

Optimisation énergétique d'une serre horticole à accumulation d'énergie en sous-sol, sur le principe de l'hypocauste

Robert F.¹, Lepage S.², Souyri B.³, Martinet J.-P.⁴, Claudon F.⁵, Boillot B.

¹ Astredhor, Unité nationale, 44 rue d'Alésia, 75682 Paris Cedex 14

² Astredhor, Station Ratho, 135 chemin Finday, Les hoteaux, 69126 Brindas

³ Université de Savoie, Polytech'Savoie, Savoie Technolac, 73376 Le Bourget du Lac Cedex

⁴ Entreprise Gonthier, 70 chemin des Maraîchers, 73200 Albertville

⁵ CEA, Savoie Technolac, BP 332, 50 Avenue du Lac Léman, 73377 Le Bourget du Lac Cedex

Correspondance : fabien.robort@astredhor.fr

Résumé

Un réseau aéraulique souterrain d'une serre horticole, sur le principe de l'hypocauste, a été instrumenté pour permettre l'analyse des possibilités de stockage d'énergie d'origine solaire lors des périodes ensoleillées et de restitution lors des besoins de plantes en culture. Après l'amélioration du fonctionnement du dispositif, la serre hypocauste qui permet des performances de protection de plantes vivaces contre le froid supérieures à des tunnels froids, se révèle toutefois insuffisamment performante notamment du fait de la mauvaise charge énergétique en souterrain. La modélisation sous le logiciel TRNSys confirme le surdimensionnement du dispositif, pour lequel soit une ventilation supérieure serait nécessaire, soit des tubes plus courts permettraient une efficacité plus importante. Il faudra également travailler sur des serres dont l'enveloppe est beaucoup moins déperditive et en installant des dispositifs limitant la stratification des couches d'air.

Mots-clés : énergie, serre froide, hypocauste, aéraulique

Abstract: Energy optimization of a horticultural glasshouse with underground energy storage based upon hypocaust system

An underground system of a greenhouse, a hypocaust system, was instrumented to analyze possible solar energy storage during sunny periods and restitution according to needs in plant cultivation. After improving the functioning of the device, which allowed the protection of perennial plants against cold, the system was however inefficient, due to the low energy loaded in the tubes. The modeling software TRNSYS confirmed the oversizing of the device. More powerful ventilation or shorter tubes would be necessary to improve efficiency. It will also be necessary to work on greenhouses whose envelope would be much less deperditive, and installing devices limiting the stratification of air layers.

Keywords: energy, cold greenhouse, hypocaust, aeraulic.

Introduction

La consommation d'énergie pour les cultures sous serres représentent jusqu'à 40 % du prix de revient des cultures, et est le deuxième poste de charge après la main d'œuvre (Ademe, 2007). Le stockage de l'énergie excédentaire, même temporairement, fait partie des solutions qui peuvent améliorer le rendement d'une serre. Le principe de stockage de l'énergie en sous-sol sur (principe de l'hypocauste), grâce à la « serre capteur solaire » a déjà fait l'objet de recherche dans le passé. Dans les années 1980, des équipes françaises, suisses et espagnoles avaient travaillé sur ce sujet (Baille et Boulard, 1986 ; Castilla et al., 1985. ; Bourgeois et al., 1985).

Le contexte énergétique et la baisse du prix des énergies fossiles n'ont cependant pas permis un développement plus poussé de celles-ci malgré des premiers résultats intéressants (Baille et Boulard, 1986).

A la fin des années 1990, une équipe de l'Université de Genève menée par Hollmuller (2002), se penche à nouveau sur la question et travaille sur le stockage solaire à court terme en serres horticoles et plus particulièrement pour des productions maraîchères. Les bases d'analyse systémique permettant d'évaluer la prestation énergétique d'échangeurs air/sol ont par là même été reposées. La modélisation analytique a permis de mettre en lumière les phénomènes physiques de base et de dégager quelques règles de dimensionnement simplifiées. C'est sur la base de ces travaux qu'un dispositif hypocauste a été mis en place en 2008 au sein d'une serre horticole dans les Alpes.

Matériel et méthodes

Le dispositif hypocauste a été développé sur le site d'une entreprise horticole, l'entreprise Gonthier, basée à Albertville (45°67' N, 6°38' E). La serre est en plastique avec faitage en double paroi gonflable. Des travaux comparatifs ont été réalisés sur le site de la station Ratho à Brindas (45°7' N, 4°7' E).

1. Etude expérimentale de la serre

L'objectif de cette tâche était d'analyser l'efficacité énergétique du stockage d'énergie.

1.1 Instrumentation de la serre

La première tâche du projet a été consacrée à l'instrumentation de la serre. L'instrumentation de l'installation a consisté à :

- Quadriller le stock souterrain par une douzaine de sondes (placées à intervalles réguliers (Figure 1) au niveau des tubes) de façon à avoir une bonne mesure de la température du sol et donc du comportement du stock thermique (ceci sur une chapelle des serres hypocaustes),
- Placer une dizaine de sondes de température dans l'air au sein de cette chapelle pour observer les phénomènes de convection. Les températures d'air en entrée et en sortie de l'échangeur air-sol ont également été mesurées ainsi que le débit de ventilation,
- Installer des sondes hygrométriques dans la serre,
- Installer une station météorologique.

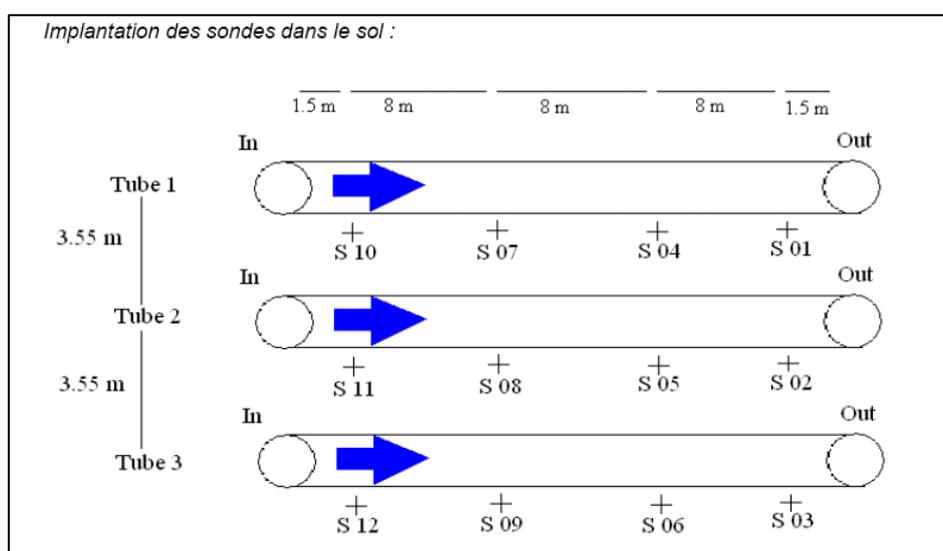


Figure 1 : Emplacement des sondes dans le dispositif hypocauste

Les sondes choisies étaient des PT 100/hygrométrie. Ces sondes sans fil sont reliées à des enregistreurs (ou data logger) avec un relevé toutes les 10 minutes.

Des balances ont également été installées courant 2010 pour mesurer les échanges d'eau entre les plantes et l'air de la serre.

