

GEOSER

Stockage solaire à court terme en serres horticoles

**Pierre Hollmuller, Bernard Lachal, Pierre Jaboyedoff,
Antoine Reist, Javier Gil, Luc Danloy**



**GEOSER
Stockage solaire à court terme
en serres horticoles**

**Pierre Hollmuller ¹⁾, Bernard Lachal ¹⁾, Pierre Jaboyedoff ²⁾,
Antoine Reist ³⁾, Javier Gil ¹⁾, Luc Danloy ⁴⁾**

Rapport final

Sous mandat de l'Office Fédéral de l'Energie

- 1) Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie, 7 rte de Drize, CH - 1227 Carouge
2) Sorane, 152 route du Châtelard, CH - 1018 Lausanne
3) Centre des Fougères, Station de recherches en production végétale de Changins,
CH - 1964 Conthey
4) 54 route de la Prulay, CH - 1217 Meyrin

Rapports de recherche du Cuepe

1. Analyse thermique de la cité solaire de Plan-les-Ouates
G. Branco, B. Lachal, P. Gallinelli, D. Gonzalez, W. Weber
2. GEOSER : Stockage solaire à court terme en serres horticoles
P. Hollmuller, B. Lachal, P. Jaboyedoff, A. Reist, J. Gil, L. Danloy

Adresse

Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie (CUEPE)
Battelle, Bâtiment A
7, route de Drize
CH 1227 - Carouge/Genève
Tél. : (41 22) 705 9661
Fax : (41 22) 705 9639
<http://www.unige.ch/cuepe>

TABLE DES MATIERES

1. INTRODUCTION.....	1
2. PROBLEMATIQUE ET ETAT DE L'ART : TOUR D'HORIZON.....	2
2.1. Gestion énergétique des serres agricoles.....	2
2.2. Le stockage solaire.....	2
<i>Captage</i>	2
<i>Stockage</i>	3
<i>Transfert</i>	3
<i>Contraintes agronomiques</i>	4
3. DESCRIPTION DE L'EXPERIENCE.....	5
3.1 But, démarche et intervenants.....	5
3.2. Serres et installations techniques.....	5
3.3 Système de mesure.....	11
3.4 Principe de fonctionnement : analyse d'un jour type.....	11
<i>Chauffage, stockage et déstockage</i>	11
<i>Condensation et évaporation</i>	14
<i>Electricité</i>	15
<i>Bilan des stocks : pertes diffusives et gains capacitifs</i>	16
<i>Bilan des serres : pertes et gains par l'enveloppe</i>	19
3.5 Dysfonctionnements et configurations particulières.....	22
<i>Stockage intempestif</i>	22
<i>Distribution de chaleur par gaines flexibles</i>	22
4. BILANS ENERGETIQUES ET AGRONOMIQUES.....	23
4.1 Gestion des serres et contrainte climatique.....	23
4.2 Bilans énergétiques.....	24
<i>Période sans stockage</i>	24
<i>Période avec stockage</i>	25
<i>Stockage/déstockage versus potentiel solaire récupérable</i>	35
4.3 Bilan agronomique.....	37
5. OPTIMISATION DES SYSTEMES.....	39
5.1 Simulation numérique.....	39
5.2 Optimisation de la serre à eau.....	39
5.3 Optimisation de la serre à air.....	40
6. CONCLUSIONS.....	43
7. REMERCIEMENTS.....	43
BIBLIOGRAPHIE.....	44

ANNEXES

Annexe 1 : Système de mesure

Annexe 2 : Calendrier

Annexe 3 : Mesure d'étanchéité des serres

Annexe 4 : Analyse du sol

Annexe 5 : Le logiciel hortichern

1. INTRODUCTION

La culture sous abris est devenue un instrument ordinaire de notre approvisionnement en produits frais. Quelle que soit l'optique choisie: économique, sociale ou écologique, la production locale apparaît plus sensée que l'importation de régions lointaines, lorsqu'il s'agit de produits cultivés de toutes façons sous abris (cf. bilan écologique sommaire, REIST et GYSI, 1990). Cela étant, l'exploitation raisonnée des infrastructures impose, sous nos climats, le chauffage quasi continu des serres pour une production de toute saison.

Ainsi que nous le verrons (sec. 2), la rationalisation de la gestion énergétique des serres a dès les années 70 logiquement débuté par l'amélioration de l'enveloppe et des équipements de distribution de chaleur, avant de s'attaquer à la possibilité de stockage/restitution des gains solaires. Plusieurs expériences ont été menées dans ce domaine, sous divers climats et plus particulièrement avec stockage en citerne comme dans le sous-sol. Il n'existe cependant à ce jour pas d'étude comparative de ces deux systèmes de stockage (ni entre eux, ni avec une serre standard) et les bilans énergétiques complets, incluant les besoins électriques auxiliaires, font défaut.

Le but du projet GEOSER fut de compléter cette lacune, en analysant simultanément trois serres récentes de même construction, soumises à contrainte météorologique et programme agronomique communs. La première, équipée d'un système de distribution de chaleur classique relié à une centrale de chauffe à gaz devait servir de serre témoin, alors qu'aux deux autres s'ajoutaient, pour l'une un système de stockage en citerne (échangeurs air/eau dans la serre), pour l'autre un stockage en sous-sol (échangeur air/sol par tubes enterrés). Après description des équipements, le fonctionnement des systèmes et les flux énergétiques en jeu est présentée par l'analyse détaillée d'un jour type (sec. 3).

Après définition du calendrier d'exploitation, nous présentons les bilans énergétiques détaillés des deux systèmes de stockage et les bilans thermiques comparés des serres sur une année complète d'exploitation (sec. 4). Afin de vérifier l'innocuité des systèmes de stockage sur la production agronomique, l'analyse énergétique est enfin complétée par une étude agronomique comparative.

En se basant sur un ensemble de simulations numériques, une étude paramétrique permet finalement d'évaluer le potentiel d'optimisation des systèmes (sec. 5).

2. PROBLEMATIQUE ET ETAT DE L'ART : TOUR D'HORIZON

2.1. Gestion énergétique des serres agricoles

Les serres agricoles occupent en Suisse une surface de quelque six cents hectares; leur consommation d'énergie pour le chauffage varie, selon le type et l'utilisation qui en est faite, entre 10 et 40 litres de mazout (soit 360-1440 MJ) par m² et par an : au total, environ 100-120'000 tonnes de mazout (3-5 PJ, ou 0.5% de la consommation totale d'énergie du pays). Le coût énergétique des cultures sous abris a pris de l'importance dès les années 70, avec une augmentation brusque du prix des combustibles, suivie d'une lente dégrèvement accompagnée d'une baisse continue du prix de vente des produits. Dans un contexte de maigre plus-value, la rentabilité des facteurs de production devient critique. Le chauffage représente actuellement de 15 à 20% des coûts de production sous abris. Le rapport au produit brut peut être abaissé de deux manières : en augmentant la valeur de la production, par une amélioration quantitative ou qualitative des rendements; ou en réduisant la consommation d'énergie par mètre carré. Les deux peuvent se combiner : les années 80 ont vu les rendements augmenter de 3.5% par an (soit 40% en 10 ans), et la consommation d'énergie par m² baisser de moitié : ainsi, la productivité de l'énergie consommée a quasiment triplé.

Il y a un peu plus de 20 ans que la recherche s'est mise en devoir d'améliorer le bilan énergétique des abris de culture. Les perfectionnements apportés à l'enveloppe des serres, à la gestion des équipements et à la distribution de chaleur ont permis de réduire de moitié la consommation annuelle de combustible par unité de surface. Afin d'économiser d'avantage d'énergie ou de l'utiliser plus rationnellement, restent l'éventuelle possibilité d'utiliser en direct des rejets thermiques (en provenance d'industries proches ou lors de cogénération liée à l'éclairage artificiel des plantes) et le stockage de chaleur excédentaire (solaire ou autre).

Le stockage de chaleur a fait l'objet de nombreuses recherches au début des années 80. Il permet d'utiliser de l'énergie normalement dissipée et parfois de réduire la dimension des installations de production de chaleur en écrasant le pic de puissance de chauffage au crépuscule. Lorsque la chaleur stockée est d'origine fossile (production de chaleur à un moment où la serre n'a pas besoin de chauffage, par exemple lors de production de gaz carbonique pour les plantes, ou de cogénération), il s'agit de chaleur à température élevée. Le dimensionnement et la gestion du stock ne posent pas de problème. Il est beaucoup plus difficile d'exploiter les excédents d'énergie solaire. L'optimisation d'un système de captage, stockage et redistribution de chaleur exige un juste dimensionnement des composants et une bonne conception de fonctionnement : les flux d'énergie sont faibles, le rendement des installations limité et les investissements élevés. Les réalisations expérimentales des années 80 ont généralement déçu; l'analyse de leur rendement global est presque toujours lacunaire. Nous en présentons ici une brève revue critique pour illustrer les raisons de nos choix de systèmes de captage, stockage et distribution.

2.2. Le stockage solaire

Captage

Des *capteurs solaires séparés* ont été utilisés pour chauffer des serres de production horticole; une description de 13 installations expérimentales dans le nord ainsi que dans le sud de l'Europe (von ZABELTITZ, 1987) montre des résultats peu encourageants. Les surfaces de capteurs représentaient 10 à 50% de la surface des serres. Associés à un stock et souvent à une pompe à chaleur, ils n'ont jamais couvert totalement les besoins thermiques des serres. Les coûts d'installation et d'exploitation de capteurs séparés semblent définitivement condamner leur utilisation pour le chauffage de serres horticoles.

L'utilisation de *capteurs situés dans les serres* est une hypothèse séduisante. Ils peuvent constituer des systèmes d'ombrage fixes, avec un fluide à opacité variable (BAILLE et BOULARD, 1986; CHIAPALE et al, 1983; LEVAV, 1985; REPETTI, 1984) ou mobiles, constitués de réflecteurs ou absorbeurs orientables (EGGERS, 1986). Ils peuvent également couvrir partiellement le sol sous forme de gaines remplies d'eau. Les systèmes d'ombrage sont compliqués à installer et à manœuvrer, leur coût est élevé et ils influencent négativement les cultures; tous les systèmes proposés jusqu'ici ont été abandonnés. Les absorbeurs posés sur le sol sont généralement passifs et ne posent que des problèmes d'encombrement. Ils permettent le maintien

hors gel d'abris légers, au printemps dans les régions méditerranéennes, et en été dans le grand nord (CASTILLA PRADOS et al, 1985; GRAFIADELLIS, 1986; LISKOLA,1983; PHOTIADES et BREDENBECK, 1986). Toutefois, leur puissance d'échange réduite limite leur usage à sauvegarder des cultures de serre froide.

La solution présentant le meilleur compromis entre le coût et le rendement consiste à **utiliser la serre comme capteur**, et à stocker la chaleur dans son sol. L'emprise au sol est nulle et l'appareillage réduit à un minimum, mais le captage limité par l'échauffement autorisé de l'air de la serre (BREDENBECK, 1982; DARMRATH, 1983; JELINKOVA, 1986).

