

Rapport annuel 2005, nov. 2005

HORTISOL

Intégration des processus énergétiques dans les cultures sous abris

Auteur et coauteurs	Michel Bonvin, Gilbert Morand, Antoine Reist
Institution mandatée	Haute école valaisanne
Adresse	Rte du Rawyl 47, 1950 Sion
Téléphone, e-mail, site Internet	027 606 87 51, michel.bonvin@hevs.ch , www.hevs.ch
N° projet / n° contrat OFEN	101083 / 151298
Durée prévue du projet (de - à)	Février 2005 – juin 2006

RÉSUMÉ

Le but du projet *Hortisol* est d'optimiser, par simulation, l'utilisation des ressources énergétiques nécessaires à la production de biomasse commercialisable sous serres horticoles. Il s'agit donc de :

1. Elaborer une réflexion sur la gestion du climat d'une serre horticole en développant un modèle mathématique du fonctionnement physique de cette dernière. Ce modèle considère les paramètres essentiels à la production horticole vivrière et ornementale (température intérieure, dynamique des échanges thermiques, taux de CO₂, éclairage naturel et/ou artificiel, humidité relative, ...);
2. Développer un prototype d'outil informatique d'aide à la décision en matière de construction, d'équipement et d'exploitation de serres horticoles.

Les travaux menés en 2005 ont abouti à la réalisation :

1. D'un modèle mathématique permettant de suivre la croissance de la tomate en considérant les différents flux caractéristiques : chaleur, humidité (production et condensation), lumière naturelle et/ou artificielle, gaz carbonique (absorption et enrichissement) ;
2. D'un premier outil informatique ciblé sur les cultures de tomates. Ce prototype devra être validé et, si nécessaire, affiné.
3. D'un article de présentation publié dans la Revue maraîchère suisse [1].

Buts du projet

Ce projet vise à l'optimisation stratégique du rendement d'une exploitation horticole (relation entre d'une part les coûts de construction et d'exploitation et d'autre part la productivité) par l'utilisation minimale et judicieuse de toutes les ressources énergétiques : énergie de chauffage, d'éclairage, enrichissement en CO₂. Ce n'est donc pas le but de ce travail que de viser à l'optimisation des pratiques culturales, mais bien à l'optimisation de la construction, de l'équipement et de la gestion économique de l'environnement physique des serres.

Pour ce faire, le projet se propose de développer un outil informatique de planification et de gestion d'une serre abritant une culture de tomates. Les buts du projet poursuivis en 2005 ont été les suivants :

- **Etude de la littérature** et analyse des mesures déjà effectuées sur des serres existantes et disponibles à ce jour ; étude des produits informatiques existants ;
- **Modélisation mathématique**, c'est-à-dire :
 - Définition des paramètres physiques essentiels participant à la production horticole vivrière et ornementale de qualité : températures de consigne pour l'air (températures de jour, de nuit, d'aération ou de ventilation, inversions de température et chocs thermiques), fertilisation carbonée, utilisation des écrans thermiques et/ou d'ombrage, éclairage naturel et/ou artificiel, humidité relative, etc.) ;
 - Quantification des transferts d'énergie à travers l'enveloppe de la serre, de ceux liés aux phénomènes d'évapotranspiration et de production de biomasse ; ces phénomènes sont directement liés aux paramètres physiques énoncés dans le point précédent et aux facteurs climato-météorologiques ;
- **Réalisation d'un premier prototype de logiciel** de planification et de gestion d'une serre ;

Les activités restant à réaliser dans la première moitié de 2006 sont les suivantes :

- **Validation**, c'est-à-dire comparaison des résultats produits par le logiciel de calcul avec des résultats de campagnes de mesures déjà effectuées par les partenaires du projet ;
- Réalisation définitive de **l'interface utilisateur** ;
- Rédaction d'une **documentation technique**.

Travaux effectués et résultats acquis

L'**étude de littérature** a montré que :

- La modélisation des flux thermiques dans une serre est chose acquise [2-6] ;
- Un modèle d'évapo-transpiration (*HORTITRANS*) existe et a été validé [7-9] ;
- Des modèles de conduite de culture existent pour la tomate (*TOMGRO*, *TOSIM*, *SERRISTE*) [10-18].

En revanche, nos recherches n'ont pas trouvé de modèle intégrant tous les flux énergétiques qui doivent être pris en considération dans le cadre d'une optimisation stratégique d'une serre (bâtiment et équipement) : flux de chaleur, flux de lumière, flux d'humidité, flux de CO₂, qui ont une influence sur la photosynthèse et la production de biomasse.

La **modélisation mathématique**, dont les grandes lignes sont présentées dans l'annexe 1, a permis de dégager un modèle simplifié de la tomate issu de *SERRISTE* [11-12], n'incorporant que la production de biomasse commercialisable et ignorant tous les aspects de nombre et de gran-

deur de fruits ; ce modèle de la tomate a ensuite été couplé aux autres modèles partiels (thermique, de rayonnement, du cycle de l'eau, du cycle du gaz carbonique).

Le **premier prototype de logiciel** permet de suivre l'évolution de tous les paramètres caractérisant une culture de tomates sur une saison de production : température de la serre, puissance de chauffage, taux de ventilation, enrichissement en CO₂, éclairage artificiel, activité photosynthétique, indice foliaire, production journalière de fruits commercialisables, etc. Parmi les innombrables paramètres nécessaires au calcul, il s'agira d'identifier ceux qui représentent une plus value pour l'utilisateur et qui doivent donc lui être présentés parce que porteurs d'information à caractère stratégique : c'est là une question à laquelle il s'agira de donner réponse après avoir questionné les milieux professionnels.

Le logiciel actuel a été construit à partir de l'expérience acquise lors de la réalisation de *bSol* [19-20] : une serre de production est constituée d'un bâtiment, d'un ensemble de paramètres de fonctionnement (telles que valeurs de consigne de la température, de l'humidité relative, de la teneur en gaz carbonique, ...), d'un ensemble de valeurs caractérisant les conditions météorologiques extérieures, d'un horizon (susceptible d'intercepter le rayonnement solaire incident). Ces différents éléments font l'objet de fichiers indépendants et sont assemblés dans un fichier projet. (L'état actuel des écrans correspondant à chacun de ces fichiers est présenté aux pages 16 à 19 du document annexé : « Hortisol : Document de travail »). En cours de développement, il s'est avéré que, pour gérer correctement certains phénomènes particulièrement dynamiques, tel que le renouvellement d'air censé limiter l'accumulation d'humidité intérieure, un pas de calcul de 60 minutes est nettement trop grand : il faut affiner, lorsque les conditions l'exigent, avec des pas de calcul dont l'ordre de grandeur est celui de la minute.

Collaboration nationale

- Les personnes suivantes ont été informées des développements des travaux en rapport avec *Hortisol* et, en date du 16 juin 2005, ont clairement approuvé les objectifs du projet :

BECK	Natalie	BKW FMB Energie AG
FELLAY	Nicolas	VSGP-UMS
GILLI	Céline	Agroscope-RAC
GRIEDER	Thomas	Energie-Ag. c/o Encontrol GmbH
POFFET	Josef	VSG Beratungsdienst
SCHINDELHOLZ	Jean-Paul	Rossat SA
STETTLER	Martin	OFEN

- Sur demande de M. Ch. Weinmann, de l'Energie Agentur der Wirtschaft, M. Bonvin a eu l'occasion de présenter les objectifs et l'état actuel des travaux de *Hortisol* aux serristes romands réunis à Morges, le 9 novembre 2005.
- La rédaction d'un article de vulgarisation à abouti à une publication dans la Revue maraîchère suisse [1].

Collaboration internationale

- Le 9 juin 2005, une rencontre-discussion a eu lieu à Lullier entre M. Christian Gary, concepteur du logiciel *SERRISTE* et ancien chercheur à l'INRA, et les porteurs du projet *Hortisol*.
- Le 16 décembre prochain, une délégation des porteurs du projet se rendra, sur invitation, à l'INRA à Avignon avec comme objectif de discuter du lien possible entre un outil stratégique tel que *Hortisol* et des outils de microrégulation.

Évaluation de l'année 2005 et perspectives pour 2006

Les travaux menés en 2005 ont abouti à des résultats encourageants : il a été possible de modéliser simplement la tomate, de sorte que les algorithmes de calcul restent à un niveau de simplicité suffisant pour pouvoir être gérés par un ordinateur personnel. D'autre part, il a été possible d'assembler sans mauvaise surprise le traitement mathématique des différents phénomènes participant à la croissance de la plante : chaleur, lumière, CO₂, humidité, photosynthèse.