Une centrale d'acquisition reliée à un PC stockait les données sur place. Une passerelle WEB permettait de se connecter au PC de l'entreprise Gonthier afin de consulter les données du monitoring à distance.

1.2 Campagne d'essai

Une fois instrumentée, une campagne de mesures a été menée. Elle s'est déroulée sur une année complète. Un suivi régulier des mesures a été effectué afin de détecter rapidement toute défaillance de mesures. En cas de problème, des interventions sur site ont été réalisées. Une analyse des résultats expérimentaux a été réalisée au fur et à mesure de l'acquisition de données. Ainsi, l'ensemble des cinétiques mises en jeu a pu être évalué au niveau du captage de l'énergie solaire, de son stockage et de sa restitution.

2. Etudes d'optimisation

L'objectif de cette tâche était de faire une étude d'optimisation des flux énergétiques au sein de la serre. Pour cela, un outil de modélisation a été utilisé.

2.1 Développement d'un modèle numérique

Une modélisation mathématique complète de la serre avec son système d'accumulation d'énergie dans son environnement a été réalisée à l'aide du logiciel TRNSys. Pour cela, les modèles déjà existants dans la bibliothèque de base TRNSys ont été utilisés. Il a été réalisé un développement spécifique pour les composants manquants à la bibliothèque ou non disponibles dans la communauté scientifique.

2.2 Simulation et optimisation de la serre

Une phase d'analyse de sensibilité a été réalisée sur les caractéristiques techniques des composants du système et des scénarios de gestion afin de connaître précisément leur influence. Les résultats de simulation ont été comparés aux résultats expérimentaux.

Le support de simulation était le logiciel de simulation dynamique thermique TRNSys. Trois simulations ont été réalisées (i) Modélisation du système réel équipant la serre horticole = Procédé n°1; (ii) Modélisation de la serre équipée d'un hypocauste implanté dans le sens de la largeur. Les tubes ont été tournés à 90°. Leur nombre est dans ce cas de 40 tubes, de longueur 9,60m = Procédé n°2; (iii) Modélisation du système réel, avec des longueurs deux fois moindres = Procédé n°3. Les procédés ont été étudiés sur la totalité du mois de février, propice à l'utilisation de ce système d'hypocauste.

2.3 Bilan énergétique et comparaison à des simulations

Les bilans énergétiques ont été calculés à partir de données récupérées sur les outils de mesures ainsi qu'à partir des données extraites du monitoring, sur le mois de février 2011, période au cours de laquelle les données sont les plus complètes et les résultats les plus représentatifs. Des simulations grâce au modèle de calcul ont pu être réalisées, avec des plans de système hypocaustes très différents, pour identifier les possibilités et les améliorations.

Pour le système hypocauste en place, le bilan a été calculé à partir de données collectées sur les outils de mesures ainsi qu'à partir des données extraites du monitoring. De plus, le débit des ventilateurs ne pouvant être mesuré, il a été pris l'hypothèse d'un débit moyen de 7 000 m³/h. Il a été appliqué, pour calculer ce bilan, les règles de contrôle-commande en omettant cependant la commande d'ouverture des ouvrants rendant le calcul trop complexe.

3. Evaluation de l'impact agronomique

L'objectif de cette tâche est d'évaluer l'impact des systèmes étudiés sur la qualité des cultures. Une évaluation morphologique et la qualité commerciale ont été regardées et corrélées aux mesures physiques.

Dans les deux systèmes étudiés, l'un sur l'entreprise Gonthier, l'autre à la station expérimentale du Ratho, des cultures ayant un zéro végétatif assez bas ont été mises en place. Deux structures (serre verre et tunnel plastique) de la station d'expérimentation du Ratho ont été utilisées pour étudier deux itinéraires techniques à deux dates décalées par rapport à ceux conduits en parallèle aux établissements Gonthier Horticulture dans la serre hypocauste. Des cultures ont également été mises en place en serre chaude à l'entreprise Gonthier.

Les mesures ont été réalisées sur les tailles de plantes, leur développement végétatif, leur développement floral. La présence de maladies et de ravageurs a également été évaluée afin d'estimer si un des systèmes ou une des modalités a une influence sur la qualité sanitaire. Une appréciation globale commerciale a été faite en fin de culture. Une analyse de corrélation entre les mesures physiques (température, luminosité, hygrométrie) et les résultats agronomiques a été réalisée.

Type de dispositif : blocs en randomisation à quatre répétitions

Caractères mesurés : 4 (hauteur, diamètre, matière fraîche et matière sèche)

Nombre de modalités : 48 par année (3 lieux x 2 itinéraires x 8 genres choisis parmi *Armeria*, *Aubrietia*, *Primula*, saxifrages, *bidens*, *begonias*, *Dianthus*, *Pericalis*, *Ranunculus*, *Plectranthus*, *Pelargonium*, *Gazania*, *Antirrhinum*, *Pericallis*,.....).

Résultats

L'instrumentation était prévue pour le premier semestre 2009. Cependant, suite à des difficultés d'approvisionnement, cette instrumentation n'a pu se finaliser qu'au début du premier semestre 2010. En conséquence, les essais n'ont pu être réalisés que pleinement sur début 2010 et sur l'hiver 2010-2011.

Une première analyse a consisté à étudier la répartition de la chaleur dans le sol pendant les deux phases (charge et décharge). Ensuite, une seconde analyse a étudié la phase de charge dans le volume de la serre et plus précisément l'évolution de la température en faitage. Enfin, une troisième partie analyse l'effet de décharge sur les plantes en étudiant notamment la température et l'humidité. Cette campagne d'essai a permis de constater que, durant la décharge, les plantes ne bénéficiaient que très peu de la chaleur échangée. Le contrôle commande, gérant le système, a été modifié pour la saison 2010/2011. Les consignes de régulation ont été simplifiées en vue d'obtenir plus souvent des phases de décharge. Cette modification a apporté des améliorations dans la performance de l'installation.

1. Etude expérimentale de la serre

1.1 Analyse de la phase de charge

1.1.1 Analyse des températures d'air

Les mesures faites en février 2011, montrent que la température en faitage (T Faitage N3) chute au moment du démarrage de la phase (Figure 2). Ceci est dû à l'aspiration de l'air dans la colonne. A partir de ce moment, la température en entrée dans les tubes (T Aéro IN) correspond à la température en faitage. On peut noter une perte de presque un degré entre le haut et le bas de la colonne d'air. Au regard de la différence de température entre l'entrée et la sortie de l'hypocauste (T Aéro OUT), on note bien un échange avec le sol.

Ce déroulement se répète pour chaque phase de stockage, qui intervient sensiblement aux mêmes horaires.