Stockage

Le stockage saisonnier demanderait des volumes trop importants pour être envisageable; seul entre en ligne de compte le stockage journalier, qui peut se faire dans un eutectique (sel de Glauber, chliarolithe/serrrolithe 25, paraffine...), dans un réservoir d'eau ou dans le sol de la serre. Les eutectiques sont coûteux, parfois irréguliers dans le changement de phase, et difficiles à mettre en oeuvre (nécessité conjointe d'importantes surfaces d'échange et d'étanchéité parfaite). Les expériences réalisées (JAFFRIN et CADIER, 1982; LEVAV, op.cit.; RAZAFINJOHANY, 1989) n'ont pas été concluantes. Le choix entre le stockage dans un réservoir d'eau ou directement dans le sol de la serre dépendra quant à lui principalement d'une analyse économique. Celle-ci fait intervenir les coûts des matériaux, de la mise en place et de l'exploitation, ainsi que le rendement potentiel de l'installation.

Pour un **stockage en citerne**, les frais engendrés par les matériaux (citerne, conduites, pompes, échangeurs...) et les coûts d'exploitation seront plus élevés que pour le stockage direct dans le terrain, mais les frais de mise en place seront inférieurs et le rendement supérieur. Deux expériences d'utilisation de stocks en citerne (PICCIURO et MARTINCIGH, 1987; von ZABELTITZ, op.cit. p 116-123) ne sont pas comparables parce qu'elles impliquent d'une part une architecture très particulière, et d'autre part deux réservoirs et une pompe à chaleur. Un exemple israélien (ZAMIR et ARBEL, 1986) donne un temps d'amortissement de 3 ans avec un couverture de 40% des besoins thermiques annuels, un exemple grec (GRAFIADELLIS, 1985) montre la possibilité d'assurer un ΔT de 5K entre la serre et l'extérieur, à faible coût.

Le **stockage direct en sol** a fait l'objet de nombreuses publications (BASCETINCELIK, 1985; BREDENBECK, 1984; EGGERS, op.cit.; JELINKOVA, op.cit.; KURTAN, 1985; MAVROYANOPOULOS et KYRITSIS, 1986; NIR et al, 1981; PORTALES, 1984; RAZAFINJOHANY, op.cit.; SANTAMOURIS et al, 1994). Les grandes différences entre les types d'installation et conditions d'exploitation, ne permettent pas de tirer des conclusions claires quant à l'opportunité de réaliser un stockage souterrain, et encore moins d'en établir la configuration.

Transfert

Pour un **stock en citerne**, si l'on renonce à l'utilisation d'une pompe à chaleur, le problème est de réaliser une surface d'échange permettant de valoriser de très faibles différences de température avec un minimum d'énergie auxiliaire. Le chauffage auxiliaire doit utiliser les mêmes vecteurs. La coordination des circuits solaire et auxiliaire, discutée ci-dessous, a représenté un des défis du projet GEOSER. Outre la performance thermique et la définition d'une stratégie de régulation évitant de charger le stock solaire avec la centrale de chauffe, la conception d'un système d'échange de chaleur doit répondre aux exigences de la robustesse, de l'encombrement réduit et du coût minimal. Les échangeurs constitués de circuits d'eau en tubes minces sont sujets à perforations fréquentes et occupent beaucoup de place; la solution qui jusqu'ici répond le mieux aux critères ci-dessus consiste à utiliser des aérochauffeurs surdimensionnés et d'en optimiser l'emplacement, l'aéraulique interne et la distribution des flux entrants et sortants.

Pour le **stockage direct dans le sol**, l'échangeur est constitué des tuyaux enterrés et les données manquaient jusqu'ici pour optimiser la dimension, la géométrie, l'emplacement en profondeur et l'isolation éventuelle de l'échangeur. A l'intérieur de la serre, comme pour l'échangeur du stock en citerne, il s'agit d'en optimiser les flux entrants et sortants. Le chauffage avec de l'air chaud contribue en effet à augmenter les déperditions thermiques s'il n'est pas canalisé : selon BAILEY (1988), les déperditions thermiques d'une serre chauffée avec un débit élevé d'air chaud non canalisé sont supérieures de 20 à 30% à celles d'une serre chauffée avec

un circuit traditionnel d'eau chaude et de 40-50% à celles d'une serre chauffée avec de l'air chaud canalisé ou si la distribution de chaleur se fait au sol.

Contraintes agronomiques

Le stockage et les dispositifs d'échange thermique ne doivent pas entraver le travail, ni faire de l'ombre ou provoquer des mouvements d'air violents. La chaleur doit être distribuée de manière que les températures soient homogènes dans les cultures.

Le système de ***distribution de la chaleur*** peut influencer le bon fonctionnement de la photosynthèse, qui dépend de la température des feuilles, avec un optimum de 20-35°C pour une feuille isolée, et de 20-30°C pour un feuillage complet; mais le développement des plantes dépend également de processus secondaires de transport et d'organogenèse. Les températures optimales pour l'obtention de récoltes satisfaisantes, qualitativement et quantitativement, se situent généralement aux alentours de 20°C (BAKKER, 1995). Pour éviter le brassage excessif d'air dans la végétation et l'augmentation des déperditions thermiques, il faut envisager une distribution de chaleur au niveau du sol. Le chauffage de la zone des racines présente en général des avantages pour les plantes en pots et fleurs coupées (McAVOY et JANES, 1984; BOULARD et al, 1984; SCHAUPMEYER, 1984; WULSTER et JANES, 1984; ZERONI et al, 1984) surtout si la température au niveau du feuillage est abaissée au-dessous de l'optimum; Pour les tomates, KOOISTRA (1984) ne constate aucun effet du chauffage au niveau des racines, HUREWITZ et al (1984) une stimulation de la croissance mais pas de compensation à une basse température de l'air, alors que GOSSELIN (1984) y trouve un avantage considérable au printemps et van WINDEN (1988) un effet variable selon le stade de développement de la plante, comme aussi pour la laitue. Toutefois, certains résultats se rapportent à des températures dépassant les consignes habituelles de chauffage; si l'on écarte cette hypothèse, le maintien d'une température égale dans l'environnement des racines et du feuillage est doublement favorable aux plantes et au bilan thermique des serres. Pour tirer le meilleur profit d'un système de stockage de chaleur, il conviendra d'optimiser la distribution de chaleur dans cette optique.

La possibilité de stocker de la chaleur dépend largement des ***stratégies d'aération et de chauffage***. Pour l'échauffement maximal autorisé dans la serre (température de consigne d'aération); on observe au-dessus de 25-28°C une réduction de la photosynthèse nette (BERTIN et HEUVELINK, 1993) et une dégradation de la qualité des fruits (SLACK et al, 1988). D'autre part, les températures excessives associées à une radiation ou une humidité élevée rendent l'environnement de travail inacceptable. Le stock devra donc être dimensionné en fonction d'une température maximale de l'air, de 25 à 28°C selon la culture. Le degré de couverture des besoins thermiques de la serre dépendra aussi de la limite inférieure de température tolérée; dans cette optique, l'abaissement temporaire en fin de nuit (stratégie "drop") contribue à réduire la consommation d'énergie au moment où la différence de température entre l'intérieur et l'extérieur est la plus élevée. Les variations de température au cours du nyctémère (couple jour-nuit) ne font par ailleurs pas obstacle à une stratégie d'optimisation thermique : les plantes répondent à la moyenne des températures de périodes allant de 24 heures à une dizaine de jours, intégrant sans conséquence un écart absolu de l'ordre de 10K entre extrêmes (COCKSHULL, 1988, 1992).

Certaines questions restent à étudier, quant à un éventuel conflit entre le stockage et la distribution de CO₂ "thermique" avec émission de chaleur dans la période où la serre joue son rôle de capteur (avec la nécessité éventuelle de charger alors deux stocks de chaleur, un pour la chaudière et l'autre pour les gains solaires), ou entre le stockage et les stratégies "DIF" consistant à chauffer la serre à des températures plus élevées la nuit que le jour (HENDRIKS et UEBER, 1995).

3. DESCRIPTION DE L'EXPERIENCE

3.1 But, démarche et intervenants

Sous nos climats, de mars à octobre, les serres de culture rejettent par ventilation naturelle d'importants excès de chaleur solaire, alors même qu'elles sont chauffées durant la nuit. Le stockage à court terme de la chaleur solaire excessive permet ainsi, sans modifier le régime de culture ni influencer le régime thermique des eaux et du sous-sol, d'économiser du combustible fossile en période de chauffage.

Antérieurement au projet "Geoser", les conditions d'une possible utilisation de la chaleur solaire de rejet restaient cependant difficiles à évaluer sous nos climats : si les besoins thermiques des serres pouvaient être calculés avec précision sur la base des résultats des expériences "serre-pilote CERN" [BOURGEOIS et al, 1986; DANLOY et al, 1986] et HORTICERN [REIST et al, 1989] et au moyen du logiciel HORTICERN [JOLLIET et LERESCHE, 1989], les paramètres du stock et de l'échangeur, de même que leurs performances, ne pouvaient être simulés convenablement.

A la suite de travaux d'approche menés entre le Centre des Fougères de la Station de recherches en production végétale de Changins (RAC) et le Centre universitaire d'étude des problèmes de l'énergie de l'Université de Genève (CUEPE), un crédit de l'Office des constructions fédérales permit la réalisation d'une étude de faisabilité. Les conclusions proposées par le bureau d'ingénieurs SORANE furent que les connaissances acquises ne suffisaient cependant pas à motiver des réalisations pratiques; si l'on jugeait celles-ci souhaitables pour des raisons de politique énergétique, on ne pouvait pas faire l'économie d'une expérimentation. Le rapport SORANE permettait de chiffrer le potentiel d'économie d'énergie réalisable dans la pratique à 44'000 tonnes de mazout environ, pour la Suisse. L'investissement nécessaire était évalué à 62-125 Fr par m² de serre, soit une charge annuelle de 6-11 Fr ; l'énergie économisée coûterait 0.09-0.18 Fr/kWh pour une entreprise privée, dont les dépenses de chauffage diminueraient si le prix du mazout dépassait 0.90 Fr/kg. ; dans le cas de la RAC, étant donné la petitesse des installations (surcoût d'échelle), le coût serait de 0.32-0.44 Fr/kWh. Si le projet vérifiait les hypothèses résumées ci-dessus et que la moitié du potentiel d'économie se réalisait, on aurait dépensé en travaux de recherches (infrastructure comprise) la somme de 287'000 Fr correspondant à 3% de la valeur du mazout économisé annuellement (à 0.40 Fr/kg).

Pour la première fois, un dispositif très complet de mesures allait ainsi être installé dans trois serres identiques, abritant les mêmes cultures soumises aux mêmes consignes et gérées parallèlement durant 17 mois (dont une année complète avec fonctionnement des stocks). Aux compétences des cocontractants (RAC, responsable du projet et du programme agronomique ; SORANE, responsable du dimensionnement, de la mise en service et du suivi des installations, ainsi que de la simulation numérique du stockage en cuve ; CUEPE, responsable des mesures et de l'analyse énergétique, ainsi que de la simulation numérique du stockage en sol) s'ajouta celles de M. Luc DANLOY (du CERN, où avait eu lieu l'expérience HORTICERN) et de M. Alain LEGERET (de l'Ecole d'ingénieurs en horticulture de Wädenswil, où se déroulait une expérience similaire de plus petite envergure), qui participèrent au groupe d'accompagnement du projet. Le succès de l'expérience et la qualité des analyses sont sans aucun doute corrélés aux échanges d'information réguliers et au climat de respect qui marquèrent le travail de ce pool de compétences.

