, the air humidity was mostly impacted by the air circulation coming from outside the

greenhouse. It is known that high humidity levels for instance could create favorable conditions for fungal diseases like botrytis (Bartzanas et al., 2004). Hence the reduction of water supply could offer partial solution to this problem.

### Stomatal resistance and transpiration rate:

The CFD model showed its ability to simulate the increase of the  $R_s$  with the decrease of water supply for both sunlit and shaded leaves as shown in Figures 6a, and 6b. Indeed, water restriction directly impacted the stomatal closure, and consequently plant transpiration. The minimal stomatal resistance found for each irrigation regimes were :  $R_{sc}$  shaded leaves  $R_{sc}=194 \text{ s m}^{-1}$  and  $R_s$  sunlit leaves  $R_s=68 \text{ s m}^{-1}$  for 100 % water supply,  $R_{sc}=250 \text{ s m}^{-1}$  and  $R_s=88 \text{ s m}^{-1}$  for 90 %,  $R_{sc}=360 \text{ s m}^{-1}$  and  $R_s=93 \text{ s m}^{-1}$  for 80 %,  $R_{sc}=537 \text{ s m}^{-1}$  and  $R_s=123 \text{ s m}^{-1}$  for 70 %,  $R_{sc}=883 \text{ s m}^{-1}$  and  $R_s=228 \text{ s m}^{-1}$  for 60 %,  $R_{sc}=1710 \text{ s m}^{-1}$  and  $R_s=566 \text{ s m}^{-1}$  for 50 % .

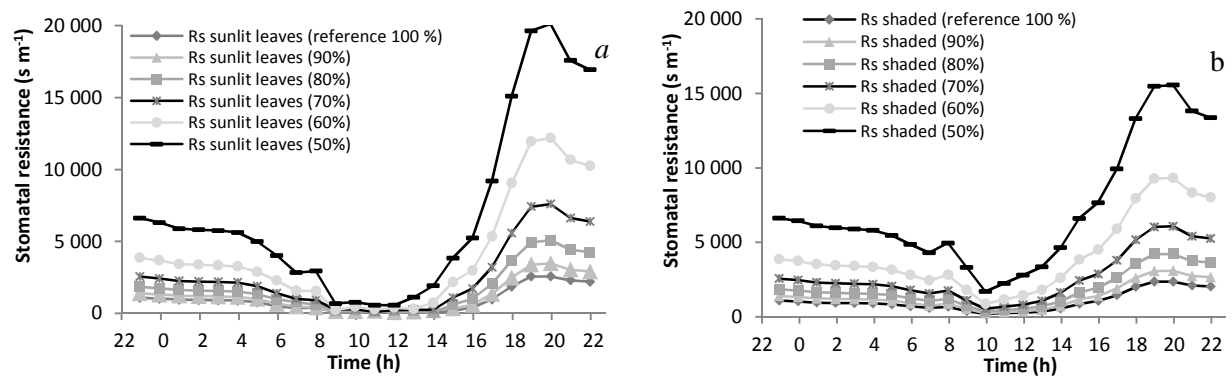


Figure 6 : Time evolution of simulated stomatal resistance of sunlit (a) and shaded leaves (b) for plants with 100 % water supply - reference case- (A), 90 % (B), 80 % (C), 70 % (D), 60 % (E), and 50 % (F).

Results clearly point out the impact of the water regime on  $R_s$ . They show that the stomatal resistance increased when the peat matric potential decreased significantly following a reduction of the water supply (Figure 7).

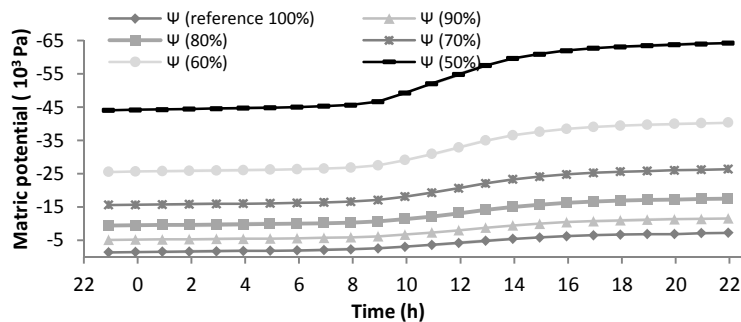


Figure 7 : Time evolution of simulated growing media matric potential for plants with 100 % water supply - reference case- , 90 % , 80 % , 70 % , 60 % , and 50 % .

Indeed, the stomatal resistance increased to limit the plant transpiration when the growing media matric potential decreased, meaning that the extraction of available water from the substrate became more difficult (Verhoef and Egea, 2014). The amount of water into the growing media decreased simultaneously with the amount of water lost from transpiration by plants. As shown in Figure 7 the most important decrease of the growing media matric potential for a given irrigation regime was obtained at daytime when the transpiration rate was high (as explained below). The matric potential was not important until 80% irrigation regime compared to the reference with  $RC = 8.87 \text{ kPa}$  while  $RC$  reached  $49 \text{ kPa}$  for 50 % of water supply. The stomatal resistance was almost in the same range [ $68\text{-}1070 \text{ s m}^{-1}$ ] for the different irrigation regimes once the soil water potential was higher than  $-10 \text{ kPa}$  (Figures 6a, 6b and 7). The predicted distribution of the plant transpiration rate for different irrigation regimes is presented in Figures 8. The results show that the transpiration rate decreased when decreasing the water supply. Irrigation scenarios from the reference (100 %) to 80 % of water supply had a little impact on plant transpiration. Differences appeared when the water supply was reduced to 70, 60, or 50 %. The calculated  $RC$  and cumulated transpiration ratio (CTR) between a given irrigation scenario and the reference led to results:  $RC = 4.11 \text{ W m}^{-2}$  and  $CTR = 90.36 \%$  for 90 % water supply,  $RC = 8.64 \text{ W m}^{-2}$  and  $CTR = 79.97 \%$  for 80 %,  $RC = 14.18 \text{ W m}^{-2}$  and  $CTR = 67.67 \%$  for 70 %,  $RC = 20.77 \text{ W m}^{-2}$  and  $CTR = 53.34 \%$  for 60 %,  $RC = 28.64 \text{ W m}^{-2}$  and  $CTR = 37.10$  for 50 %.

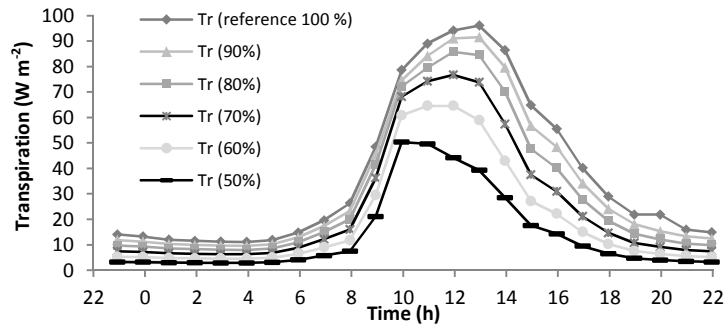


Figure 8: Time evolution of simulated transpiration rates for plants with 100 % water supply - reference case- , 90 % , 80 % , 70 % , 60 % ,and 50 %.

Simulations disclosed heterogeneities of the stomatal resistance and transpiration rate distributions for different irrigation regimes inside the canopy mostly from the top to the bottom of the canopy as shown in Figures 9c, 9d, 9e, 10c, 10d and 10e. This was mainly due to the variation of the global radiation and relative humidity distribution inside the canopy.

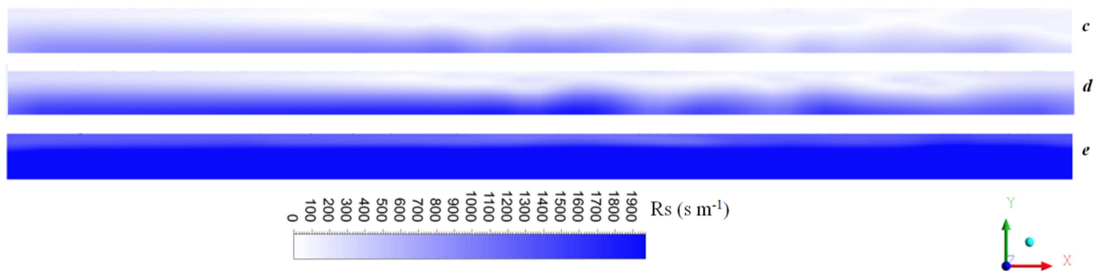


Figure 9: Simulated distribution of the stomatal resistance ( $s\ m^{-1}$ ) inside the crop at 1 pm on 18<sup>th</sup> June 2014, for plants with 100 % water supply (c), 80 % (d), and 50 % (e).

