



HORTISOL

INTEGRATION DES PROCESSUS ENERGETIQUES DANS LES CULTURES SOUS ABRIS

Rapport final

Rapport rédigé par

Michel Bonvin, Haute école valaisanne

Rte du Rawyl 47, 1950 Sion, michel.bonvin@hevs.ch , www.hevs.ch

Gilbert Morand, Haute école valaisanne

Rte du Rawyl 47, 1950 Sion, gilbert.morand@hevs.ch , www.hevs.ch

Antoine Reist

Rte de l'Industrie 10, 1963 Vétroz, antoine.reist@tvs2net.ch

Impressum

Datum: 31. Juli 2006

Im Auftrag des Bundesamt für Energie, Forschungsprogramm Verfahrenstechnische Prozesse VTP

Mühlestrasse 4, CH-3063 Ittigen

Postadresse: CH-3003 Bern

Tel. +41 31 322 56 11, Fax +41 31 323 25 00

www.bfe.admin.ch

BFE-Projektleiter: Bereichsleiter, martin.stettler@bfe.admin.ch

Projektnummer: 101083

Bezugsort der Publikation: www.energieforschung.ch

Für den Inhalt und die Schlussfolgerungen ist ausschliesslich der Autor dieses Berichts verantwortlich.

Table des matières

Table des matières.....	3
Summary	4
Zusammenfassung.....	4
Résumé	4
1. Introduction.....	5
2. Objectifs du projet	6
3. Modélisation	6
3.1. Données météorologiques et horizon	6
3.2. Les phénomènes thermiques.....	7
3.3. L'humidité.....	7
3.4. La lumière	8
3.5. Le gaz carbonique (CO ₂)	8
3.6. La tomate	8
3.7. Le modèle économique.....	8
4. Règles de gestion.....	8
4.1. Règle pour le chauffage	9
4.2. Règle pour la ventilation	9
4.3. Règle pour la brumisation	10
4.4. Règle pour les écrans	10
4.5. Règle pour l'enrichissement carbonique.....	10
4.6. Règle pour l'éclairage artificiel	10
5. Structuration logicielle	11
6. Validation analytique	12
7. Conclusions.....	12
8. Littérature	13
9. Annexe 1 : Fondements théoriques	14
9.1. Idée générale	14
9.2. Données météorologiques	14
9.3. Bilan thermique	16
9.4. Bilan de l'eau.....	18
9.5. Bilan du gaz carbonique	19
9.6. Rayonnement.....	19
9.7. Notation.....	20
10. Annexe 2 : Copies d'écran	22
11. Annexe 3 : Constantes	37
12. Annexe 4 : Contacts effectués pendant le projet	38
13. Annexe 5 : Acteurs du projet.....	38

Summary

In the management of greenhouses, the manufacturer of greenhouses or equipment, the market-gardener or the agricultural extension agent currently use two categories of simulation tools: tools allowing the assessment of the energy requirements for heating, such as *HORTICERN*, or tools enabling to simulate various modes of culture management in an ideal environment for the plant, such as *TOMGRO* or *SIMULSERRE*.

Hortisol is a simulation tool for tomato culture, which integrates the energy processes (heat, humidity, carbon dioxide, artificial light) and the culture itself. For the planner, it becomes thus possible to compare various constructive alternatives or to evaluate the contribution on the production of equipment such as carbonic fertilization equipment, artificial lighting or fogging system. Also for the owner, it is possible to estimate the impact of set value modification (such as the heating temperature for example) or plantation date on both the corresponding energy expenditure and the productivity. *Hortisol* thus stands out as a tool of cultures strategic planning and management. See also www.bsol.ch/hortisol.

Zusammenfassung

Hersteller von Gewächshäusern oder Ausrüstungen, Gemüsebauer und landwirtschaftliche Berater verwenden im Bereich des gedeckten Anbaus gegenwärtig zwei Arten von Simulationstools: Software zur Einschätzung des Heizenergiebedarfs (*HORTICERN*) oder zur Simulation von verschiedenen Anbauarten in einer für die Pflanzen idealen Umgebung (*TOMGRO* oder *SIMULSERRE*).

Hortisol ist ein Simulationshilfsmittel für den Tomatenanbau, das sowohl die energetischen Aspekte (Wärme, Feuchte, Kohlendioxid, künstliches Licht) als auch den Anbau selber berücksichtigt. Für den Planer ist es somit möglich, verschiedene Bauvarianten zu vergleichen und den Einfluss der Ausrüstung (Versorgung mit zusätzlichem Kohlendioxid, künstliche Beleuchtung, Nebeln) auf die Produktion zu beurteilen. Der Betreiber kann die Konsequenzen der Veränderung eines Sollwerts (z.B. Heiztemperatur) oder des Anbaudatums auf den entsprechenden Energieverbrauch und die Produktivität einschätzen. *Hortisol* ist ein strategisches Planungs- und Verwaltungshilfsmittel für Gewächshäuser. Siehe auch www.bsol.ch/hortisol.

Résumé

En matière de gestion de culture sous abri, le constructeur de serres ou d'équipements, le maraîcher ou le vulgarisateur utilisent actuellement deux catégories d'outils de simulation : des outils permettant d'estimer les besoins en énergie de chauffage, tels que *HORTICERN* ou des outils qui permettent de simuler différents modes de conduite des cultures dans un environnement idéal pour la plante, tels que *TOMGRO* ou *SIMULSERRE*.

Hortisol est un instrument de simulation pour une culture de tomate qui intègre les processus énergétiques (chaleur, humidité, gaz carbonique, lumière artificielle) et la culture elle-même. Pour le planificateur, il devient ainsi possible de comparer différentes variantes constructives ou de juger de l'apport sur la production d'équipements tels qu'équipement de fertilisation carbonique, d'éclairage artificiel ou de brumisation. De même pour l'exploitant, il est possible de juger de l'effet que la modification d'une valeur de consigne (telle que la température de chauffage par exemple) ou de la date de plantation produit à la fois sur la dépense énergétique correspondante et sur la productivité. *Hortisol* se profile ainsi comme un outil de planification stratégique et de gestion des cultures. Voir aussi www.bsol.ch/hortisol.

1. Introduction

En Suisse, la surface des exploitations horticoles sous serres (1000 ha) représentent le 7% de la surface totale consacrée à la production de légumes. Si l'on considère qu'un m² cultivé sous abri peut consommer jusqu'à de 50 kg de mazout par an, on situe l'importance de l'enjeu que représente l'optimisation énergétique de telles exploitations : avec le renchérissement des énergies primaires, ces enjeux vont encore augmenter dans les années qui viennent.

Au cœur de la production de biomasse, il y a :

- la photosynthèse : du gaz carbonique, de l'eau et du rayonnement visible se combinent pour produire des sucres et de l'oxygène ;
- l'évapo-transpiration : c'est l'élément moteur de la montée dans la plante de la sève, et avec elle des matières nutritives. La plante produit donc de l'humidité, surtout lorsque la photosynthèse est en marche.

Les facteurs limitatifs à la croissance de la plante peuvent être multiples : suivant les conditions extérieures auxquelles la plante est exposée, ce peut être le manque de rayonnement, le faible taux de gaz carbonique, le manque d'évaporation en raison d'une température trop basse ou d'une température trop élevée qui provoque la fermeture des stomates. Pour le maraîcher, qui peut intervenir sur plusieurs paramètres, moyennant dépense, se pose la question d'optimiser ses interventions relativement aux incidences économiques qu'elles peuvent avoir (dépenses pour des énergies diverses comparées au gain en productivité).

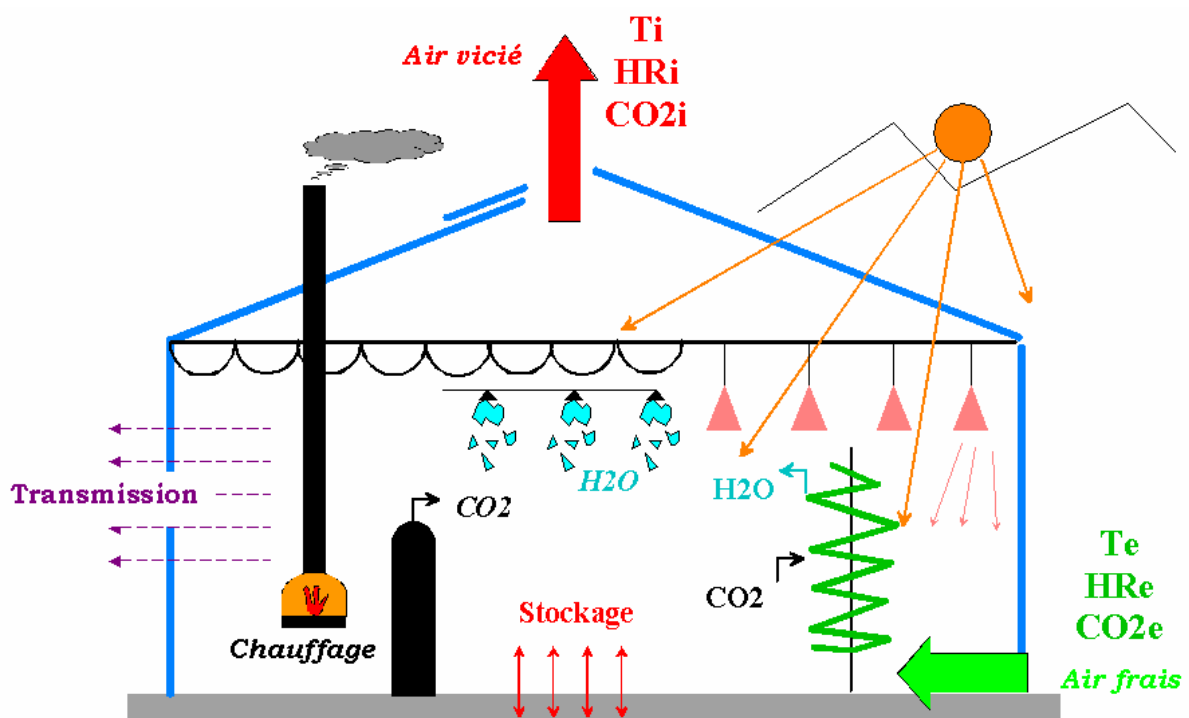


Figure 1.1 : Représentation schématique des différents phénomènes se déroulant dans une culture sous serre.

Actuellement, le planificateur, le constructeur et le maraîcher disposent d'outils permettant d'estimer les besoins d'énergie de chauffage (*HORTICERN* [2]), ou de d'éclairer des problèmes de conduite des cultures dans un environnement idéal pour la plante (*SIMULSERRE*, *TOMGRO* [10-19])

Mais il n'existe pour l'instant pas d'outil de simulation dynamique couvrant tout à la fois les trois catégories de problèmes liés aux différentes énergies (chauffage, CO₂, lumière artificielle, humidification), à celle de la production horticole et à celle du rendement économique d'une exploitation.

2. Objectifs du projet

Ce projet vise à l'optimisation stratégique du rendement d'une exploitation horticole (relation entre les coûts de construction et d'exploitation d'une part et la productivité d'autre part) par l'utilisation optimale de toutes les ressources énergétiques nécessaires : énergies de chauffage et d'éclairage, enrichissement en CO₂, brumisation. Ce n'est donc pas le but de ce travail que de viser à l'optimisation des pratiques culturales.

Pour ce faire, un prototype d'outil informatique de planification et de gestion d'une serre abritant une culture de tomates a été développé : ont été modélisés tous les phénomènes importants intervenant dans une culture (chaleur, lumière, gaz carbonique, humidité), ainsi que leurs interactions ; un outil informatique a ensuite été développé, dont l'interface utilisateur est suffisamment simple pour que le logiciel puisse être utilisé par un constructeur de serre, un maraîcher ou un vulgarisateur agricole.

3. Modélisation

Il s'agit de maîtriser théoriquement et de caractériser quantitativement à la fois les conditions météorologiques dans lesquelles la serre est placée, les différents phénomènes physiques qui s'y déroulent (chaleur, lumière, gaz carbonique, humidité) ainsi que les phénomènes biologiques de photosynthèse et de croissance de la tomate. Les différents points ci-dessous exposent les grandes lignes de chacun des éléments nécessaires à la modélisation de l'ensemble « climat extérieur-serre-culture », les détails étant placés en annexe à la fin de ce rapport.

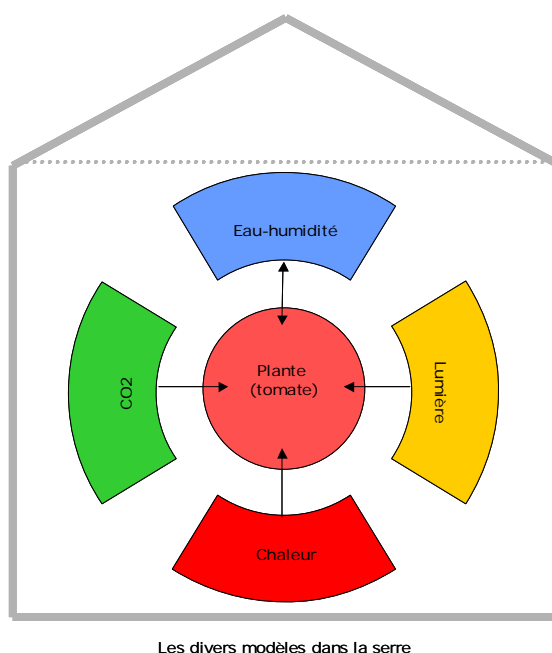


Fig. 3.1 : Les différents modèles intervenant dans Hortisol et leurs interactions.

3.1. DONNÉES METEOROLOGIQUES ET HORIZON

Les données météorologiques représentatives utilisées pour représenter le climat du lieu dans lequel la serre se trouve sont extraites de la base de données *METEONORM* [24] : pour un emplacement donné, *Hortisol* doit disposer des données horaires suivantes :

- température extérieure (°C);
- humidité relative extérieure (%);
- irradiance globale sur un plan horizontal sans effet d'horizon (W/m²);

- irradiance diffuse sur un plan horizontal sans effet d'horizon (W/m^2) ;
- hauteur du soleil au-dessus de l'horizontale ($^\circ$) ;
- azimut du soleil par rapport au sud ($^\circ$).

Afin de déterminer avec précision l'irradiance disponible, l'horizon du lieu où se trouve la serre doit être introduit par l'utilisateur sous la forme d'une ligne brisée dont les différents points sont donnés en azimut et hauteur.

A partir des données météorologiques importées ainsi que de la ligne d'horizon, *Hortisol* est capable de déterminer, l'irradiance globale heurtant un plan d'orientation quelconque : la somme des irradiances passant à-travers chacune des faces de la serre sera utile à la photosynthèse.

3.2. LES PHENOMENES THERMIQUES

Pour suivre l'évolution de la *température de l'air* à l'intérieur de la serre, *Hortisol* fait, minute après minute, le bilan des déperditions et des gains thermiques dans la serre. Les termes suivants sont considérés :

- déperditions thermiques vers l'air extérieur, par conduction à travers les éléments de l'enveloppe (vitrage, avec ou sans écran, parties opaques telles que cadre de fenêtre, ponts de froid) ou par renouvellement d'air ;
- déperditions thermiques à travers différents éléments de construction situés contre le terrain ;
- déperditions thermiques à travers différents éléments de construction situés contre des locaux à température constante ;
- gains thermiques solaires, donnés en fonction de l'ensoleillement, de la surface des fenêtres, de la transparence énergétique des vitrages et des écrans, ainsi que du facteur de cadre de fenêtre ;
- phénomènes thermiques sensibles de stockage ou de déstockage dans la masse intérieure de la serre (capacité calorifique) ;
- gains latents de condensation de vapeur d'eau sur les vitrages ;
- énergie latente évacuée par l'évaporation de la plante ;
- énergie latente évacuée par la brumisation mise en place pour rafraîchir ;
- gains internes dus au fonctionnement de l'éclairage artificiel ;
- gains internes en raison de l'activité humaine ou du fonctionnement d'appareils ;
- chaleur de chauffage.