3.2. Serres et installations techniques

Le projet a été réalisé au Centre des Fougères de la Station de recherches en production végétale de Changins, à Conthey, dans la vallée du Rhône.

Les trois serres (fig. 1), orientées nord-sud et disposées en parallèle, sont de petites dimensions (12 x 8 m, hauteur latérale 2.8 m). Leur construction, assurée par une entreprise suisse, correspond à ce qui existe le plus couramment dans le pays. En acier avec cadres d'aluminium, elles sont couvertes en toiture de verre simple sélectif et latéralement de vitrages doubles. Un écran interne horizontal, à la hauteur des piédroits, assure l'isolation nocturne et la protection contre l'ensoleillement excessif. L'humidification, lorsque nécessaire, est assurée par un système de brumisation fine. Dans la serre témoin et la serre à air (stockage en terre effectué via un flux d'air) le chauffage de base est assuré par des aéroconvecteurs classiques (échangeurs eau/air à débit fixe) reliés à la centrale de chauffe. Dans la serre à eau (stockage en citerne

assuré par une circulation d'eau) les aéroconvecteurs ont été surdimensionnés afin de servir également d'échangeurs pour le stock (écart de température entrée/sortie bien plus faible qu'en mode chauffage) et se règlent par débit d'air progressif.

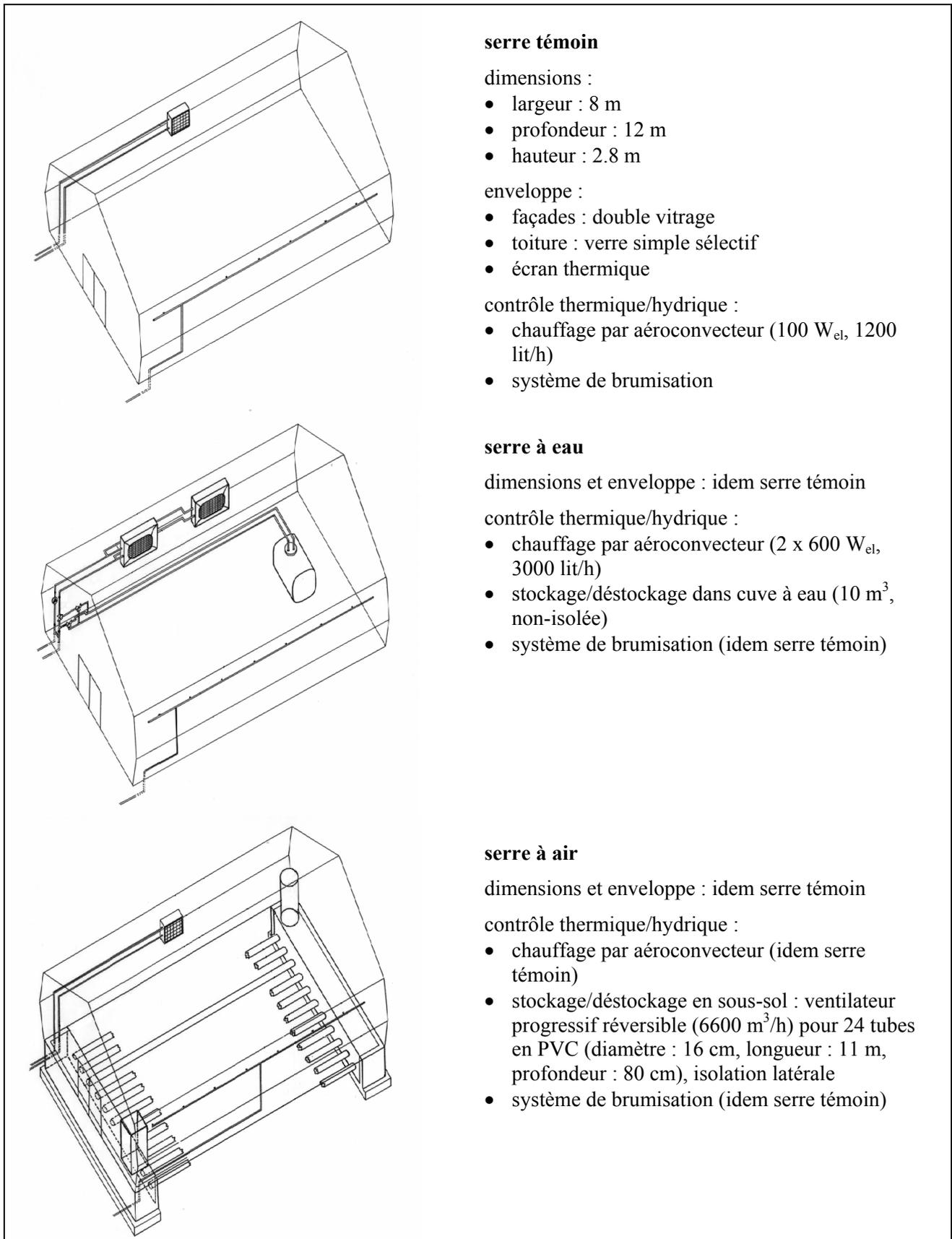


Figure 1 : Schéma technique des trois serres.

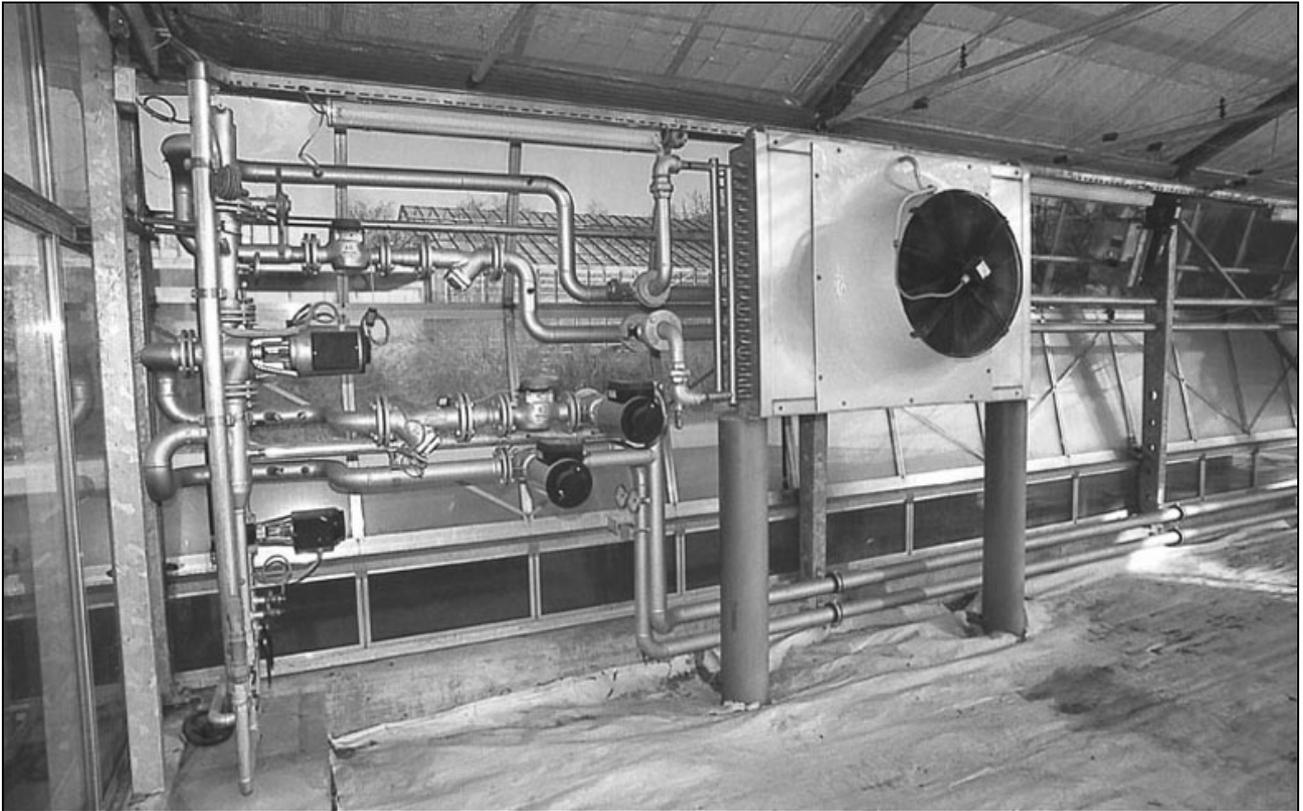


a



b

Figure 2 : Vues générales : a) emplacement de serres ; b) gestion de l'espace intérieur, avec cultures hors-sol.

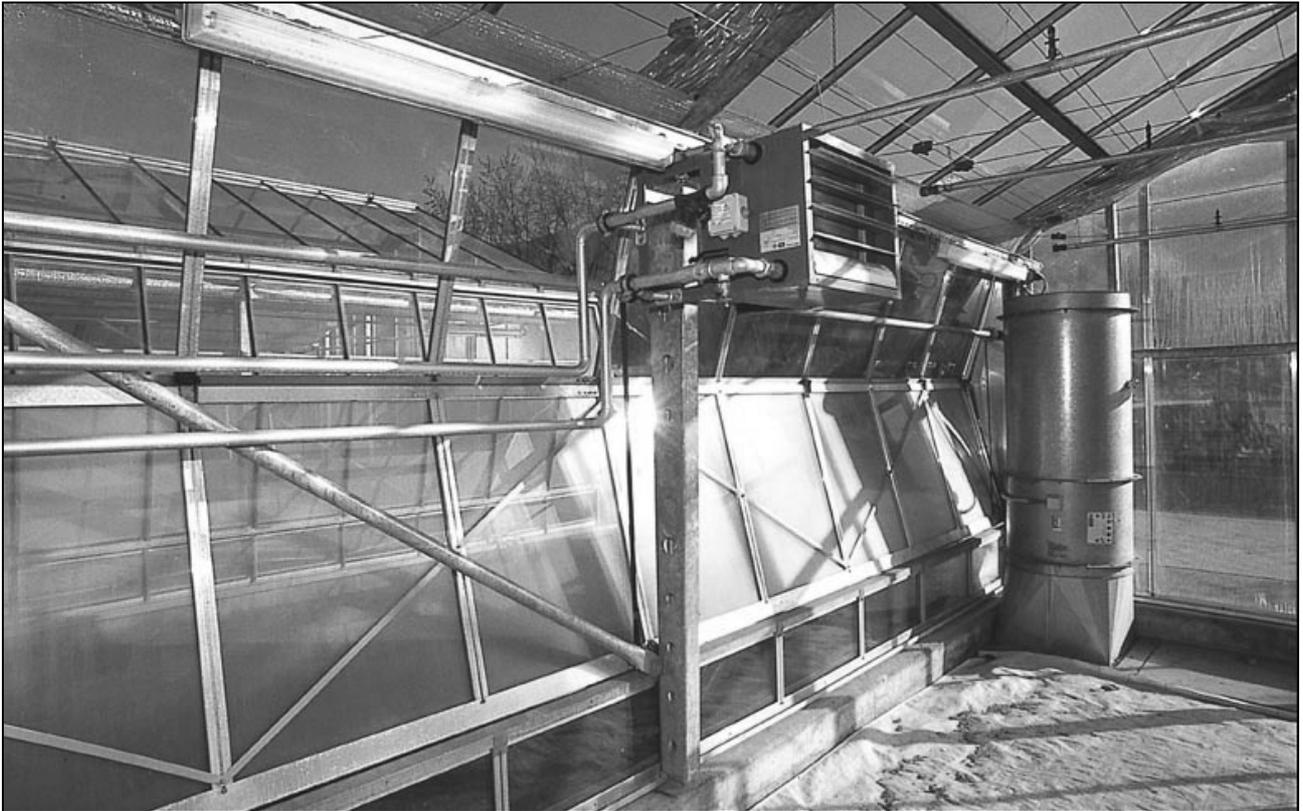


a



b

Figure 3 : Serre à eau : a) système hydraulique et aéroconvecteur ; b) bouche d'accès à la cuve (avant remblayage).



a



b

Figure 4 : Serre à air : a) aérochauffeur et cheminée d'entrée au stock ; b) registre de tubes enterrés (pendant remblayage).