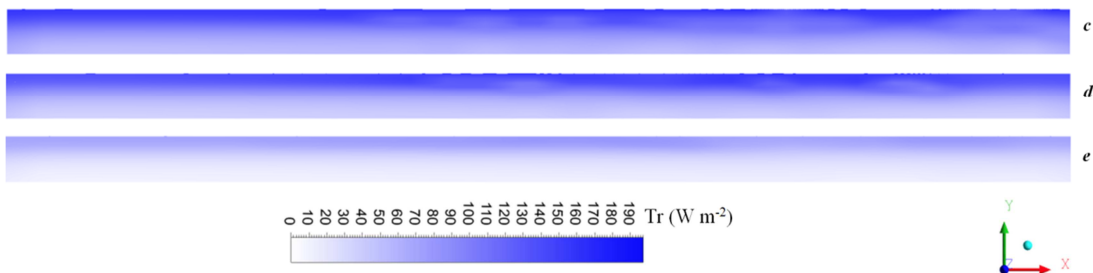


Figure 9: Simulated distribution of the crop transpiration rate ( $W\ m^{-2}$ ) at 1 pm on 18<sup>th</sup> June 2014 for plants under 100 % water supply (c), 80 % (d), and 50 % (e).



The simulated stomatal resistance of the lower leaves was higher than that of the upper ones for the different water regimes as indicated in Figures 9c, 9d, and 9e, which is not surprising. Indeed the global radiation was much higher in the upper part of the canopy. The distribution of transpiration rate was also affected by the heterogeneous distribution of  $R_s$ . The lowest leaves of the crop had the lowest transpiration rate. Conversely, the highest values of the transpiration rate were simulated at the top of the crop (Figures 10c, 10d, and 10e). The stomata resistance and transpiration distributions were almost the same for the reference case (Figures 9c and 10c) and 80 % of water supply (Figures 9d and 10d), but for 50 % water supply scenario (Figures 9e, and 10e) distributions were very different from the reference case with higher  $R_s$  and lower  $Tr$ .

### Conclusions

In this study, the effect of six water regimes on plants and microclimate under greenhouse was studied. An unsteady CFD model, combining a radiative submodel together with a crop submodel taking account of the water balance in the substrate-plant-atmosphere continuum was used. It was validated in a previous study.

The CFD model showed that the air temperatures, the relative humidities around and inside the canopy, the leaf temperatures, the growing media matric potentials, the stomatal resistances, and the transpiration rates were impacted by the different irrigation regimes. The simulations showed that the air temperatures and the leaf temperatures increased with the decrease of water supply on contrary to relative humidities which decreased. As expected, the growing media matric potential decreased with the reduction of water supply, the stomatal resistance was impacted by this decrease and became higher. As a consequence of the increase of the stomatal resistance, the transpiration decreased with the reduction of water supply. The CFD simulations could be helpful to define the best irrigation regime that makes it possible to keep almost the same microclimate as for the well-watered conditions (thus maintaining a priori a good quality of plants) together with the use of a less amount of water for irrigation. The simulation showed that the use of 80 % of water supply compared to 100 % did not significantly impact the microclimate distributions (in particular in terms of difference between the leaf temperatures and the adjacent air temperatures and also in terms of rate of

transpiration). To warranty good conditions for the plant and avoid stomatal closure (which would reduce photosynthesis activity) the leaf temperatures should remain colder than the adjacent air temperatures during daytime. From that point of view, the scenario with 80 % water supply appears to be a good compromise. Using 80% of water instead of 100 % makes it possible to save 0.13 l per container and per day. Moreover, the reduction of water supply also help reducing the humidity and could limit problems such as fungal diseases or moisture development. The next step will consist in modelling microclimate and transpiration for different irrigation regimes by taking into account the whole domain of greenhouse.

### References

- Bartzanas, T., Boulard, T., Kittas, C., 2004. Effect of Vent Arrangement on Windward Ventilation of a Tunnel Greenhouse. *Biosyst. Eng.* 88, 479–490. doi:10.1016/j.biosystemseng.2003.10.006
- Bligh, G.E., 1997. Interactions between the atmosphere and the earth. *Géotechnique* 47, 715–767.
- Bouhoun Ali, H., Bournet, P.E., Cannavo, P., Chantoiseau, E., 2016. CFD simulation of greenhouse microclimate and crop transpiration under water restriction. *Agric. Eng. CIGR*. Submitted.
- Boulard, T., Wang, S., 2002. Experimental and numerical studies on the heterogeneity of crop transpiration in a plastic tunnel. *Comput. Electron. Agric.* 34, 173–190. doi:10.1016/S0168-1699(01)00186-7
- Bournet, P.E., Ould Khaoua, S.A., Boulard, T., 2007. Numerical prediction of the effect of vent arrangements on the ventilation and energy transfer in a multi-span glasshouse using a bi-band radiation model. *Biosyst. Eng.* 98, 224–234. doi:10.1016/j.biosystemseng.2007.06.007
- Gerosa, G., Mereu, S., Finco, A., Marzuoli, R., 2012. Stomatal Conductance Modeling to Estimate the Evapotranspiration of Natural and Agricultural Ecosystems, in: *Evapotranspiration - Remote Sensing and Modeling*. Ayse Irmak.
- González-Dugo, M.P., Moran, M.S., Mateos, L., Bryant, R., 2006. Canopy temperature variability as an indicator of crop water stress severity. *Irrig. Sci.* 24, 233–240.

- Jackson, R.D., Center, L.B.J.S., 1981. Canopy temperature as a crop water stress indicator.
- Jarvis, P.G., 1976. The Interpretation of the Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in the Field. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 273, 593–610. doi:10.1098/rstb.1976.0035
- Kichah, A., Bournet, P.-E., Migeon, C., Boulard, T., 2012. Corrigendum to “Measurement and CFD simulation of microclimate characteristics and transpiration of an Impatiens pot plant crop in a greenhouse” *Biosyst. Eng.* 112, 22-34. doi:10.1016/j.biosystemseng.2012.04.006
- Majdoubi, H., Boulard, T., Fatnassi, H., Bouirden, L., 2009. Airflow and microclimate patterns in a one-hectare Canary type greenhouse: An experimental and CFD assisted study. *Agric. For. Meteorol.* 149, 1050–1062. doi:10.1016/j.agrformet.2009.01.002.
- Monteith, J.L., 1977. Resistance of a partially wet canopy: Whose equation fails? *Bound. Layer Meteorol* 12, 375–383.
- Monteith, J.L., 1973. *Principles of environmental physics.* Edward Arnold, London.
- van Genuchten, M.T., 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44, 892–898.
- Verhoef, A., Egea, G., 2014. Modeling plant transpiration under limited soil water: Comparison of different plant and soil hydraulic parameterizations and preliminary implications for their use in land surface models. *Agric. For. Meteorol.* 191, 22–32. doi:10.1016/j.agrformet.2014.02.009.



---

**Annexe 10 : Stomatal resistance modelling under water restriction conditions by means of design of experiments: Comparison with the Jarvis method**

**Article présenté au congrès Hortimodel 2016 à Avignon, France (poster).**

---

H. Bouhoun Ali<sup>4</sup>, P.E. Bournet, P. Cannavo, and E.Chantoiseau

Agrocampus Ouest, UP EPHor Environmental Physics and Horticulture Research Unit, F-49045 Angers, France.

**Abstract**

In greenhouses, reducing water consumption by increasing water efficiency is of high interest. Water need is linked to the plant transpiration, which itself depends on the stomatal resistance ( $R_s$ ). Up until now however, prediction of  $R_s$  through models was mainly conducted for well watered plants in open field conditions and very few models exist for greenhouse plants grown in pots. The aim of this work was to develop a dynamic model of  $R_s$  based on the full factorial design FFD under water restriction conditions. Then, the model was validated and its performance was compared against the Jarvis model inside a greenhouse. The FFD is based on an optimization process to establish a polynomial relationship between  $R_s$  and the radiation, humidity and temperature. To implement the model, a set of experiments was conducted inside a 10 m<sup>2</sup> growth chamber equipped with Impatiens New Guinea planted in 0.74L-pots under well-watered condition.  $R_s$  was measured with a porometer and nine scenarios were tested. First the FFD model was implemented for well watered condition. Then it was adapted to calculate  $R_s$  under water restriction, through the introduction of a new multiplicative function depending on the growing media matric potential. Once these parameters had been determined, the obtained FFD model was validated against experimental data recorded inside a greenhouse Impatiens crop, and compared with the Jarvis model. The FFD showed its ability to correctly simulate  $R_s$  under water restriction conditions. Its

---

<sup>4</sup> E-mail: hacene.bouhounali@agrocampus-ouest.fr

main advantage is that just few data was enough to fit this model contrary to the Jarvis method and it provided even better results. Hence, it could be useful to accurately predict the evolution of transpiration.

**Keywords:** Stomatal conductance, transpiration, greenhouse, growth chamber, porometer, statistical model, climatic factors

### INTRODUCTION

At a time when ecological concerns are growing, a better management of water resources in the horticultural sector appears to be necessary to remain competitive. Up to now, the question of an optimal control of irrigation for ornamental crops grown under greenhouses has not been investigated to the same extent as it has been for open field crops.