Pour ce qui est de la *capacité calorifique*, *Hortisol* prend en compte tous les éléments structurels massifs, tels que radier, mur contre terrain, cloison intérieure, et en détermine l'inertie thermique après avoir déterminé la profondeur de pénétration journalière de la vague de chaleur dans le matériau considéré.

Lorsqu'un élément de construction est en contact avec le terrain, la *température du sol* à une profondeur donnée est déterminée analytiquement en admettant que la température en surface est une oscillation harmonique annuelle (1^{re} composante de Fourier de la température de l'air) et que la température de la serre est constante.

La *température de surface des vitrages*, qui conditionne les phénomènes de condensation, est déterminée à partir du bilan des flux thermiques à la surface intérieure du vitrage, en considérant aussi la contribution de la chaleur latente de condensation (une partie de la chaleur de condensation diffuse vers l'intérieur de la serre, une autre vers l'extérieur à travers le vitrage, au pro rata des résistances thermiques intérieure et extérieure).

3.3. L'HUMIDITE

L'évolution de la teneur en vapeur d'eau de l'air intérieur est donnée par le bilan des productions et des évacuations d'humidité [7] :

- production de vapeur d'eau par la plante, en raison de la respiration et de l'activité photosynthétique ;

- production de vapeur d'eau par brumisation artificielle ;
- évacuation de vapeur d'eau par condensation sur les vitrages froids ;
- évacuation et introduction de vapeur d'eau par ventilation ;
- stockage ou déstockage de vapeur d'eau par augmentation ou diminution de l'humidité relative de l'air intérieur.

On a admis que le sol de la serre est en béton et donc en principe sec : dans ce sens, on a négligé tout phénomène d'évaporation du sol.

3.4. LA LUMIÈRE

Le *rayonnement photosynthétiquement actif* est considéré comme le rayonnement solaire visible qui entre dans la serre par chacune des faces transparentes de cette dernière (transparence énergétiques des vitrages et effets d'écran inclus) augmenté, s'il y a lieu, du rayonnement produit par le système d'éclairage artificiel. Le rayonnement solaire pénétrant par les faces verticales de la serre est uniformément réparti sur toute la surface de cette dernière : en d'autres termes, en matière de lumière, les effets de bord ont été négligés.

3.5. LE GAZ CARBONIQUE (CO₂)

Le suivi de la concentration de gaz carbonique dans l'atmosphère intérieure est basé sur le bilan suivant :

- gaz carbonique introduit à l'intérieur ainsi que gaz carbonique évacué vers l'extérieur par la ventilation ;
- gaz carbonique absorbé par les plantes lors de la photosynthèse ;
- gaz carbonique ajouté artificiellement (fertilisation carbonée).

3.6. LA TOMATE

Pour ce qui est de la plante, *Hortisol* utilise le modèle de la tomate développé et validé dans le cadre de la réalisation des logiciels *TOMGRO* et *SIMULSERRE* [10-19]. Ce modèle, écrit en Fortran et initialement développé pour décrire la tomate dans un environnement physique quasi-optimal, a été traduit dans le langage de programmation C++ et relié aux paramètres physiques variables de la serre. Dans le cadre de ce modèle, il est possible de suivre la croissance de la plante à mesure que l'activité photosynthétique se déroule : à partir du jeune plan, dont les caractéristiques à la plantation sont connues, la surface foliaire augmente, les fleurs, puis les fruits apparaissent, croissent, atteignent la maturité et sont cueillis. Les activités du maraîcher, telles qu'effeuillages successifs sont prises en compte et influencent la surface foliaire.

3.7. LE MODELE ÉCONOMIQUE

Le rendement économique de la culture est estimé sur la base du détail calculé par *Hortisol* des dépenses journalières pour les différentes formes d'énergie (énergie de chauffage, d'éclairage artificiel, d'enrichissement en CO₂ et d'eau pour brumisation) et de main d'œuvre. Pour chacune de ces rubriques, des coûts fixes (par exemple amortissement de la serre et de son équipement, main d'œuvre fixe) et des coûts variables (par exemple énergies, main d'œuvre nécessaire à la cueillette) peuvent être définis : le logiciel peut ainsi suivre quotidiennement l'évolution des dépenses et des recettes. En ce qui concerne les recettes, elles sont basées sur les quantités récoltées chaque semaine et sur le prix de vente de la tomate, qui peut être paramétré semaine après semaine, sur toute une année.

4. Règles de gestion

Pour optimiser le fonctionnement de la serre et le comportement de la culture, l'exploitant doit rechercher de subtils équilibres en agissant sur les valeurs de différents paramètres. *Hortisol* permet d'ajuster la simulation en modifiant les paramètres suivants :

- Température intérieure :
 - Actions : l'enclenchement du chauffage ainsi que de la ventilation et/ou de la brumisation peuvent modifier la température intérieure à la hausse ou à la baisse ; le déploiement de l'écran mobile ralentit un refroidissement (la nuit en hiver) ou atténue une surchauffe (le jour en été) ;
 - Risque : l'éclairage artificiel, qui peut être souhaité pour renforcer la photosynthèse, peut chauffer la serre au point de provoquer des surchauffes.
- Humidité intérieure :
 - Action : la ventilation (naturelle par ouverture des ouvrants ou éventuellement mécanique) permet d'évacuer les excédents de production de vapeur d'eau à l'intérieur de la serre ;
 - Risque : la brumisation, souhaitée pour des raisons de rafraîchissement de la serre, augmente fortement l'humidité intérieure.
- Rayonnement photosynthétique :
 - Action : l'éclairage artificiel renforce la photosynthèse pour le cas où la dose journalière d'éclairage naturel est trop faible ;
 - Risque : le déploiement des écrans, motivé par la lutte contre la surchauffe intérieure, diminue l'intensité de l'éclairage naturel.
- Gaz carbonique :
 - Action : fertilisation carbonique durant les périodes de forte activité photosynthétique ;
 - Risque : une ventilation trop abondante évacue vers l'extérieur le gaz carbonique avant qu'il n'ait pu être absorbé par la plante.

Les principes appliqués par *Hortisol* pour modifier les conditions intérieures de la serre sont exposés ci-dessous. Les grandeurs marquées en italique correspondent à des grandeurs qui peuvent être choisies par l'utilisateur pour la simulation.

4.1. RÈGLE POUR LE CHAUFFAGE

Lorsqu'une *installation de chauffage* est disponible dans la serre, *Hortisol* permet de définir deux températures de consigne, une *température de jour* et une *température de nuit*. Le jour et la nuit sont définis par le niveau d'irradiance extérieur sur un plan horizontal : lorsque ce niveau est supérieur à une *valeur limite d'irradiance* introduite par l'utilisateur, c'est la consigne de jour qui est considérée ; dans le cas contraire, c'est la consigne de nuit (les débuts du jour et de la nuit correspondent à des heures entières).

Chaque fois que la température intérieure de la serre tombe en dessous de la consigne, le système de chauffage compense le déficit de température, et ceci jusqu'à concurrence de la valeur limite de la *puissance maximale du chauffage*. D'autre part, la vitesse de montée en température est limitée à une valeur accessible dans le fichier *ConstantesPhysique.cnf*.

Pour le cas où la température moyenne de la serre le jour qui a précédé a été située au-dessus de la valeur de consigne de jour, une option « *température intégrée* » permet, pour la nuit qui suit, d'abaisser la température de consigne de nuit, jusqu'à une valeur minimale en dessous de laquelle la plante serait en danger ; cette valeur est accessible dans le fichier *ConstantesPhysique.cnf*.

4.2. RÈGLE POUR LA VENTILATION

La ventilation a la double fonction de refroidir la serre lorsque les conditions extérieures sont propices et d'évacuer les excédents d'humidité. En ce qui concerne le débit de ventilation, il peut varier entre une *valeur minimale* (correspondant aux infiltrations naturelles lorsque la serre est fermée au maximum) et une *valeur maximale* (correspondant la situation où le débit d'air échangé avec l'extérieur prend sa valeur maximale).

En ce qui concerne le critère de température, la *température minimale de ventilation* détermine la frontière en dessous de laquelle le débit de ventilation est minimal ; de même, la *température maximale de ventilation* détermine la frontière en dessus de laquelle le débit de ventilation est maximal. Entre ces deux valeurs de la température intérieure, le débit de ventilation varie linéairement entre sa

valeur minimale et sa valeur maximale. De surcroît, le débit de ventilation est toujours maintenu à sa valeur minimale lorsque la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est supérieure à une *différence de température* prescrite : ceci permet d'éviter de ventiler la serre par grand froid.

De même pour ce qui est du critère d'humidité, le débit de ventilation varie linéairement entre ses deux valeurs extrêmes à partir d'une consigne d'*humidité relative minimale* à une consigne d'*humidité relative maximale*.

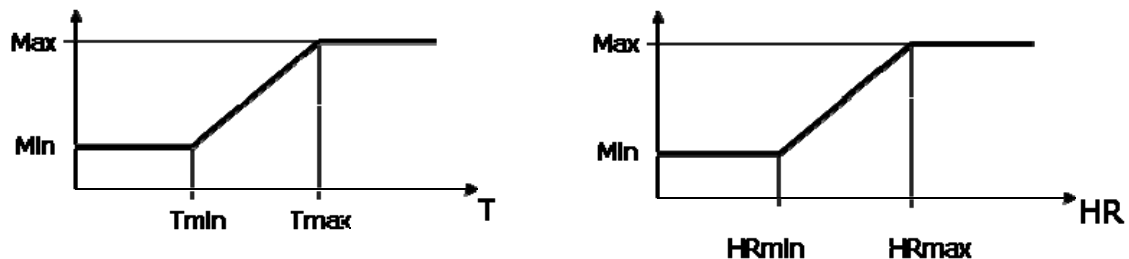


Fig. 4.1 : Représentation schématique du débit de ventilation déterminé selon le critère de température (gauche) et déterminé selon le critère d'humidité relative (droite).

Lorsque les deux critères de température et d'humidité interviennent simultanément, c'est la plus grande des deux valeurs du débit de ventilation qui est retenue.

4.3. REGLE POUR LA BRUMISATION

Lorsqu'une *installation de brumisation est disponible* dans la serre, elle a pour fonction de rafraîchir l'atmosphère intérieure par grande chaleur. Elle est enclenchée sitôt que la température intérieure est supérieure à une *température de brumisation* ET tant que l'humidité relative se situe en dessous d'une *humidité relative maximale*.

4.4. REGLE POUR LES ECRANS

Dans *Hortisol*, les écrans se déploient sitôt que la température intérieure est supérieure à la *température de déploiement des écrans* (lutte contre les surchauffes) et sitôt que l'irradiance extérieure est inférieure à une *irradiance minimale* (diminution des déperditions thermiques) : ainsi les écrans sont toujours déployés la nuit.

4.5. REGLE POUR L'ENRICHISSEMENT CARBONIQUE

Lorsqu'une *installation d'enrichissement en CO₂ est disponible* dans la serre, elle fonctionne tant que la concentration intérieure est inférieure à une *concentration de consigne*. Deux options peuvent être activées : l'installation peut fonctionner uniquement si les ouvrants sont fermés ou aussi si *les ouvrants sont déployés* (dans ce contexte, les ouvrants sont considérés comme déployés dès que la valeur du débit de ventilation est supérieure à 90 % de débit de ventilation maximale ; cette valeur est accessible dans le fichier *ConstantesPhysique.cnf*). De surcroît, l'installation peut fonctionner toujours ou uniquement si l'*irradiance intérieure* est supérieure à une valeur limite.

4.6. REGLE POUR L'ECLAIRAGE ARTIFICIEL

Lorsqu'une *installation d'éclairage artificiel est disponible* dans la serre, elle est enclenchée sitôt que l'irradiance intérieure est inférieure à une *irradiance minimale* et que le rayonnement photosynthétique, intégré sur une journée, reste inférieur à une *énergie limite*. De toute façon, la plante bénéficie d'une *période prescrite de repos* durant laquelle l'éclairage artificiel ne peut pas fonctionner.

5. Structuration logicielle

Hortisol fonctionne sur un PC (système d'exploitation Windows 98, NT, 2000, XP) ou sur Mac équipé d'un émulateur Windows. Une machine d'une performance égale ou supérieure à Pentium III est suffisante pour faire tourner le logiciel avec un temps de réponse acceptable.

Le logiciel *Hortisol* est écrit en C++. Le calcul s'effectue par itération sur toute une année à partir de la date de plantation. Un pas d'itération détermine, à partir des conditions actuelles, la valeur des différents paramètres pour le pas d'itération suivant. Trois grandeurs des pas d'itération s'imbriquent les unes dans les autres :

- la minute pour tout ce qui a trait aux conditions physiques à l'intérieur de la serre (température et besoins de chauffage, ventilation, humidité, gaz carbonique) ainsi qu'à l'activité photosynthétique ;
- l'heure pour les paramètres météorologiques qui caractérisent le climat extérieur ;
- le jour pour tout ce qui concerne la croissance de la plante ainsi que les aspects économiques de coûts et de rendement.

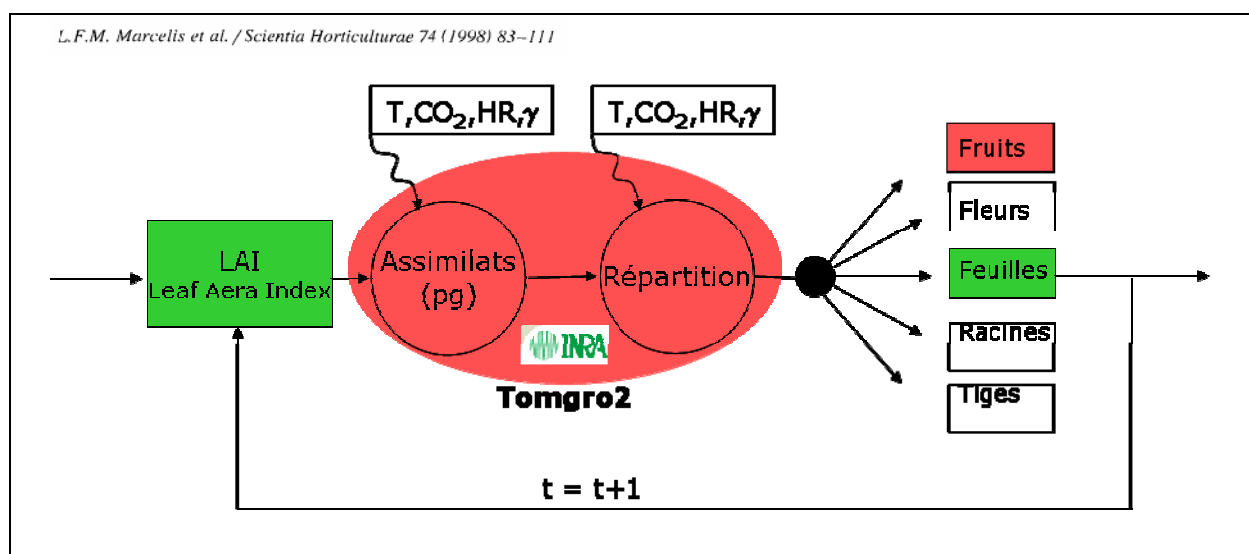


Fig. 5.1 : Représentation schématique présentant l'itération à la base de la croissance de la plante et de la production de fruit : selon la grandeur de la surface foliaire (LAI), la chaleur, le rayonnement, le CO₂ et l'eau vont pouvoir produire des assimilats (pg), lesquels, selon la maturité de la plante, vont se répartir différemment en fruits (rouge), feuilles (vert) ou fleurs, tiges, racines. A l'itération suivante, la plante aura une surface foliaire modifiée.