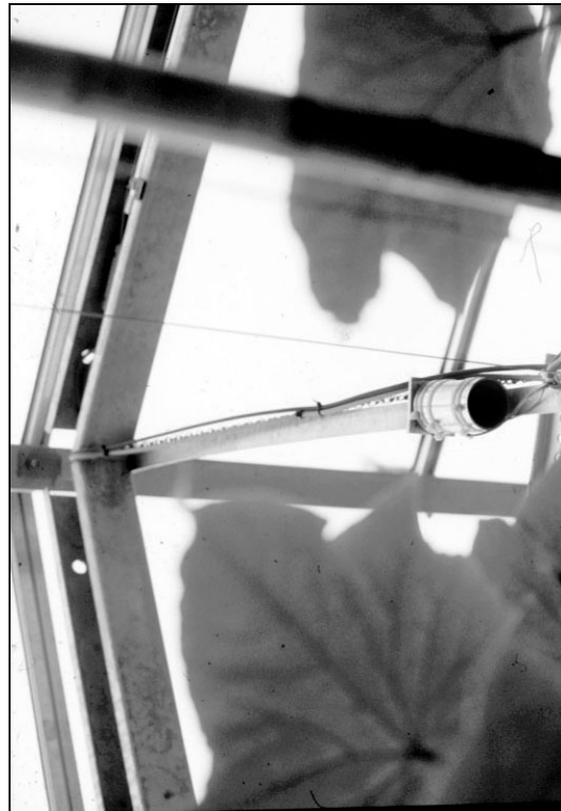
b



d



a



c

Figure 5 : Mise en place du système de mesure : a) thermocouples pour température de sol et de tube ; b) anémomètre pour débit d'air dans un des tubes ; c) hygromètre et thermocouple pour climat intérieur ; d) ventilateur et manomètres pour mesure ponctuelle de l'étanchéité.

A cet équipement de base s'ajoute pour la serre à eau une citerne de 10 m³ non-isolée enterrée sous la serre. Elle est reliée au circuit primaire par une pompe de brassage et un système de vannes trois voies permettant de contrôler le sens de la circulation d'eau lors des opérations de stockage/déstockage (stratification du stock).

Dans la serre à air, l'échangeur air/sol est constitué de 24 tubes de PVC enterrés à 80 cm sous la serre, le sous-sol étant isolé latéralement et la circulation d'air assurée par un ventilateur à débit variable et réversible (stratification du stock).

La gestion de l'ensemble de ces équipements est faite par un automate de régulation du commerce, modifié par le fabricant pour la gestion supplémentaire des deux systèmes de stockage.

3.3 Système de mesure

Afin de pouvoir établir précisément les flux susmentionnés, une chaîne de mesure automatique très complète (environ 90 valeurs saisies par 30 secondes, moyennées et enregistrées par 5 minutes) et indépendante des sondes et codes de régulation (environ 90 valeurs, également saisies et enregistrées toutes les 5 minutes) a été installée à l'extérieur comme à l'intérieur des trois serres (cf. annexe 1). Des décomptes de chaleur redondants ainsi qu'un important travail d'étalonnage et de vérification par recoupement ont ainsi permis la saisie de données d'une grande précision (de l'ordre de 0.01 K pour les différentiels de température, soit de 2% sur les puissances).

3.4 Principe de fonctionnement : analyse d'un jour type

Le fonctionnement parallèle des trois serres et la gestion du stockage solaire s'observent particulièrement bien sur un jour de mi-saison tel le 10 mai 1994, belle journée de printemps (ensoleillement de 27 MJ/m²) mais encore relativement froide (températures moyenne et extrêmes de 14.3, 9.9 et 20.3 °C). Les flux énergétiques à l'intérieur des serres sont explicités ci-dessous et sont résumés dans le tableau 2.

Chauffage, stockage et déstockage

Les figures 6 et 7 retracent la dynamique horaire, resp. par 5 minutes, des trois serres : ce dernier pas de temps correspond à la fréquence d'acquisition des mesures et met en évidence la faible inertie thermique des serres et les oscillations rapides qui en découlent.

Dans la serre témoin, il est fait appel au chauffage (222 MJ) pendant toute la période nocturne afin de maintenir la température dans la serre au minimum requis par le programme agronomique. Dès apparition du soleil, vers 8 heures, la température intérieure augmente et atteint rapidement la consigne supérieure. Les ouvertures latérales sont alors progressivement actionnées pour évacuer les excédents solaires (irradiation de 2600 MJ sur la surface de référence de la serre), jusqu'à disparition de l'astre derrière l'horizon vers 20 heures. Suit la chute de la température de la serre et la reprise du chauffage dès 22 heures.

Dans la serre à eau, alors que durant la première partie de la nuit la citerne est plus chaude que la consigne minimale de la serre, la chaleur stockée précédemment dans la cuve est déchargée de celle-ci via les aéroconvecteurs (110 MJ), permettant d'éviter le recours à la chaudière. Lorsque le déstockage devient impossible - ici à l'occasion du changement de consigne vers 5 heures - la chaudière prend le relais (77 MJ) jusqu'à l'apparition du soleil et la montée de température dans la serre. Dès que celle-ci dépasse à nouveau la température de la cuve, peu après 9 heures, l'excès de gains solaires est à nouveau stocké (195 MJ). Pour maintenir la consigne supérieure, une partie importante des gains solaires est cependant toujours évacuée par ventilation naturelle, cependant retardée et moindre que dans la serre témoin.

Un cycle similaire a lieu dans la serre à air. Tant que jusqu'avant 5 heures la température du sol le permet, le déstockage (62 MJ) est actionné. Indépendant du circuit primaire et moindre que dans la serre à eau, celui-ci a cependant lieu en parallèle au chauffage auxiliaire (158 MJ), qui prend seul la relève en fin de nuit. Dès que, un peu avant 9 heures, la température de la serre dépasse à nouveau celle du stock, le stockage (133 MJ) se met en route en parallèle à la ventilation naturelle de la serre.

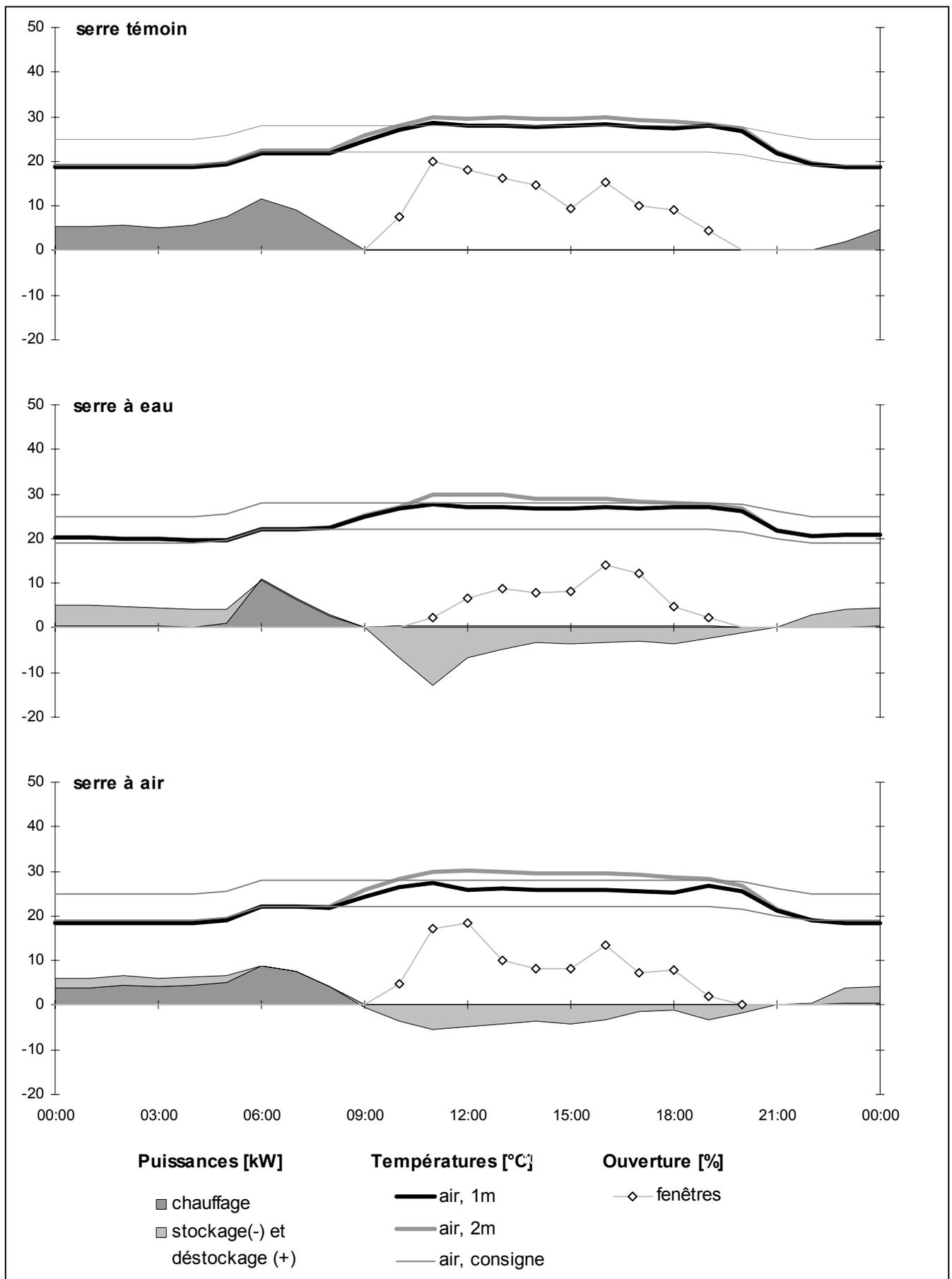


Figure 6 : Dynamique horaire des trois serre, 10 mai 1994.