The control of irrigation is based on a representative model of the stomata behaviour. Stomata opening and closing can be assessed through the evolution of the stomatal resistance ( $R_s$ ). Modelling  $R_s$  for open field conditions was extensively undertaken over the past 50 years with the help of new sensors that made it possible the direct measurement of  $R_s$ , such as porometers and gas exchange analysers (Damour et al., 2010). Almost all models of  $R_s$  for open field were deduced from two seminal works by Jarvis (1976) and Ball et al. (1987) but very few models exist for plant cultivated in containers under greenhouse conditions and/or under water restriction. The most commonly used model to predict  $R_s$  is the multiplicative model of Jarvis (Yu et al., 1998). A major limitation of the Jarvis model however is the number of input data required to get acceptable accuracy. For example, considering an Impatiens crop Sourgnès et al. (2015) used more than 180  $R_s$  measurements to get a sufficient dataset to reach a correct prediction of  $R_s$ , while Wei et al. (2013) used 992 measurements for wheat plant.

Given the above-mentioned limitations of the Jarvis approach, it appeared relevant to identify and test an alternative modelling approach. In this prospect, a method based on the design of experiments (DOE), developed by Box and Wilson (1951) was implemented. DOE is a set of mathematical and statistical techniques that use a limited number of experiments to describe the relationships between a set of variables (Montgomery, 2008).

The aim of this work was to develop a statistical model of  $R_s$  based on a commonly used DOE design, namely the full factorial design (FFD) method (Lundstedt et al., 1998) to estimate  $R_s$ . The main factors impacting  $R_s$  were first identified for well watered conditions: global radiation, vapour pressure (or relative humidity, and air temperature) (Damour et al., 2010). Secondly, under water restriction conditions, a correction factor expressing the water status of the soil or plant was introduced in the  $R_s$  model following the procedure described by Li et al (2012).

## MATERIALS AND METHODS

### Experimental setup

The experiments took place in Angers (47° 28' N, 0° 33' E), in north-western France in 2014. A 10 m<sup>2</sup> (5 m x 2 m) growth chamber was used to collect data for calibrating  $R_s$  with the FFD model because it made it possible to control the climatic factors (radiation, humidity, temperature) within a range that replicated natural conditions. Inside the growth chamber, four 16-week-old potted Impatiens plants (Novae-Guinea, cv. 'Sonic Scarlet') initially grown under greenhouse conditions were used. The experiments inside the growth chamber were systematically performed in the morning to keep the same conditions for the different scenarios, and the plants were irrigated once before starting the experiment. The plants came from the greenhouse described hereafter.

Then, validation experiments were conducted inside a 100 m<sup>2</sup> glasshouse compartment located in Angers (47° 28' N, 0° 33' E) in north-western France. Experiments were carried out during 16 weeks from March 26<sup>th</sup> to July 20<sup>th</sup>, 2014 with Impatiens (Novae-Guinea, cv. 'Sonic Scarlet') as plant model. Young Impatiens plants were potted in 0.74 L containers (8.7 cm height) filled in with fine peat with homogeneous peat bulk density (i.e. 0.12 g cm<sup>-3</sup>). Plants were equally distributed on four shelves with an initial density of 28 plants per m<sup>2</sup> (18 m<sup>2</sup> total area). During the experiment, the plant density was decreased to favour plant growth, but insuring that plants covered entirely the shelves (final density of 15 plants per m<sup>2</sup>). Plants were irrigated by periodically flooding with a nutrient solution, and flowers were regularly removed. For the purpose of the study, irrigation was periodically stopped on one shelf until

plants evidenced water stress visual signs. For the plants on the three other shelves, well watered conditions were applied with water potential in peat kept higher than -2 kPa. In order to avoid excessive temperatures, a shading screen was used and the roof vents were fully open as soon as external temperatures exceeded 20°C.

### Climate and stomatal resistance measurements

Inside the growth chamber, global radiation above the canopy ( $rg$ ) was measured by a radiometer (CNR1, Kipp&Zonen, Delft, The Netherlands,  $\pm 10\%$ ). Temperature ( $t$ ) and relative humidity ( $rh$ ) of the air above the canopy were measured by shielded and ventilated sensors (Vaisala HMP45C, Campbell Scientific Ltd., Antony, France, accuracy  $\pm 0.1\text{ }^\circ\text{C}$  for  $t$  and  $\pm 2\%$  for  $rh$ ) (Figure 1.A). All these sensors were connected to a computer to record the values of the different factors simultaneously. Stomatal resistance of the upper leaves was measured using a porometer (AP4, Delta-T Device, United Kingdom). The accuracy of this device was  $\pm 20\text{ s m}^{-1}$  for  $R_s$  in the  $[20-40\text{ s m}^{-1}]$  range, and  $\pm 10\%$  in the  $[50-4000\text{ s m}^{-1}]$  range. Five measurements were taken from green, young, healthy, fully expanded leaves in four pots for each scenario. Measurements were made after stabilizing the chamber climate, i.e. one hour after changing the climatic set points.

For the other part of the experiment inside the greenhouse, global radiation, relative humidity and temperature were measured on one of the four shelves bearing the plants. The same sensors were used as the ones used inside the growth chamber (Figure 1.B). Peat matric potential ( $\Psi_{\text{soil}}$ , kPa) was measured at the middle height of ten containers with tensiometers (SDEC 1300, France). Among them, four were placed in the well watered condition shelf and the six others were used in the water-restricted shelf. All the factors of the air above the canopy and the peat matric potential were recorded every 3 seconds and averaged online over 10 minutes periods with a data logger system (CR5000, Campbell Scientific Ltd., Antony, France).  $R_s$  was measured on the upper part of the canopy considering five sunlit leaves from different plants and for each water condition. Measurements were replicated every half hour from 8:00 am to 8:00 pm in weeks 10, 11, 12, 14, and 16 after re-potting.



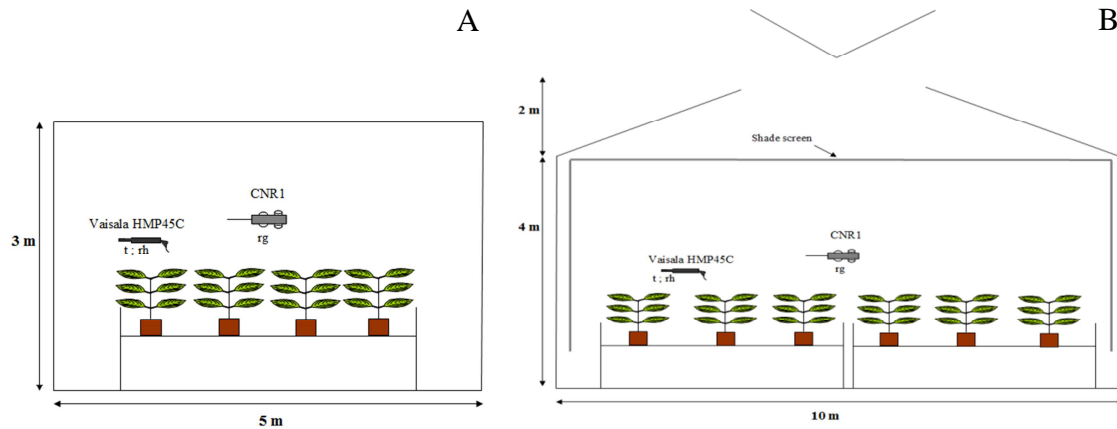


Figure 1. Experimental device in the growth chamber (A) and in the greenhouse (B).

## MODELLING METHODOLOGY

### Statistical model (FFD) of Stomatal resistance

FFD is a collection of mathematical and statistical techniques which uses a sequence of designed experiments to obtain an optimal response. In the present case, FFD was applied to estimate the response of  $R_s$  to the variation of climatic factors. Three factors were chosen (global radiation, relative humidity and temperature) and each factor had two levels. The  $2^3$  FFD was chosen by considering the time required to perform this experiment and a center point was added to take account of the non-linear relationships between the response and factors. These non-linear relationships were evidenced in previous works conducted inside a greenhouse for cucumber, chrysanthemum, tulip, and lilium (Li et al., 2012). For each factor the maximum and minimum value were fixed by considering the growth chamber operating limits together with real conditions observed inside the greenhouse: the global radiation varied within the range  $\in [0-150] \text{ W m}^{-2}$ , humidity  $\in [55-75] \%$  and temperature  $\in [15-26] \text{ }^\circ\text{C}$ . In order to simplify the calculation, it was appropriate to use coded variables with an interval  $[-1, 1]$ , therefore 0 was in the middle of the design. The conversion of the original variables ( $rg$ ,  $rh$ ,  $t$ ) to the coded variables ( $RG$ ,  $RH$ ,  $T$ ) and vice versa was given by the following formula (Equation 1):

$$A = \frac{a_0 - a}{\text{step}} \text{ with } a_0 = \frac{a_{\max} + a_{\min}}{2} \text{ and } \text{step} = \frac{a_{\max} - a_{\min}}{2} \quad (1)$$

Where A is the coded variable corresponding to a as the original variable.