L'enjeu pour la première partie de 2006 est multiple :

- Il s'agira d'abord de valider les résultats produits en les comparant aux caractéristiques de cultures documentées ;
- Ensuite, au niveau de l'interface utilisateur, il s'agira de définir et arrêter la forme sous laquelle les résultats seront présentés, de façon à ce que le message soit simple et clair ;
- Puis, il faudra rédiger une documentation technique et d'utilisation ;
- Enfin, dans la mesure où les moyens matériels le permettent, il est souhaitable qu'une poursuite ou un élargissement du projet puisse être mise en place au niveau européen (par exemple sous la forme d'un projet Eurêka).

Références

- [1] M. Bonvin, G. Morand, A. Reist : ***Hortisol, un outil stratégique pour le serriste***, Der Gemüsebau/Le Maraîcher 5/2005, 11.
- [2] O. Jolliet : ***Modélisation du comportement thermique d'une serre horticole***, Thèse no 713, EPFL, 1988.
- [3] P. Hollmuller, B. Lachal, P. Jaboyedoff, A. Reist, J. Gil, L. Danloy : ***GEOSER, Stockage solaire à court terme en serres horticoles***, Rapports de recherche du CUEPE no 2, 2002.
- [4] A. Reist, L. Danloy, P. Hollmuller, P. Jaboyedoff, B. Lachal : ***Stockage de chaleur, gestion de l'énergie et du climat dans les serres horticoles***, Recueil des exposés du colloque GEOSER, 15 février 1996, Conthey.
- [5] Société suisse pour la géothermie : ***L'énergie géothermique dans l'agriculture***, 14^e journée technique et d'information, 4 nov. 2003.
- [6] E. A. Scales & Associates : ***Energy Conservation Opportunities for Greenhouse Structures***, US Department of Energy grant number DE-FG45-99-R530427, 2003.

- [7] O. Jolliet : **HORTITRANS, a Model for predicting and Optimizing Humidity and Transpiration in Greenhouses**, J. agric. Engng Res. (1994) **57**, 23-37.
- [8] N. Petitat : **Modélisation et mesure de l'évapotranspiration**, Mémoire no 42, Université de Genève, 1999.
- [9] F. Geoola, U. M. Peiper : **Outdoor Testing of the Condensation Characteristics of Plastic Film Covering Materials Using a Model Greenhouse**, J. agric. Engng Res. (1994) **57**, 167-172.
- [10] J. W. Jones, E. Dayan, L. H. Allen, H. Van Keulen, H. Challa : **A dynamic Tomato Growth and Yield Model (TOMGRO)**, American Society of Agricultural Engineers (1991) **34(2)**, 663-671.
- [11] C. Gary : **Gestion du climat et des cultures sous serre : maîtrise du rendement et du calibre de la tomate**, INRA, mai 2002.
- [12] C. Gary, M. Tchamitchian : **Modelling and Management of Fruit Production : the Case of Tomato**, in : LMM Tijskens, MLATM Hertog and B. Nicolai (eds) **Food Process modeling**, Woodhead Publishing, London (2001), 201-229.
- [13] L. F. M. Marcelis : **Simulation of Biomass Allocation in Greenhouse Crops – a Review**, Acta Horticulturae (1993), 328, 49-67.
- [14] E. Heuvelink : **Dry Matter Partitioning in Tomato : Validation of a Dynamic Simulation Model**, Annals of Botany **77**, 71-80, 1996.
- [15] E. Heuvelink : **Evaluation of a Dynamic Simulation Model for Tomato Crop Growth and Development**, Annals of Botany **83**, 413-422, 1999.
- [16] H. Zekki, C. Gary, A. Gosselin, L. Gauthier : **Validation of a Photosynthesis Model through the Use of the CO₂ Balance of a Greenhouse Tomato Canopy**, Annals of Botany **84**, 591-598, 1999.
- [17] A. Reist : **Steuerung der Wachstumsfaktoren in Gewächshäusern**, private communication, 2003.
- [18] A. Ramirez, F. Rodriguez, M. Berenguel, E. Heuvelink : **Calibration and Validation of Complex and Simplified Tomato Growth Models for Control Purpose in the Southeast of Spain**, Proc. Int'l WS on Model Plant Growth & Contr. Prod. Qual. In Hort. Prod. Eds M. Fink and C. Feller, Acta Hort. **654**, ISHS 2004.
- [19] M. Bonvin : **bSol – logiciel d'aide à la décision en matière d'énergétique du bâtiment**, Rapport élaboré sur mandat de l'Office fédéral de l'énergie, novembre 2003.
- [20] **bSol – Bien construire avec le soleil**, www.bsol.ch

Annexe au rapport annuel

HORTISOL : Documentation de travail

HEVs, décembre 2005

Licence d'utilisation

Version 01-F du logiciel HORTISOL (22 juillet 2005)

Ce logiciel a été développé au sein du Groupe de compétences en énergie de la Haute Ecole Valaisanne (HEVs), "membre de la HES-SO. Hortisol est soutenu par la HES-SO, l'OFEN, la CRDE.



Tous les droits d'auteurs, y compris ceux de transmission et de copie, sont propriété de la HEVs.

La HEVs décline toute responsabilité en rapport avec l'utilisation de ce logiciel.

 **Hortisol, un logiciel suisse**

Version de développement

Langue

Français Deutsch English Italiano

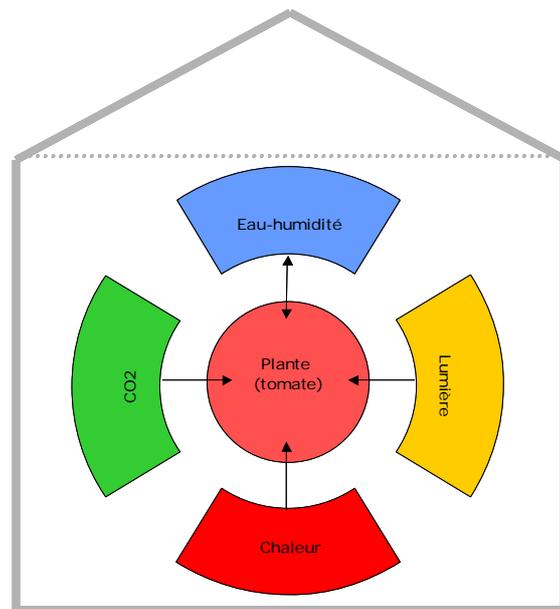
1.	Modèles utilisés	3
1.1.	Modélisation de la croissance de la plante et des fruits	3
1.1.1.	La croissance de la feuille(indice foliaire)	3
1.1.2.	La production par photosynthèse de sucres (CH ₂ O)	5
1.1.3.	La masse commercialisable	10
1.2.	Modélisation de la température intérieure de la serre	10
1.3.	Modélisation de l'humidité dans la serre	10
1.3.1.	L'humidité absolue et humidité relative	10
1.3.2.	Cycle de l'eau dans la serre	11
1.3.3.	Equation différentielle pour le suivi de l'eau	12
1.3.4.	Température sur vitrage	13
1.3.5.	Chaleur de condensation	13
1.4.	Modélisation de lumière	14
1.5.	Modélisation du CO ₂	14
2.	Définition de règles d'exploitation de la serre	15
3.	Structure logicielle	15
4.	Validation du modèle	20
4.1.	Les données tests	20
4.2.	« Situations analytiques »	21
4.3.	Comparaison avec d'autres programmes de simulation	21
4.4.	Situations réelles	21
5.	Notations et correspondances utiles	22
5.1.	Définition des grandeurs utiles	22
5.2.	Correspondances utiles	22

1. Modèles utilisés

Modéliser la croissance de tomate dans une serre horticole demande d'étudier les modèles suivants :

- 1) modèle de la croissance de la plante
- 2) modèle ou suivi de la température de la serre (équation de la chaleur)
- 3) modèle ou suivi de l'humidité dans la serre (cycle de l'eau)
- 4) modèle ou suivi de la concentration en CO₂
- 5) modèle ou suivi de la lumière dans la serre (lumière naturelle et lumière artificielle)

Le modèle 1) interagit fortement avec les 4 autres modèles.