Une simulation *Hortisol* est réalisée sur la base des informations contenues dans quatre fichiers informatiques :

- la serre (extension .sre) contient la description de la serre en tant que construction (orientation, dimensions, matériaux), ainsi que de ses équipements (installations de chauffage, de production de CO₂, d'éclairage artificiel, de brumisation) ;
- l'exploitation (extension .eon) rassemble toutes les valeurs de consigne et d'utilisation ;
- la météo (extension .meo) renferme les valeurs horaires des grandeurs qui caractérisent le climat dans lequel la serre est située ;
- l'horizon (extension .hrz) décrit la ligne du ciel nécessaire à déterminer l'ensoleillement direct.

De plus, le fichier Projet (extension .hsol) renferme les références des quatre fichiers ci-dessus.

Les résultats d'un calcul (sous forme de données numériques ou de graphiques) sont visibles sous les différents onglets d'une fenêtre interface. Pour les grandeurs physiques calculées, les valeurs horaires peuvent être exportées, par exemple dans un fichier Word ou dans un tableur, pour visualisation ou pour traitement particulier.

6. Validation analytique

Dans le cadre des 18 mois sur lesquels s'est étendue toute la phase de modélisation et de développement du projet *Hortisol*, il n'a pas été possible de procéder à une validation expérimentale complète, c'est-à-dire de confronter directement les résultats de calcul à des mesures. Toutefois, il a été possible de minimiser les risques en testant analytiquement les interfaces d'imbrication des différents modèles dont *Hortisol* est constitué. En effet :

- la modélisation des flux thermiques dans une serre est chose acquise et validée [2-6] ;
- le modèle d'évapo-transpiration (*HORTITRANS*) existe et a été validé [7-9] ;
- des modèles de conduite de culture existent pour la tomate (*TOMGRO*, *TOMSIM*, *SERRISTE*) [10-19] et ils ont été validés expérimentalement et produisent des résultats de simulation dont l'écart avec les mesures est de moins de 10 % [20]; c'est le noyau de *TOMGRO*, aimablement transmis par C. Gary, qui a été repris dans *Hortisol*.

Les tests effectués sont décrits dans le travail de semestre de L. Petrig [21].

7. Conclusions

Hortisol est un outil informatique de simulation d'une culture de tomate dont l'objectif est d'éclairer les choix stratégiques en matière de construction et de culture.

Pour le maraîcher et le constructeur, il est possible, grâce à *Hortisol* de comparer différents choix constructifs. Par exemple, une installation de fertilisation carbonique ou d'éclairage artificiel représentent des investissements initiaux et occasionnent des frais de fonctionnement, qui sont relativement faciles à estimer ; quant aux gains de productivité qui en résulteront, *Hortisol* les quantifie en simulant la croissance de la plante dans son environnement.

Pour l'exploitant horticole, il est possible de comparer différents scénarios relatifs à la date de plantation (et donc de récolte) ou aux différentes valeurs de consigne à intégrer dans le système de micro-régulation. Par exemple, planifier une récolte sur les six premiers mois de l'année implique de planter en octobre, de disposer d'éclairage artificiel, d'investir d'avantage en énergie de chauffage, mais avec le bénéfice de prix du marché plus élevés : *Hortisol*, en quantifiant soigneusement dépenses et recettes permet de juger des enjeux.

En l'état actuel, on peut considérer qu'*Hortisol* est un prototype d'outil informatique : *Hortisol* fonctionne en tant qu'outil d'aide à la décision stratégique en matière de construction, d'équipement et d'exploitation de culture de tomate sous abri. En ce sens, l'objectif qui lui avait été fixé en début de projet est atteint. Pour le transformer en produit commercialisable, il faut encore valider définitivement la procédure de calcul (comparaison avec des mesures in situ), produire une documentation d'utilisation en ligne et sécuriser le logiciel pour tout ce qui concerne des utilisations erronées. La seconde partie de l'année 2006 sera consacrée à organiser et à financer ces travaux.

8. Littérature

- [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] M. Trigui, S. Barrington, L. Gauthier : **A Strategy for Greenhouse Climate Control, Part II : Model Validation**, J. agric. Engng Res. (2001) 79, 99-105.
- [19] G. Papadakis, A. Frangoudakis, S. Kyritsis : **Experimental Investigation and Modelling of Heat and Mass Transfer between a Tomato Crop and the Greenhouse Environment**, J. agric. Engng Res. (1994) 57, 217-227.
- [20] 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.
- [21] L. Petrig : **Validation du logiciel Hortisol**, Travail de semestre, Haute école valaisanne, 2006.
- [22] 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.
- [23] **bSol – Bien construire avec le soleil**, www.bsol.ch
- [24] **METEONORM – Global Meteorological Database for Engineers, Planers and Education**, Version 5.0 – Edition 2003.
- [25] B. Keller : **Klimagerechtes Bauen**, BG Teubner – Stuttgart, 1997.

9. Annexe 1 : Fondements théoriques

9.1. IDEE GENERALE

Le logiciel *Hortisol* est un logiciel d'aide à la décision stratégique en matière :

- de construction et d'équipement d'une serre horticole ;
- de gestion des cultures en ce qui concerne la date de plantation et le choix des consignes.

Dans sa version initiale, *Hortisol* n'a été développé que pour traiter de la culture de tomate.

Pour étudier une serre et sa culture, *Hortisol* effectue chaque minute sur toute une année, dans le cadre d'un modèle à un nœud, les bilans des flux des grandeurs suivantes qui influencent la croissance de la plante (ces valeurs sont, la plupart du temps, source de dépense en ce qui concerne le maintien de valeurs de consigne) :

- chaleur ;
- humidité ;
- gaz carbonique ;
- lumière.

Lorsque les conditions de la culture l'exigent, des paramètres variables sont activés :

- activation du chauffage, de la ventilation ou de la brumisation pour maintenir la température dans une plage de valeurs souhaitée ;
- activation de la brumisation ou de la ventilation pour assurer une humidité relative intérieure adéquate ;
- ventilation ou enrichissement en gaz carbonique artificiel pour assurer une teneur optimale en CO_2 ;
- enclenchement de l'éclairage artificiel ou mise en place d'écrans mobiles (à la fois protection solaire pour éviter les surchauffes pendant le jour et résistance thermique supplémentaire pendant la nuit).

La somme de toutes les interventions effectuées par les installations techniques sur une certaine période donne les besoins nets en ce qui concerne les différentes énergies et permet d'en déterminer les coûts.

L'évolution des dépenses globales (en main d'œuvre et en énergies) peut directement être comparée à celle des recettes, ce qui permet, en plus d'une optimisation énergétique aussi une optimisation financière.

9.2. DONNEES MÉTÉOROLOGIQUES

9.2.1. Température extérieure

Pour la température extérieure θ_e , *Hortisol* utilise des données horaires pour toute la durée d'une année (du 1^{er} janvier au 31 décembre). Pour un endroit géographique donné, ces valeurs peuvent, par exemple, être extraites de la base de données METEONORM [24].

9.2.2. Température du sol en contact avec un élément de construction

La température du sol en contact avec un élément de construction situé à une profondeur donnée au-dessous du niveau du sol, est déterminée analytiquement à l'aide de l'équation de conduction de la chaleur :

$$c\rho \frac{\partial \theta}{\partial t} = \text{div}(\lambda \text{grad}(\theta))$$

9.1

dans laquelle c , ρ et λ représentent la chaleur massique, la masse volumique et la conductivité thermique du sol. Les hypothèses suivantes sont faites :

- le terrain est homogène (conductivité thermique, chaleur massique et masse volumique constantes) ;
- l'élément de construction en contact avec le sol est homogène quant à sa valeur U ; tout effet de bord est négligé ;
- la température du sol en surface peut être considérée comme une fonction harmonique dont la période est une année (1^{re} composante du développement en série de Fourier de la température extérieure) ;
- la température intérieure de l'élément en contact avec le sol est constante tout au long de l'année.

La température du terrain ainsi déterminée tient donc compte du fait que le terrain proche de l'élément de construction considéré est influencé par les échanges thermiques entre la serre et le terrain.

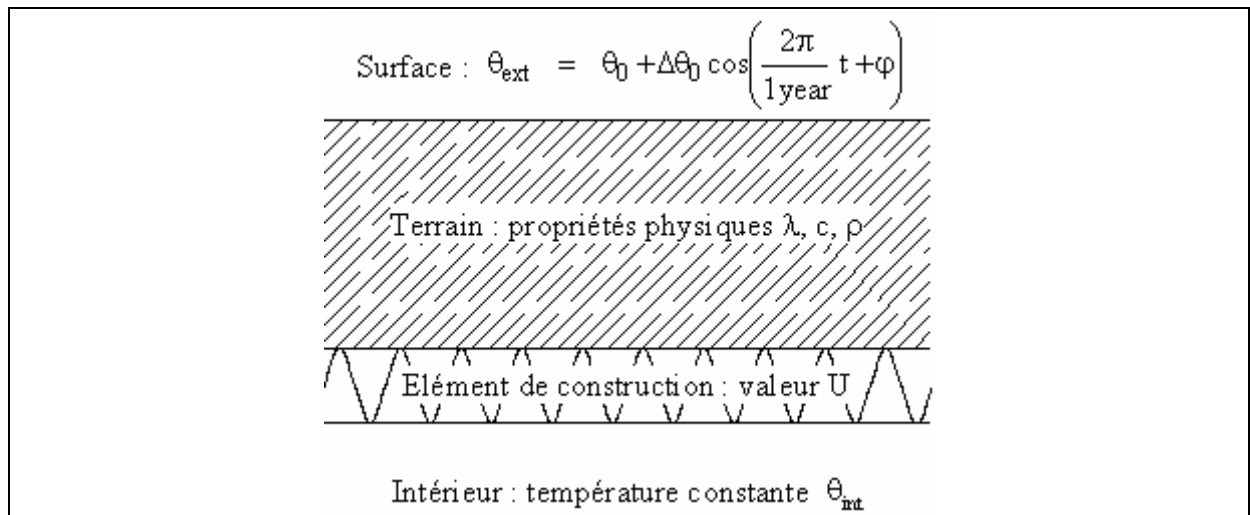


Fig. 9.1 : Représentation schématique des hypothèses utilisées pour déterminer la température du terrain directement en contact avec un élément de construction.

9.2.3. Rayonnement solaire

L'irradiance incidente G_k sur une surface d'orientation arbitraire k est calculée par *Hortisol*, à partir des données horaires brutes des irradiances globale G_h et diffuse D_h sur un plan horizontal, sans aucun effet d'horizon.

$$G_k = B_k + D_k^{\text{sky}} + D_k^{\text{reflected}} \quad 9.2$$

$$B_k = (G_h - D_h) \frac{\cos \theta}{\sin \eta} \quad 9.3$$

Pour le rayonnement diffus en provenance du ciel, D_k^{sky} , un modèle isotrope est considéré ; en ce qui concerne l'albédo du sol ρ , il est pris en compte sous la forme de valeurs mensuelles qui dépendent uniquement de la température mensuelle moyenne du lieu [réf]. Les effets d'horizon agissent à la fois sur l'irradiance directe B_k (ligne d'horizon) et sur les irradiances diffuses D_k par l'intermédiaire des facteurs de vue du ciel et du sol par la surface k (r_{Dk} et r_{Rk}) et pour une surface horizontale (r_{Dh} et r_{Rh}).

$$D_k^{\text{sky}} = r_{Dk} D_h \quad 9.4$$

$$D_k^{\text{reflected}} = r_{Rk} \rho \frac{(G_h - D_h) + r_{Dh} D_h}{1 - \rho r_{Rh}} \quad (\text{soleil au-dessus de la ligne d'horizon}) \quad 9.5a$$

$$D_k^{\text{reflected}} = r_{Rk} \rho \frac{r_{Dh} D_h}{1 - \rho r_{Rh}} \quad (\text{soleil en dessous de la ligne d'horizon}) \quad 9.5b$$

avec :

$$r_{Dk} + r_{Rk} = 1$$

$$\rho = 0.5 \quad \text{pour} \quad \bar{g}_e \leq -3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho = \rho_0 + \delta_\rho \exp(-0.038 (\bar{\theta}_e + 3 \text{ } ^\circ\text{C})) \quad \text{pour} \quad \bar{g}_e > -3 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\rho_0 = 0.2 \quad \delta_\rho = 0.3$$

9.3. BILAN THERMIQUE

9.3.1. Protection thermique de la serre

Pour les déperditions thermiques de la serre, *Hortisol* considère les catégories suivantes :

- pertes à travers un élément opaque, qui sont caractérisées par la valeur U de l'élément ; cette valeur U peut être introduite directement par l'utilisateur ou être calculée par *Hortisol* à partir des couches qui constituent l'élément ;
- pertes à travers des éléments de type fenêtre, qui sont caractérisées par les valeurs U du vitrage et du cadre de fenêtre ainsi que par la fraction de cadre ;
- pertes par des ponts de froids linéiques et/ou ponctuels ;
- pertes par renouvellement d'air, qui sont fonction du débit de renouvellement d'air.

9.3.2. Capacité calorifique de la serre

Un élément de construction en contact avec le climat intérieur peut accumuler de la chaleur à certaines heures de la journée (apports solaires à travers les vitrages, production de chaleur de par la présence de personnes ou le fonctionnement d'appareils électriques, etc.) et la restituer à la pièce lorsque la température de cette dernière baisse. *Hortisol* traite ces phénomènes en admettant que [25] :

- la température à la surface intérieure de l'élément considéré varie suivant la relation :

$$\theta_i(t) = \theta_{i0} + \Delta\theta \cos\left(\frac{2\pi t}{1 \text{ day}} + \phi\right) \quad 9.6$$

- le flux de chaleur sur l'autre face de l'élément de construction est nul (plan adiabatique) ;
- la chaleur stockée dans un élément k de construction Q_k^{sto} est considérée comme l'intégrale durant toute une journée des flux de chaleur entrant dans l'élément considéré ;
- la capacité calorifique de l'élément est le quotient de la chaleur stockée par le double de l'amplitude de variation de température :

$$C_k = \frac{Q_k^{\text{sto}}}{2 \Delta\theta} \quad 9.7$$

- En ce qui concerne la capacité calorifique C associée au nœud intérieur, elle est considérée comme la somme de toutes les capacités calorifiques de chacun des éléments en contact avec l'air intérieur, la capacité calorifique de l'air lui-même étant négligée :

$$C = \sum_{(k)_i} C_k \quad 9.8$$

Du point de vue pratique, *Hortisol* permet de traiter trois variantes suivantes :

1. la couche de stockage k est directement en contact avec l'air de la serre.