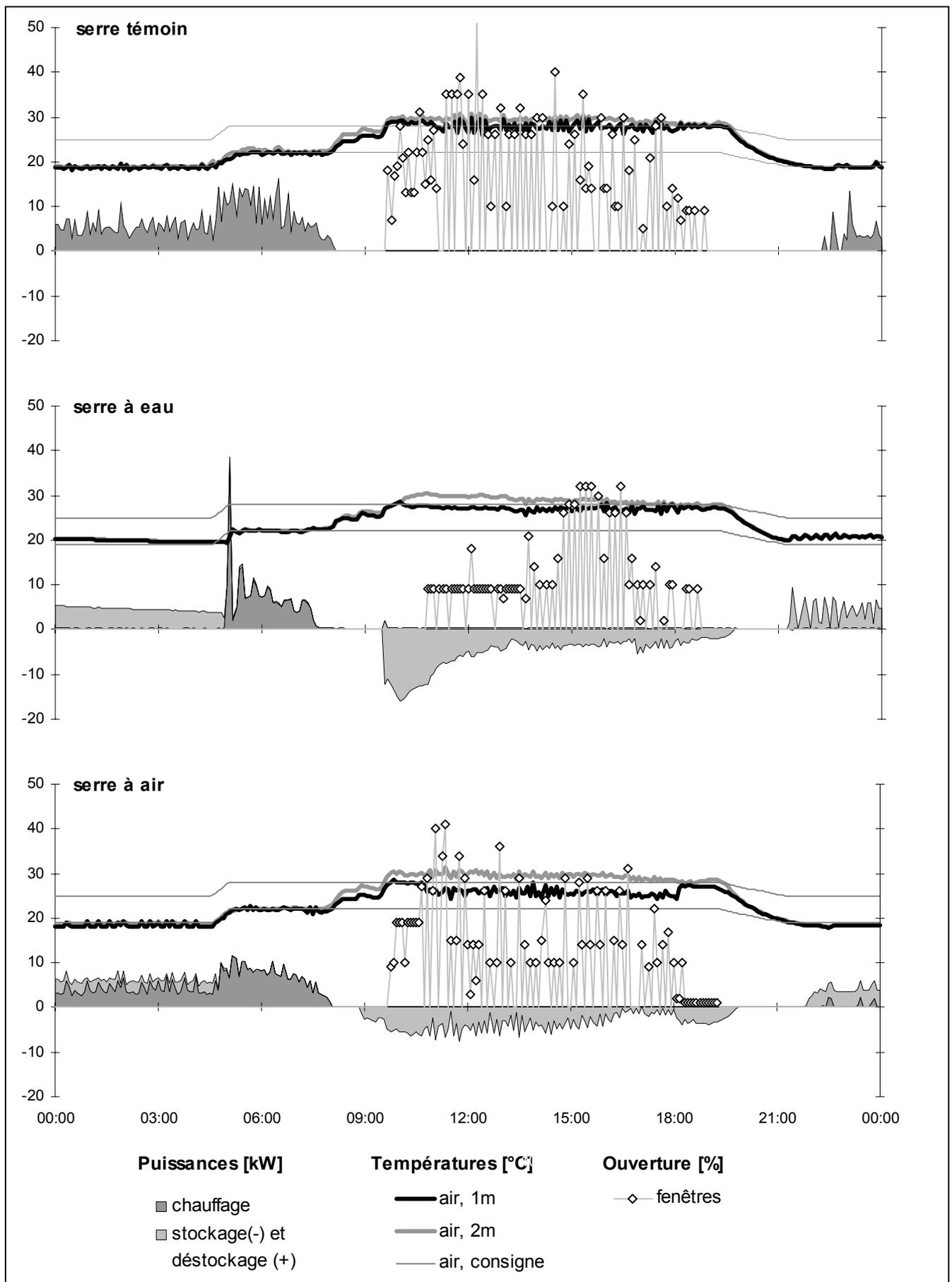


Figure 7 : Dynamique par 5 minutes des trois serres, 10 mai 1994.

Condensation et évaporation

Dans le stock de la serre à air, les échanges sensibles décrits ci-dessus (variations de température de l'air au contact du sol) sont souvent accompagnés d'échanges latents (variations de l'humidité de l'air par condensation/évaporation), ainsi que cela s'observe le 10 mai 1994 (fig. 8). Pendant le déstockage nocturne, l'air qui se réchauffe au contact thermique du sol évapore de l'eau précédemment accumulée à la surface des tubes. Au contraire, le rafraîchissement du flux d'air assez humide (serre fermée) conduit pendant la première heure de stockage, entre 9 et 10 heures, à de la condensation. Dès l'ouverture des fenêtres et la baisse d'humidité qui s'ensuit, cette eau est cependant à nouveau évaporée, jusqu'à ce que vers 19 heures les fenêtres se referment, l'humidité remonte et la condensation reprenne le dessus pour la dernière heure de stockage. Le cycle recommence dès la reprise du déstockage vers 22 heures.

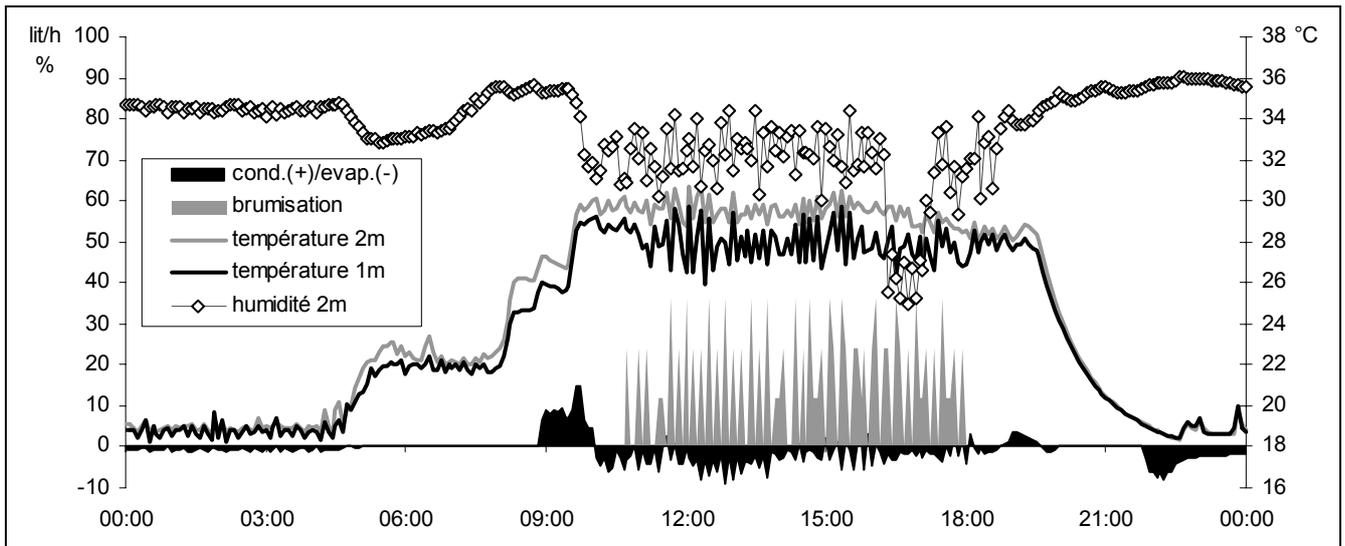


Figure 8 : Climat intérieur et flux hydriques dans la serre à air, 10 mai 1994.

Le déficit d'eau de ce seul jour (33 lit évaporés pour 14 lit condensés, soit 81 MJ soutirés pour 34 MJ fournis au stock) se généralise à l'ensemble de l'année de mesure (voir sec. 4) et indique la présence d'un apport d'eau supplémentaire vers les tubes. Malgré le soin amené à l'étanchéité, celui-ci provient peut-être parfois de la pluie (ponctuellement corrélée avec l'eau récoltée à l'extrémité des tubes, légèrement inclinés). C'est cependant le système de brumisation de la serre qui semble constituer la principale source "d'infiltration" d'eau : afin de maintenir l'humidité minimale du programme agronomique, particulièrement lors des périodes d'aération, celui-ci injecte dans la serre, à une hauteur de 2 m, des gouttelettes d'environ 80 microns. Ainsi que le montrent des études sur la brumisation et ses effets thermiques [LEFEBVRE, 1989 et RODRIGUEZ, 1991], l'énergie d'évaporation d'une telle goutte est, en un premier temps et jusqu'à ce qu'elle atteigne la température humide de l'air, pompée exclusivement dans la goutte elle-même, puis seulement dans l'air et dans l'eau. Ceci explique pendant ces périodes, surtout à une hauteur de 1 m c'est à dire quelque peu éloigné des buses d'injection, l'abaissement de la température de la serre – effet tout à fait comparable aux valeurs observées lors de l'EXPO'92 à Séville, où des systèmes de brumisation avaient été utilisés pour rafraîchir les espaces extérieurs [ALVARES, 1991]. Or selon ces mêmes études, la durée d'évaporation d'une goutte de cette taille varie entre 3 secondes (air sec) et 40 secondes (air humide), alors qu'elle perd sa vitesse d'injection dans la serre en moins de 0.1 seconde : cela lui laisse amplement le temps d'être emportée dans le flux d'air aspiré vers les tubes, sans y être encore évaporée donc mesurée par la sonde d'humidité à l'entrée du puits.

Alors que les phénomènes de condensation/évaporation ont du moins périodiquement pu prendre de l'importance dans les échanges air/sol de la serre à air, un tel phénomène n'a pas été observé dans les échanges air/eau des aéroconvecteurs de la serre à eau.

Electricité

Par rapport à la serre témoin, l'un et l'autre des deux systèmes de stockage consomment un surplus d'électricité. Surdimensionnés, les aéroconvecteurs de la serre à eau ont ainsi une puissance de pointe mesurée à 1200 W, contre 100 W (donnée fabricant) dans les serres témoin et à air, et fonctionnent non seulement en période de charge thermique (36 MJ) mais également pour le stockage (30 MJ). Egalement surdimensionnée, la pompe de circulation supplémentaire dégage par ailleurs une puissance moyenne de 380 W lors du stockage (14 MJ) et du déstockage (8 MJ). Par rapport aux aéroconvecteurs de la serre témoin (4 MJ) il en résulte pour le jour en question une surconsommation électrique de 84 MJ pour la serre à eau. Dans la serre à air, ce sont 300 W du ventilateur pour tubes enterrés (16 MJ) qui s'additionnent à l'aéroconvecteur standard (3 MJ), induisant une surconsommation de 15 MJ.

Généralement omis dans des expériences similaires, le relevé de ces puissances électriques permet d'évaluer l'efficacité énergétique des deux systèmes de stockage : en regard des énergies thermiques déstockées, les coefficients de performance du 10 mai 1994 s'élèvent ainsi à peine à 1.3 pour la serre à eau (qui a souffert d'un problème de réglage et pourrait aisément être optimisée, ainsi que nous le verrons plus loin), contre 4.1 pour la serre à air (compte non tenu des apports thermiques diffusifs par le sous-sol, dont nous parlerons plus loin).