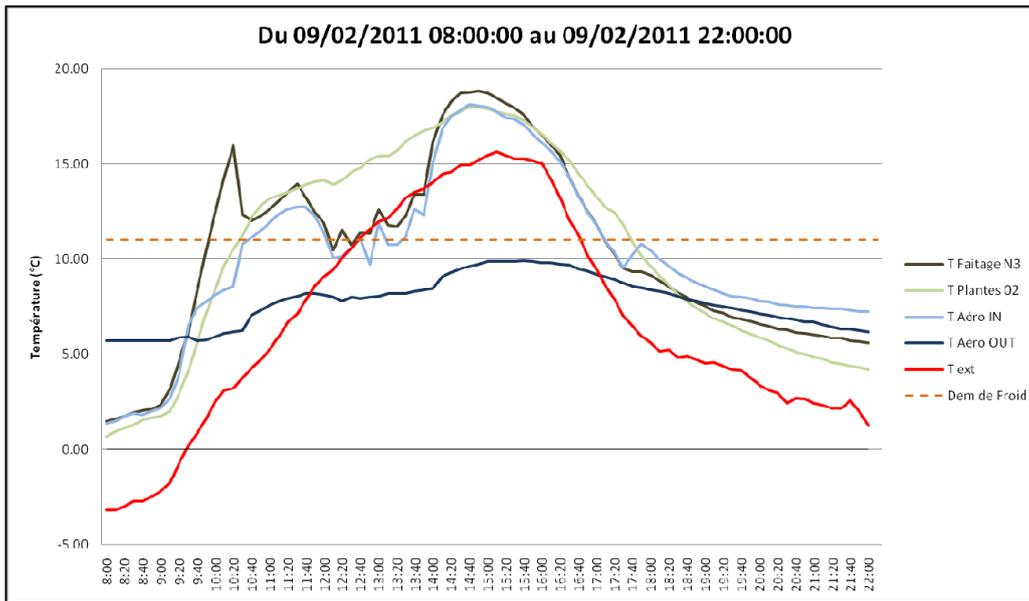


Figure 2 : Températures aériennes dans le dispositif hypocauste en phase de stockage

1.1.2 Analyse des températures au niveau du sol

Les températures en sous-sol (T sous-sol 11, Figure 2) à 80 cm de profondeur, près de l'entrée du dispositif, permettent de bien noter une augmentation de la température dans le sol pendant la période de stockage (10h20 – 17h50). Ces résultats de 2011 montrent un gain de presque 3°C dans le sous-sol.

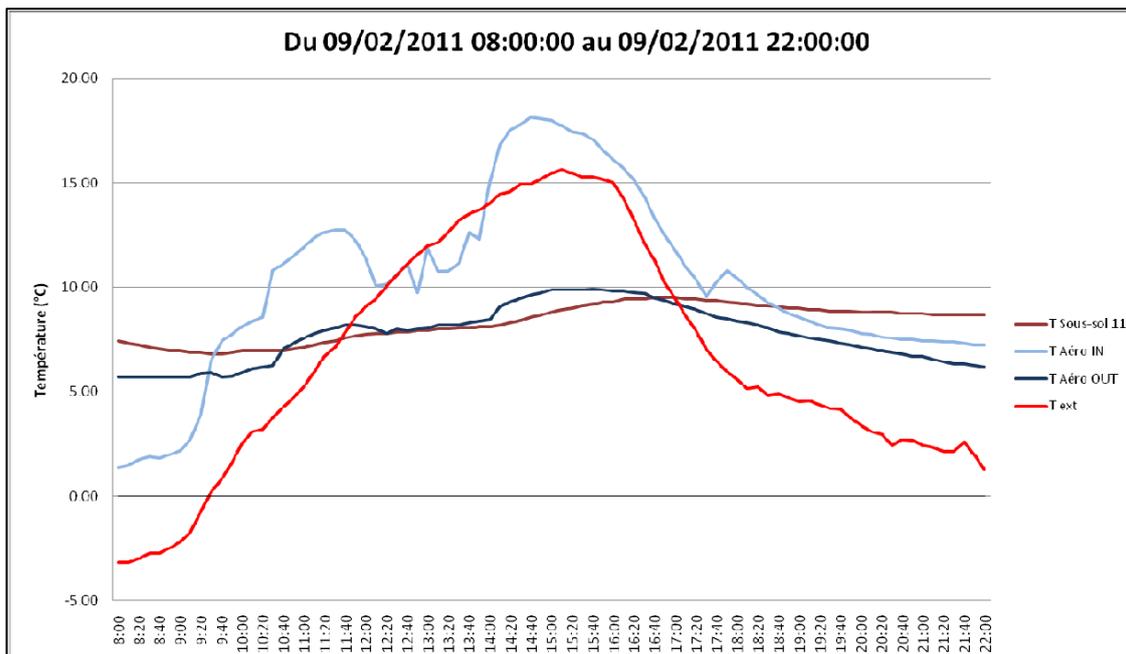


Figure 3 : Evolution des températures aux différents points de mesure de l'hypocauste lors de la charge

Au 2/3 de l'hypocauste, l'échange n'a presque plus lieu ou de seulement quelques dixièmes de degrés. Sur la dernière tranche du sol, l'échange peut être considéré comme inexistant. La température est quasi-stable et identique sur toute la tranche du sol.

Avec les sondes à 1,5 m de profondeur, la phase de stockage n'a pas d'incidence sur la température du sol à cette profondeur. La température reste constante à environ 8°C.

1.2 Analyse de la phase de restitution

1.2.1 Analyse des températures d'air

Comme pendant la phase de stockage, la température en faitage chute au moment du démarrage de la phase de restitution. Ceci est dû à l'aspiration de l'air dans la colonne. A partir de ce moment, la température en entrée dans les tubes correspond à la température en faitage. La température de sortie des tubes est supérieure d'environ 3,5°C à la température d'entrée, permettant de maintenir une température de plantes bien supérieure à la température extérieure.

Cette phase de restitution se termine lorsque la température au niveau des plantes remonte en-dessus de la consigne de 4,5°C. Dans le cas présent, cet arrêt se produit au moment du réchauffement global de la serre par le soleil en début de journée. Dans ce cas, on observe une remontée de la température en sortie du tube, ainsi qu'une forte augmentation de la température en entrée du tube et plus particulièrement en faitage.

Ce déroulement se répète pour chaque phase de restitution, qui intervient sensiblement aux mêmes horaires pendant les périodes froides.

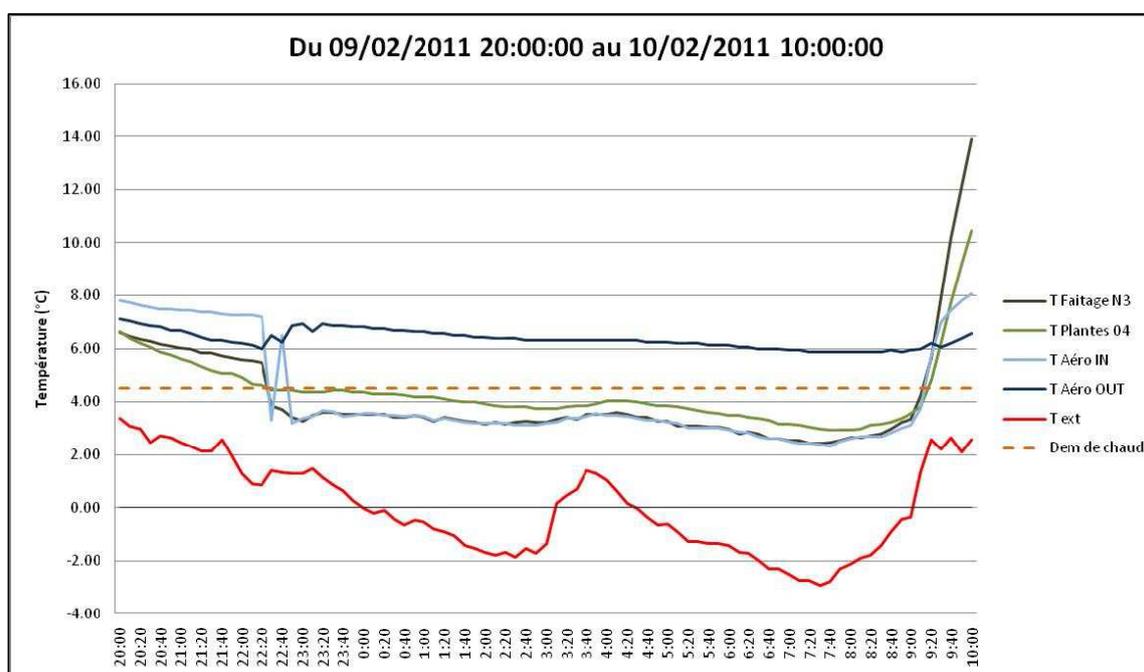


Figure 4 : Températures aériennes dans le dispositif hypocauste en phase de restitution