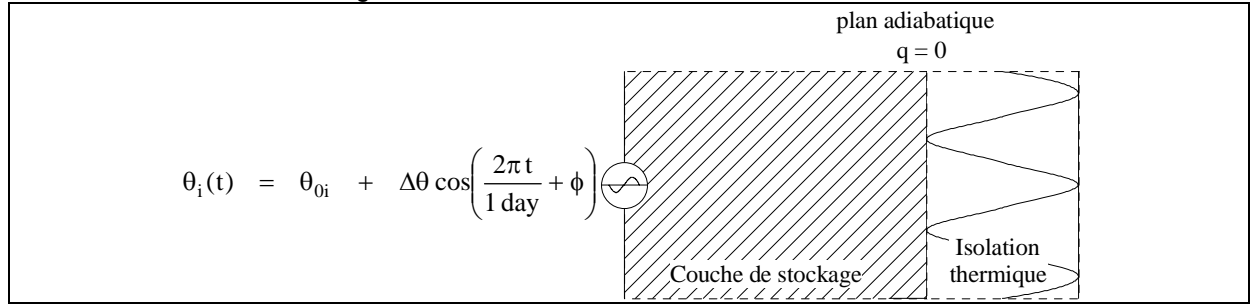


Fig . 9.2 : Représentation schématique pour le cas où l'élément de stockage est directement en contact avec l'air de la serre dont la température varie harmoniquement.

2. la couche de stockage est en contact avec l'air de la serre au travers d'une **résistance thermique**, telle couche de recouvrement, dont la capacité calorifique peut être négligée.

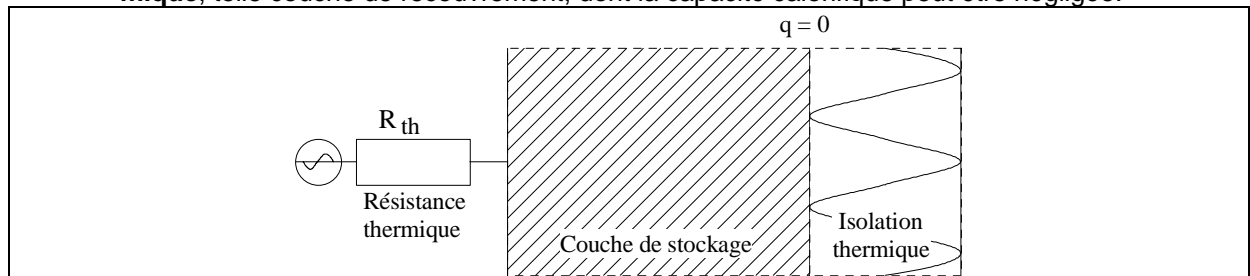


Fig . 9.3 : Représentation schématique pour le cas où l'élément de stockage est en contact avec l'air de la serre par le biais d'une couche (résistance thermique R_{th}) dont la capacité de stockage est négligeable.

3. la couche de stockage est recouverte d'une **couche de recouvrement**, telle que crépis, boiserie épaisse ; dans ce cas, les capacités calorifiques des deux couches sont rigoureusement considérées.

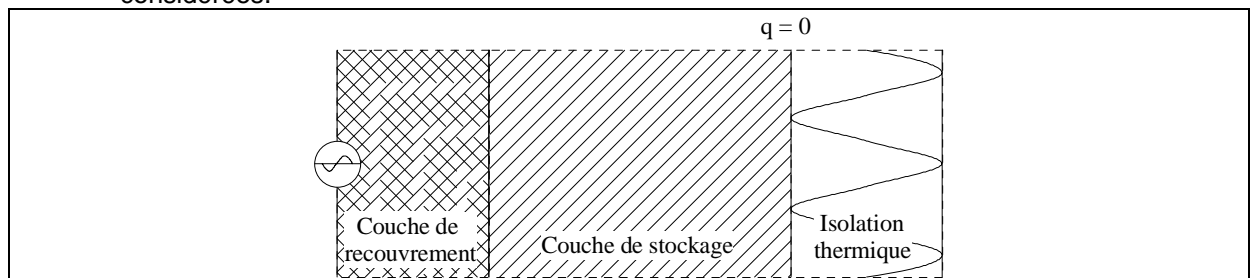


Fig . 9.4 : Représentation schématique pour le cas où l'élément de stockage est en contact avec l'air de la serre par le biais d'une couche dont la capacité de stockage ne peut pas être négligée.

9.3.3. Température intérieure

De manière générale, pour la température intérieure, la somme des différentes puissances thermiques perdues (vers l'extérieur, vers différents éléments de terrain, vers différents locaux à température constante) est égale à la somme des gains thermiques (gains solaires à travers les vitrages, déstockage de chaleur accumulée dans les structures, gains internes dégagés par les phénomènes de condensation sur les vitrages, chaleur nécessaire à l'évaporation de la plante, chaleur de brumisation, gains internes liés au fonctionnement de l'éclairage artificiel, gains internes des personnes et des installations électriques, et gains en provenance des installations techniques de chauffage). Ce bilan thermique est représenté par l'équation suivante :

$$\begin{aligned}
H_e (\theta_i(t) - \theta_e(t)) + \sum_k H_{Gk} (\theta_i(t) - \theta_{Gk}(t)) + \sum_k H_{Ok} (\theta_i(t) - \theta_{Ok}(t)) = \\
\sum_k g_{Sk}(t) F_F g_k A_{Wk} G_k(t) - C \frac{d\theta_i(t)}{dt} \\
+ \sum_k \dot{m}_{ck} L \left(1 - \frac{U_{Wk}}{h_i} \right) - \dot{m}_t L - \dot{m}_{br} L \\
+ SRE_0 P_L(t) + SRE_0 (P_{iP}(t) + P_{iE}(t)) + SRE_0 P_H(t)
\end{aligned} \tag{9.9}$$

où les différentes déperditions thermiques spécifiques H sont données par :

$$H_e = \left(\sum_{(j)_e} A_j U_j + \sum_{(j)_e} L_j \psi_j + \sum_{(j)_e} \chi_j \right) + c_a \rho_a \dot{V} \tag{9.10}$$

$$H_{Gk} = \left(\sum_{(j)_{Gk}} A_j U_j + \sum_{(j)_{Gk}} L_j \psi_j + \sum_{(j)_{Gk}} \chi_j \right) \tag{9.11}$$

$$H_{Ok} = \left(\sum_{(j)_{Ok}} A_j U_j + \sum_{(j)_{Ok}} L_j \psi_j + \sum_{(j)_{Ok}} \chi_j \right) \tag{9.12}$$

9.3.4. Température de surface des vitrages

La température de la surface intérieure des vitrages est à la source des phénomènes de condensation. Elle est donnée par le bilan des flux thermiques sur la surface intérieure du vitrage considéré, incluant le rayonnement secondaire intérieur produit par l'irradiance incidente sur le vitrage :

$$A_{Wk} h_i (\theta_i - \theta_{Sik}) = A_{Wk} U_{Wk} (\theta_i - \theta_e) - q_i G_k \tag{9.13}$$

$$\text{avec : } h_i = 8 \frac{W}{m^2 K}$$

9.4. BILAN DE L'EAU

Le bilan de l'eau qui entre, qui est produite ou absorbée à l'intérieur ou qui ressort de la serre est donné par la relation suivante [7] :

$$E_t + E_{br} = E_{Wk} + E_v + E_{sa} \tag{9.14}$$

L'équation précédents tient compte des formes d'eau transpirée par la plante, additionnée par brumisation, évacuée par condensation sur les vitrages, évacuée par ventilation et stockée dans l'air intérieur. Pour ces différentes contributions, on a :

$$E_t = \frac{a}{L} G_i + \frac{h_t}{L \gamma} (e_i^* - e_i) \tag{9.15}$$

$$\text{avec : } a = 0.154 \ln(1 + 1.1 LAI^{1.13})$$

$$h_t = 1.65 LAI \left(1 - 0.56 e^{-G_i/13} \right)$$

(a est un nombre pur, alors que h_t se mesure en $W/m^2 K$; G_i représente le rayonnement photosynthétique).

$$E_{Wk} = \frac{h_c A_{Wk}}{L \gamma SRE_0} (e_i - e_{Wk}^*) \tag{9.16}$$

$$\text{avec : } h_c = 3.5 \frac{W}{m^2 K}$$

$$E_v = \frac{h_v}{L \gamma} (e_i - e_e) \quad 9.17$$

$$\text{avec : } h_v = c \rho \frac{\dot{V}}{A}$$

$$E_{sa} = \frac{\hat{h}_s}{L \gamma} \frac{de_i}{dt} \quad 9.18$$

$$\text{avec : } \hat{h}_s = c \rho H$$

Les unités de \hat{h}_s sont des $J/m^2 K$.

9.5. BILAN DU GAZ CARBONIQUE

Le bilan du gaz carbonique prend en compte la contribution du renouvellement d'air, de l'absorption par la plante lors de la photosynthèse et de dégagement artificiel dans la serre, selon la relation suivante :

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\dot{V}}{V} (C_e - C_i) - 10^6 \frac{R T}{p_{atm} V} \frac{\dot{m}_{CO2}}{M_{CO2}} + \dot{C}_{art} \quad 9.19$$

9.6. RAYONNEMENT

Pour le rayonnement photosynthétique, *Hortisol* considère les contributions du rayonnement solaire entrant par les vitrages ainsi que le rayonnement visible produit par les lampes :

$$G_i(t) = \frac{1}{SRE_0} \sum_k g_{sk}(t) F_F g_k(t) A_{wk} G_k(t) + \eta_L P_L(t) \quad 9.20$$

9.7. NOTATION

9.7.1.Indices

Indice	Notion	Begriff
0	grandeur constante	konstante Wert
art	artificiel	künstlich
br	brumisation	Sprayen
c	condensation	Kondensation
CO ₂	gaz carbonique	Kohlendioxyd
D	diffus	diffus
e	extérieur	aussen
E	appareils électriques	Elektrogeräte
F	cadre de fenêtre	Fensterrahmen
G	terrain	Erdreich
H	chauffage	Heizung
h	plan horizontal	Horizontale Ebene
i	intérieur	innen
j, k	indice de sommation	Summenindex
k	plan d'orientation quelconque	Ebene mit beliebiger Orientierung
L	lampe	Lampe
P	personnes	Personen
R	réfléchi	reflektiert
S	protection solaire	Sonnenschutz
sa	stocké dans l'air	in der Luft gespeichert
t	transpiré par la plante	durch die Pflanze ausgedünst
W	fenêtres	Fenster
V	ventilation	Lüftung

9.7.2. Grandeurs

	Unités	Notion	Begriff
\dot{m}	kg/s	débit massique	Massenstrom
\dot{V}	m ³ /s	débit d'échange d'air	Luft-Volumenstrom
A	m ²	superficie	Fläche
B	W/m ²	irradiance directe	Direkte Einstrahlung
C	J/K	capacité calorifique	Wärmespeicherkapazität
C	ppm	concentration de gaz carbonique	CO ₂ -Inhalt
c _a	J/kgK	chaleur massique de l'air	Spezifische Wärmekapazität der Luft
h	W/m ² K	coefficient de transfert de chaleur	Wärme-Übergangskoeffizient
e	Pa	pression de vapeur d'eau	Wasserdampfdruck
e*	Pa	pression de saturation	Sättigungsdruck
D	W/m ²	irradiance diffuse	Diffuse Einstrahlung
F	-	facteur de réduction	Abminderungsfaktor
g	-	coefficient de transmission énergétique d'un vitrage	Gesamtenergiedurchlassgrad einer Verglasung
G	W/m ²	irradiance globale	Globale Einstrahlung
H	W/K	dépense thermique spécifiques	Spezifische Wärme-Verluste
H	m	hauteur de la serre	Höhe des Gewächshauses
L	J/kg	chaleur latente d'évaporation de l'eau	Wasser-Verdampfungswärme
LAI	-	Indice foliaire (surface des feuilles rapportée à la surface du sol)	Blätter-Index (Quotient der Blätter-Fläche und der Boden-Fläche)
M	kg/mol	masse molaire	molare Masse
P	W/m ²	densité de puissance calorifique par m ² de SRE ₀	Wärmeleistungsdichte pro m ² EBF ₀
p _{atm}	Pa	pression atmosphérique	Atmosphär-Druck
Q ^{sto}	J	chaleur stockée journallement	täglich gespeicherte Wärme
q	-	Facteur de rayonnement secondaire	Faktor der Sekundärstrahlung
r	-	facteur de vue	Form-Faktor
R	J/mol K	constante des gaz parfait	Idealgas-Konstante
SRE ₀	m ²	surface de référence énergétique	Energiebezugsfläche
T	K	température absolue	absolute Temperatur
U	W/m ² K	coefficient de transmission de chaleur	Wärmedurchgangskoeffizient
V	m ³	volume de la serre	Volumen des Gewächshauses
ψ	W/mK	coefficient linéique de transmission de chaleur	Längebezogener Wärmebrücke
χ	W/K	coefficient ponctuel de transmission de chaleur	Punktbezogener Wärmebrücke
Δθ	°C	amplitude de variation journalière de la température	Tages-Temperaturamplitude
α	-	azimut du soleil à partir du sud	Azimutwinkel der Sonne
γ	Pa/K	constante psychrométrique (66 Pa/K)	Psychrometrische Konstante
η	-	rendement lumineux des lampes	Licht-Wirkungsgrad der Lampen
η	-	angle d'élévation du soleil au-dessus de l'horizontale	Höhenwinkel der Sonne über der Horizontale
θ	°C	température	Temperatur
θ	-	angle d'incidence	Einfallswinkel
λ	W/mK	conductivité thermique du sol	Erdreich-Wärmeleitfähigkeit
ρ _a	kg/m ³	masse volumique de l'air	Dichte der Luft
ρ	kg/m ³	masse volumique du sol	Erdreichdichte
ρ	-	albédo du sol	Albedo der Erdoberfläche
φ	-	déphasage	Phasenverschiebung

10. Annexe 2 : Copies d'écran

A l'ouverture d'un projet *Hortisol*, le menu principal apparaît sous la forme d'un bandeau horizontal (fig. 10.1) : ce dernier présente différents boutons permettant d'activer les différents fichiers nécessaires au calcul.

Le fichier projet (extension .hsol) renferme, entre autres choses, les références des quatre fichiers nécessaires au calcul : serre, exploitation, météo et horizon (fig 10.4).

La serre (extension .sre) contient la description de la serre en tant que construction (orientation, dimensions, matériaux), ainsi que de ses équipements (installations de chauffage, de production de CO₂, d'éclairage artificiel, de brumisation) (fig. 10.5 et 10.6);

L'exploitation (extension .eon) rassemble toutes les valeurs de consigne et d'utilisation (fig 10.7);

La météo (extension .meo) renferme les valeurs horaires des grandeurs qui caractérisent le climat dans lequel la serre est située fig 10.9);

L'horizon (extension .hrz) décrit la ligne du ciel nécessaire à déterminer l'ensoleillement direct (fig 10.10);

Les résultats d'un calcul (sous forme de données numériques ou de graphiques) sont visibles sous les différents onglets d'une fenêtre interface (fig 10.11 à 10.16). Pour les grandeurs physiques calculées, les valeurs horaires peuvent être exportées, par exemple dans un fichier Word ou dans un tableur, pour visualisation ou pour traitement particulier.

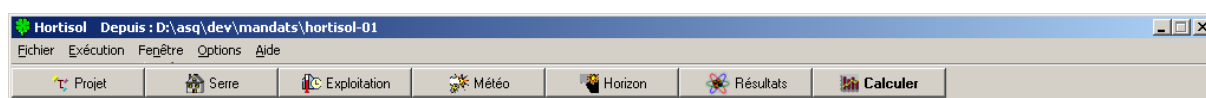


Fig. 10.1 : Menu principal. Sous Fichier, on trouve l'accès aux opérations habituelles telles que Ouvrir, Sauver, Quitter ; sous Option se trouvent la fenêtre Finance (fig. 10.2) ainsi que celle permettant de définir les Matériaux et leurs caractéristiques (fig 10.3).