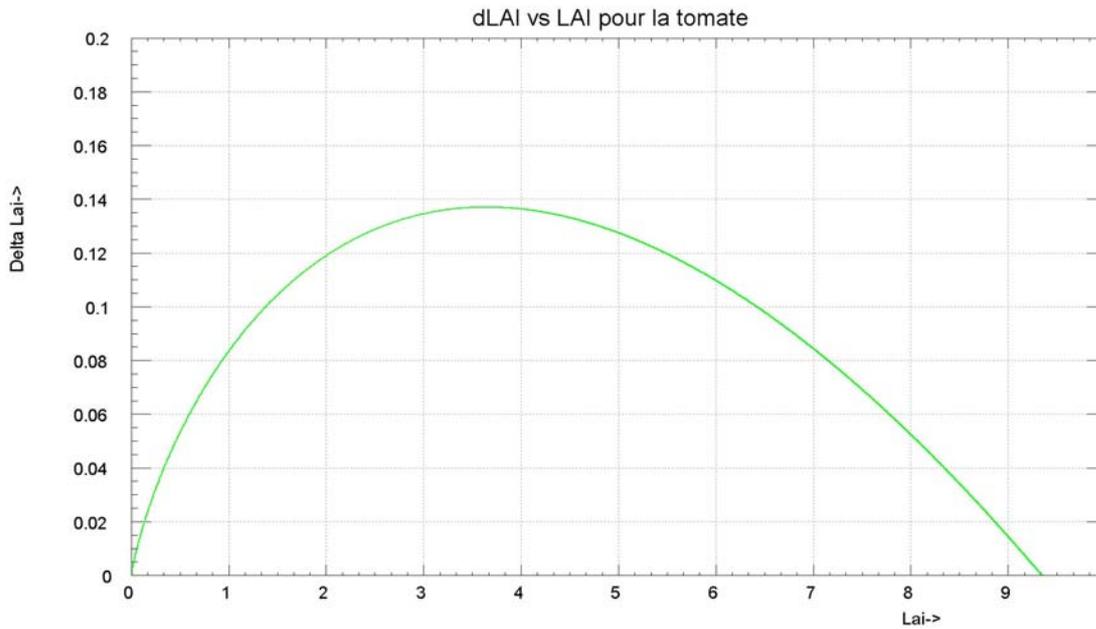


Les divers modèles dans la serre

1.1. Modélisation de la croissance de la plante et des fruits

1.1.1. La croissance de la feuille (indice foliaire)

Dans des conditions standards (tableau 1), la surface de feuille rapportée à la surface du terrain (lai) croît (en un jour) suivant la fonction suivante :



Graphique 1 : Accroissement journalier de l'indice foliaire en fonction de l'indice foliaire lui-même (lai).

La variation journalière de l'indice foliaire est donnée par la fonction suivante

$$\Delta LAI = a \cdot LAI + b \cdot LAI \cdot \ln(LAI) + c \cdot LAI^{1.5}$$

$a = +0.09215907$

$b = -0.02929701$

$c = -0.00872732$

  justifier les chiffres après la virgule, citer les sources

$C_{CO_2} = 350 \text{ ppm}$	Concentration de CO2 naturel (extérieur)
$T = 24^\circ C$	Température (standard)
$PPFD = 40 \left[\frac{\text{mol Photons}}{m^2 \cdot \text{jour}} \right] = 463 \left[\frac{\mu \text{ mol Photons}}{m^2 \cdot s} \right] \cong 100 \frac{W}{m^2}$ sur 24 heures	

  valider la relation : 100 W c'est 100 watt physique ou « 100 watt physiologique » pour la plante ?

Tableau 1 : conditions standard pour la culture de la tomate.

1.1.2. La production par photosynthèse de sucres (CH₂O)

La production par photosynthèse de sucre (CH₂O) est principalement fonction de

- L'indice foliaire(lai)
- La lumière assimilable par la plante (ppfd)
- La température
- De la concentration en CO₂

La production de sucre par photosynthèse s'exprime par la formule suivante :

$$Pg = \frac{D \cdot LF_{\max} \cdot P_{\text{gred}}(T)}{K} \cdot \ln \left[\frac{(1-m) \cdot LF_{\max} + Q_e \cdot PPFD}{(1-m) \cdot LF_{\max} + Q_e \cdot PPFD \cdot e^{-K \cdot LAI}} \right]$$

Les différents termes suivants sont discutés:

-D : facteur de conversion

$$1 \frac{\mu \text{ mol } CO_2}{m^2 \cdot s} \cong 2.592 \frac{g \text{ CH}_2\text{O}}{m^2 \cdot \text{jour}}$$

D=2.592 est le facteur de conversion pour passer de

$$\frac{\mu \text{ mol } CO_2}{m^2 \cdot s} \text{ en } \frac{g \text{ CH}_2\text{O}}{m^2 \cdot \text{jour}}$$

-(1-m)

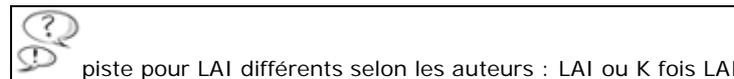
m=0.1, leaf light transmission coefficient.

-Q_e

Q_e=0.0645, leaf quantum efficiency

-K

K = 0.58, light extinction coefficient



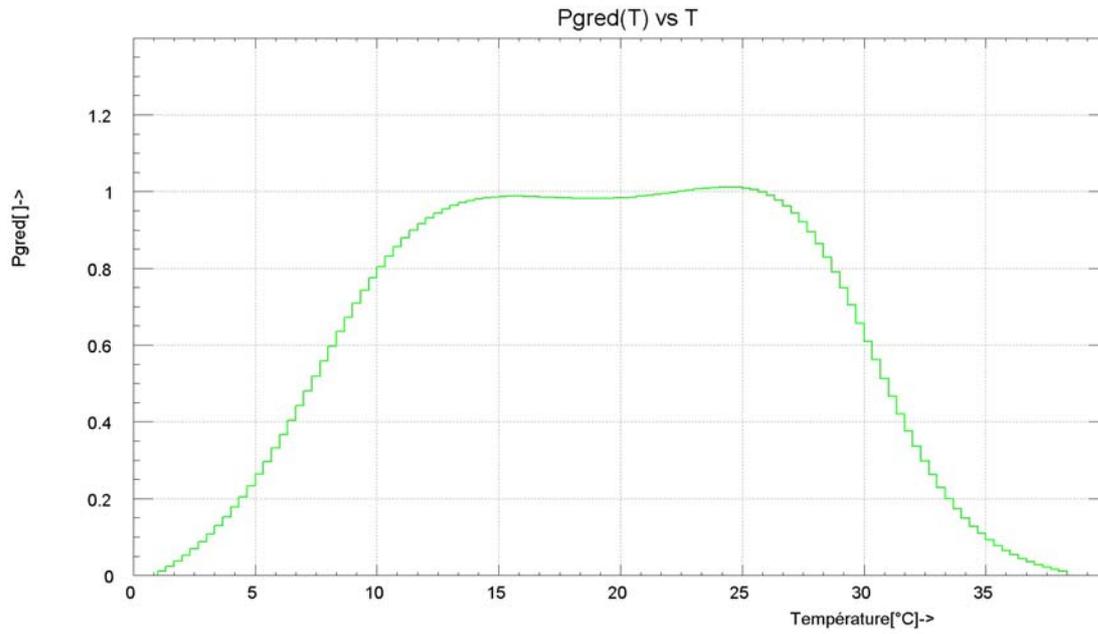
-L_{fmax} : facteur qui tient en compte de la concentration en CO₂

$$LF_{\max} = \tau \cdot C_{CO_2}$$

$$\tau = 0.069 \left[\frac{\text{mol air}}{m^2 \cdot s} \right]$$

Maximum leaf photosynthetic rate. Photosynthèse foliaire maximale
CCO₂ est calculé en ppm. On a donc des parties de mole de CO₂ par mole d'air.