A non-linear mathematical model was used to estimate the response of  $R_s$  to the variations of the climatic factors. This model was deduced from the original model of  $2^3$  FFD given in Equation (2).

$$R_s = a_0 + b_1.RG + b_2.RH + b_3.T + b_{12}.RG.RH + b_{13}.RG.T + b_{23}.RH.T + b_{123}.RG.RH.T \quad (2)$$

Where RG is the coded global radiation, RH, the coded relative humidity, and T, the coded air temperature. This polynomial model contains a number of unknown coefficients ( $a_0, b_1, b_2, b_3, b_{11}, b_{12}, b_{13}, b_{23},$  and  $b_{123}$ ) to be determined by specific experiments. These experiments were based on different scenarios specified by the  $2^3$  FFD with one center point, meaning 9 different scenarios (Table 1).

Table 1. Scenarios and input data.

Scenario (rg, rh, t)	Mean $R_s$ value ( $s\ m^{-1}$ ) N° of Repetitions n=5	Standard deviation ( $s\ m^{-1}$ )
150 $W\ m^{-2}$ , 55%, 15°C	267	36
150 $W\ m^{-2}$ , 55%, 26°C	91	10
150 $W\ m^{-2}$ , 75%, 15°C	254	31
150 $W\ m^{-2}$ , 75%, 26°C	102	38
45 $W\ m^{-2}$ , 60%, 22°C	265	18
0 $W\ m^{-2}$ , 55%, 15°C	1434	315
0 $W\ m^{-2}$ , 55%, 26°C	1410	381
0 $W\ m^{-2}$ , 75%, 15°C	848	33
0 $W\ m^{-2}$ , 75%, 26°C	885	189

To implement the FFD model, the  $Jmp^{TM}$  software was used with the input data obtained from experiments conducted inside a growth chamber.

### Stress function

Nikolov et al., (1995) proposed Equation (3) to express the effect of reduction in the water amount in the soil on  $R_s$  response.

$$f(\Psi_{\text{soil}}) = 1 + \left(\frac{\Psi_{\text{soil}}}{\Psi_1}\right)^c \quad (3)$$

Where  $\Psi_{\text{soil}}$  (kPa) is the substrate water potential,  $\Psi_1$ (kPa) is the matric water potential for which  $R_s$  under water restriction is twice the stomatal resistance under well-watered condition. Parameters  $c$  and  $\Psi_1$  are to be determined using linear regressions for instance. Equation (3) was finally multiplied by the  $R_s$  equation obtained for well watered condition to get the model of stomatal resistance under restriction condition, following Li et al. (2012).

## RESULTS AND DISCUSSION

### Stomatal resistance modelling under growth chamber conditions

Table 1 shows the experimental design matrix with the 9 scenarios considered to provide the input information for FFD model by Equation (2). This table also provides the mean value of  $R_s$  measured for each scenario and the corresponding standard deviation.

The experiments were carried out in order to determine the effect of the climatic factors on the  $R_s$  response. According to Baille et al. (1994), at least during day time conditions for high radiation, the stomatal resistance is low. On the contrary, when radiation is low,  $R_s$  increases. These results were confirmed, as well as the fact that the effect of radiation on  $R_s$  was the most significant one. For instance, a simple comparison between scenarios (150 W m<sup>-2</sup>, 55 %, 15 °C) and (0 W m<sup>-2</sup>, 55 %, 15 °C) showed that  $R_s$  increased from 267 to 1410 s m<sup>-1</sup> only in response to a variation of  $r_g$ . These results therefore confirm that the stomatal resistance decreased with increasing air relative humidity (Damour et al., 2010). They also explain why under night time conditions (i.e. for zero radiation), the effect of humidity on  $R_s$  appeared to be prevalent, as shown by comparing scenarios (0 W m<sup>-2</sup>, 55 %, 15 °C) and (0 W m<sup>-2</sup>, 75 %, 15 °C), where  $R_s$  decreased from 1434 to 848 s m<sup>-1</sup>.

The regression equation based on the first-order model with three factors and their interaction terms Equation (4) confirmed that RG was the most important factor with the highest coefficient in the model.

$$R_s = 590 - 454.RG - 104.RH - 58.T + 124.RG.RH - 35.RG.T + 20.RH.T - 8.RG.RH.T \quad (4)$$

With  $RG = (rg - 75)/75$ ;  $Rh = (rh - 65)/10$ ;  $T = (t - 20.5)/5.5$  in the present case

The accuracy of the model given by Equation (4) was assessed from the coefficient of determination ( $r^2$ ). A value of  $r^2 = 0.83$  was obtained. In a second step, two improvements of the model were undertaken in order to increase its accuracy. The first modification was to consider that the highest order multiplicative interaction term (RG.RH.T) was negligible (Myers, 1995). This term was replaced by  $RG^2$  because RG represented the most important parameter impacting the  $R_s$  response. The second modification was suggested after several sensitivity tests showing that the intercept  $= 590 \text{ s m}^{-1}$  would be better replaced by a  $RG^3$  term. Taking account of these modifications, a new model (Equation 5) was obtained with  $r^2 = 0.99$  far better than the model given by Equation (4).

$$R_s = -115.RG - 139.RH - 39.T + 139.RG.RH + 43.RG.T + 11.RH.T + 661.RG^2 - 368.RG^3 \quad (5)$$

This model therefore evidenced that RG was the prevailing parameter influencing the  $R_s$  response with higher coefficients, while RH and T appeared to have a lesser influence. Furthermore, it was evidenced that the temperature played a non-significant role on stomatal resistance as reported also by Misson et al. (2004) for pine plant.

Once the model was established for well watered conditions (Equation 5), it was adapted to water restriction cases by fitting the parameters of function  $f(\psi_{soil})$  (Equation 3) on measurements undertaken for water restricted plants on weeks 10, 11, 14 and 16.

The results of the calibration of  $f(\psi_{soil})$  (Figure 2) gave:  $\Psi_1 = -11.41 \text{ kPa}$  and  $c = 1.05$ . It can be seen that the agreement between calculated and measured values was quite low with  $r^2 = 0.47$ . It should be noted that most of the error occurs for the largest values of the stomatal resistance ratio, mainly recorded at night. Conversely, the fit of function  $f(\psi_{soil})$  for the diurnal ratio of  $R_s$  measurements (corresponding to the low values of the stomatal resistance

ratio) was quite good (Figure.2). It is worth noticing that the transpiration rate is mainly sensitive to low values of  $R_s$  which explains why we focused on the diurnal  $R_s$  ratio. Moreover, it must be stated  $R_s$  depends rather on the leaf water potential (Jarvis, 1976) than on the soil water potential. In the present case, the peat water potential was used for the curve adjustment because technically it was easier to assess than the leaf water potential. In addition, in general, both potentials vary in the same manner all day long. It may happen however that during summer days the plants cannot absorb water from the substrate fast enough to balance their transpiration. The leaf water potential thus decreases rapidly and the proportionality with soil potential is lost (Tuzet et al., 2003). Such conditions lead to a closure of the stomata which is not taken into account by the present model.

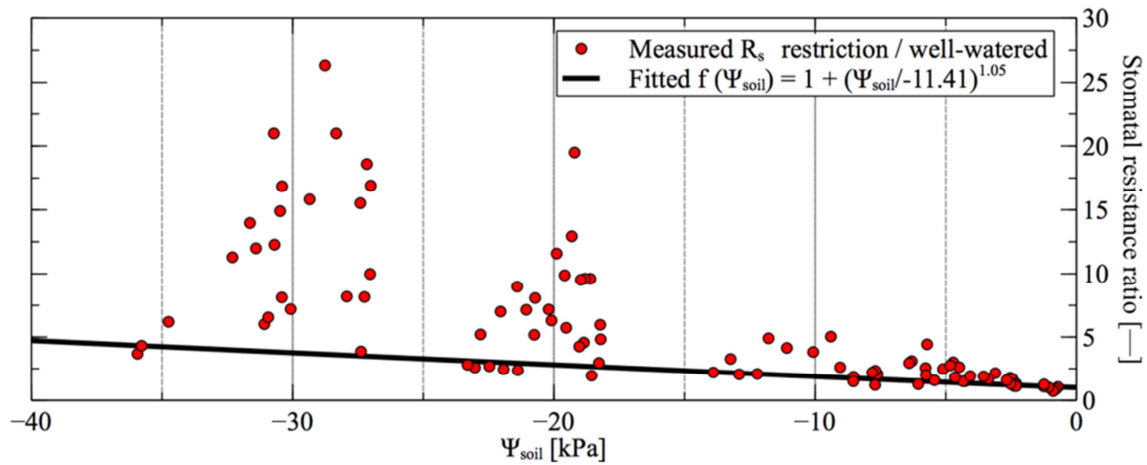


Figure 2. Fitted function of stress  $f(\Psi_{soil})$

The statistical model of  $R_s$  obtained for restriction conditions is given by Equation (6).