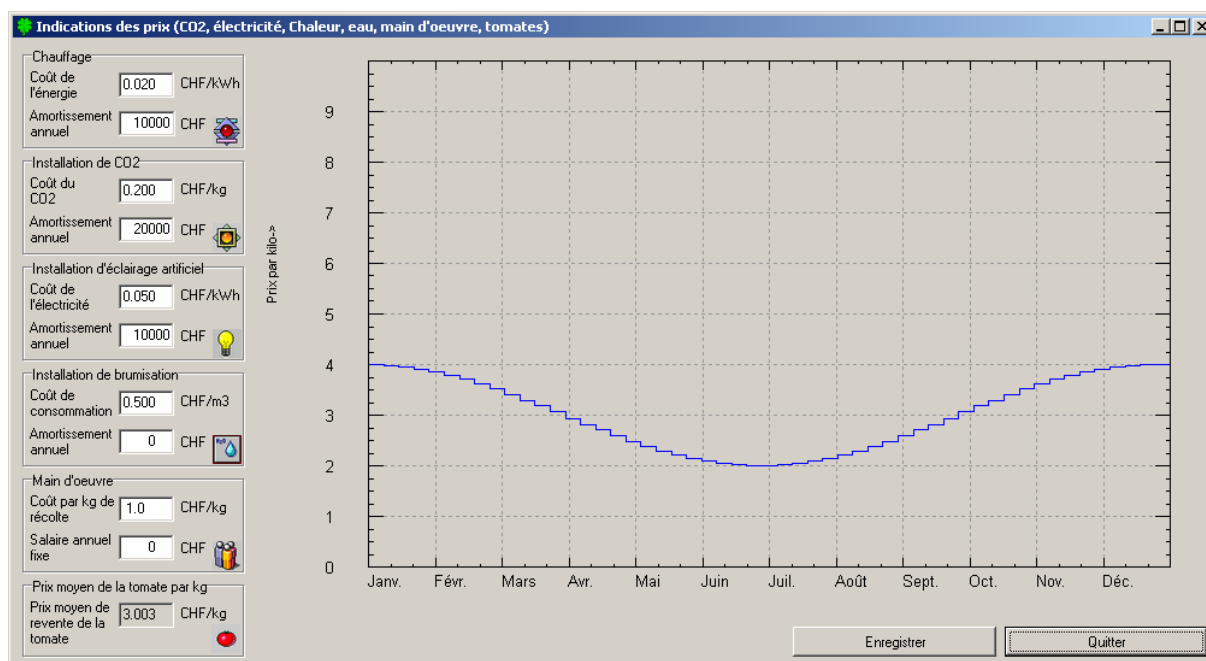


Fig. 10.2 : Menu principal/Option/Finance. Cette fenêtre sert à préciser tous les paramètres financiers sous la forme d'investissement (amortissement annuel) et de fonctionnement ainsi qu'à préciser le prix de vente hebdomadaire des tomates récoltées (graphique).

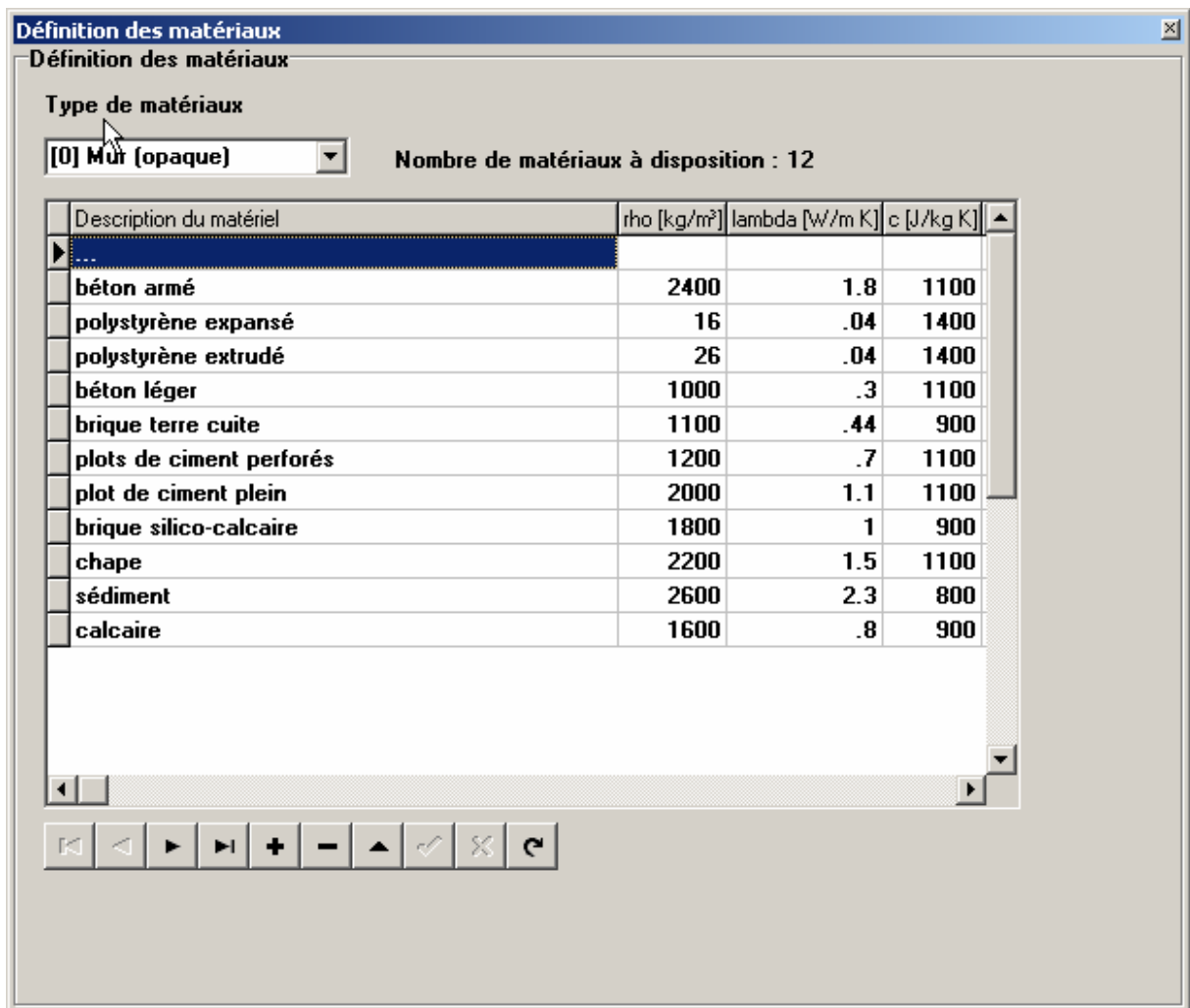


Fig. 10.3 : Menu principal/Option/Matériaux. Fenêtre permettant la définition des propriétés physiques des matériaux apparaissant dans les différents menus déroulants. Dans cette figure sont représentés les matériaux opaques ; par le biais du menu déroulant en haut à gauche, on accède à des fenêtres analogues traitant des vitrages, des cadres de fenêtre, des portes et des écrans de protection solaire ou thermique.

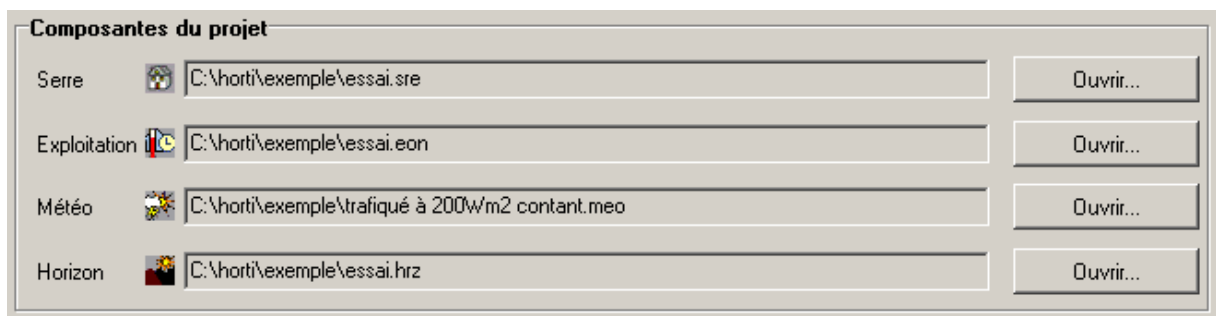


Figure 10.4 : Fichier Projet avec les précisions quant aux constituants du projet ainsi qu'à leur emplacement.

Serre

Serre

Zone 1

Sud

surface 1

Nord

surface 1

Est

surface 1

Ouest

surface 1

Toit

surface 1

Sol

surface 1

Masse 1

Serre

Volume total

18000 [m³]

Superficie totale

5000 [m²]

Zone

Volume

18000 [m³]

Superficie

5000 [m²]

S. réf. énerg.

5000 [m²]

Machine / production de

Installation de chauffage

☒ 300.0 W/m²

Fourniture de CO2

☒ 6.0 g/m³h

Eclairage artificiel

☒ 120.0 W/m² (électrique)

Rendement lumière

40.0 %

Brumisation

☒ 8.0 ml/h/m² (Débit max d'eau brumisé)

Face Sud

Surf. totale

180.0 [m²]

Orientation

[1] Façade Sud

Inclinaison

90 [°]

Azimut

0 [°]

Surface

Type de surface

[1] Fenêtre

Type de contact

[0] Air extérieur

F. cadre

5 [%]

F. ombrage

0 [%]

☒ Superficie 180.0 [m²]
 ☐ Dimensions

Transmission

522.9 [W/K]

Constituants / Valeur U

Vitrage

[1] vitrage double

U 2.90 [W/m² K]

g0 0.780 [-]

Cadre

[0] métal (Al)

U 3.00 [W/m² K]

Protection solaire / thermique

[2] écran

U 4.50 [W/m² K]

g0 0.600 [-]

Appliquer

Enregistrer sous...

Fermer

Fig. 10.5 : Fichier Serre. Dans la partie supérieure on trouve les grandeurs géométriques (Superficie et Volume) de la serre, ainsi que son équipement (Chauffage, Fourniture de CO₂, Eclairage artificiel, Brumisation). Dans la partie inférieure sont précisées l'orientation de la « face sud », ainsi que ses constituants (grandeurs géométriques et matériaux).

Serre

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

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

Machine / production de
 Installation de chauffage: ☒ 300.0 W/m²
 Fourniture de CO2: ☒ 6.0 g/m²h
 Eclairage artificiel: ☒ 120.0 W/m² (électrique) Rendement lumière: 40.0 %
 Brumisation: ☒ 8.0 ml/h·m² (Débit max d'eau brumisé)

Masse
☒ Superficie: 5000.0 [m²]
☐ Dimensions

Constituant
 Matériau: [1] béton armé Épaisseur: 20.0 [cm]
 Lambda: 1.800 c: 1100 rho: 2400
 [W/m K] [J/kg K] [kg/m³]
☐ Revêtement

Capacité calorifique: 1419.95 [MJ/K]

Appliquer Enregistrer sous... Fermer

Fig. 10.6 : Fichier Serre. Dans la partie inférieure sont précisées la surface ainsi que l'épaisseur des matériaux massifs qui contribuent à l'inertie thermique de la serre.

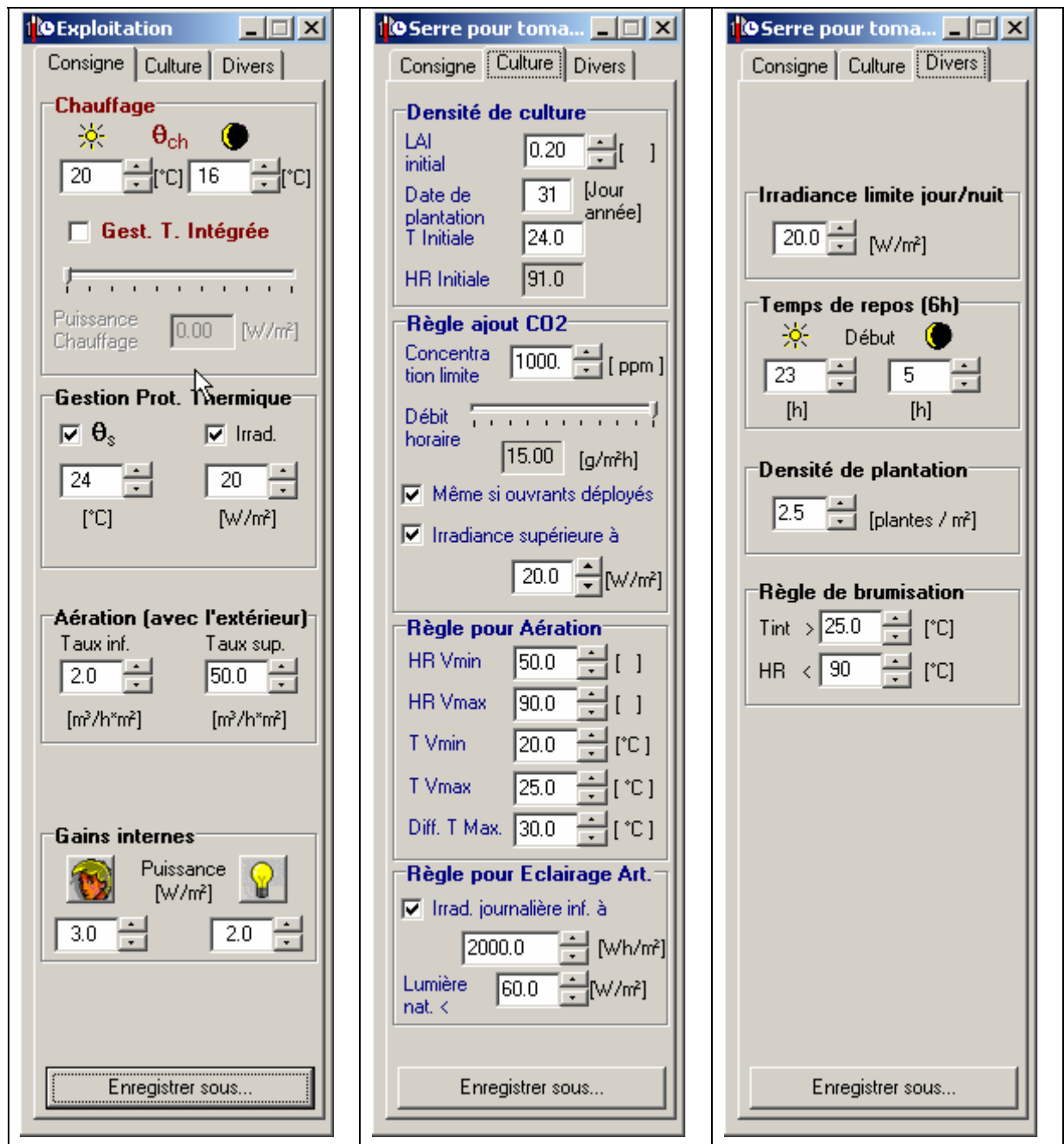


Fig. 10.7 : Fichier Exploitation.

Le premier onglet présente les consignes de jour et de nuit pour le chauffage, les paramètres de gestion des écrans (qui se ferment sitôt que la température intérieure est supérieure à la valeur indiquée et sitôt que l'irradiance naturelle extérieure est inférieure à la valeur indiquée), les débits minimal et maximal de ventilation ainsi que les gains internes (un clic sur les icônes figurant sous Gains internes permet de fixer l'horaire des gains : voir fig. 10.8).