1.2.2 Analyse des températures au niveau du sol

Sur la Figure 5, rapportant les températures en sous-sol (T Sous-sol 11) à 80 cm de profondeur, nous pouvons analyser ici la décharge à l'entrée de l'hypocauste (1ère tranche, coté « IN »), qui permet de constater que le sol restitue de l'énergie (la température chute d'environ 2,5°C durant la nuit).

L'analyse des mesures faites au niveau de la 3^{ème} tranche permet de constater que l'échange devient quasi-inexistant dans cette partie du sol et que donc seule la première moitié de l'hypocauste restitue véritablement de la chaleur.

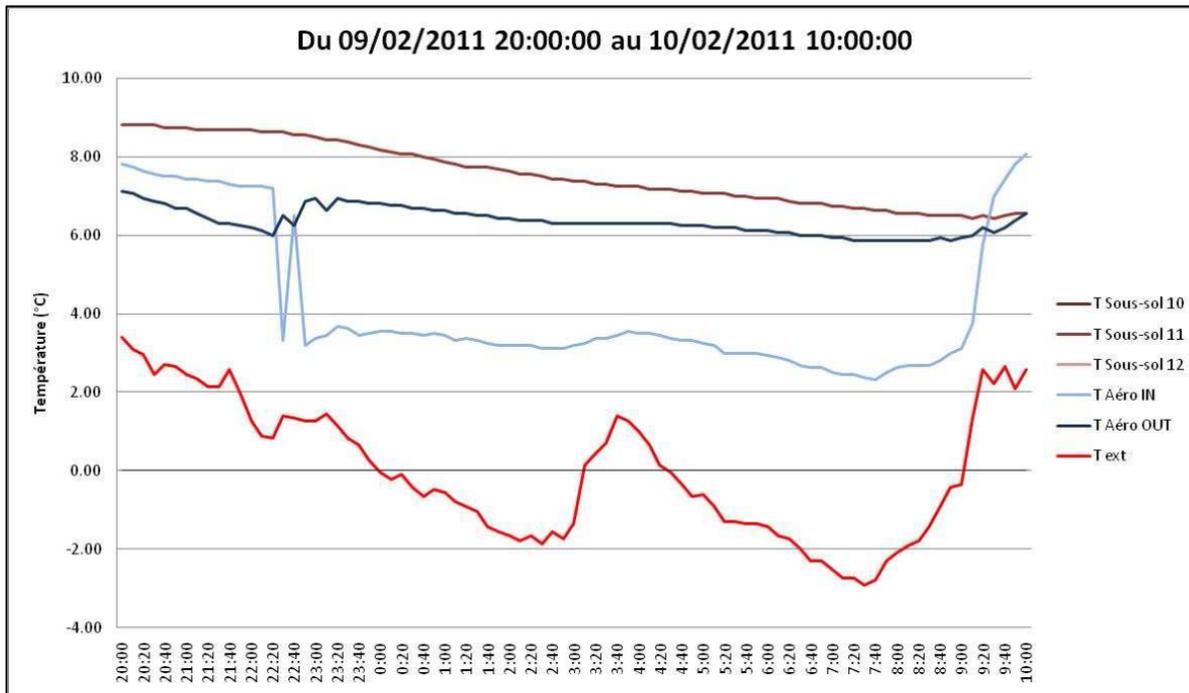


Figure 5 : Températures en sous-sol au niveau de la première tranche dans le dispositif hypocauste en phase de restitution

1.2.3 Analyse des températures au niveau des plantes

Les trois courbes de températures de teintes vertes correspondent aux sondes au niveau des plantes dans la serre hypocauste (Figure 6), la sonde "T Plantes 02" étant la plus proche de la sortie de l'hypocauste (T Aéro out) et la sonde "T Plantes N1" étant la plus éloignée (donc la plus proche de l'entrée de l'hypocauste (T Aéro Inn)).

On constate une différence de température entre la sortie d'air et la température réelle au niveau des plantes. Cette différence de près de 2°C démontre qu'il y a une perte de chaleur et un défaut de diffusion. De plus, on remarque que la sonde la plus proche de la sortie de l'hypocauste (sonde Plantes 02) n'est pas la plus chaude alors que c'est la première à être en contact avec le flux d'air « réchauffé ». Cela peut être dû à l'éloignement des sondes du flux d'air réellement créé par l'hypocauste et d'une protection créée par le poteau sur lequel cette sonde est fixée. D'une manière générale, les sondes ont le même comportement et l'écart constaté entre elles n'est que de l'ordre de 0,5°C.

1.2.4 Analyse de l'hygrométrie au niveau des plantes

Durant la période de restitution, on constate que l'hygrométrie ne varie que très faiblement dans la serre hypocauste (H1). La comparaison avec la serre traditionnelle (SC) permet de réaliser que l'hygrométrie n'est pas influencée par l'hypocauste en phase restitution. Dans les deux serres, l'hygrométrie chute brutalement le matin aux alentours de 9h : cela est probablement dû uniquement à l'ensoleillement qui assèche l'air ambiant.

Le niveau d'humidité de la serre hypocauste est supérieur à celui de la serre classique lorsque le système est à l'arrêt. Cette différence accentue l'effet non désiré de forte humidité au matin. Celle-ci est problématique, car trop importante au niveau des plantes, limitant la transpiration et donc la croissance. Pour y remédier, traditionnellement, il est de coutume d'ouvrir les volets d'aération afin de faire descendre l'humidité. Or, dans le cas de la serre équipée de l'hypocauste, cette ouverture est absente. Il apparaît que le système a moins d'influence que les conditions climatiques. Cette constatation est vérifiée au cours de la journée. Cependant, au matin, lorsque le soleil n'est que peu présent, on

constate une forte augmentation de l'humidité en sortie de l'hypocauste qui correspond à la mise en route de la phase de stockage (courbe bleu ciel à partir de 9h, Figure 7).