$$R_s = (-115. RG - 139. RH - 39. T + 139. RG. RH + 43. RG. T + 11. RH. T + 661. RG^2 - 368. RG^3) \cdot \left( 1 + \left( \frac{\Psi_{soil}}{-11.41} \right)^{1.05} \right) \quad (6)$$

To check the accuracy of the statistical FFD model, its performance was compared with the performance of the Jarvis model, the most commonly used model to predict  $R_s$ . Sourignes et al. (2015) determined the parameters of the Jarvis model for a well-watered *Impatiens* crop

almost 20 years after Baille et al.,(1994). The calibration of the Jarvis model in Baille et al., (1994) study was based on indirect measurements of  $R_s$  (i.e. from the evapotranspiration). In contrast, Sourignes et al., (2015) conducted direct measurements of  $R_s$  with a porometer. The parameters were assessed from all the data collected over 3 weeks (10, 11, and 12 after planting). 180 direct measurements of  $R_s$  for sunlit leaves with a porometer were used. Then as we did it with the FFD model of  $R_s$ , the Jarvis model developed by Sourignes et al., (2015) was multiplied by the stress function given by Equation 3 to account for water restriction conditions, leading to the model given by Equation (7):

$$R_s = 48.1 \frac{(316.67+rg)}{8.87+rg} (1 - 0.15(VPD - 2.84)^2) \left(1 + \left(\frac{\psi_{soil}}{-11.41}\right)^{1.05}\right) \quad (7)$$

Where  $rg$  ( $W m^{-2}$ ) is the global radiation measured above the canopy and  $VPD$  (kPa), is the vapour pressure deficit deduced from humidity and temperature measurements above the canopy.

The FFD statistical and Jarvis models (Equation 6 and 7) were validated against data collected for week 16 under water restriction (Figure 3). Both models were applied to the sunlit leaves and showed their ability to simulate  $R_s$  for water restriction conditions. The performances of the two models were also assessed through a linear regression operated between measured and estimated  $R_s$  values on week 16 after planting, and their accuracy were compared (Figure 4)

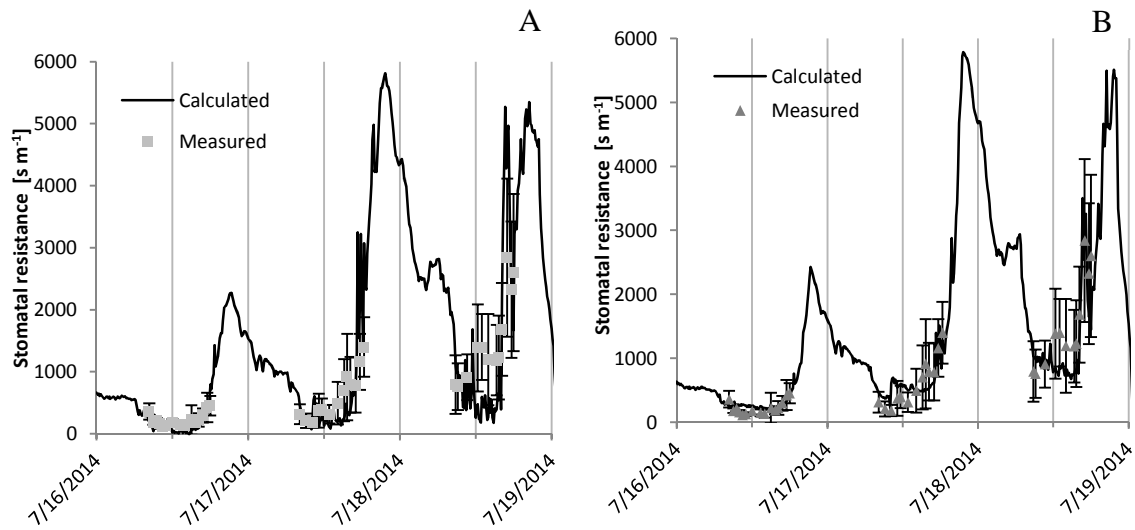


Figure 3. Measured and calculated  $R_s$  for plants under water restriction with FFD statistical model (A) and Jarvis model (B) 16 weeks after plantation.

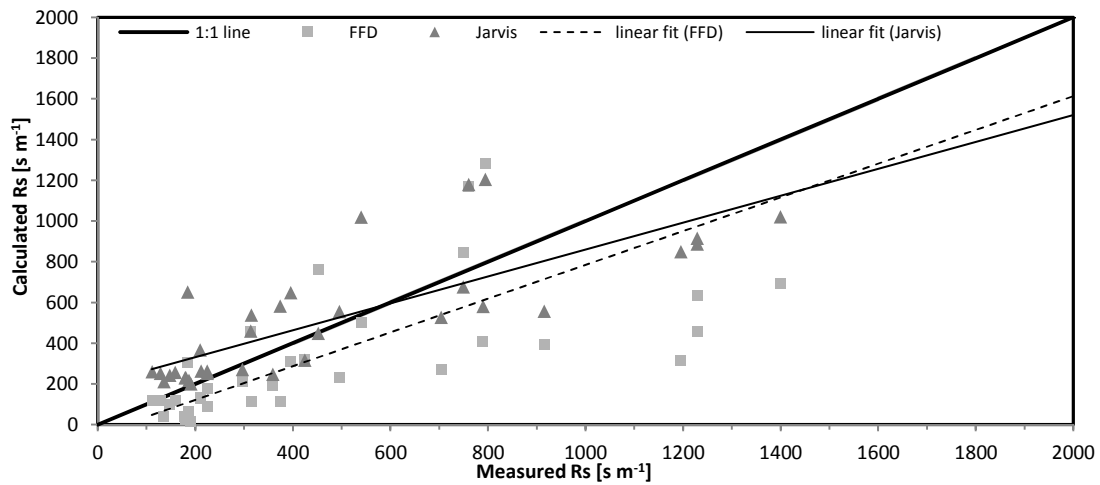


Figure 4. Comparison of the performances of the FFD and Jarvis models for estimating  $R_s$  on week 16 for plants under water restriction; the lines correspond to the linear regression between calculated and measured  $R_s$ , the linear regression is given by these equations:  $y = 1.14x - 174.19$  with  $r^2=0.65$  for FFD model, and  $y = 0.69x + 156.45$  with  $r^2=0.81$  for Jarvis model.

Based on the  $r^2$  and RMSE calculated for week 16 (Figure 3), a good agreement was generally obtained between measured and predicted  $R_s$  given by both models, the accuracy of the two models was almost similar. With  $r^2=0.65$  and  $RMSE=308 \text{ s m}^{-1}$  for the FFD model (Figure 3.A), and  $r^2=0.81$ ,  $RMSE=559 \text{ s m}^{-1}$  for the Jarvis model (Figure 3.B). The FFD and Jarvis models showed that during most of the day, the agreement between measured and calculated data was quite good.

The performances of the two models were also assessed through a linear regression operated between measured and estimated  $R_s$  values on week 16 after planting. On week 16 (Figure 4) with the FFD model, the slope of the linear regression was close to 1 (slope of 1.14,  $r^2 = 0.65$ ), confirming the good agreement between measured and estimated  $R_s$  values. However, with the Jarvis model results were less accurate than results found by FFD model (slope of 0.69,  $r^2 = 0.81$ ). The FFD model thus provided promising perspectives for estimating  $R_s$ .

## CONCLUSIONS

In this study, a statistical method based on Full Factorial Design was implemented to model the stomatal resistance in response to variations of the climatic conditions. To reach this goal, nine scenarios were established inside a growth chamber under controlled climatic conditions. In the second stage, a multiplicative function describing the stomatal behaviour according to the soil water potential was developed. This function was added to the FFD model to be adapted to restriction water condition. To analyze the performance of the FFD model with regards to other modelling techniques, it was compared with the most commonly used Jarvis (1976) model.

The validation against data recorded inside greenhouse showed good agreement with a slight advantage to the statistical FFD model.

Nevertheless, the accuracy of  $R_s$  model could still be increased in order to get better prediction of the temporal evolution of  $R_s$  by including leaf water potential in the correction function. This improvement of  $R_s$  model would help get more accuracy for the hourly dynamic prediction of transpiration, and would be a powerful tool for precision horticulture.