Le deuxième onglet sert à préciser la date de la plantation, les règles de rajout de CO_2 , de ventilation et d'éclairage artificiel.

Par le troisième onglet, on a accès à la définition de la frontière entre le jour et la nuit (irradiance naturelle limite), au temps de repos accordé à la plante (temps pendant lequel aucun éclairage artificiel n'est possible, à la densité de plantation et aux règles de brumisation).

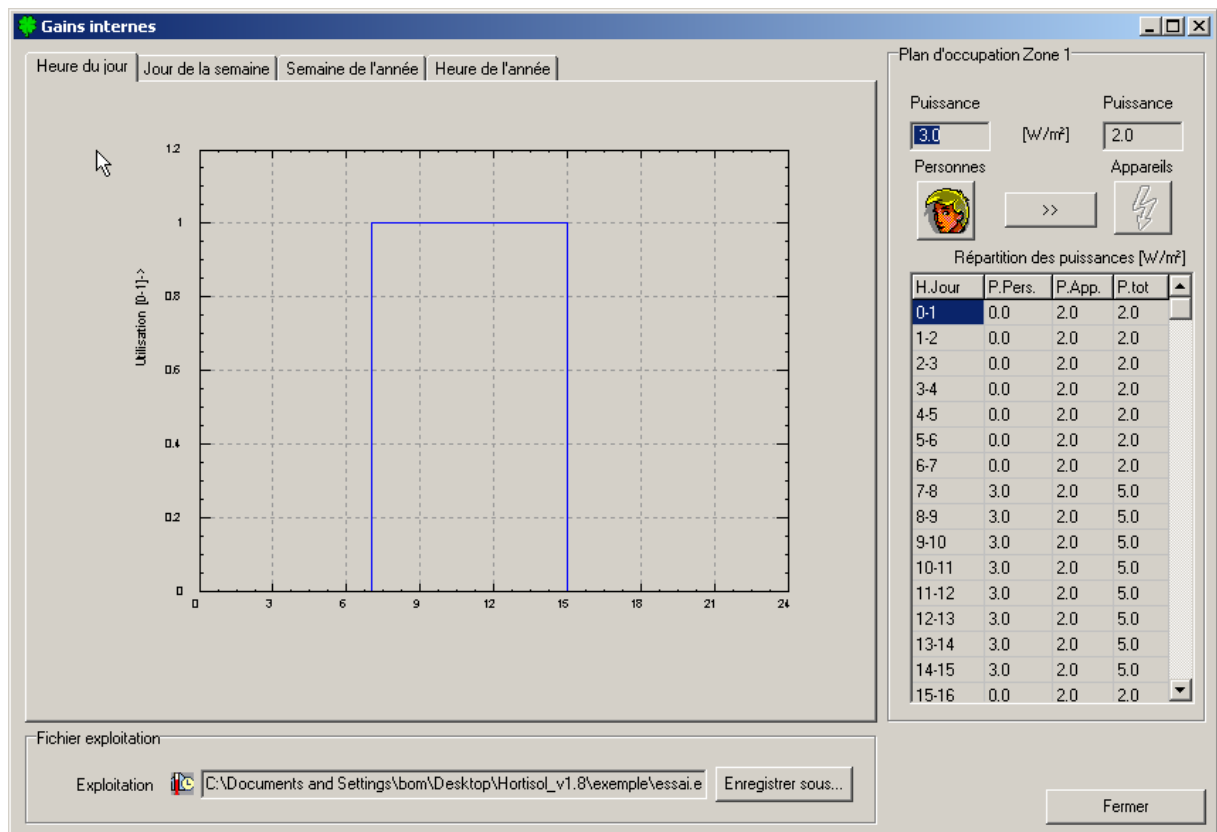


Fig. 10.8 : Fichier Exploitation/Consigne/Gains internes. Interface permettant l'introduction de l'horaire des gains internes (horaire selon les heures du jour, les jours de la semaine et les semaines de l'année).

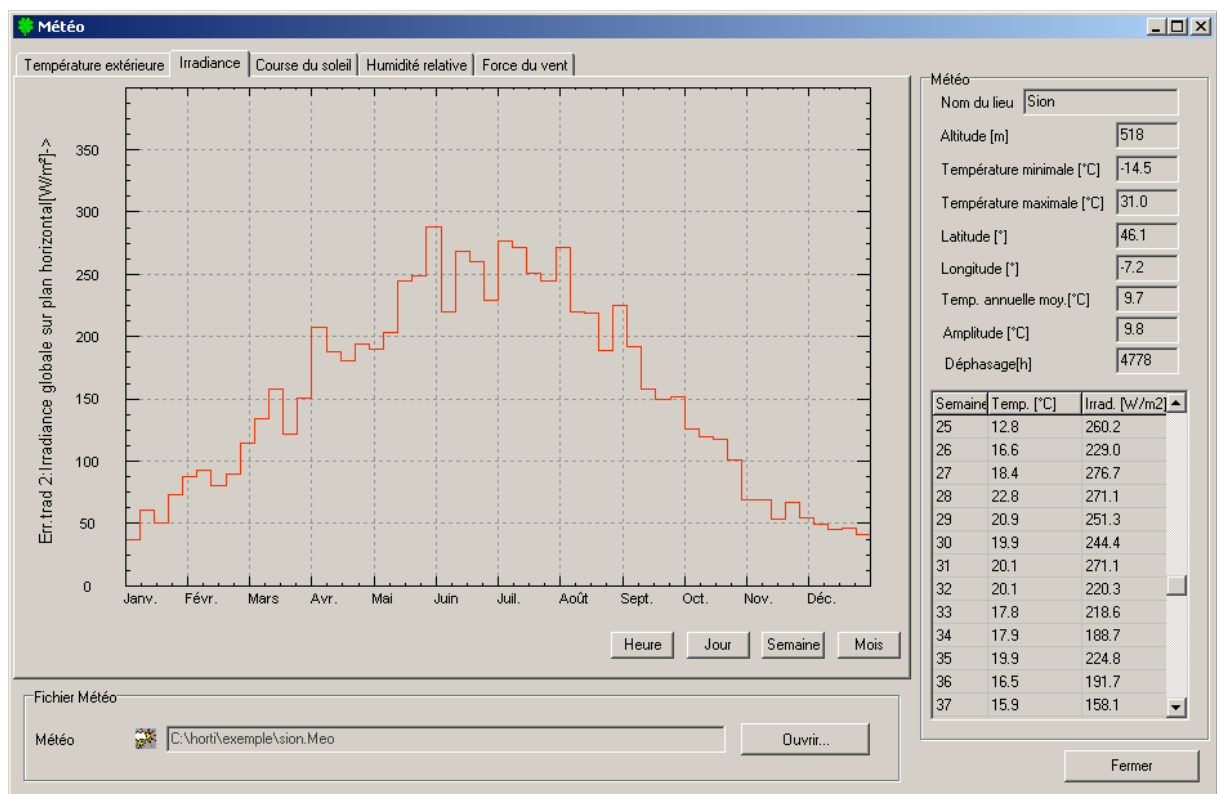


Fig. 10.9 : Fichier Météo : fenêtre de visualisation de l'irradiance globale horizontale sous forme hebdomadaire.

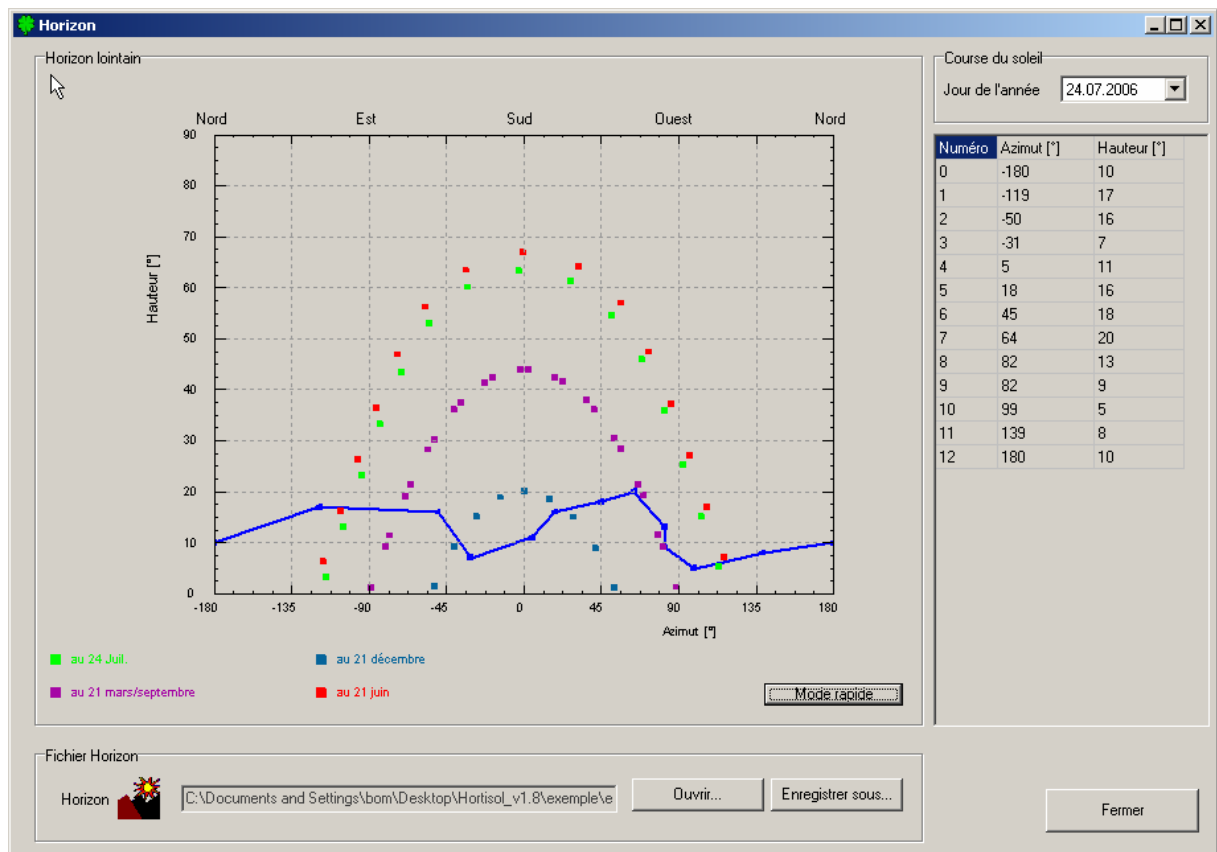


Fig. 10.10 : Fichier Horizon. Fenêtre interface permettant l'introduction des points qui déterminent la ligne d'horizon. Cette fenêtre présente aussi les positions du soleil aux différents solstices et équinoxes.

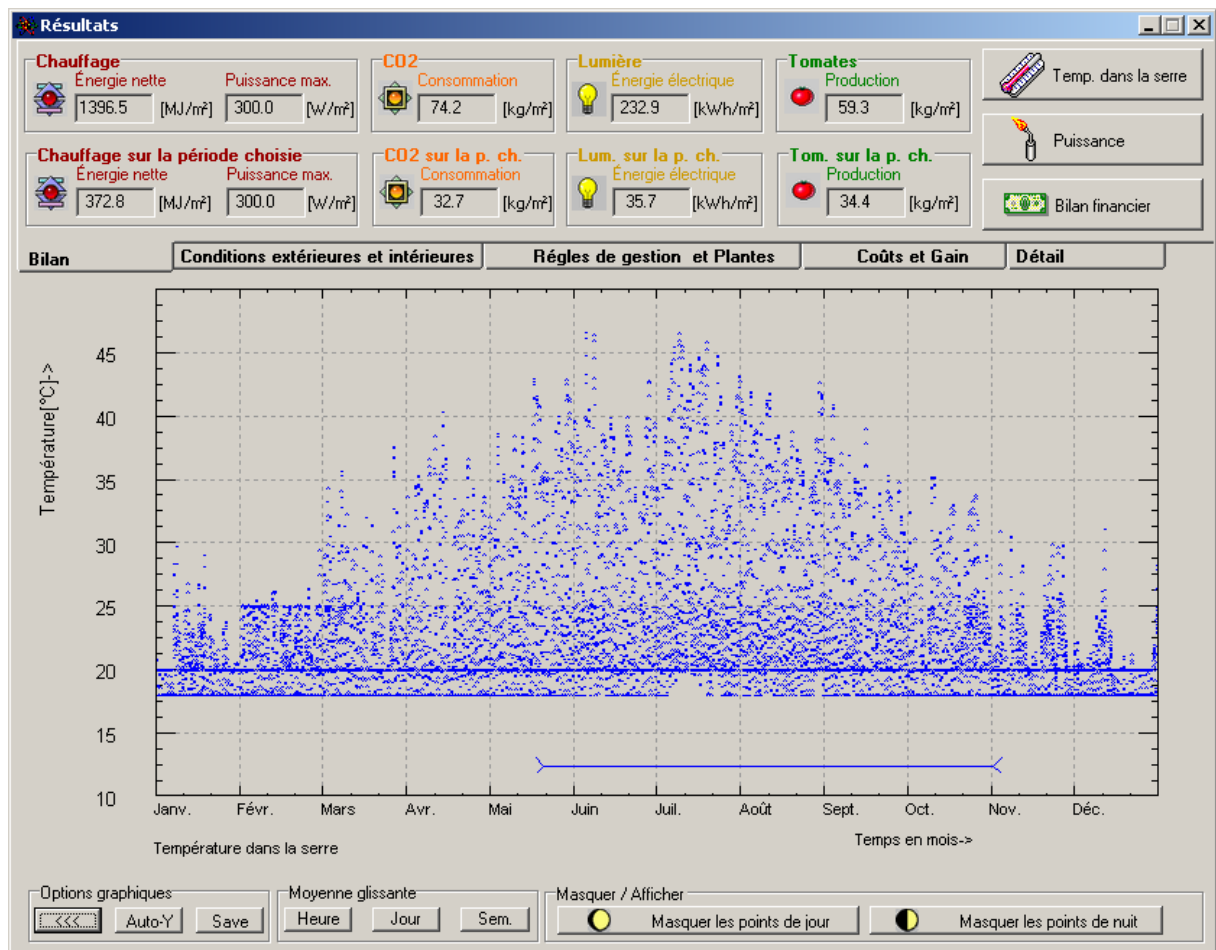


Fig. 10.11 : Fenêtre interface Résultats/Bilan/Température dans la serre. Le graphique présente, heure après heure sur toute une année, l'évolution de la température dans la serre. Au bas du graphique se trouve un « ruban » avec deux poignées réglables horizontalement qui permettent de définir une partie de l'année sur laquelle une analyse particulière est demandée (ici du 15 mai au 31 octobre). En haut, les valeurs des différentes énergies (chauffage, CO₂, lumière artificielle) et des quantités récoltées sur toute l'année et sur la période choisie à l'aide du ruban (ici du 15 mai au 31 octobre).