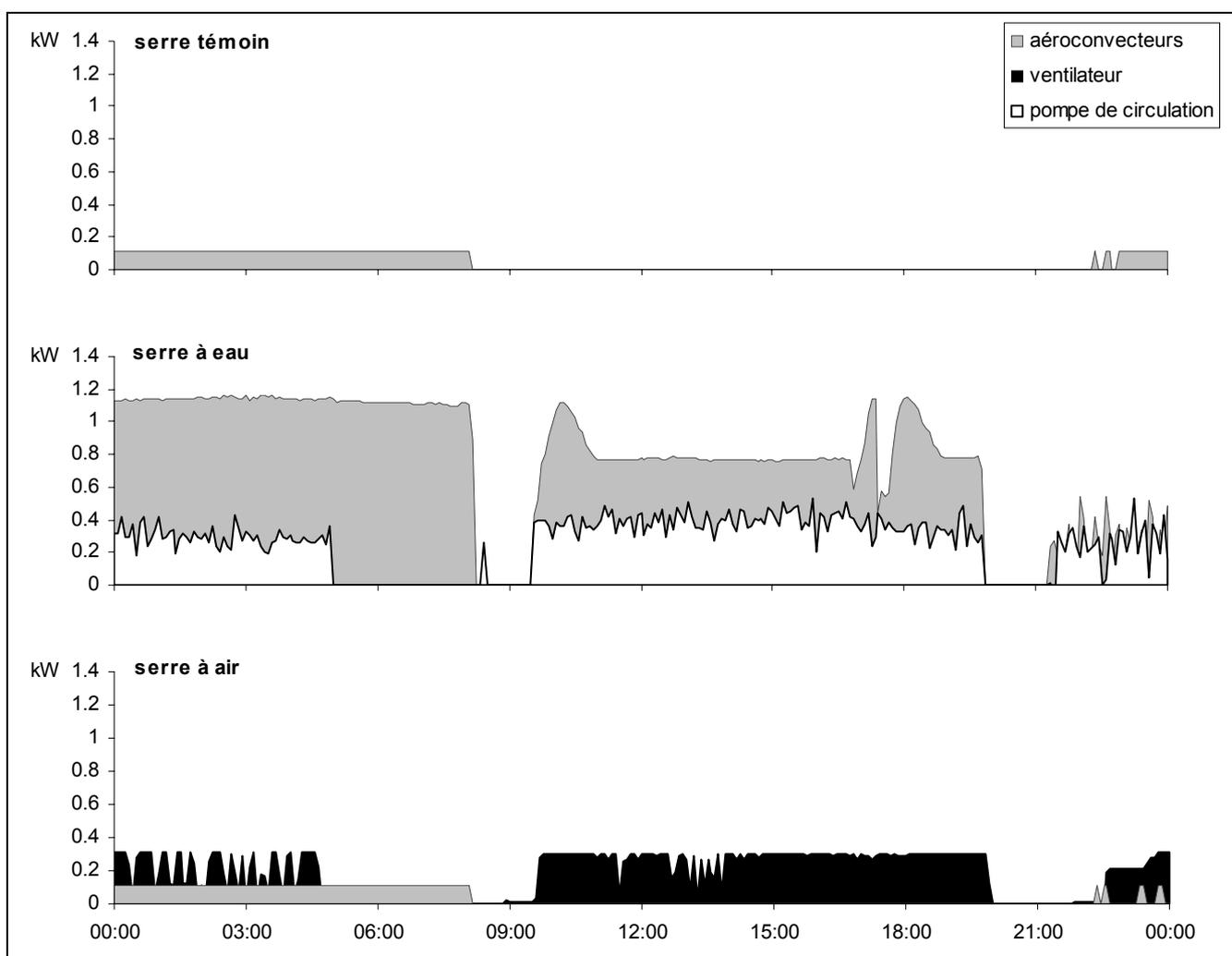


Figure 9 : Consommation électrique pour chauffage, stockage et déstockage, 10 mai 1994.

Transformées en chaleur, il convient enfin de prendre correctement en compte la contribution thermique de ces puissances électriques : pour les aéroconvecteurs et la pompe de brassage elles participent directement au bilan thermique de la serre, alors que dans le cas du ventilateur pour tubes enterrés elles contribuent au bilan du stock.

Bilan des stocks : pertes diffusives et gains capacitifs

Pour l'un et l'autre des deux systèmes, le solde du stockage/déstockage (différence entre énergies stockées et déstockées, dans le cas de la serre à air y compris échanges latents et électricité) correspond à la somme de la variation capacitive du stock et des pertes thermiques (fig. 10 et 11). Pour quantifier séparément ces deux flux nous utilisons un modèle simplifié à un nœud :

$$\Delta Q_{stock} = C \cdot \Delta_t T + K \cdot \Delta_x T \cdot \Delta t$$

qui relie le solde du stockage/déstockage ΔQ_{stock} à la variation de température du stock $\Delta_t T$ (variation capacitive) pendant l'intervalle de temps Δt , ainsi qu'au gradient de température stock-environnement $\Delta_x T$ (pertes diffusives), où K et C sont respectivement les coefficients de diffusion et de capacité apparents.

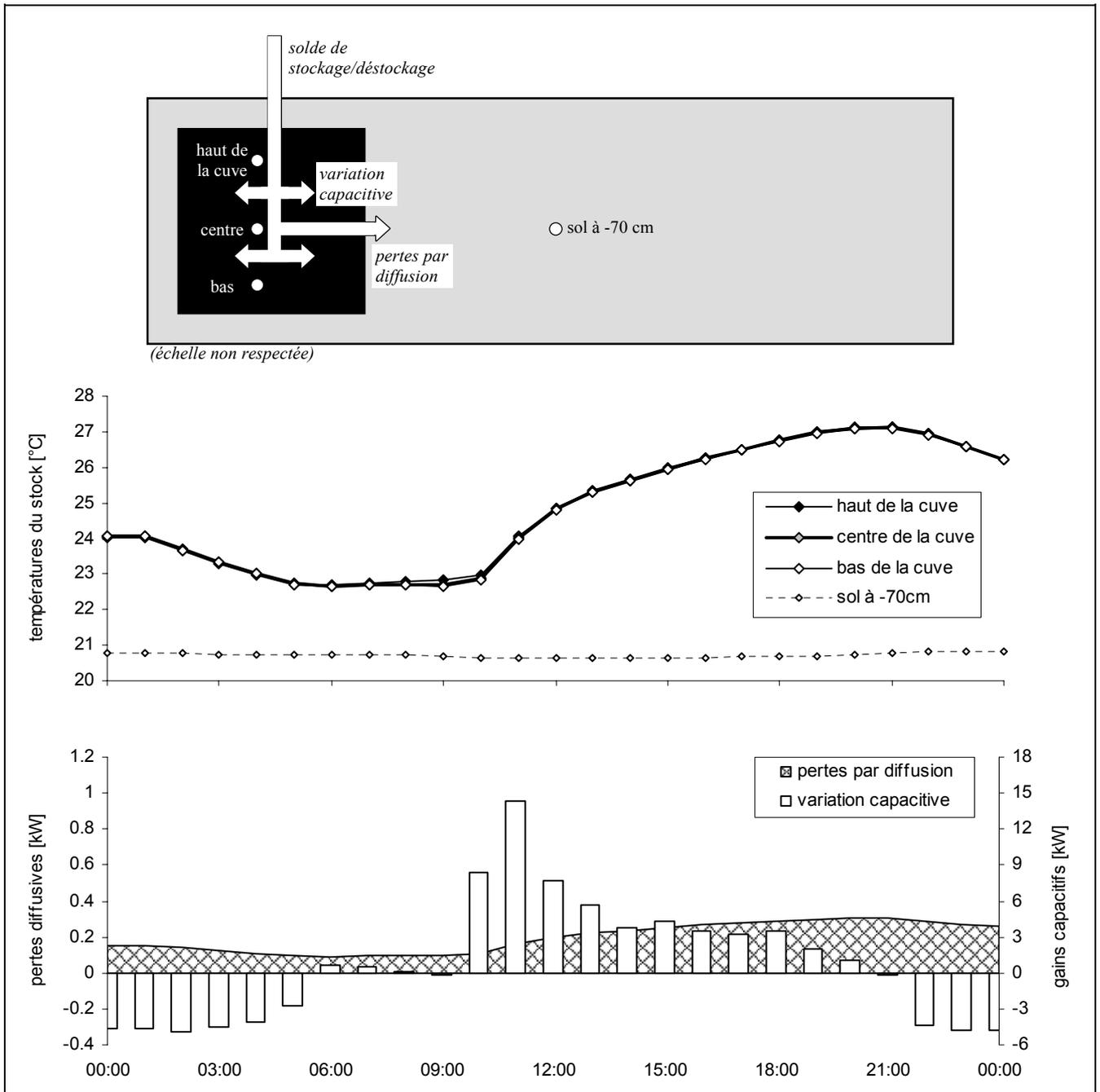


Figure 10 : Décomposition du solde de stockage/déstockage de la serre à eau en pertes diffusives et gains capacitifs, 10 mai 1994.

Dans le cas du stock en cuve, les phénomènes capacitif et diffusif sont clairement dissociables (masse active séparée du terrain), si bien que trois sondes dans la cuve et une sonde de à 70 cm sous le sol de la serre définissent clairement les températures en jeu. Il n'en va pas de même pour le stock en terre (continuum entre masse active et terrain) qui allie phénomènes capacitif et diffusif. S'agissant d'un stockage à court terme, on considère dès lors une couche active de ± 30 cm (environ deux fois la longueur de diffusion journalière) en dessus/dessous de la nappe de tuyaux. La température moyenne de cette couche est définie par des sondes dans le plan et à ± 20 cm de la nappe de tuyaux, alors que le différentiel entre ces dernières et des sondes à ± 40 cm définissent les gradients des pertes diffusives.

Finalement, les faibles pas de temps induisant trop d'imprécisions dans un modèle uni-nodal qui ne tient pas compte des régimes diffusif/capacitif délocalisés du terrain, la détermination par régression bilinéaire des coefficients K et C se fait pour les deux stocks en base hebdomadaire.