**Literature cited**

- Baille, M., Baille, A., Laury, J.C., 1994b. Canopy surface resistances to water vapour transfer for nine greenhouse pot plant crops. *Sci. Hortic.* 57, 143–155. doi:10.1016/0304-4238(94)90042-6
- Ball, J.T., Woodrow, I., Berry, J., 1987. A Model Predicting Stomatal Conductance and its Contribution to the Control of Photosynthesis under Different Environmental Conditions, in: Biggins, J. (Ed.), *Progress in Photosynthesis Research*. Springer Netherlands, pp. 221–224.
- Box, W., Wilson, W., 1951. Central composite designs. *J R Stat Soc X111*, 1–35.
- Damour, G., Simonneau, T., Cochard, H., Urban, L., 2010. An overview of models of stomatal conductance at the leaf level. *Plant Cell Environ.* 33, 1419–1438. doi:10.1111/j.1365-3040.2010.02181.x
- Jarvis, P.G., 1976. The Interpretation of the Variations in Leaf Water Potential and Stomatal Conductance Found in Canopies in the Field. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* 273, 593–610. doi:10.1098/rstb.1976.0035
- Li, G., Lin, L., Dong, Y., An, D., Li, Y., Luo, W., Yin, X., Li, W., Shao, J., Zhou, Y., Dai, J., Chen, W., Zhao, C., 2012. Testing two models for the estimation of leaf stomatal conductance in four greenhouse crops cucumber, chrysanthemum, tulip and liliun. *Agric. For. Meteorol.* 165, 92–103. doi:10.1016/j.agrformet.2012.06.004
- Lundstedt, T., Seifert, E., Abramo, L., Thelin, B., Nyström, Å., Pettersen, J., Bergman, R., 1998. Experimental design and optimization. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 42, 3–40. doi:10.1016/S0169-7439(98)00065-3
- Misson, L., Panek, J.A., Goldstein, A.H., 2004. A comparison of three approaches to modeling leaf gas exchange in annually drought-stressed ponderosa pine forests. *Tree Physiol.* 24, 529–541.
- Montgomery, D.C., 2008. *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons.
- Nikolov, N.T., Massman, W.J., Schoettle, A.W., 1995. Coupling biochemical and biophysical processes at the leaf level: an equilibrium photosynthesis model for leaves of C3 plants. *Ecol. Model.* 80, 205–235. doi:10.1016/0304-3800(94)00072-P

- Sourgnès, M., Migeon, C., Bouhoun Ali, H., Bournet, P., Cannavo, P., Chantoiseau, E., 2015. Ability of multiplicative models to simulate stomatal resistance along plant growth : application to the New Guinea Impatiens grown in greenhouse. Acta Hort Press.
- Wei, Z., Liu, Y., Xu, D., Cai, J., Zhang, B., 2013. Application and comparison of winter wheat canopy resistance estimation models based on the scaling-up of leaf stomatal conductance. Chin. Sci. Bull. 58, 2909–2916. doi:10.1007/s11434-013-5858-3
- Yu, G.-R., Nakayama, K., Matsuoka, N., Kon, H., 1998. A combination model for estimating stomatal conductance of maize (*Zea mays* L.) leaves over a long term. Agric. For. Meteorol. 92, 9–28. doi:10.1016/S0168-1923(98)00087-2

**5.2.7 Annexe 11 : Code de la routine : UDFs (User Defined Function) pour modéliser l'impact du couvert végétal et faire le bilan hydrique dans le continuum substrat-plante**

```

#include "udf.h"
#include "sg.h"
#include "mem.h"
#include "surf.h"
#include "sg_disco.h"
#include "surf.h"
/*****

/* *****Initialisation du domaine *****

/*****

# define Tintial 290 /* Initialisation de la température dans le domaine */
# define FracEau 0.0094 /* Initialisation de fraction d'eau dans le domaine */

/*****
/***** Caractérisation de la végétation* *****
/*****

# define L 0.04 /* longueur caractéristique d'une feuille */
# define h 0.24 /* hauteur de la végétation */
# define LAIS 2.36 /* Leaf Area Index surfacique */
# define LAD 9.83 /*Leaf Area Index volumique */
# define teneurint 0.652 /*teneur en eau initiale dans le substrat cm3 cm-3 */
# define alpha 0.134 /* constante de l'équation de Van Genuchten */
# define N 1.469 /* constante de l'équation de Van Genuchten */
# define tetares 0.1 /* constante de l'équation de Van Genuchten */
# define tetasat 0.887 /* constante de l'équation de Van Genuchten */

# define lambda 0.0262 /* conductivité thermique de l'air W m-2 K-1*/

```

```

# define Visc 1.8e-5 /* viscosité dynamique de l'air kg s-1 m-1 */
# define Lv 2257000 /* chaleur latente de vaporisation J kg-1*/
# define Chp 1004 /* capacité thermique massique à pression constante de l'air */
# define rx 0.2 /* coefficient de relaxation */
# define Sigma 5.67e-8 /* constante de Stefan-Boltzmann W m-2K-4*/
# define zero 273.15 /* correspond à 0 °C */
# define gama 66e-3 /* gamma constante psychrométrique kPa K-1 */
# define nt 24 /* nombre de pas de temps */

/*****
/*****Source de température végétation (Flux chaleur sensible)*****/
/*****

DEFINE_SOURCE(T_interne0, cell, thread, dS, eqn)

{

real source ; int I, nb;

real RayAbs, RayAbs2, Qs, teta, delta1;

float Tinterne, delta_t, Humair, humrelat3;

float RA, Tambiant, DPV, f1, f2, f3, RS, newtemp, newtemp2,
Humfeuille, Humfeuille2, G, D, RT, Pv, Pvsat, delta; float phi1, phi2; Material
*m=THREAD_MATERIAL(thread);

real psi, pt;

/* on récupère la valeur de la température de l'air dans la maille C_T(cell,thread)*/

Tambiant=C_T(cell,thread);

/* on récupère la valeur de la température de la feuille stockée dans user defined memory 0*/

Tinterne=C_UDMI(cell,thread,0); /* C_UDMI(cell,thread,0) variable Tinterne*/

/* on récupère la valeur de la fraction massique avec C_YI(cell,thread,0);*/

```

```

Humair=C_YI(cell,thread,0);      /* C_YI(cell,thread,0) variable Humair*/

/* on récupère la valeur de l'humidité absolue de la feuille stockée dans user defined memory 1*/

Humfeuille=C_UDMI(cell,thread,1); /* C_UDMI(cell,thread,1) variable Humidité*/

Pv=C_UDMI(cell,thread,32);      /*pression de vapeur de l'air*/

Pvsat=C_UDMI(cell,thread,30);   /*pression de saturation à la température de feuille*/

D=C_UDMI(cell,thread,24);      /*pression de saturation à la température de l'air*/

Humfeuille2=C_UDMI(cell,thread,34); /*humidité relative de l'air*/

delta1=C_UDMI(cell,thread,17); /* constante intervenant dans le modèle de Penman*/

/*****
/***** résistance aérodynamique *****/
/*****/

RA=271;

/*****
/*****/
/*****/

Qs=(teneurint*740)-C_UDMI(cell,thread,69); /*quantité d'eau qui reste dans le sol en cm3; 740 cm3 le
voulume d'un pot*/

C_UDMI(cell,thread,70)=Qs;

teta=Qs/740; /*teneur en eau cm3 cm-3*/

C_UDMI(cell,thread,71)=teta;

psi=(-1/alpha)*(pow(pow((tetasat-tetares)/(teta-tetares),(N/(N-1)))-1,(1/N)));

C_UDMI(cell,thread,72)=psi;

```

```

/*****
/*****Calcul de la résistance stomatique *****/
/*****

G=C_STORAGE_R_XV(cell,thread,SV_DO_IRRAD,0); /*rayonnement incident sur la maille*/

C_UDMI(cell,thread,7)=G;

D=0.611*exp((17.25*(Tambient-zero))/(237.8+(Tambient-zero)));

f3=(1+pow(psi/-11.26,1.24));

C_UDMI(cell,thread,3)=f3;

C_UDMI(cell,thread,24)=D;

humrelat3=101.3*100*C_YI(cell,thread,0)/(D*(C_YI(cell,thread,0)+0.622)); /*humidité relative de
l'air */

C_UDMI(cell,thread,2)=humrelat3;

RS=f3*(-115*((G-75)/75)-139*((humrelat3-65)/10)-39*(((Tambient-273.15)-20.5))/5.5)+139*((G-
75)/75)*((humrelat3-65)/10)+11*((humrelat3-65)/10)*(((Tambient-273.15)-20.5))/5.5)+43*((G-
75)/75)*(((Tambient-273.15)-20.5))/5.5)+661*((G-75)/75)*((G-75)/75)-368*((G-75)/75)*((G-
75)/75)*((G-75)/75) ;

if (RS>0)

RS=f3*(-115*((G-75)/75)-139*((humrelat3-65)/10)-39*(((Tambient-273.15)-20.5))/5.5)+139*((G-
75)/75)*((humrelat3-65)/10)+11*((humrelat3-65)/10)*(((Tambient-273.15)-20.5))/5.5)+43*((G-
75)/75)*(((Tambient-273.15)-20.5))/5.5)+661*((G-75)/75)*((G-75)/75)-368*((G-75)/75)*((G-
75)/75)*((G-75)/75) ;

else RS=f3*100;