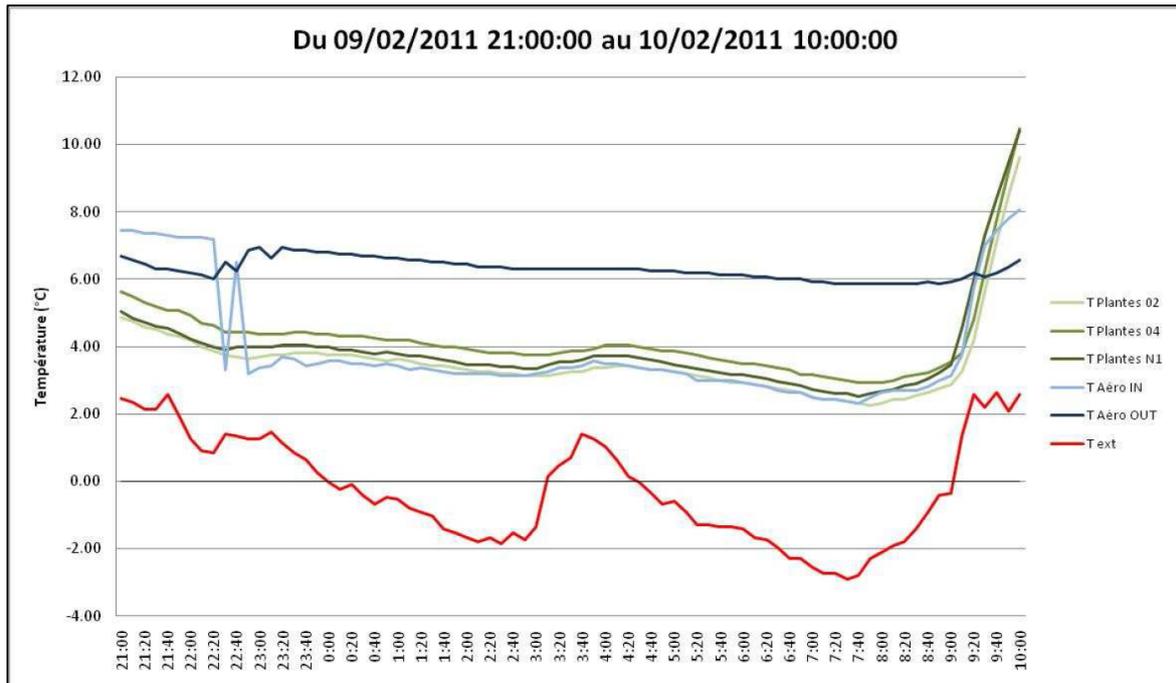


Figure 6 : Températures au niveau des plantes lors de la phase de restitution

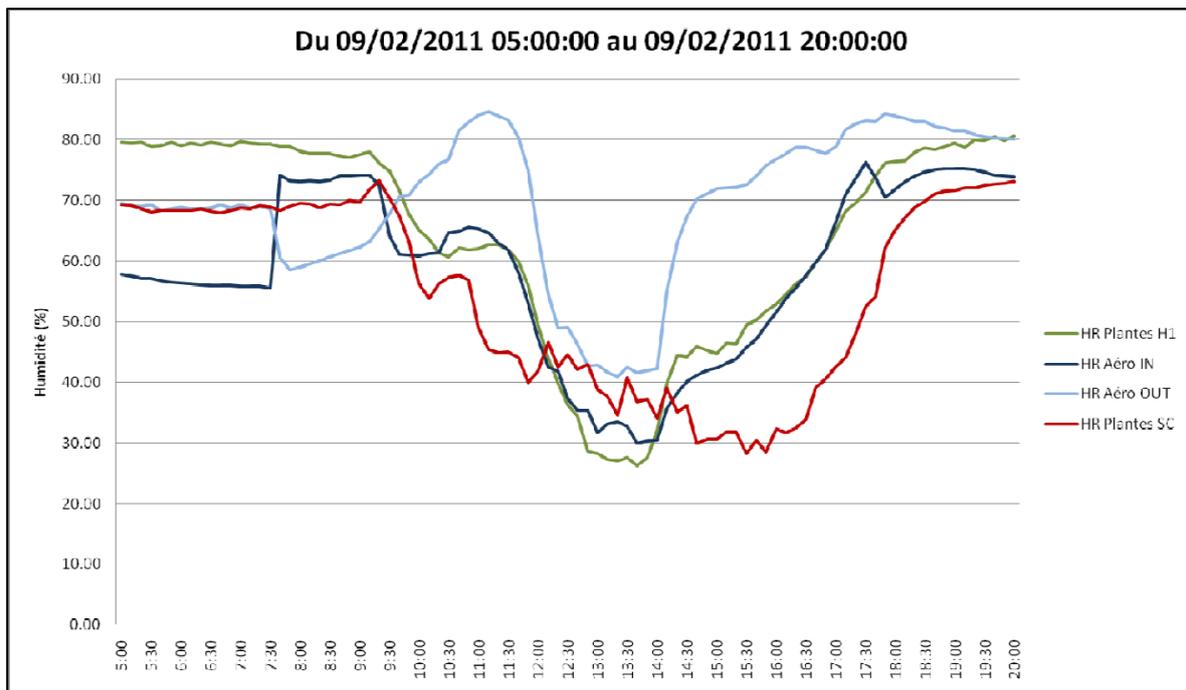


Figure 7 : Hygrométrie au niveau des plantes lors de la phase de charge ; comparaison hypocauste avec serre classique

2. Etude d'optimisation

Le travail a été réalisé en deux temps. La première tâche a consisté dans le développement d'un modèle à partir des données recueillies au sein du système hypocauste. Ensuite, des scénarios ont été réalisés, donnant plusieurs possibilités de modification ou d'amélioration du dispositif.

2.1 Développement d'un modèle numérique : intégration du type Hollmuller

L'intégration de ce modèle reste complexe et nécessite des données complètes sur le type de sol de la serre. Dans un premier temps, les caractéristiques physiques du dispositif hypocauste ont été testées seules sous le logiciel TRNSys, puis, dans un deuxième temps, ces caractéristiques ont remplacé celles du module de serre équivalent du modèle Hollmuller en vigueur.

Paramétrages selon les caractéristiques du dispositif hypocauste étudié: Ceux-ci se programment directement sous TRNSys (simulation studio) à travers les caractéristiques du dispositif. Doivent notamment être définies les résistances thermiques des sols étudiés (en $\text{kJ}/(\text{hr}.\text{m}^2.\text{K})$) ainsi que les tolérances de calcul.

Les entrées, à relier aux différents éléments du système, sont le débit d'air entrant dans l'hypocauste, sa température, son humidité et la pression. Pour ce projet, nous considérons qu'il n'y a pas d'infiltration d'eau. Ce type permet d'obtenir en sortie la température du flux d'air sortant, son humidité, les énergies sensible et latente échangées au cours du parcours ainsi que différentes températures de surfaces.

2.2 Résultats des simulations

A travers les différentes simulations, il a été testé la bonne réaction des modèles numériques.