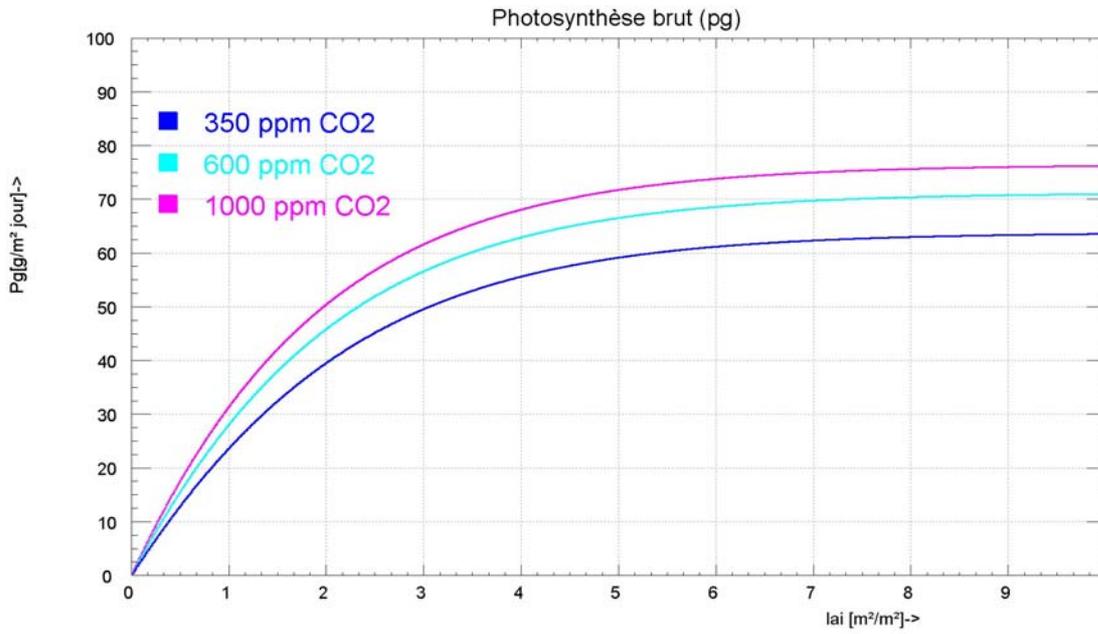
-P_{gred} : tient compte de la croissance différenciée pour la tomate selon la température



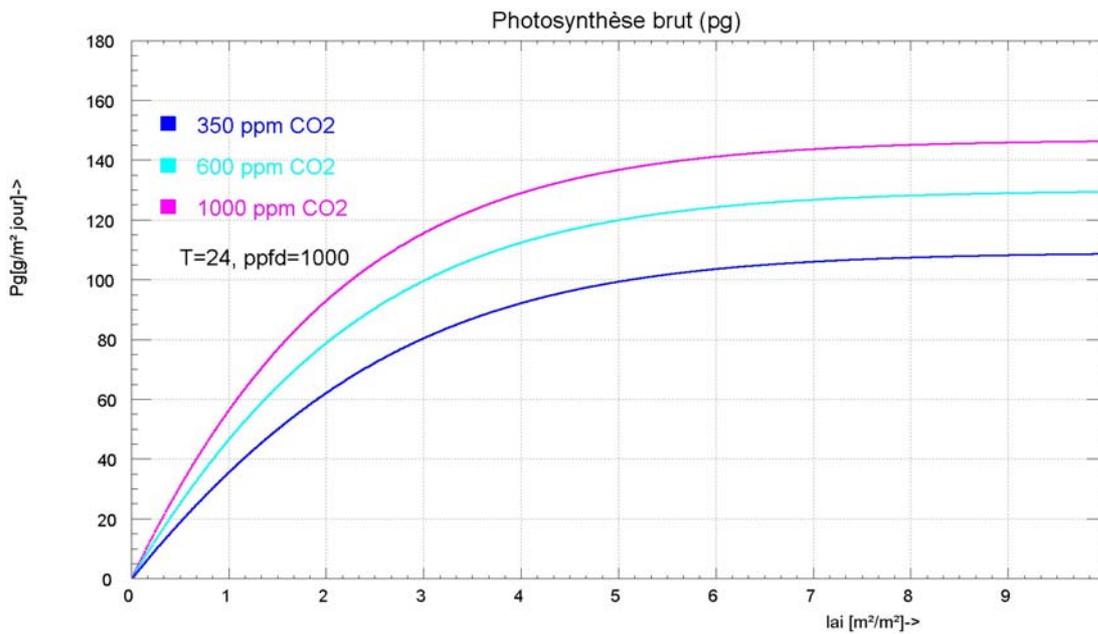
Graphique 2 : la fonction $P_{gred}(T)$.

-LAI

Canopy leaf area index.

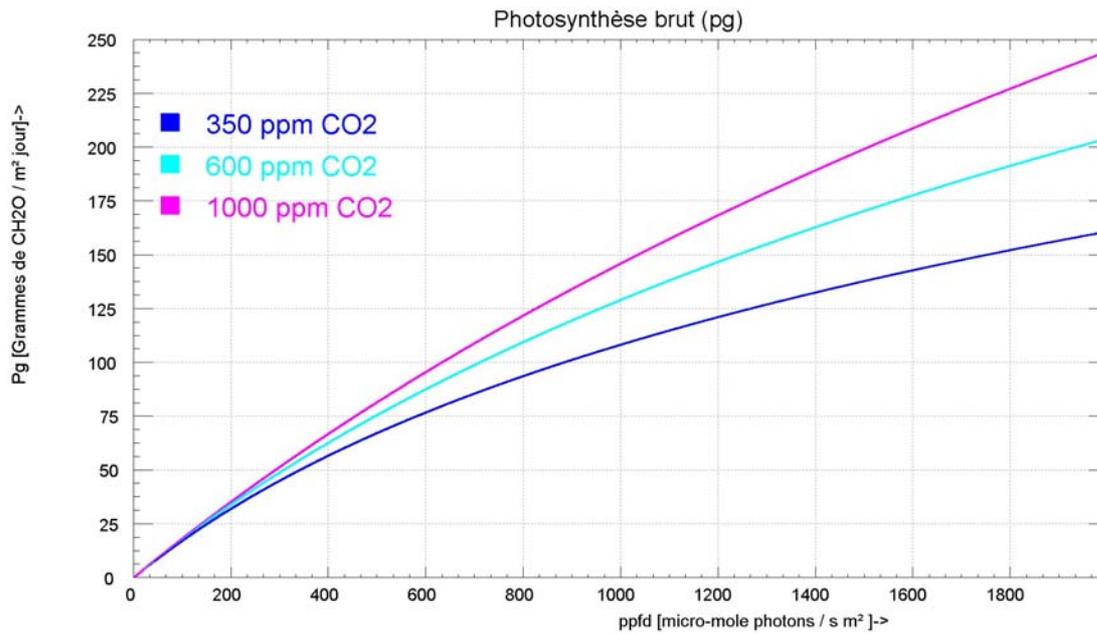


Graphique 3 : photosynthèse brut en fonction du lai pour trois concentrations différentes de CO₂. La valeur de ppfd est de $463 \left[\frac{\mu \text{ mol Photons}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$. La température est de 24 °C.



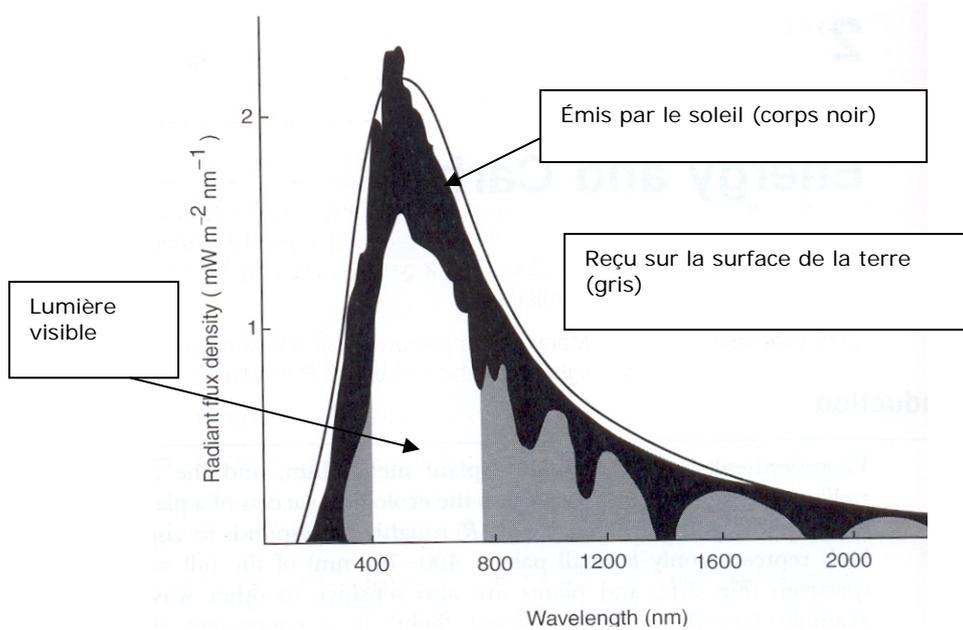
Graphique 3 : photosynthèse brut en fonction du lai pour trois concentrations différentes de CO₂. La valeur de ppfd est de $1000 \left[\frac{\mu \text{ mol Photons}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right]$. La température est de 24°C.