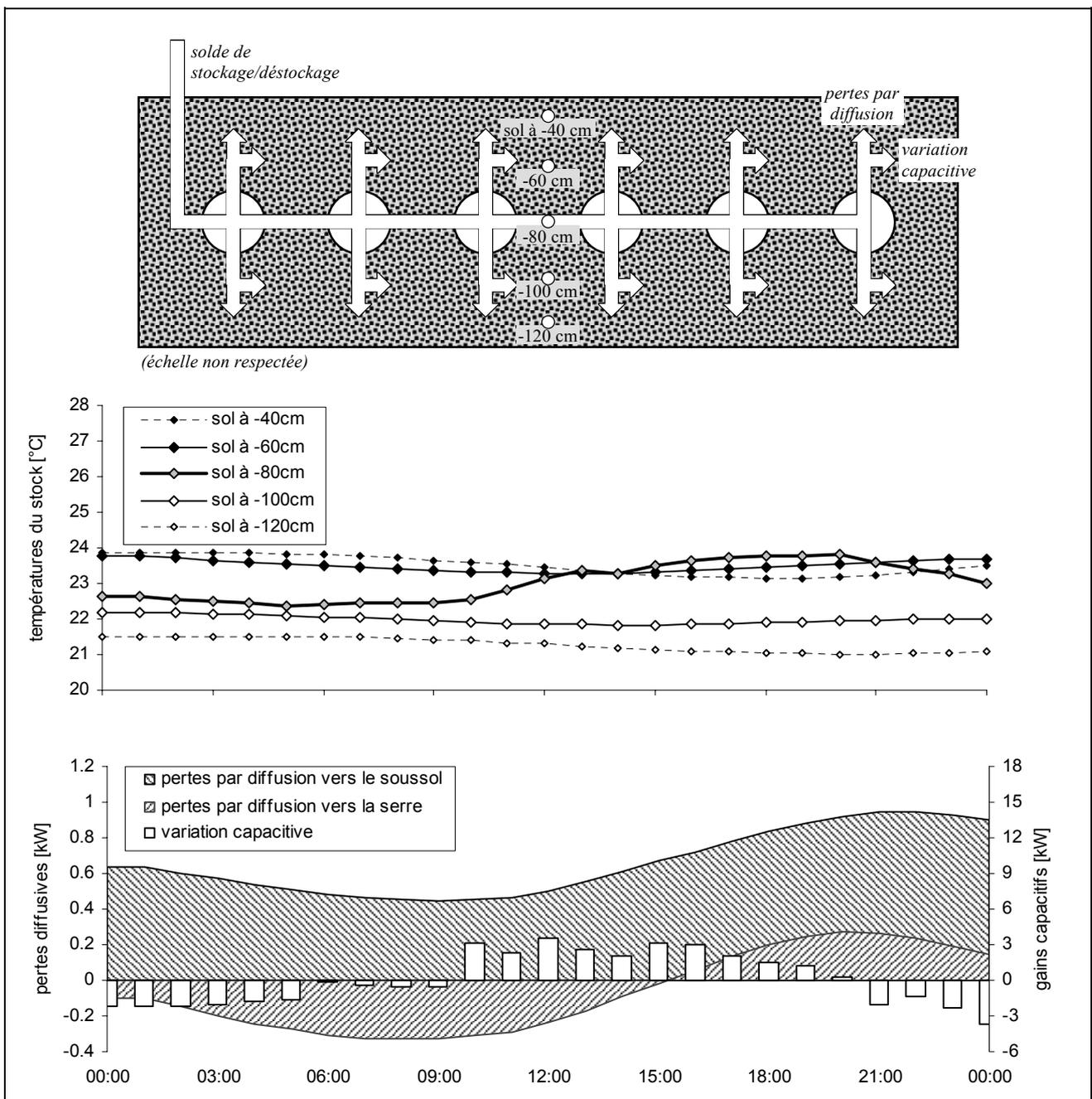


Figure 11 : Décomposition du solde de stockage/déstockage de la serre à air en pertes diffusives et gains capacitifs, 10 mai 1994.

Dans le cas du stock en cuve, la dissociation des phénomènes en jeu se manifeste par une température de stock homogène, dont la variation est en phase avec les pertes thermiques (fig. 10). Il en résulte une bonne détermination des coefficients de régression : $K = 47.6 \pm 1.5$ W/K, $C = 47.1 \pm 1.6$ MJ/K. Rapportée aux 25 m² de surface de cuve la conductivité apparente s'élève ainsi à 1.9 W/K.m² et correspond à la diffusion au travers d'une couche de terre de 1 m (soit environ un tiers de la longueur de diffusion saisonnière), alors que par rapport aux 10 m³ d'eau (41.8 MJ/K) le surplus de capacité apparente correspond à une couche de 11 cm de terrain perturbé aux alentours immédiats de la cuve (soit environ deux tiers de la longueur de diffusion journalière).

Dans le cas du stock en terre, la lente transmission de chaleur induit des inhomogénéités et déphasages entre les températures des différentes couches du stock (fig. 11). Ces déphasages, qui indiquent des régimes diffusif/capacitif délocalisés ou transitoires, induisent une détermination imprécise des coefficients de régression : $K = 1860 \pm 170$ W/K, $C = 116.6 \pm 29.6$ MJ/K. Cette incertitude se traduit pour une semaine donnée (et à fortiori pour une journée ou une heure donnée) par un défaut de bilan dans la dissociation en composants diffusifs et capacitifs (Fig. 12). Finalement, s'agissant d'un stockage relativement extensif (quelques 53 m³ de masse dans la couche active, pour une surface de déperdition de 2 x 96 m² aux interfaces inférieure et supérieure), les pertes s'avèrent plus fortes et la variation de température plus faible que dans le cas du stockage en cuve. Rapportées aux volumes et surfaces susmentionnées, les conductivité et capacité apparentes du sol s'élèvent enfin respectivement à 1.90 W/K.m et 1.94 MJ/K.m³, valeurs compatibles avec la littérature [MUSY et SOUTTER, 1991] pour un sol sablonneux à faible teneur en eau tel qu'observé sur place lors d'une analyse de sol (cf. annexe 4).

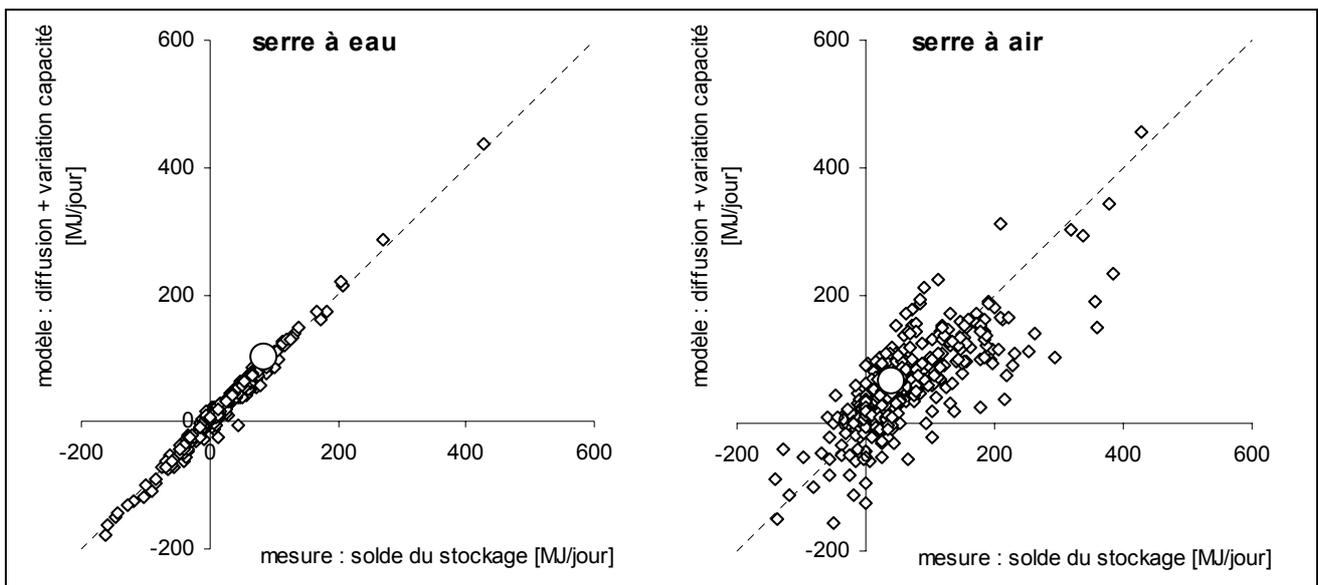


Figure 12 : Décomposition journalière du solde de stockage (mesure) en composants diffusif et capacitif (modèle à un nœud) : avril 1994 – mars 1995 (carrés) avec mise en valeur du 10 mai 1994 (rond).

Avec les coefficients de diffusion et de capacité thermiques ainsi obtenus, il sera désormais possible de boucler complètement les bilans thermiques des stocks, en reportant arbitrairement sur la composante diffusive le défaut de bilan restant. Ainsi, dans le cas ponctuel du 10 mai 1994, le solde de 85 MJ de stockage/déstockage de la cuve à eau se traduit par 84 MJ de gains capacitifs pour 17 MJ de pertes diffusives, dont l'on retranchera 16 MJ de régime transitoire ou défaut de bilan (correspondant à 8% de l'énergie stockée ce jour-là). Pour le stock sous-terrain, le bilan de 40 MJ du stockage/déstockage se décompose en 14 MJ de gains capacitifs pour 51 MJ de pertes diffusives, dont l'on retranchera 25 MJ de régime transitoires ou défaut de bilan (19% de l'énergie stockée ce jour-là). Dans ce deuxième cas, en appliquant le coefficient de conductivité thermique séparément aux surfaces et gradients de température inférieur et supérieur à la couche active, on peut par ailleurs dissocier le solde de 26 MJ de pertes diffusives en un apport de 18 MJ en provenance de la serre et une perte de 44 MJ vers le sous-sol (fig. 11).

Bilan des serres : pertes et gains par l'enveloppe

Une étude simplifiée des bilans des serres vient compléter celle des stocks.

Pour les trois serres, les pertes par le sol sont évaluées grâce au coefficient de conductivité du sol déterminé pour la serre à air et appliqué aux gradients de température des sols de chaque serre. Ces pertes s'avèrent nettement supérieures dans les serres témoin et à eau (55 et 57 MJ pour le 10 mai 94) que pour celle à air (18 MJ), qui bénéficie du stock sous-terrain, si bien que l'analyse comparative des enveloppes se fera sur leur partie émergente uniquement.

Pour chaque serre, on détermine le captage solaire et les pertes de l'enveloppe (transmission et infiltration, pertes par le sol non-comprises) grâce à un modèle à un nœud :

$$P_{therm} = K \cdot \Delta T_{env} - S \cdot G_{sol}$$

qui relie, en base journalière, l'ensoleillement G_{sol} et le différentiel de température serre-météo ΔT_{env} aux besoins thermiques P_{therm} . Ceux-ci comprennent le chauffage, le déstockage, et l'électricité dissipée dans la serre (aéroconvecteurs et pompe de brassage), dont on retranche les pertes par le sol en période de charge thermique (cf. plus bas). La détermination par régression linéaire du coefficient de pertes K et de la surface de captage effectif S se fait après changement de variable :

$$H = K - S \cdot M$$

où:

$$H = P_{therm} / \Delta T_{env} \quad : \text{ besoins thermiques réduits}$$

$$M = G_{sol} / \Delta T_{env} \quad : \text{ variable météo réduite}$$

Pour une forte contrainte météo (faible ensoleillement et fort différentiel de température, soit petite valeur de M) les ouvrants des serres restent fermés et l'on observe le comportement linéaire attendu (fig. 13 à gauche), qui permet la détermination des paramètres K et S par régression linéaire sur les valeurs de M inférieurs à 5 W/K.m². Dès ce seuil dépassé les gains solaires excessifs sont évacués par ventilation, ce qui se traduit par une chute de la surface de captage effective, comportement nettement plus prononcé que pour des bâtiments à surface vitrée standard [LACHAL et GUIBAN 1992].