2.2.1 Vérification de la température extérieure

Les simulations ont été effectuées sur la journée du 09 février

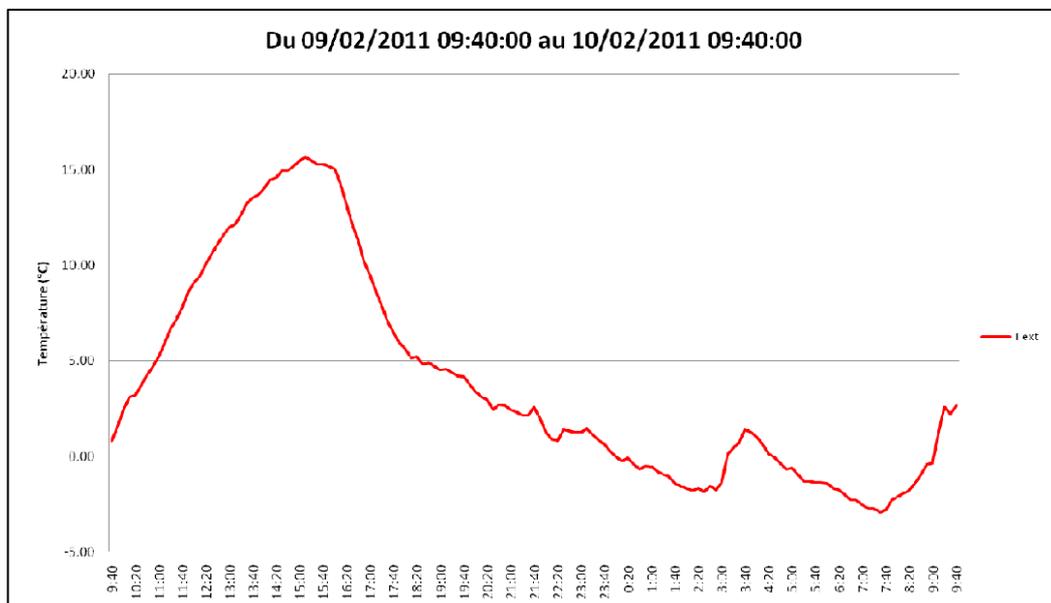


Figure 8 : Relevé des températures extérieures le 9 février 2011

La température simulée (Figure 9) correspond bien à la température réelle (Figure 8). Cependant, un léger lissage atténue les pics de température.

En comparant les profils de température aux niveaux des entrées et sorties de l'hypocauste, on se rend compte que la différence, et donc l'échange, est moins importante en simulation. Cette différence peut expliquer le manque de gain relevé au niveau des plantes. De plus, il apparaît que les phases d'échanges sont plus courtes que dans la réalité. L'échange dans les tubes dans le modèle numérique ne correspond pas à la réalité. Il a été nécessaire de paramétrer un sol avec une meilleure capacité thermique et un tube avec de meilleures propriétés d'échange.

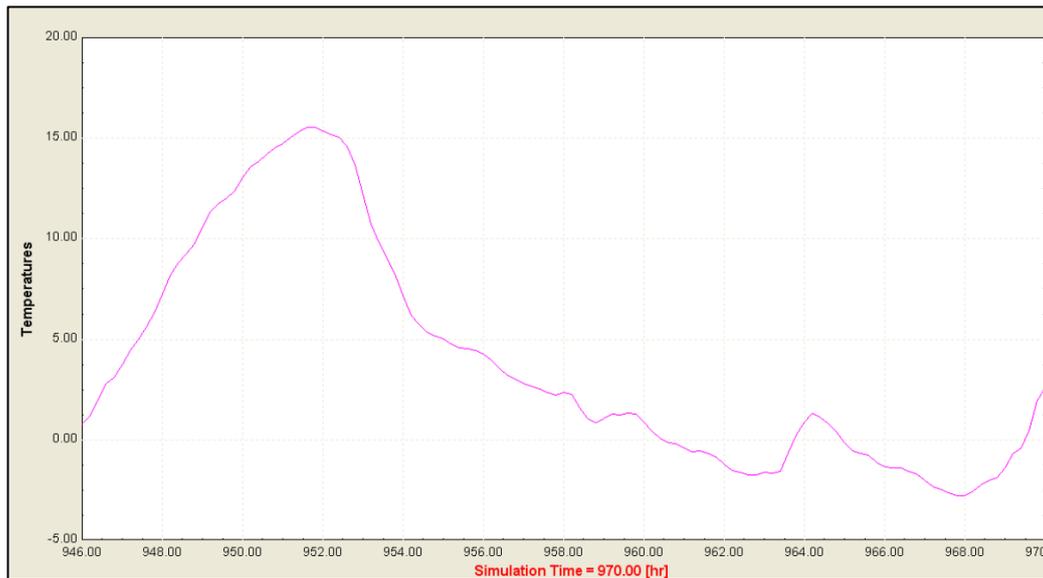


Figure 9 : Simulation des températures extérieures du 9 février 2011 avec le modèle numérique développé sous TRNSys

2.3 Bilan énergétique de la serre et comparaison à des simulations

2.3.1 Bilan du procédé réel

Sur la période du mois de février il a donc été calculé :

- Une énergie totale transmise au sol en phase de **stockage** de : **1 159 kWh**,
- Une énergie totale transmise par le sol en phase de **restitution** de : **1 567 kWh**.

Le système restitue plus qu'il ne stocke, un effet géothermique est donc présent dans le procédé. Afin d'établir un bilan mensuel prenant en compte l'effet géothermique, il a été calculé les excédents d'énergie stockés/restitués dans/par le sol lorsque le système a restitué ou stocké la totalité de l'énergie demandée/possible. Ainsi, pour le mois de février, les valeurs suivantes sont obtenues :

- **Diffusion** dans le sol : **385 kWh**,
- **Apport** du sol : **793 kWh**.

2.3.2 Comparaison mesure / simulations et optimisation de l'hypocauste

Trois simulations sous le logiciel TRNSys ont été réalisées et sont comparées au bilan réalisé à partir des données réelles recueillies sur la serre hypocauste. Procédé n°1 = Modélisation du système réel équipant la serre horticole ; Procédé n°2 = Modélisation de la serre équipée d'un hypocauste implanté dans le sens de la largeur.

Les tubes ont été tournés à 90°. Leur nombre est dans ce cas de 40 tubes, de longueur 9,60m ; Procédé n°3 = Modélisation du système réel, avec des longueurs deux fois moindres. Les résultats, à travers l'analyse des courbes et le calcul des bilans énergétiques, ont été comparés entre chaque procédé (Figure 10). Les résultats sont analysés selon les différents niveaux d'analyse :

Stockage : le procédé n°3, avec une longueur de tube plus courte, est le procédé stockant le plus d'énergie.

Diffusion : le procédé n°3, ayant plus de stockage, diffuse plus dans le sol que les deux autres procédés. La notion de diffusion regroupe l'énergie excédentaire et non rediffusée au cours des 24h.

Apport : le procédé n°2 est le procédé puisant le plus dans le sol, en plus de l'énergie stockée, afin de permettre de répondre aux besoins.

Restitution : grâce aux apports plus importants, le procédé n°2 est le procédé restituant le plus d'énergie en sortie de l'hypocauste.

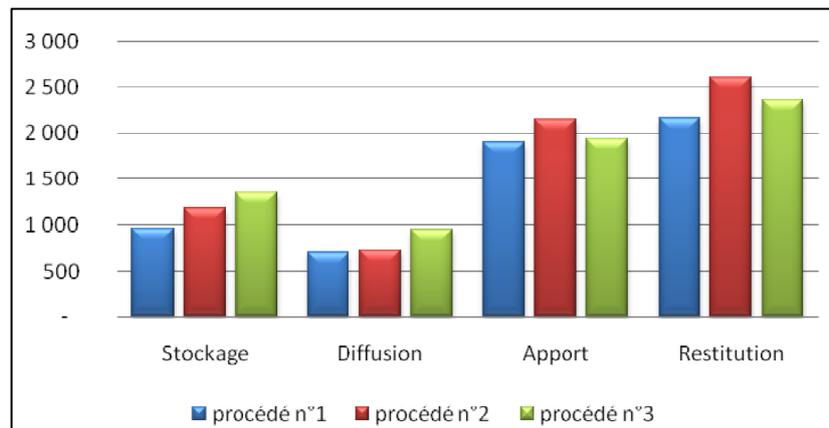


Figure 10 : Comparaison des performances des trois procédés simulés

En comparant les résultats affichés dans la partie précédente, on note clairement que le procédé n°3, utilisant une longueur de tube plus courte, est le procédé le plus performant (Figure 10).