-ppfd : photosynthetically active photon flux density



Graphique 3 : photosynthèse brut en fonction du ppfd. La valeur de lai est constante, égale à 9. La température est de 24°C.

Voici la distribution de radiation qui est émise par le soleil, reçue par l'atmosphère et reçue à la surface de la terre.



Tiré de la page 24 de (Fitter and Hay 2002).

Notons que la lumière visible, et donc la radiation active en photosynthèse, se trouve là où le flux est le plus grand.

Le flux de densité de la radiation active en photosynthèse (PPFD – photosynthetically active photon flux density) du soleil est mesuré par le nombre de moles de photons entre 400 et 700 nm reçues par 1 m² par seconde ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$).

1 mole est 6.022×10^{23} photons. (Autrefois appelé « Einsteins »)

Pour convertir entre W m^{-2} et $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPFD (pour lumière du soleil) : $1 \text{ W m}^{-2} = 4.6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPFD.

Ici, il faut tenir compte du fait que l'irradiance arrive en forme de lumière directe et diffuse (réflétée par nuages, atmosphère etc.). 1/3 de la radiation totale directe est PAR mais 2/3 de la radiation diffuse est PAR. Pour la majorité des conditions météorologiques, la proportion de la lumière totale qui est active en radiation (PAR) est presque constante à 0.5 ± 0.02 .

Valeurs typiques :

Journée ensoleillée d'été sans nuages : $1200 - 1800 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPFD.

Journée couverte avec pluie : $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPFD.

Journée couverte : $100 - 500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPFD

Chambre de croissance typique $400 - 500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPFD

Notre plantarium : $100 - 150 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ PPFD

[tiré de Shipley ECL 610 : Modélisation de la photosynthèse]

1.1.3. La masse commercialisable

1.2. *Modélisation de la température intérieure de la serre*

Equation de la chaleur. Voir fondements théoriques de bSol. Ajout par rapport à bSol :

- interaction humidité - chaleur
- interaction condensation sur vitrages - chaleur

1.3. *Modélisation de l'humidité dans la serre*

1.3.1. L'humidité absolue et humidité relative

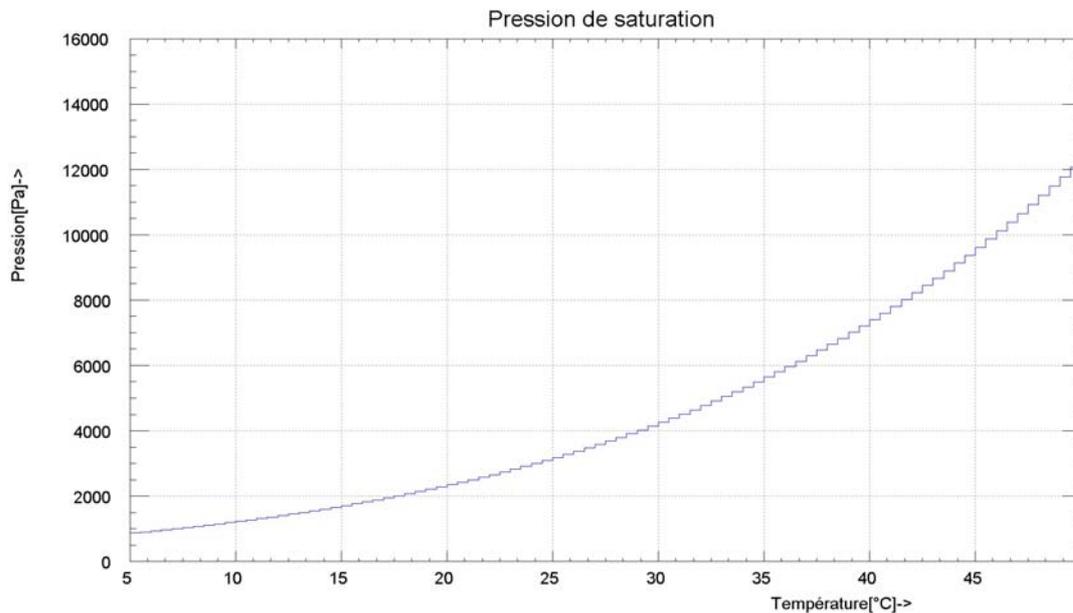
HR est l'humidité relative est donnée par

$$HR = \frac{e}{e_s}$$

e pour la pression de vapeur d'eau [Pa]

e_s pour la pression de saturation de vapeur d'eau [Pa]

$$e_s = 611 \cdot e^{\frac{17.1 \cdot \Theta}{234.2 + \Theta}}$$
 Le graphique suivant montre la relation.



Graphique : relation entre la pression partielle de saturation en Pa et la température.

$$\rho_{H_2O} = \frac{m_{H_2O}}{V} = \frac{e \cdot M_{H_2O}}{R \cdot T} \text{ calculé en kg/m}^3$$

soit x = teneur en H₂O (kg H₂O / kg air sec), on a $x = 0.622 \cdot \left(\frac{e}{P_{atm}} \right)$

1.3.2. Cycle de l'eau dans la serre

Le bilan de l'eau dans la serre peut s'exprimer ainsi :

$\begin{aligned} & \text{Eau Transpirée par les plantes} + \text{Eau Evaporée du sol} + \text{Eau additionnée} \\ & = \\ & \text{Eau condensée sur le vitrage} + \text{Eau ventilation} + \text{Eau stockée dans l'air} \end{aligned}$
--

Toutes les unités de cette équation sont en $\frac{kg}{m^2 \cdot s}$

Eau Transpirée par les plantes

On considère la feuille comme un film d'eau. C'est par les feuilles qu'il y a échange d'eau. Les racines ne font qu'alimenter l'eau qui s'est évaporée par les feuilles.

$$E_t = \frac{a}{\lambda} \cdot R_i + \frac{h_t}{\lambda \cdot \gamma} \cdot (e_i^* - e_i)$$

$$a = 0.154 \cdot \ln(1 + 1.1 \cdot LAI^{1.13}) \quad []$$

$$h_t = 1.65 \cdot LAI \cdot (1 - 0.56 \cdot e^{\frac{-R_i}{1.32}}) \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

$$E_t = \frac{0.154 \cdot \ln(1 + 1.1 \cdot LAI^{1.13})}{2.3 \cdot 10^6} \cdot R_i + \frac{1.65 \cdot LAI \cdot (1 - 0.56 \cdot e^{\frac{-R_i}{1.32}})}{2.3 \cdot 10^6 \cdot 66} \cdot (e_i^* - e_i)$$

Eau Evaporée du sol

Culture hors sol. On néglige donc cette contribution.

Eau additionnée

On considère que l'eau additionnée est toujours en suffisance.

Eau qui condense sur le vitrage

L'eau qui condense sur le vitrage est éliminée par le drainage.
L'eau condense sur le vitrage parce que le vitrage est plus froid.

$$E_c = \frac{h_c}{\lambda \cdot \gamma} \cdot \frac{A_c}{A} \cdot (e_i - e_c^*)$$

$$h_c \cong 3.5 \left[\frac{W}{m^2 \cdot K} \right]$$

A_c est la surface de l'enveloppe (verre)

A est la surface au sol

Eau perdue par ventilation

$$E_v = \frac{h_v}{\lambda \cdot \gamma} \cdot (e_i - e_0)$$

A est la surface de la serre au sol.

$$h_v = C \cdot \rho \cdot \frac{\dot{V}}{A}$$

Eau stockée dans l'air

$$E_{sa} = \frac{\hat{h}_s}{\lambda \cdot \gamma} \cdot \frac{de_i}{dt}$$

$$\hat{h}_s = C \cdot \rho \cdot H$$

H est la Hauteur de la serre

1.3.3. Equation différentielle pour le suivi de l'eau

La variable qui est suivie dans cette équation est e . C'est la pression partielle de vapeur d'eau dans l'air. Elle est calculée en Pa !

$$\Delta e = \frac{\Delta t}{\hat{h}_s} \cdot \left(\underbrace{\left[a \cdot \gamma \cdot R_i + h_t \cdot (e_i^* - e) \right]}_{\text{plante}} + \underbrace{\left[h_c \cdot \frac{A_c}{A} \cdot (e_c^* - e) \right]}_{\text{vitrage}} + \underbrace{\left[h_v \cdot (e_0 - e) \right]}_{\text{ventilation}} \right)$$

e_0 Pression partielle de la vapeur d'eau en dehors de la serre (vient de meteoNorm).