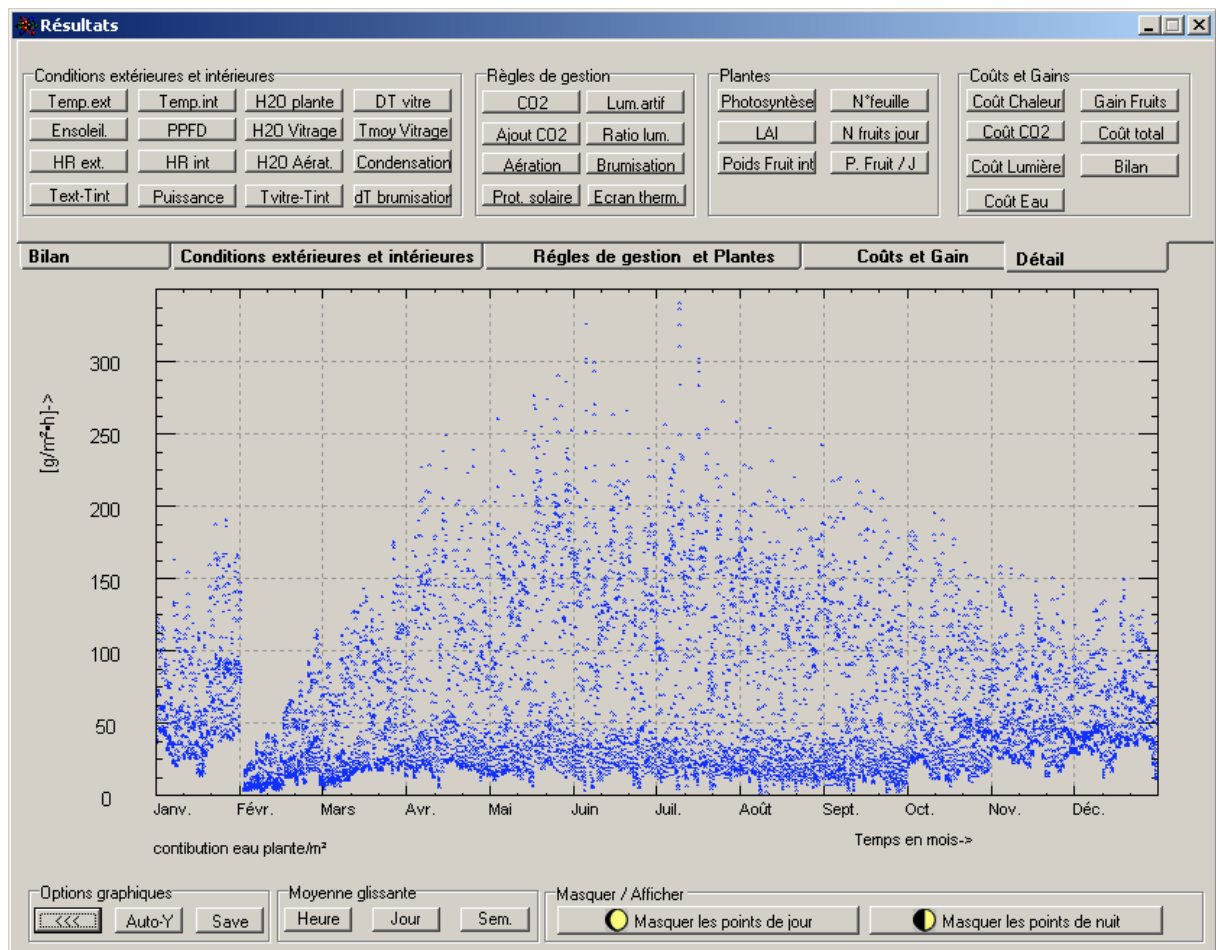


Fig. 10.12 : Fenêtre interface Résultats/Détail/H₂O plante. Le graphique présente, heure après heure sur toute une année, la quantité d'eau évaporée par les plantes. (La culture a été plantée le 31 janvier).

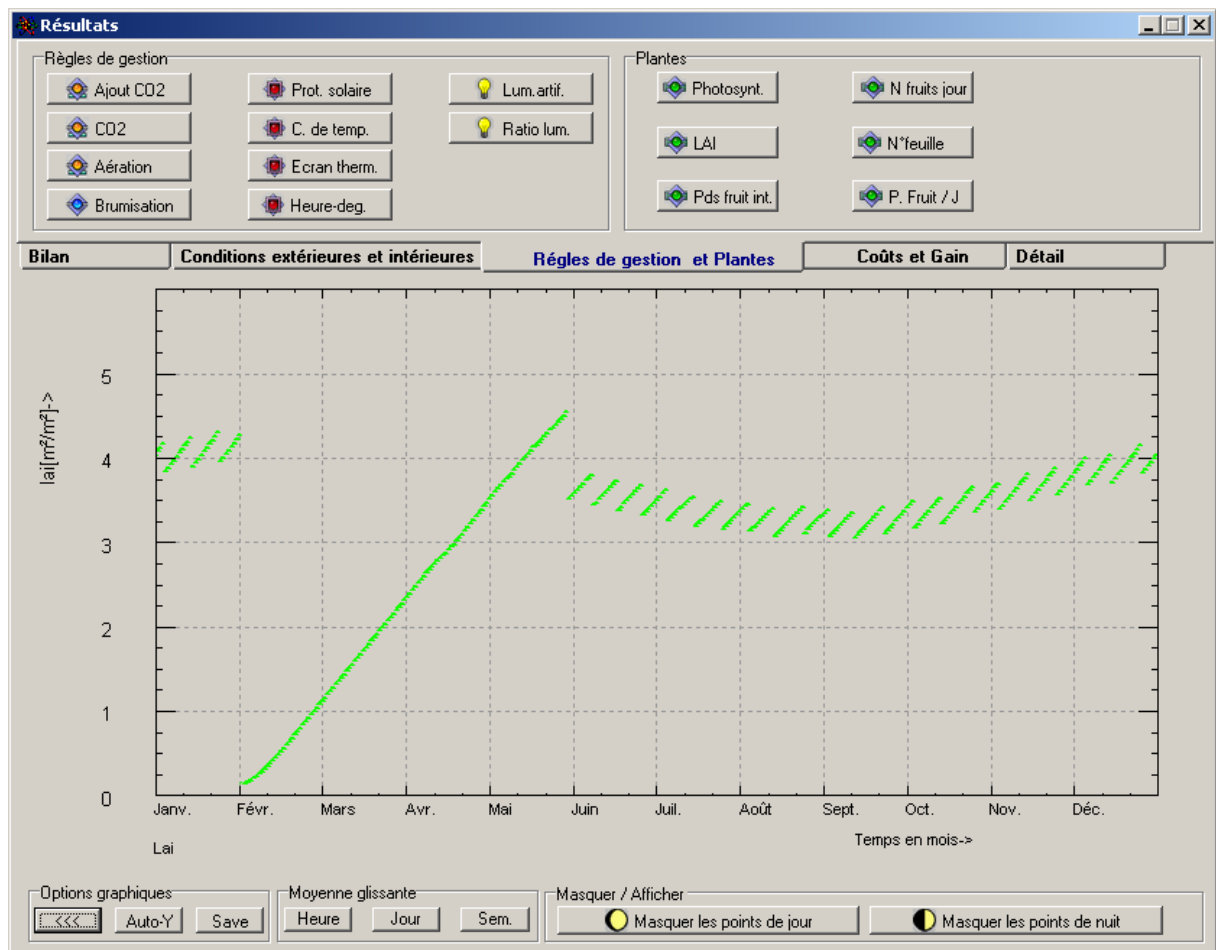


Fig. 10.13 : Fenêtre interface Résultats/Règles de gestion et Plantes/LAI. Le graphique présente, jour après jour sur toute une année, l'évolution de l'indice foliaire. (La culture a été plantée le 31 janvier).

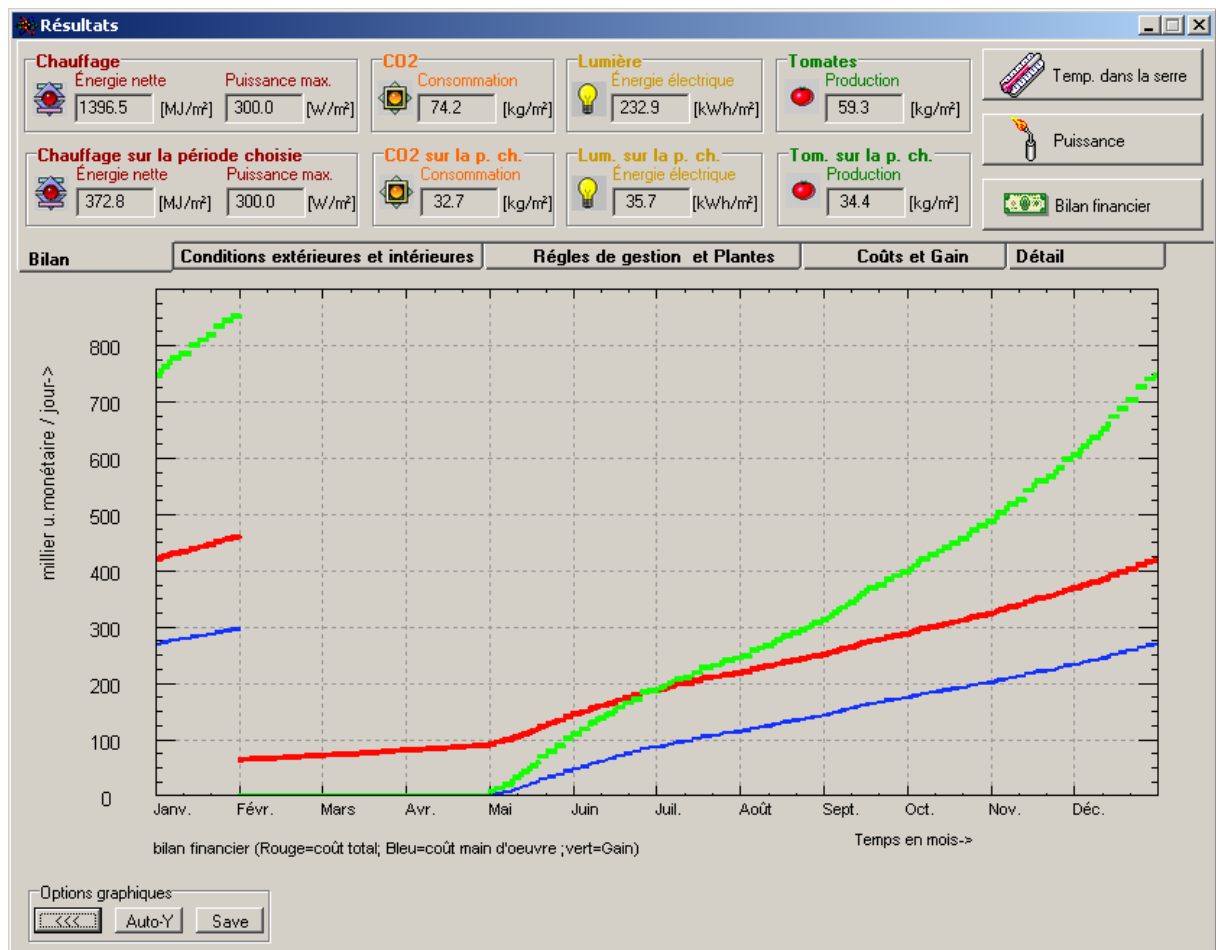


Fig. 10.14 : Fenêtre interface Résultats/Bilan/Bilan financier. En rouge le graphique présente, jour après jour, l'évolution des dépenses globales (basées sur les amortissements et les frais d'exploitation selon les indications introduites dans la rubrique Finance, fig 10.2). En bleu, ce sont les dépenses de main d'œuvre nécessaire à la cueillette. En vert sont présentés les recettes basées sur les quantités récoltées ainsi que sur les prix de vente définis dans la rubrique Finance (fig. 10.2).



Fig. 10.15 : Fenêtre interface Résultats/Conditions extérieures et intérieures. Cette rubrique donne accès à 17 graphiques qui présentent sous forme horaire les conditions climatiques extérieures et intérieures ainsi que les quantités d'eau mises en jeu dans les différents phénomènes du cycle de l'eau. (dT brumis. et H2O Vit. représentent par exemple le rafraîchissement produit par la brumisation ainsi que la quantité d'eau qui condense sur les vitrages).

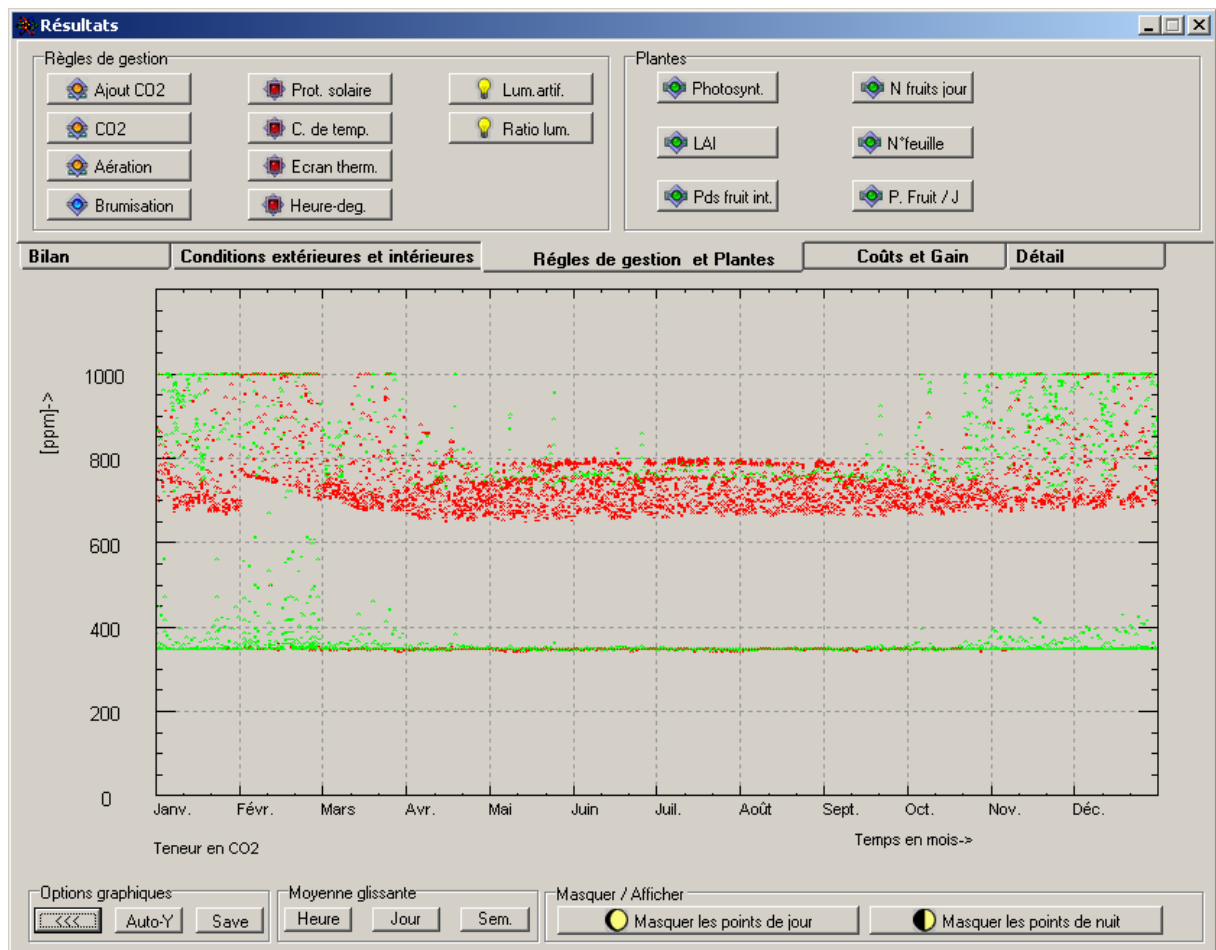


Fig. 10.16 : Fenêtre interface Résultats/Règles de gestion et Plantes. Fenêtre représentant des paramètres influencés par les différents processus de réglage, ainsi que la croissance de la plante. Sur ce graphique : teneur en CO₂ de jour (points rouges) et de nuit (points verts).