Cependant, ce résultat doit être pondéré dans le sens où le volume de la serre est lui aussi réduit. Néanmoins, ces résultats rejoignent les constatations relevées dans l'analyse des mesures sur le système réel qui démontraient la faible efficacité de la deuxième moitié du tube.

A l'avenir, il serait intéressant d'étudier un projet similaire mais équipé d'un hypocauste plus réduit dans sa longueur entre les entrées et sortie d'air, quitte à multiplier les modules.

3. Evaluations agronomiques

Les taxons composant le panel du matériel végétal ont été observés selon les différentes modalités de culture : serre chaude et tunnel froid au Ratho (serre R = modalité 1 et tunnel R = modalité 2) et serre chaude et serre hypocauste à l'entreprise Gonthier (serre G = modalité 3 et hypo G = modalité 4).

Il est fait le constat, que la mesure agronomique du poids frais n'est pas la variable la plus représentative en matière de résultat. Par contre, les suivis des stades végétatifs et reproducteurs hebdomadaires sont plus pertinents pour les producteurs. La période choisie pour les itinéraires techniques allant de la semaine 40 de l'année 2010 à la semaine 11 de l'année 2011 est très représentative des conditions climatiques rencontrées en Rhône-Alpes et accumule les difficultés de gestion technique liées à l'humidité dans les serres.

Les résultats agronomiques obtenus avec le dispositif hypocauste, sont dans l'ensemble assez intéressants, avec des plantes qui présentent des morphologies commercialement attrayantes : compactes, ramifiées.

Il n'y a généralement pas d'élongation du fait des températures relativement faibles par rapport à des dispositifs chauffés. Les calendriers sont de fait plus longs, et nécessitent que soient bien calculées les dates de mise en culture.

Des taxons exigeant des sommes de températures plus hautes, ou ayant des degrés de végétation plus haut, n'ont pas donné de bons résultats agronomiques, voire ont dépéri. C'est le cas du bégonia (Figure 11 et 12).

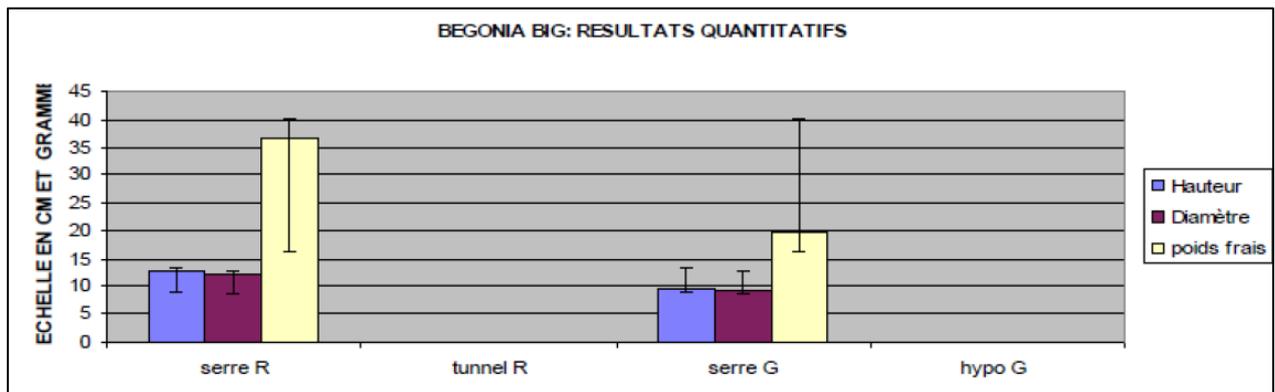


Figure 11 : Comparaison de la croissance de *Begonia x hybrida* Dragon Wing F1 'Red' entre les différentes modalités de conditions de culture

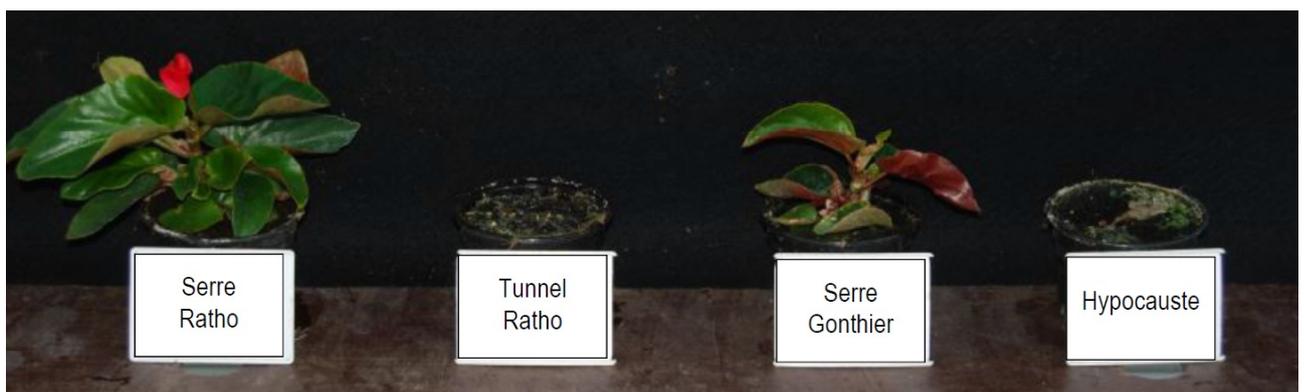


Figure 12 : Rendus morphologiques de la croissance de bégonia entre les différentes modalités

En revanche, le système hypocauste permet la protection pour un certain nombre de plantes, montrant sa différence avec le tunnel froid. Pour exemple, le *Percallis cruenta* 'Venezia' plus connu sous le nom de cinéraire des fleuristes est une plante de serre froide dont le zéro végétatif est proche de 7° C, a résisté et même donné un bon résultat commercial dans le système hypocauste, alors qu'il a dépéri dans le tunnel (Figures 13 et 14).