1.3.4. Température sur vitrage

Rayonnement sur le vitrage

I est le rayonnement global

q_i facteur d'émission secondaire (le vitrage absorbe une partie du rayonnement et le réchauffe). Les valeurs typique de q_i sont de l'ordre de 0.03 à 0.05.

$$T_{\text{surfaceVitrageInterieur}} = T_i - \frac{U}{h_i} \cdot (T_i - T_e) + \frac{q_i \cdot I}{h_i}$$

Ce calcul de température de surface de vitrage doit se faire pour chaque face vitrée.

en connaissant $T_{\text{surfaceVitrageInterieur}}$ Nous calculons e_c^*

$$R_i = g \cdot I \cdot \frac{A_c}{A} = g \cdot I \cdot \frac{\sum A_i \cdot \vec{n}_i \cdot \vec{n}_{\text{soleil}}}{A}$$

La valeur de h_i est une constante et vaut 8 W/m²K. Cette grandeur est programmée comme une constante.

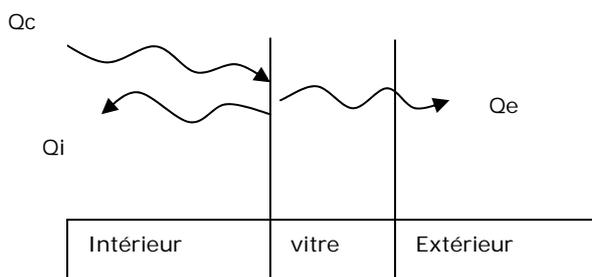
Les facteurs secondaires sont à mettre dans la database. Ils sont programmés comme des constantes.

1.3.5. Chaleur de condensation

Une fois la condensation sur le vitrage déposée, reste à répartir la proportion d'énergie qui va

- vers l'air intérieur
- vers l'extérieur
- pour chauffer la vitre

L'échauffement de la vitre est négligé.



$$Q_i = Q_c \cdot \frac{R_e}{R_{tot}}$$

$$Q_i = Q_c \cdot \left(1 - \frac{U}{h_i}\right)$$

1.4. Modélisation de lumière

Deux sources de lumière sont traitées dans Hortisol :

- Lumière naturelle

Heure après heure, le logiciel suit la position du soleil. Le rayonnement solaire peut être arrêté par l'horizon lointain ou atténué par les protections solaires ainsi que par les vitres de la serre.

- La lumière artificielle

La lumière artificielle est générée par des lampes placées au dessus des cultures. Rien ne filtre ou n'atténue cette lumière.

Le rendement des lampes est considéré. La totalité de l'énergie électrique consommée contribue à augmenter la température de la serre.

1.5. Modélisation du CO2

La concentration du CO2 s'exprime :

$$C_{CO_2} = 10^{+6} \cdot \frac{n_{CO_2}}{n_{Air}} \text{ [ppm]} \quad \text{par l'utilisation de la loi des gaz parfaits : } C_{CO_2} = 10^{+6} \cdot \frac{R \cdot T}{P_{atm}} \cdot \frac{m_{CO_2}}{M_{CO_2}}$$

$$1 \text{ ppm } CO_2 = \frac{1 \mu \text{ mol } CO_2}{1 \text{ mol Air}}$$

1 particule de CO2 pour 1 million de particule d'air
1 mole de CO2 pour 1 million de mole d'air.

L'équation de base utilisée est celle de la continuité pour le CO2.

$$\Delta C_{CO_2} = \text{renouvellement avec L'extérieur} - \text{consommation par les plantes} + \text{Ajout Artificiel}$$

ce qui donne

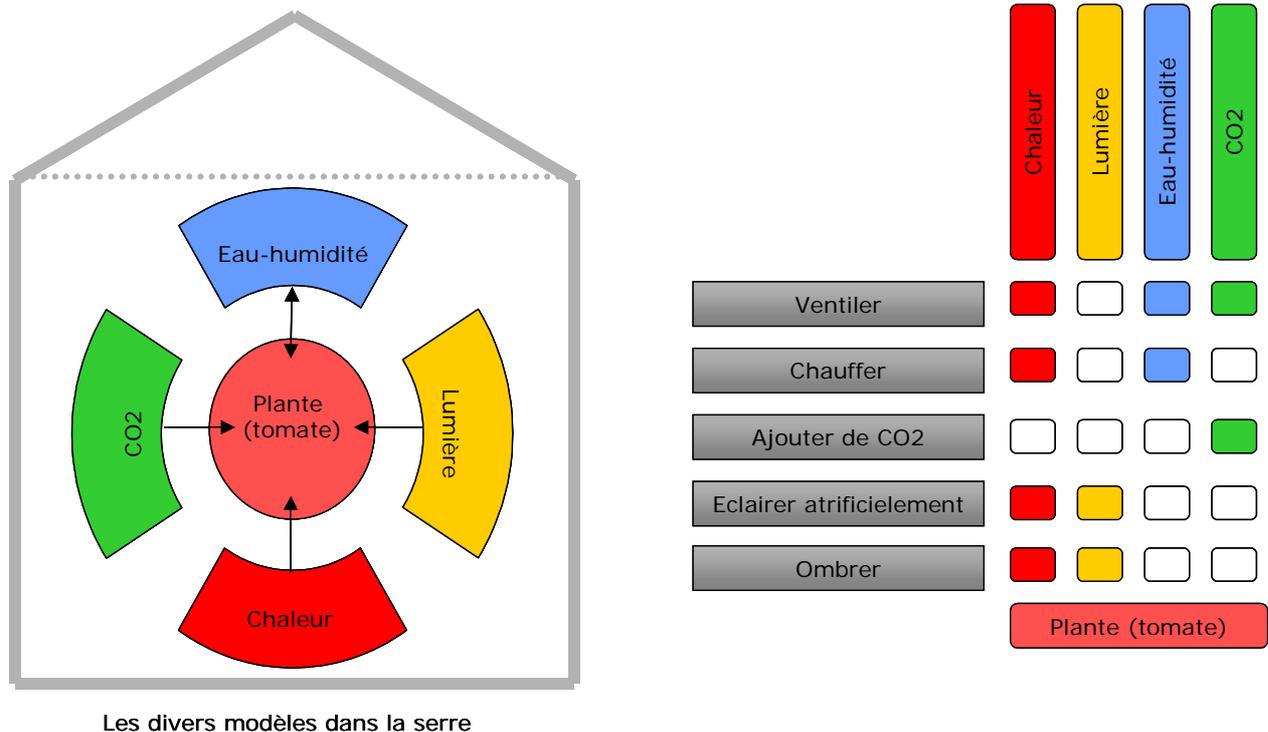
$$\Delta C_{CO_2} = \underbrace{\Delta t \cdot \left(\frac{\dot{V}}{V} \cdot (C_{CO_2,0} - C_{CO_2}) \right)}_{\text{Apport par renouvellement}} - \underbrace{10^{+6} \cdot \frac{R \cdot T}{P_{atm} \cdot V} \cdot \frac{\dot{m}_{CO_2}}{M_{CO_2}}}_{\text{Consommé par la plante}} + \underbrace{(\Delta C_{CO_2})_{artificiel}}_{\text{Apport par machine}}$$

2. Définition de règles d'exploitation de la serre

Hortisol est un outil stratégique d'aide à la décision.

Hortisol calcule les effets sur la production de tomates en serre

- de divers choix possibles au niveau de l'équipement de la serre
- de diverses règles lors d'exploitation de la serre



Graphique : A gauche les différents modèles développés. A droite les interactions entre les différentes règles et les différents modèles.

3. Structure logicielle

Le logiciel Hortisol est écrit en C/C++. Il hérite de bSol de nombreuses fonctionnalités, d'une structuration quasi identique ainsi que de l'algorithme pour le suivi de la température dans la serre.