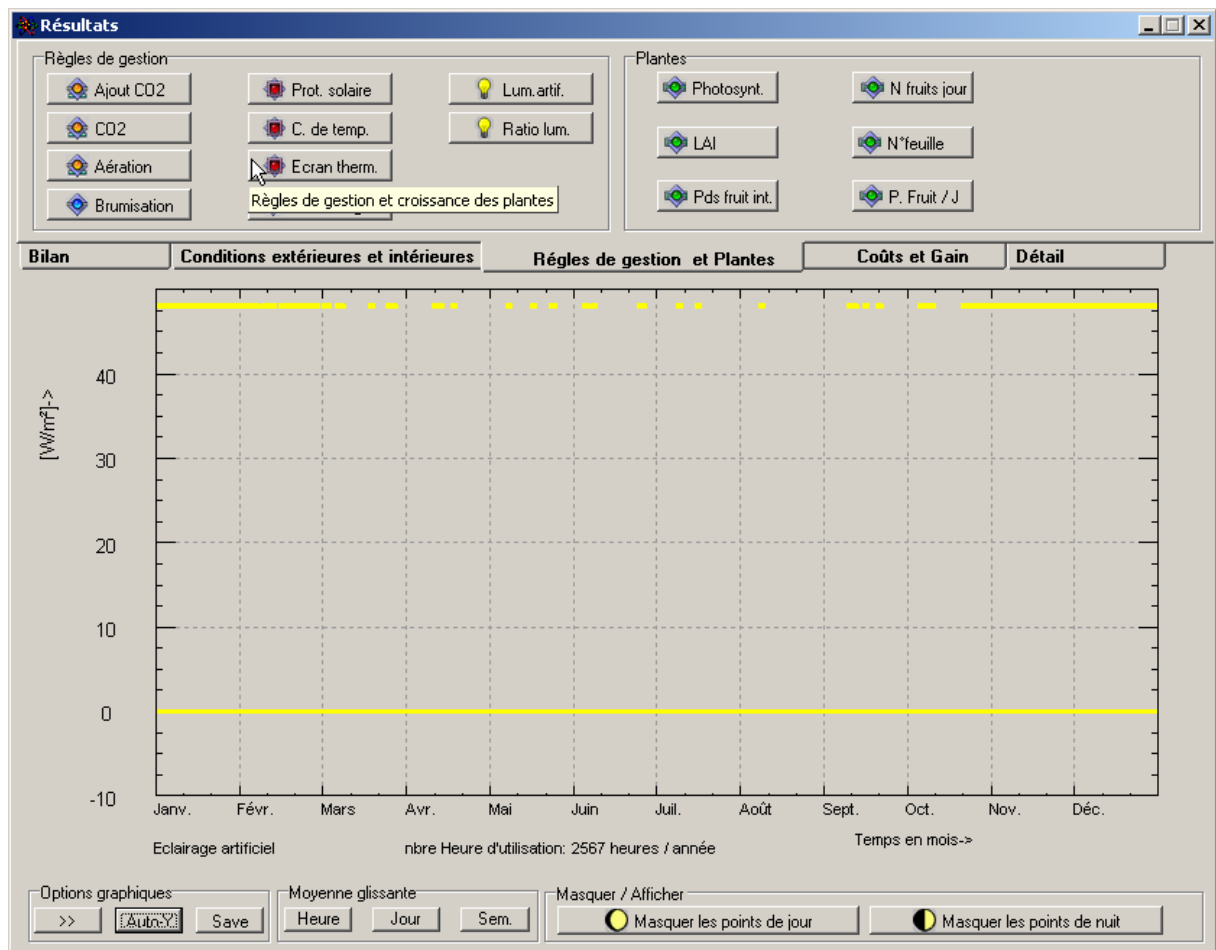


Fig. 10.17 : Fenêtre interface Résultats/Règles de gestion et Plantes. Fenêtre représentant des paramètres influencés par le processus de réglage, ainsi que la croissance de la plante. Sur ce graphique : puissance spécifique d'éclairage artificiel.

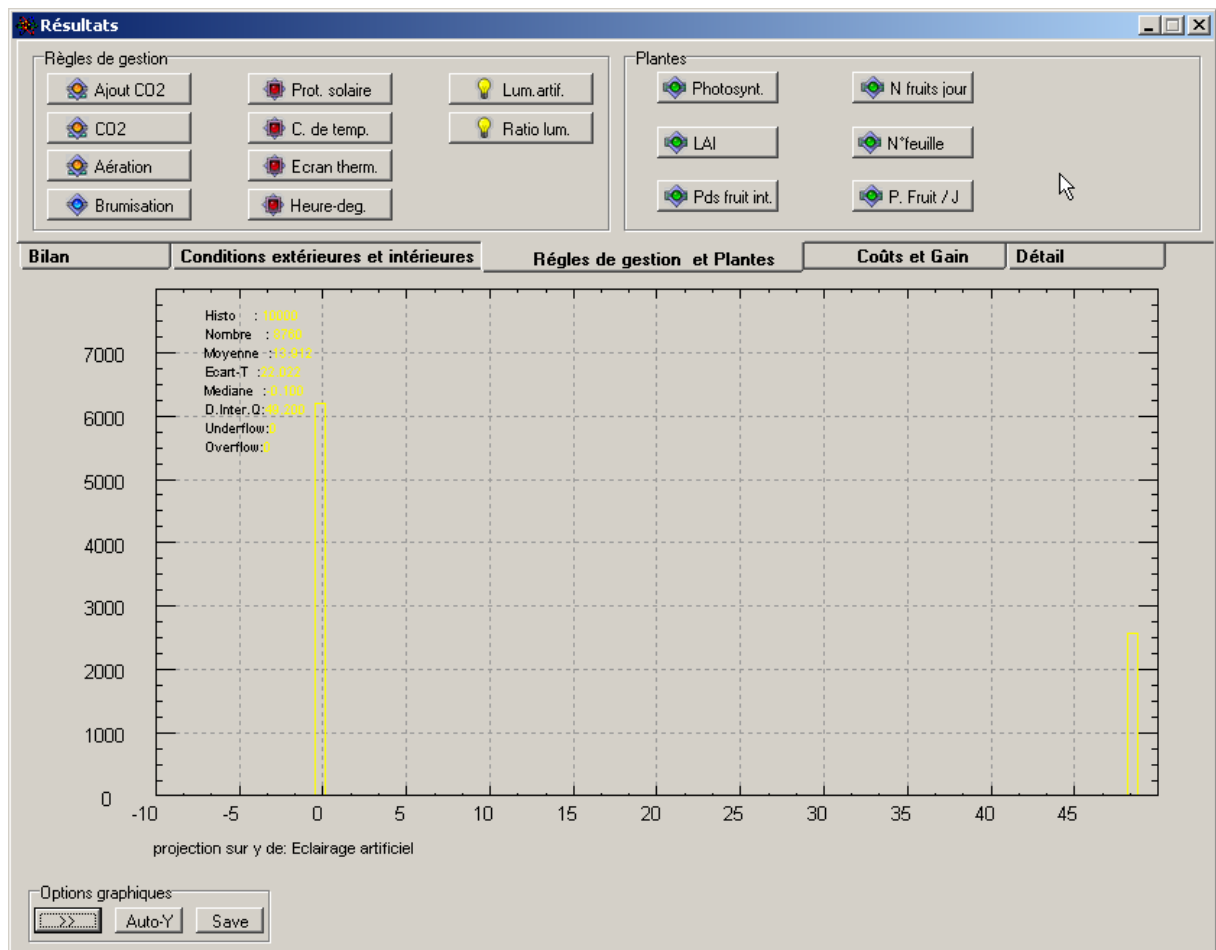


Fig. 10.18 : Fenêtre interface Résultats/Règles de gestion et Plantes. Puissance spécifique d'éclairage artificiel dans une représentation sous forme d'histogramme : dans cet exemple, on voit que l'éclairage artificiel fonctionne pendant 2600 h par année.

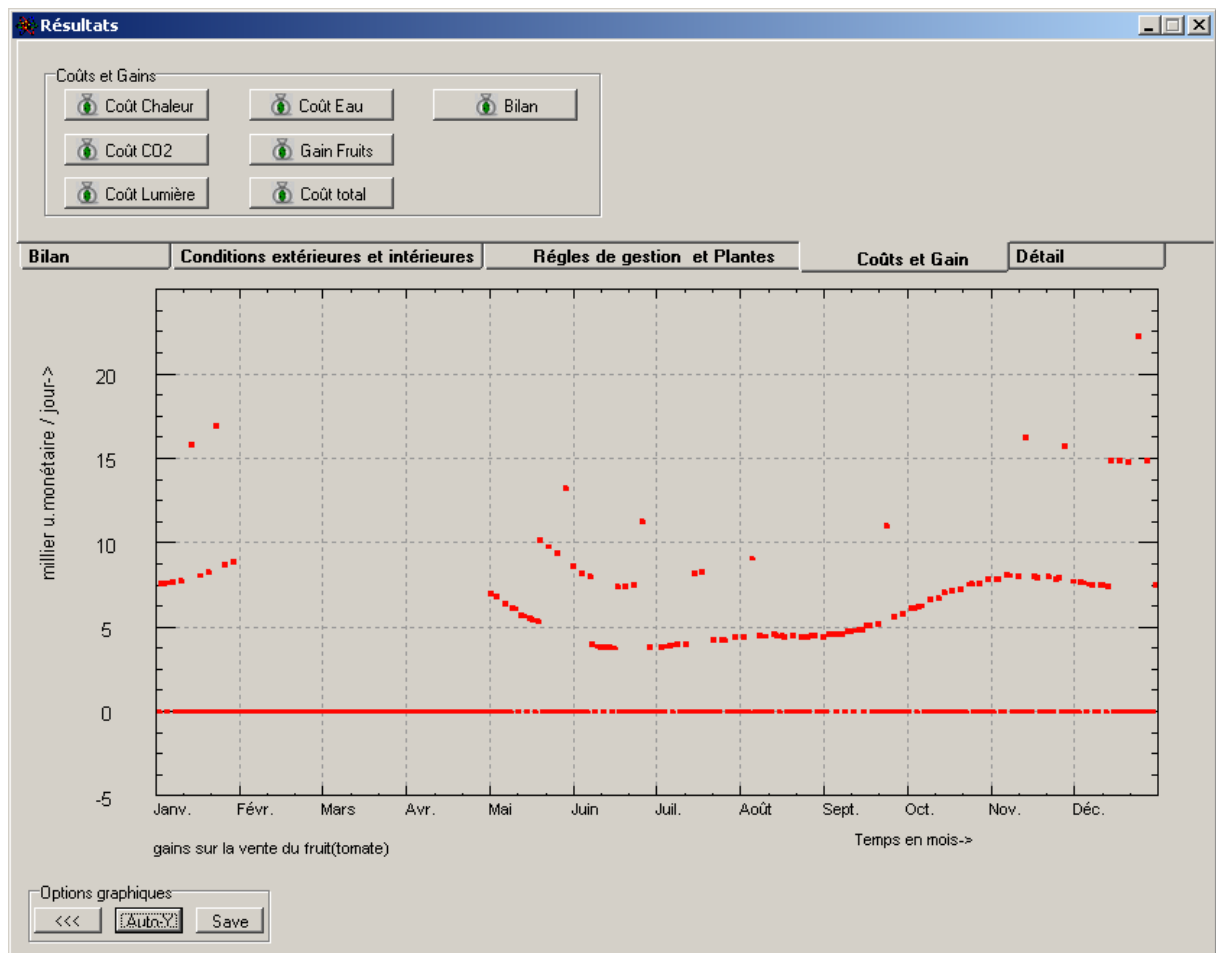


Fig. 10.19 : Fenêtre interface Résultats/Coûts et gains. Gains journaliers provenant de la vente de tomates

11. Annexe 3 : Constantes

Les constantes utilisées *Hortisol* sont contenues dans le fichier *constantesPhysique.cnf* accessible avec Notepad (fig. 11.1).

```
# fichier de configuration contenant les grandeurs physiques
# Toute modification des constantes physiques peut entraîner
# des résultats erronés. L'HEVs n'assume pas la fiabilité des résultats
# si ce fichier venait à être changé.
#
R=      8.31      # constante des gaz parfaits.
cAir=    1005.0    # capacité thermique air [J/kg K].
rhoAir=   1.120    # densité air [kg/m³] valeur moyenne à Wabern mesuré par METAS.
alphaInt=  8.0     # coefficient convection intérieur [W/m²K]
alphaExt= 20.0     # coefficient convection extérieur [W/m²K]
resistAdd= 1.25    # résistance additionnelle pour pièce en contact avec comble non chauffé.
teneurBaseCO2=350.0 # teneur naturel du CO2 []
MCO2=     44.0     # masse molaire du CO2 []
qi=0.03    # facteur d'émission secondaire
lambda=2300000.0  # chaleur latente de vaporisation pour l'eau J/kg
gamma=66.0  # constante psychométrique Pa/K
limiteOuvrantOuvert=0.9 # limite pour décider si l'ouvrant est ouvert/fermé
TminGestionInt=14.0 # limite min pour la consigne de nuit quand la gestion de température
intégrée est activée.
TPenteMaxPuiss=5.0 # °C/h pente maximum de la température.
#
nombreIterationParHeure=60 # nombre d'itérations pour une heure
ratioFruitFraisMatiereSeche= 25.0 #
```

Fig. 11.1 : Les données accessibles dans le répertoire Constantes sous *constantesPhysiques.cnf*

12. Annexe 4 : Contacts effectués pendant le projet

- Les personnes suivantes ont composé le groupe d'accompagnement du projet *Hortisol* et ont été informées des développements en cours lors des séances du 16 juin 2005 et du 20 janvier 2006, ainsi que lors du Workshop final qui s'est tenu à l'Öga le 29 juin 2006 :

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

- Sur demande de Ch. Weinmann, de l'Energie Agentur der Wirtschaft, M. Bonvin a eu l'occasion de présenter les objectifs et l'état des travaux de *Hortisol* aux serristes romands réunis à Morges, le 9 novembre 2005.
- La rédaction d'un article de vulgarisation a abouti à une publication dans la Revue maraîchère suisse [1].
- 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 2005, une délégation des porteurs du projet s'est rendue, 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. A cette même occasion, elle a eu l'occasion de visiter une serre modèle et de rencontrer les responsables de la firme Microregul France www.microregul.com.
- Le 18 mai 2006 a eu lieu une rencontre-discussion avec les responsables du centre Des Fougères de Conthey (Agroscope Changins).
- Présentation prochaine d'un poster « *Hortisol, un outil stratégique pour le serriste* » à la journée nationale *Serres et énergie – faire face au prix de l'énergie* qui aura lieu le 21 septembre prochain au CTIFL de Balandran, France.

13. Annexe 5 : Acteurs du projet

Nom	Organisation	téléphone	e-mail
Robert Degli Agosti	EIL	022/759.95.28	robert.degli-agosti@etat.ge.ch
Horace Pictet	EIL	022/759.95.13	horace.pictet@etat.ge.ch
Robin Bruchet	EIL	022/759.94.59	robin.bruchet@hesge.ch
Charles Moncousin	EIL	022/759.95.10	charles.moncousin@etat.ge.ch
Michel Bonvin	HEVs	027/606.87.51	michel.bonvin@hevs.ch
Patrice Cordonier	HEVs	027/606.87.35	patrice.cordonier@hevs.ch
Gilbert Morand	HEVs	027/323.76.23	gilbert.morand@asq.ch
Antoine Reist	indépendant	027/346.29.37	antoine.reist@tvs2net.ch