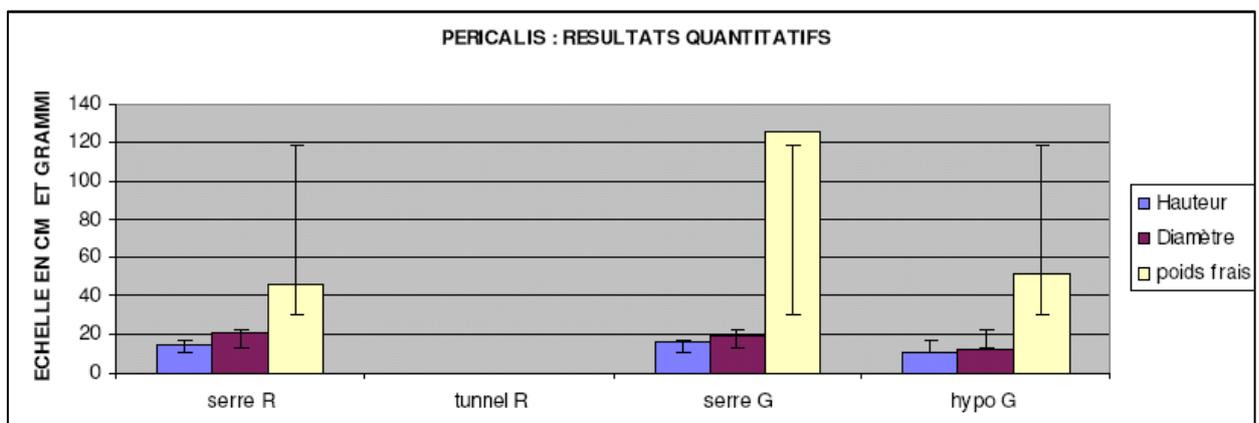


Figure 13 : Comparaison de la croissance de *Pericallis cruenta* Venezia F1 'Blue with Ring' entre les différentes modalités de conditions de culture

Ainsi, avec le système hypocauste, de bons résultats ont été obtenus avec *Ranunculus Mache* F1 'Scarlet', *Saxifraga White* 'Star', *Saxifraga Saxony* 'Red', *Saxifraga Pixie* 'Rose', *Primula vulgaris* Primlet

'Mixed', *Aubrieta gracilis* Kitte 'Blue', *Aubrieta gracilis* Kitte 'Rose-Red', les plantes étant commercialement acceptables, mais il faut prendre en compte le retard de développement par rapport à des plantes de serre chaude pour organiser les calendriers de culture.



Figure 14 : Rendus morphologiques de la croissance de *Pericallis* entre les différentes modalités

Discussion

Un des points forts de ce projet est celui du développement d'une méthodologie d'analyse précise du système serre et de ses systèmes de régulation, notamment pour le système de ventilation couplé au système d'échangeurs enterrés. Le fonctionnement du système a été amélioré lors des campagnes d'essais, par l'analyse des résultats expérimentaux pour ce qui concerne la réduction et la maîtrise des consommations énergétiques, pour ce qui concerne la gestion du climat (impact sur la qualité des cultures : taille des plantes, développement végétatif et floral...). Un problème de commande de ventilation pour la restitution n'a pu être corrigé qu'en deuxième année permettant d'accroître les performances du dispositif.

Les travaux ont révélé le surdimensionnement du dispositif, ne permettant pas de profiter pleinement de l'effet hypocauste sur l'ensemble du dispositif. En effet, la majorité de l'échange entre l'air et les tubes de stockage souterrain s'effectue dans la première moitié de l'hypocauste.

Autrement dit, il faudrait soit un débit plus important dans les tubes de façon à charger/décharger la totalité de l'hypocauste, soit des tubes plus courts ce qui imposerait une reconfiguration lourde du dispositif.

Le dispositif comprenant des éléments techniques aux comportements énergétiques très différents, ici le sol, des échangeurs enterrés et une serre, a pu être modélisé sous le logiciel de simulation thermique dynamique TRNSys. Les résultats confirment l'efficacité de valorisation des apports thermiques de la serre pour une restitution ultérieure lors de périodes froides. Lors des recherches bibliographiques (Boulard et al., 1989 ; Hollmuller et Lachal, 2005), il est apparu que l'humidité de l'air pouvait avoir un effet, ce qui peut être pris en compte dans le modèle d'échangeurs thermiques enterrés du logiciel TRNSys. Ce phénomène n'a pas été constaté dans le dispositif étudié.

En termes d'énergie, le dispositif comparé à des simulations avec des longueurs de tube plus courtes, est moins performant. Le dispositif le plus performant serait un dispositif de même rapport de volume que celui étudié, et avec des longueurs de tubes plus faibles. Un tel dispositif permettrait de profiter au maximum de l'énergie stockée par l'hypocauste.

A l'avenir, il serait intéressant d'étudier un projet similaire mais équipé d'un hypocauste plus réduit dans sa longueur entre les entrées et sorties d'air, quitte à multiplier les modules.

Par ailleurs, un travail est nécessaire sur l'enveloppe de la serre. En effet, pour faire un parallèle avec le milieu du bâtiment, il semble peu efficace de joindre un système performant avec une enveloppe qui ne l'est que peu, c'est-à-dire très déperditif. A l'avenir, il faudra travailler sur des serres beaucoup mieux isolées et en installant un film en partie basse de façon à limiter la stratification.

En **termes agronomiques**, la serre hypocauste a montré des limites en matière de protection de cultures sensibles au froid comme le Bégonia. Le dispositif actuel est peu efficace mais les bons résultats obtenus sur les plantes vivaces et plantes horticoles de serre froide comme *Ranunculus*, par rapport à un tunnel plastique non chauffé permettent d'envisager des développements futurs pour la production de plantes rustiques pour le jardin extérieur et pour l'élevage des gammes de bisannuelles et de vivaces herbacées.

Dans la mesure où la demande de produits végétaux s'orientera vers un meilleur respect de normes environnementales au sein de la production sous serre et face à l'accroissement des coûts de transport et de l'énergie, il est primordial de continuer à observer cette technologie et de la faire évoluer dans le futur afin que le retour sur investissement basé sur l'économie d'énergie soit suffisamment rapide. Ce retour sur investissement sera à évaluer à partir de systèmes plus performants permettant d'élargir la gamme de plantes et évaluer également dans d'autres contextes climatiques en comparaison de tunnels classiques avec des dispositifs antigels (films thermiques, couvertures plantes...).

Références bibliographiques

Ademe, 2007. Utilisation rationnelle de l'énergie dans les serres : Situation technico-économique en 2005 et leviers d'action actuels et futurs ; Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par le Ctifl, l'Astredhor et l'INH.

Baille A., Boulard T., 1986. An overview of solar greenhouse projects in France. Second CNRE workshop on solar heating greenhouse, Thessaloniki. FAO Roma.

Boulard T., Razafinjohany E., Baille A., 1989. Heat and water vapor transfer in agricultural greenhouse with an underground heat storage system, part 1 and 2, Agricultural and Forest Meteorology, 45, pp. 175-194

Bourgeois M., Calame F., Danloy L., Gay J., Jolliet O., Mantilleri S., Moncousin C., Munday G.-L., Reist A., 1986. Serre-pilote CERN. Rapport final 1982-1985. CERN, Genève.

Castilla Prados N., Montero J.-I., Bretonnes F., Salvez J.-L., Jimenez M., Sevilla A., 1985. Essays on solar heating of greenhouses in Almeria. CNRE workshop on solar heating of greenhouses, Cyprus. FAO ROMA.

Hollmuller P., 2002 Utilisation des échangeurs air/sol pour le chauffage et le rafraîchissement des bâtiments. Thèse de doctorat. Université de Genève.

Hollmuller P., Lachal B., Jaboyedoff P., Reist A., Gil J., Danloy L., 2002. Geoser, Stockage solaire à court terme en serres horticoles, Rapport de recherche.

Hollmuller P., Lachal B., 2005. Buried pipe systems with sensible and latent heat exchange: validation of numerical simulation against analytical solution and long term monitoring. Ninth International IBPSA Conference, Montréal, Canada, August 15-18, 2005.