Au niveau du menu principal, la structure du programme est similaire à celle de bSol :



- **Un projet : extension est .Hsol**

Un projet est décrit par diverses composantes. Ce fichier contient la référence sur des fichiers, composantes du projet. Les composantes du projet sont :

Composantes du projet

Serre	 C:\horti\exemple\essai.sre	Ouvrir...
Exploitation	 C:\horti\exemple\essai.eon	Ouvrir...
Météo	 C:\horti\exemple\trafiqué à 200W/m2 contant.meo	Ouvrir...
Horizon	 C:\horti\exemple\essai.hrz	Ouvrir...

- Une serre : extension .sre.

Serre

Serre

Volume total: 18000 [m³] Superficie totale: 5000 [m²]

Zone

Volume: 18000 [m³] Superficie: 5000 [m²] S. réf. énerg.: 5000 [m²]

Face

Superficie brute: 5000.0 [m²] Superficie nette: 0.0 [m²]

Surface

Type de surface: [0] Mur (opaque) Type de contact: [0] Air extérieur

Superficie: 5000.0 [m²]

Transmission: 0.0 [W/K]

Machine / production de

Installation de chauffage: 500.0 W/m²

Fourniture de CO2: 12.0 g/m³h

Eclairage artificiel: 80.0 W/m² (électrique) Rendement lumière: 10.0 %

Orientation: [5] Horizontal Inclinaison: 0 [°] Azimut: 0 [°]

Constituants / Valeur U

Valeur U: 1.00 [W/m² K]

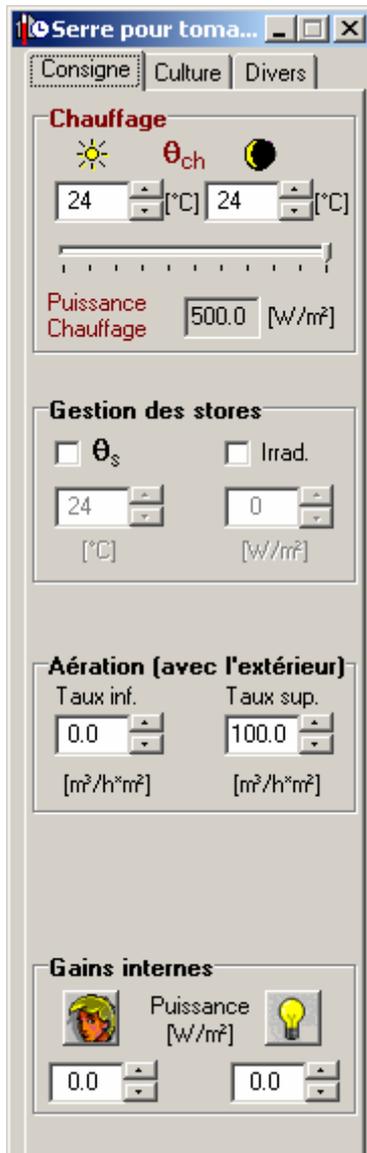
Constituants / matériaux

Appliquer Enregistrer sous... Fermer

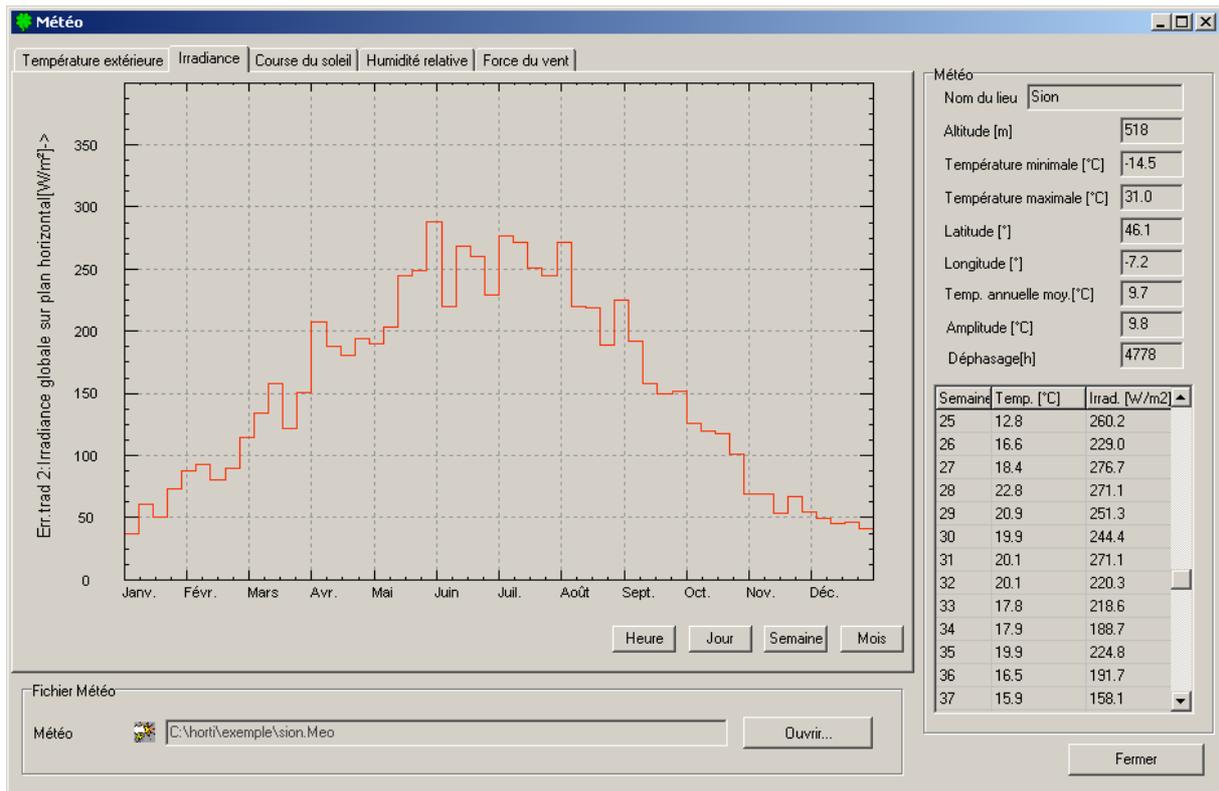
- Une exploitation : extension .eon.

L'exploitation se décline en plusieurs parties : Une liée au « hardware », la seconde à la culture de la plante.

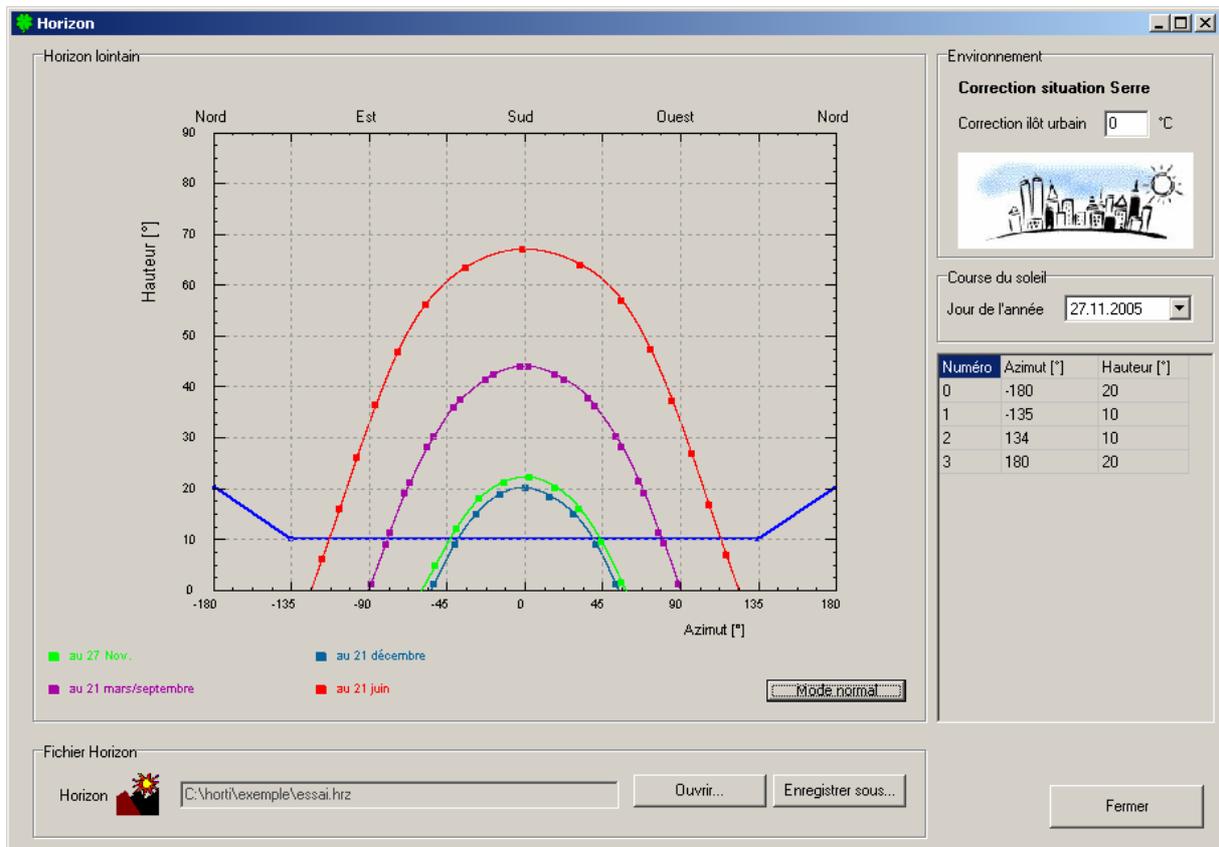
Des règles de gestion des apports en CO₂, de ventilation, de gestion de l'humidité peuvent être testés sous forme de scénario.