```

```

/*****

```

```

*****Calcul de la resistance totale* *****/

```

```

/*****

```

$$RT = RA+RS;$$

```

/*****

```

```

*****Calcul du coefficient phi1 *****/

```

```

/*****

```

$$\text{phi1} = C\_R(\text{cell}, \text{thread}) * \text{Chp}^2 * \text{LAD} / \text{RA};$$

```

/*****

```

```

*****Calcul de la température interne*****/

```

```

/*****

```

```

RayAbs=0;

```

```

/*Rayonnement absorbé dans la maille*/

```

```

for (nb=0; nb<sg_bee_gees; nb++)

```

```

{

```

```

real abs_coeff;

```

```

real refractive_index;

```

```

/* coefficient d'absorption en multibande */

```

```

if ((nb==0) && (C_UDMI(cell,thread,72)<=-10))

```

```

{

```

```

abs_coeff = 6;

```

```

}

```

```

else if ((nb==0) && (C_UDMI(cell,thread,72)>-10))

```

```

        {

abs_coeff = 9;

        }

else if (nb==1)

        {

abs_coeff = 0.0;

        }

RayAbs+=abs_coeff*C_DO_IRRAD(cell,thread,0); /*il y a une somme mais comme coefabs=0 cette
somme reste fictive juste pour faire la boucle */

        }

        C_UDMI(cell,thread,6)=RayAbs;

/*****
/*****Calcul de la température de feuilles à partir de l'équation de bilan*****/
/*****

newtemp2=Tambient+(RA/(2*C_R(cell,thread)*Chp*LAD))*(RayAbs-
(delta1*(RayAbs)+(2*C_R(cell,thread)*LAD*Chp*(D-Pv)/RA))/(delta1+2*gama*(1+RS/RA)));

C_UDMI(cell,thread,35)=newtemp2;

/*****
/*****Relaxation sur la température des feuilles*****/
/*****

Tinterne=(1-rx)*Tinterne+rx* newtemp2;

C_UDMI(cell,thread,0)= Tinterne;

phi2=Tinterne*phi1;

```



```

/* source term */

        source=phi2-phi1*C_T(cell,thread);

        C_UDMI(cell,thread,7)=source;

/* la dérivée du terme source par rapport à la température */

        dS[eqn] = -phi1;

    return source;

}

/*****
/***** Source de vapeur d'eau (Flux de transpiration) du couvert végétal *****/
/*****

DEFINE_SOURCE(vapeur_eau0, cell, thread, dS, eqn)

{real source, x[ND_ND];

int i,j,k, nb;

real RayAbs, tra, Qs, teta,delta1,penman;

float Tinterne, delta_t , Humair;

float RA, Tambiant,DPV, RS, newtemp, Humfeuille, G, D, RT;

float phi1, phi2, Pvsat, Newhum, WF, humrelat, humrelat2, humrelat3, Humfeuille2, Pv,
Humfeuilrelative, Newhum2;

real psi, pt;

{

/* on récupère la valeur de la température de l'air dans la maille C_T(cell,thread)*/

        Tambiant=C_T(cell,thread);

```

```

/* on récupère la valeur de la température de feuille stockée dans user defined memory 0*/

Tinterne=C_UDMI(cell,thread,0); /* C_UDMI(cell,thread,0) variable Tinterne*/

/* on récupère la valeur de la fraction massique avec C_YI(cell,thread,0);*/

Humair=C_YI(cell,thread,0); /* C_YI(cell,thread,0) variable Humair*/

/* on récupère la valeur de l'humidité absolue de la feuille stockée dans user defined memory 1 ceci
afin d'initialiser*/

Humfeuille=C_UDMI(cell,thread,1); /*C_UDMI(cell,thread,1) variable Humidite*/

/* on récupère la valeur de l'humidité absolue de la feuille stockée dans user defined memory 34 afin
d'initialiser*/

Humfeuille2=C_UDMI(cell,thread,34);

RayAbs=C_UDMI(cell,thread,6);

/*****
/*****Résistance aérodynamique *****/
/*****

RA=271;

/*****
/****Bilan hydrique et calcul du potentiel matriciel par le modèle de Van Genuchten *****/
/*****

Qs=(teneurint*740)-C_UDMI(cell,thread,45+nt); /*quantité d'eau qui reste dans le substrat en cm3;
740 cm3 le volume d'un pot*/

C_UDMI(cell,thread,70)=Qs;

teta=Qs/740; /* teneur en eau dans le substrat en cm3 cm-3*/

C_UDMI(cell,thread,71)=teta; /* on stocke la valeur de la teneur en eau dans le substrat */

```

```
psi=(-1/alpha)*(pow(pow((tetasat-tetares)/(teta-tetares),(N/(N-1))))-1,(1/N)));
```

```
C_UDMI(cell,thread,72)=psi; /* on stocke la valeur de potentiel matriciel du substrat */
```

```
/******
```

```
/******Calcul de la résistance stomatique* *****/
```

```
/******
```

```
G=C_STORAGE_R_XV(cell,thread,SV_DO_IRRAD,0);
```

```
C_UDMI(cell,thread,7)=G;
```

```
D=0.611*exp((17.25*(Tambient-zero))/(237.8+(Tambient-zero)));
```

```
f3=(1+pow(psi/-11.26,1.24)); /*fonction du stress */
```

```
C_UDMI(cell,thread,3)=f3;
```

```
C_UDMI(cell,thread,24)=D;
```

```
humrelat3=101.3*100*C_YI(cell,thread,0)/(D*(C_YI(cell,thread,0)+0.622));/*humidité relative de l'air */
```

```
C_UDMI(cell,thread,2)=humrelat3;
```

```
RS=f3*(-115*((G-75)/75)-139*((humrelat3-65)/10)-39*(((Tambient-273.15)-20.5)/5.5)+139*((G-75)/75)*((humrelat3-65)/10)+11*((humrelat3-65)/10)*(((Tambient-273.15)-20.5)/5.5)+43*((G-75)/75)*(((Tambient-273.15)-20.5)/5.5)+661*((G-75)/75)*((G-75)/75)-368*((G-75)/75)*((G-75)/75)*((G-75)/75);
```

```
if (RS>0)
```

```
RS=f3*(-115*((G-75)/75)-139*((humrelat3-65)/10)-39*(((Tambient-273.15)-20.5)/5.5)+139*((G-75)/75)*((humrelat3-65)/10)+11*((humrelat3-65)/10)*(((Tambient-273.15)-20.5)/5.5)+43*((G-75)/75)*(((Tambient-273.15)-20.5)/5.5)+661*((G-75)/75)*((G-75)/75)-368*((G-75)/75)*((G-75)/75)*((G-75)/75);
```

```

else RS=f3*100;

C_UDMI(cell,thread,5)=RS;

/*****
/***** Calcul de la résistance totale *****/
/*****

RT = RA+RS;

/*****
/***** Calcul de l'humidité *****/
/*****

Pvsat=0.611*exp((17.25*(Tinterne-zero))/(237.8+(Tinterne-zero)));

humrelat2=101.3*100*C_YI(cell,thread,0)/(D*(C_YI(cell,thread,0)+0.622));

C_UDMI(cell,thread,30)=Pvsat;

C_UDMI(cell,thread,31)=D;

Pv=((humrelat2)*D)/100;

C_UDMI(cell,thread,32)=Pv;

Newhum=0.622*Pvsat/(101.3-(Pvsat));

/* relaxation*/

Humfeuille=(1-rx)*Humfeuille+rx*Newhum;

C_UDMI(cell,thread,1)=Humfeuille;

/* Modèle de Penman Monteith utilisée dans la routine */

delta1=0.61112*4283.8/pow((Tambient-30.3),2)*exp((17.6*(Tambient-273))/(Tambient-30.03));

C_UDMI(cell,thread,17)=delta1;

```

```

C_UDMI(cell,thread,28)=(delta1*RayAbs*h+(2*C_R(cell,thread)*LAIS*Chp*(D-
Pv)/RA))/(delta1+2*gama*(1+RS/RA)); /*Flux de transpiration en W m-2*/

/* Apport du rayonnement dans le flux de transpiration */

C_UDMI(cell,thread,18)=delta1*RayAbs*h/(delta1+2*gama*(1+RS/RA));

/* Apport du déficit de pression de vapeur dans le flux de transpiration */

C_UDMI(cell,thread,19)=(2*C_R(cell,thread)*LAIS*Chp*(D-Pv)/RA)/(delta1+2*gama*(1+RS/RA));

penman=(1/C_R(cell,thread)*delta1*RayAbs+(2*LAD*Chp*(DPv)/RA))/(delta1+2*gama*(1+RS/RA
)); /*tr penman/densité */

/*****
/***** Calcul du cumul de transpiration pour le bilan d'eau *****/
/*****

pt=CURRENT_TIME;

for (i=0,j=44;i<=nt, j<=(44+nt);i++,j++)

    {

        if (pt==i*3600)

            {C_UDMI(cell,thread,j)=C_UDMI(cell,thread,27);}

/* C_UDMI(cell,thread,27) représente la moyenne pondérée sur les volumes des mailles */

    }

tra=0;

for (k=44;k<=(44+nt);k++) /* k à adapter selon le nombre de memory disponible */

    {

tra=tra+ C_UDMI(cell,thread,k);