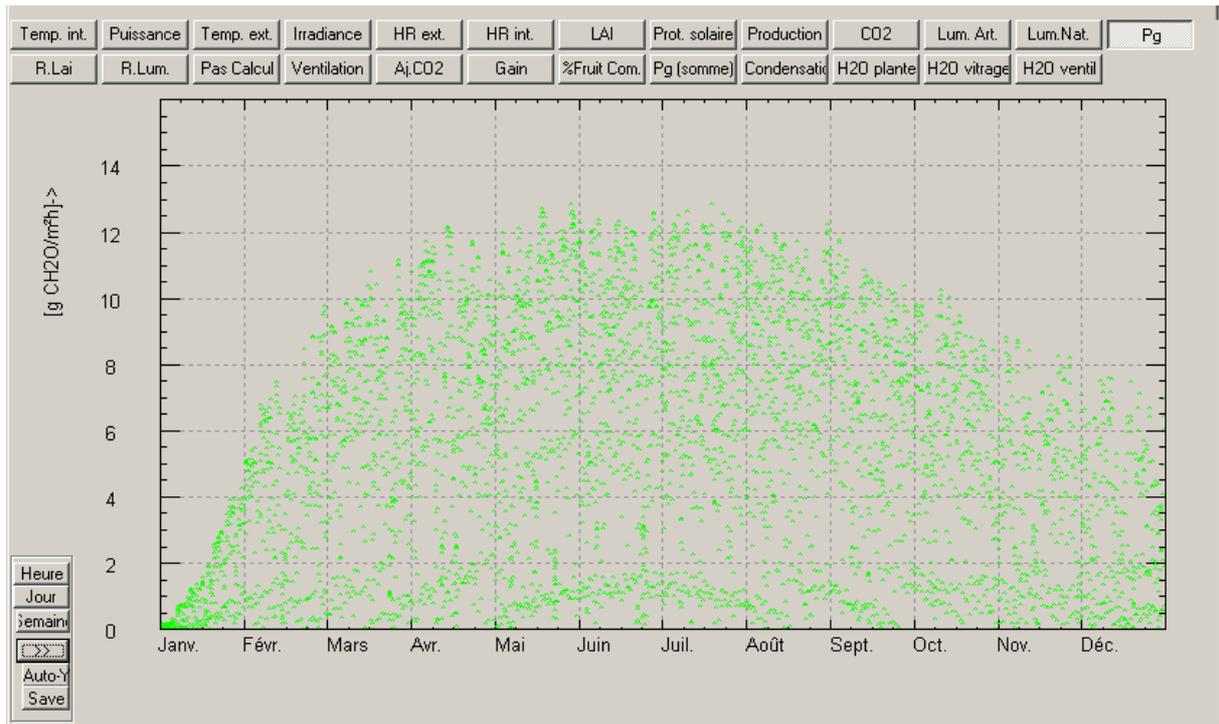
- Une météo : extension .meo.



- Un horizon : extension .hrz.



Des résultats sont calculés et présentés après avoir lancer le calcul (touche Calculer).



4. Validation du modèle

4.1. Les données tests

Des météo test

une serre test

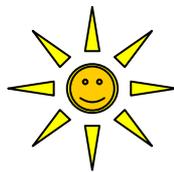
Pour nos essais, nous définissons une serre de ce type :

Surface au plancher : 5'000 m²
Volume de la serre : 18'000 m³

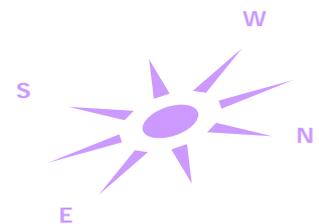
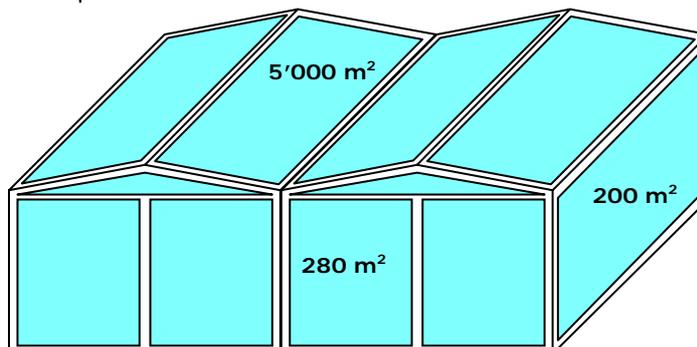
Face Sud et Nord : 200 m²
Dont : 20 m² opaque d'une valeur U de 1 W/m²*k
Dont : 180 m² vitrage double d'une valeur U de 2.9 W/m²*k, g : 0.78, f_{cadre} : 10%

Face Est et Ouest : 280 m²
Dont : 30 m² opaque d'une valeur U de 1 W/m²*k
Dont : 180 m² vitrage double d'une valeur U de 2.9 W/m²*k, g : 0.78, f_{cadre} : 10%

Toit horizontal : 5000 m²
Entièrement vitré (vitrage simple d'une valeur U de 5 W/m²*k, g : 0.86, f_{cadre} : 10%)



Lieu : Sion (Suisse)
Horizon : Valais central



4.2. « Situations analytiques »



4.3. Comparaison avec d'autres programmes de simulation



4.4. Situations réelles



5. Notations et correspondances utiles

5.1. Définition des grandeurs utiles

Notation	Unités	Description et commentaire
\hat{h}_s	$\frac{J}{m^2 \cdot K}$	Coefficient de stockage de vapeur d'eau.
h	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	Coefficient de transfert.
e	$Pa = \frac{J}{m^3}$	Pression de vapeur d'eau.
A	m^2	Surface.
R_i, I	$\frac{W}{m^2}$	Rayonnement.
C_{CO_2}	<i>ppm</i>	Concentration en CO ₂ .
$\lambda = 2.3 \cdot 10^6$	$\frac{J}{kg}$	Chaleur latente de vaporisation.
$\gamma = 66 = \frac{R}{M_{H_2O}} \cdot \frac{C_{air}}{\lambda} \cdot \rho_{air}$	$\frac{Pa}{K}$	Constante psychométrique.
E	$\frac{kg}{m^2 \cdot s}$	Flux de production d'eau

5.2. Correspondances utiles

Relation	Remarque
$1 \text{ klux} \cong 8 \text{ W}$	
$1 \text{ W} \cong 4.6 \frac{\mu \text{ mol photons}}{s}$	
$1 \frac{\mu \text{ mol } CO_2}{m^2 \cdot s} \cong 2.592 \frac{g \text{ CH}_2\text{O}}{m^2 \cdot \text{jour}}$	D=2.592 est le facteur de conversion pour passer de $\frac{\mu \text{ mol } CO_2}{m^2 \cdot s}$ en $\frac{g \text{ CH}_2\text{O}}{m^2 \cdot \text{jour}}$