```

```

}

C_UDMI(cell,thread,45+nt)=tra*3600*18/264/2257;

/*Somme de flux de transpiration pour une plante, 264 représente le nombre total de plantes*/

source=C_R(cell,thread)*penman/2257000;

C_UDMI(cell,thread,11)=source;

/* méthode directe pour le flux de transpiration juste pour l'affichage */

C_UDMI(cell,thread,22)=C_R(cell,thread)*Chp/gama*(Pvsat-Pv)*LAIS/RT;

/* Dérivée du terme source par rapport à la densité */

dS[eqn]=penman/2257000;

return source;

}

}

/*****Source : compensation du rayonnement absorbé (terme puits de chaleur)*****/

DEFINE_SOURCE(RayAbsorbe, cell , thread, dS, eqn)*****Ray absorb w/m3 *****/

{

real x[ND_ND]; /* this will hold the position vector */

real y; face_t f; Thread *t; real source; real a; real b; real RayAbs1, RayAbs2;

real rayb; real rayh; int i1;

int nb1; real abs_coeff1;

```

```

/*****
/*****Rayonnement absorbé dans les mailles*****/
/*****/

```

```
int ni;
```

```
RayAbs1=0;
```

```

for (nb1=0;nb1<sg_bee_gees;nb1++)
{
    /*****coefficient d'absorption en multibande *****/
    if ((nb1==0) && (C_UDMI(cell,thread,72)<=-10))
    /* psi = -10 kPa représente la limite entre le confort et la restriction */
    {
        abs_coeff1 = 6;
    }
    else if ((nb1==0) && (C_UDMI(cell,thread,72)>-10))
    {
        abs_coeff1 = 9;
    }
    else if (nb1==1)
    {
        abs_coeff1 = 0.0;
    }
    RayAbs1+=abs_coeff1*C_DO_IRRAD(cell,thread,0);
}

```

```

RayAbs2=RayAbs1+(0.02/h)*Ratm;

}

C_UDMI(cell,thread,13)=RayAbs1;

source=-RayAbs1;

return source;

}

/*****
/***** Initialisation des variables dans le domaine*****/
/*****/

DEFINE_INIT(INIT_Solution, domain)

{

cell_t c;

Thread *thread;

thread_loop_c (thread, domain)

{

begin_c_loop (c, thread)

{

C_UDMI(c,thread,0)= Tintial;

C_UDMI(c,thread,1)= FracEau;

}

end_c_loop (c, thread)

}

```



```

}

/*****
/*****Définition du coefficient d'absorption pour le couvert végétal.*****/
/*****confort alpha= 9 m-1; restriction alpha= 6 m-1*****/
/*****

DEFINE_GRAY_BAND_ABS_COEFF(user_gray_band_abs,cell,thread,nb)

/* Un coefficient d'absorption constant égal à 9 m-1 pour les pots est utilisé */

{

real abs_coeff = 0;

if ((THREAD_VAR(thread).fluid.porous)&& (nb==0) && (C_UDMI(cell,thread,72)<=-10))

{abs_coeff = 6;}

else if ((THREAD_VAR(thread).fluid.porous) && (nb==0) && (C_UDMI(cell,thread,72)>-10))

{abs_coeff = 9;}

else

{abs_coeff = 0;}

if (nb==0) {C_UDMI(cell,thread,74)=abs_coeff;}

if (nb==1) {C_UDMI(cell,thread,75)=abs_coeff;}

return abs_coeff;

}

/*****
/*****Calcul de transpiration moyenne pondérée sur le domaine du couvert *****/
/*****

DEFINE_SOURCE(tra, cell , t, dS, eqn)

```

```

{
    real sum, vol;

    int ID = 101;

    Domain *d = Get_Domain(1);

    Thread *thread = Lookup_Thread (d, ID);

    sum=0, vol=0;

    begin_c_loop(cell,thread)
    {
        sum+=C_UDMI(cell,thread,28);
        vol+=C_VOLUME(cell,thread);
    }

    end_c_loop(cell,thread);

    begin_c_loop(cell,thread)
    {
        C_UDMI(cell,thread,27)=sum*C_VOLUME(cell,thread)/vol;
    }

    end_c_loop(cell,thread);

    return 0;
}

```

## RÉSUMÉ

La réduction de la consommation de l'eau dans les serres agricoles représente un grand intérêt ne serait-ce que pour accroître l'efficacité d'utilisation de l'eau par les cultures et rendre les professionnels du secteur horticole plus compétitifs. La thèse vise à apporter des réponses concernant la gestion optimale de l'eau. Ceci passe par la mise en place d'un modèle capable de prédire les bilans de masse et d'énergie sur l'ensemble du continuum substrat-plante-atmosphère en régimes de confort et de restriction hydrique.

La plupart des modèles de transfert existants se focalisent soit sur le système sol-plante, soit sur le système plante-atmosphère. Ils ont de plus été établis principalement pour les systèmes de grandes cultures, alors que les cultures en pot sous serre possèdent des spécificités liées au confinement tant aérien que racinaire. L'enjeu est de bâtir une approche intégrée du continuum substrat-plante-atmosphère pour modéliser le fonctionnement de plantes cultivées en pots sous serre.

La thèse s'appuie sur une double approche expérimentale et numérique. Une campagne expérimentale a été lancée en 2014 puis en 2015 sous serre et une autre en chambre climatique en 2014, en utilisant l'Impatiens de Nouvelle Guinée comme plante modèle. Il s'agissait d'abord d'élaborer un modèle de la résistance stomatique, élément clef de la transpiration en s'appuyant sur le modèle méthode multiplicatif de Jarvis puis sur la méthode des plans d'expérience en confort et en restriction hydrique. Les données acquises ont permis de caler/valider ces modèles de résistance, qui ont pu être ensuite utilisés pour déterminer la transpiration avec le modèle de Penman Monteith et la méthode dite directe. Ces modèles ont ensuite été intégrés dans un modèle de climat distribué CFD (Computational Fluid Dynamics), qui a été validé avec des données acquises sous serre à l'échelle du couvert végétal, puis à l'échelle de la serre. L'objectif était de tester différents régimes d'irrigation pour identifier le scénario garantissant une consommation raisonnable des ressources en eau tout en maintenant la qualité des productions.

**Mots-clés :** Serre, substrat, irrigation, restriction hydrique, CFD, bilans hydrique et énergétique, potentiel hydrique, résistance stomatique, transpiration, plans d'expérience.

## ABSTRACT

*In greenhouses, reducing water consumption is of high interest, not only to increase water efficiency, but also to maintain competitiveness of the growers. The aim of this thesis is to provide answers regarding the optimal water management. To reach this goal, predictive models water and energy transfers through the substrate-plant-atmosphere are implemented, considering well watered plants and plants under water restriction.*

*Most existing models of water and energy transfers have been established either on the soil-plants system, or on the plant-atmosphere system. Moreover, such models were mainly developed for open field conditions, although plants grown in pots have specificities linked to the aerial and root confinement. The challenge is therefore to develop an integrated soil-plant-atmosphere model for greenhouse plants grown in pot.*

*The thesis was based on a combined experimental and numerical approach. A field survey was conducted in 2014 and then in 2015 inside a greenhouse, and another one in a growth chamber in 2014. The New Guinea Impatiens was used as a plant model. The stomatal resistance was first modeled, as a key factor impacting the transpiration, by using the multiplicative Jarvis model, and then the design of experiments method for plants under well-watered and water restriction conditions. The collected data was used to calibrate/validate the aforementioned stomatal resistance models; the obtained models could then be tested to evaluate transpiration with the Penman Monteith model and the direct method. Finally, these models were integrated inside a CFD model (Computational Fluid Dynamics), which was validated against experiments first at the canopy scale, and then at the scale of the whole greenhouse. The objective was to test different irrigation scenarios in order to find the best irrigation scenario for reducing the amount of water used.*

**Keywords:** Greenhouse, irrigation, substrate, water restriction, CFD, water and energy balance, matrix potential, stomatal resistance, transpiration, design of experiments.



AGROCAMPUS OUEST • Institut supérieur des sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage  
65 rue de Saint-Brieuc – CS84215 – F-35042 Rennes Cedex  
Tél. : 02 23 48 50 00  
[www.agrocampus-ouest.fr](http://www.agrocampus-ouest.fr)