Ramenés à la surface d'emprise de la serre, le coefficient K pour la serre à air, qui bénéficie d'une étanchéité moins bonne (taux de fuite à 50 Pa de 11.9 vol/h contre 9.8 vol/h pour les deux autres serres, cf. annexe 3), est un peu plus important que pour les serres témoin et à eau (tab. 1). Celles-ci se situent par contre très près de la valeur théorique (9.2 W/K.m², obtenus par pondération sur les périodes nocturnes et diurnes des 7.9 et 11.2 W/K.m² avec et sans écran thermique (cf. annexe 5).

Les surfaces effectives de captage, serres fermées, sont moins bien déterminées que les coefficients K . Ramenées à la surface d'emprise de la serre, elles définissent des coefficients effectifs de transmissivité à peine inférieurs à celui du vitrage simple.

Tableau 1 : Coefficient de déperdition et surface de captage, ramenés à la surface d'emprise des serres.

	K [W/K.m ²]	S [%]
serre témoin	9.0 ± 0.3	83 ± 8
serre à eau	8.9 ± 0.2	79 ± 7
serre à air	9.5 ± 0.3	83 ± 8

On bouclera finalement les bilans des serres en distinguant entre les périodes de charge thermique (chauffage et/ou déstockage actifs) et les périodes hors charge thermique (fig. 13). Dans le premier cas, la serre étant fermée, on évalue le captage solaire via le coefficient S et on détermine les pertes diffusives de l'enveloppe par défaut de bilan. Ce calcul reste bien corrélé quoique légèrement inférieur à celui via le coefficient K moyen (fig. 13 à droite), ce qui correspond bien à des périodes majoritairement nocturnes, avec activation de

l'écran thermique. Au contraire, hors charge thermique on évalue les pertes diffusives par l'enveloppe via le coefficient K , puis on détermine le captage solaire par défaut de bilan (bien inférieur au captage maximal, obtenu via le coefficient S , qui est partiellement évacué par ouverture de la serre et ventilation). Ainsi qu'on le voit pour la journée du 10 mai 94, cette analyse simplifiée garde de la pertinence jusqu'au niveau des bilans journaliers, avec des pertes par l'enveloppe et un captage solaire en charge thermique sensiblement égaux pour les trois serres, alors que hors charge thermique il augmente dans les serres pourvues de système de stockage (tab. 2).

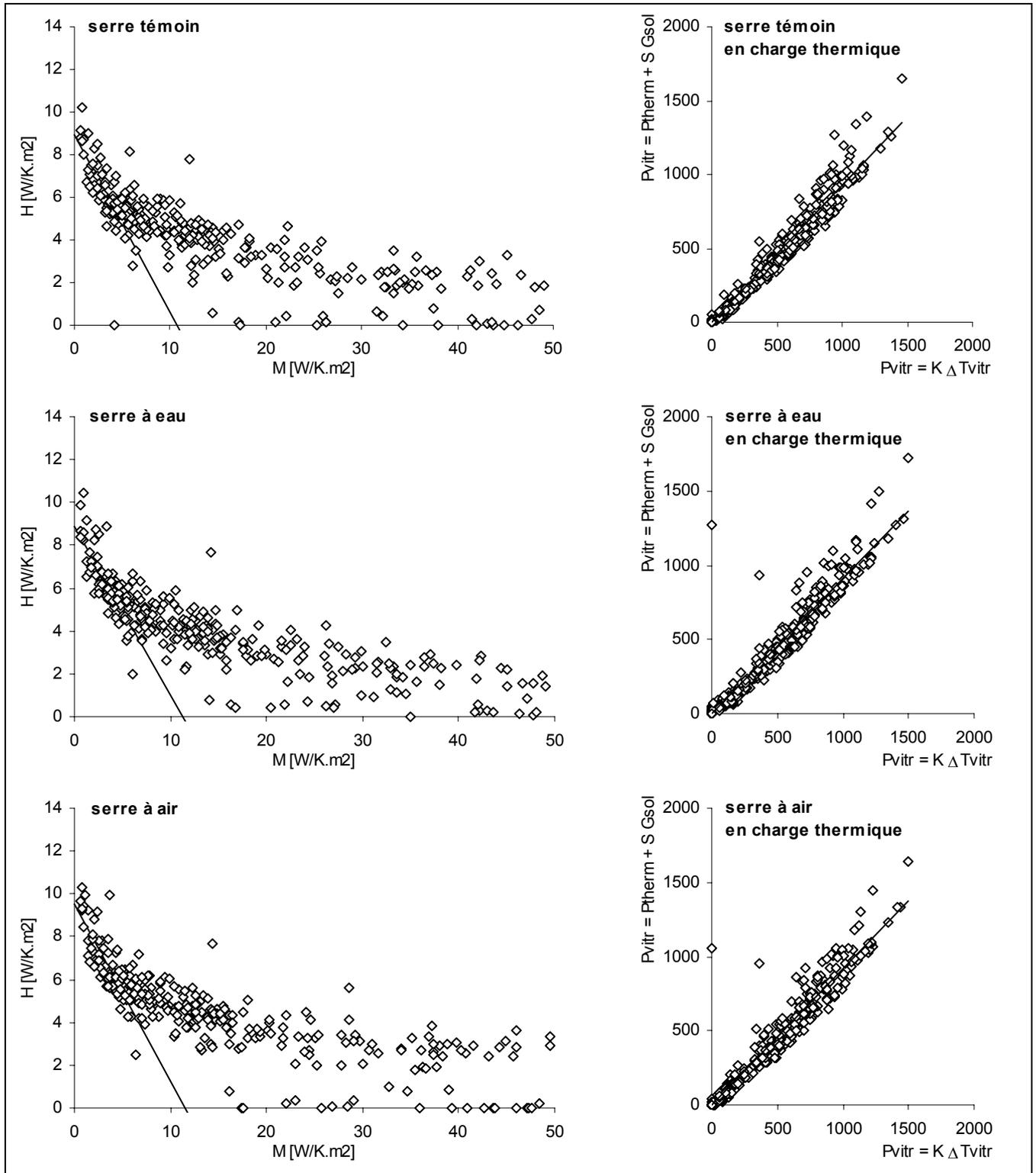


Figure 13 : Détermination des paramètres de l'enveloppe (surface de captage et coefficient de perte) par analyse $H-M$ (à gauche) ainsi que pertes par enveloppe en période de charge thermique via le coefficient de perte ou par défaut de bilan (à droite), sur la base de bilans journaliers (avril 1994 – mars 1995).

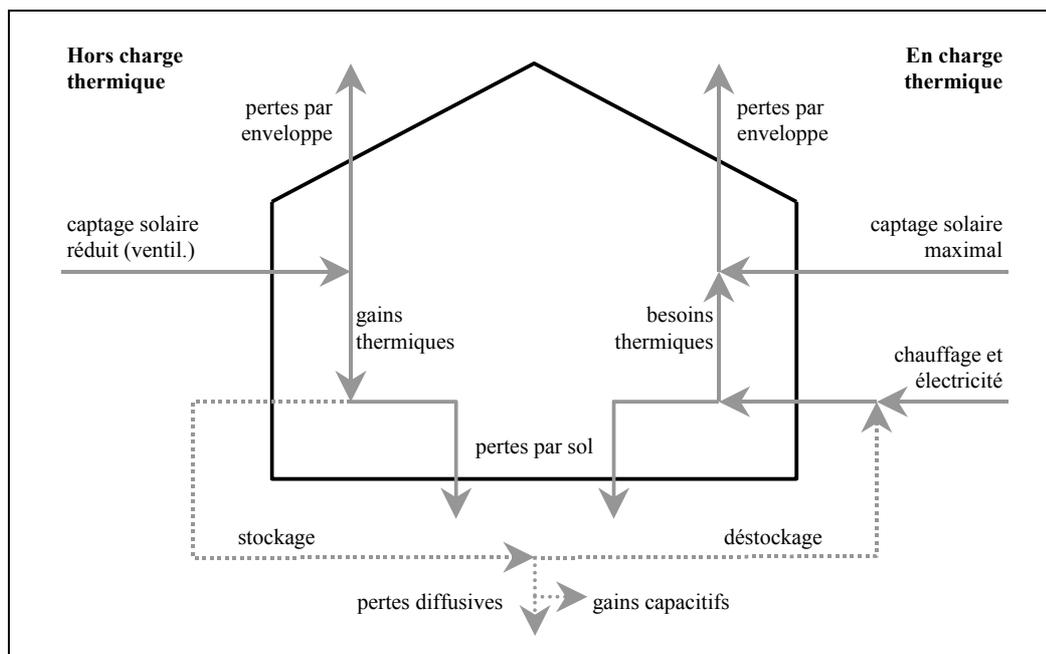


Figure 14 : Schéma du bilan thermique des serres en et hors période de charge thermique.

Tableau 2 : Bilan journalier (MJ) des stocks et des serres, 10 mai 1994.

Inputs(+) / Ouputs(-)	Serre témoin	Serre à eau	Serre à air
Stocks :			
<u>activation</u>			
stockage		195	133
déstockage		-110	-62
condensation			34
évaporation			-81
électricité ventilateur			16
total		85	40
<u>réponse</u>			
gains capacitifs (*)		-84	-14
pertes diffuses		-1	-26
total		-85	-40
Serres :			
<u>en charge thermique</u>			
chauffage	222	77	158
déstockage		110	62
électricité aéroconv. (+ pompe circul.)	4	39 + 5	3
diffusion vers(-) / depuis(+) sous-sol	-23	-24	-11
captage solaire	37	35	37
pertes par l'enveloppe	-240	-242	-249
total	0	0	0
<u>hors charge thermique</u>			
stockage		-195	-133
électricité aéroconv. (+ pompe circul.)		20 + 24	
diffusion vers(-) / depuis(+) sous-sol	-32	-33	-7
captage solaire	477	610	575
pertes par l'enveloppe	-445	-426	-435
total	0	0	0

(*) Pour équilibrer le bilan, les gains capacitifs sont considérés comme des outputs du stock.

3.5 Dysfonctionnements et configurations particulières

Stockage intempêtif

Malgré un bon fonctionnement de base, un effet annexe indésirable a régulièrement vu le jour dans la serre à eau : le couplage des puissants aéroconvecteurs à un circuit hydraulique à forte capacité (grande contenance d'eau) a fréquemment provoqué, lors des appels de chauffage en période froide, une montée de température au dessus de la consigne minimale de la serre, ce qui entraînait la mise en route passagère du stockage (parfois suivi de courts épisodes de déstockage). Malgré réduction (tardive) de la température primaire en provenance de la centrale de chauffe (utilisation d'une vanne trois-voies), ce phénomène inhérent au caractère prototype de l'installation n'a jamais été complètement enravé dans le cadre de cette expérience, ce qui a nécessité un décompte attentif des puissances thermique en jeu.

Distribution de chaleur par gaines flexibles

Dans la serre à eau, le débit d'air important a par ailleurs ponctuellement induit un dessèchement des feuilles sur les plantes de concombre situées immédiatement à l'avant des aérochauffeurs. Afin de remédier à cette nuisance, le sens de rotation des ventilateurs a été inversé pendant la période critique, et le flux d'air, afin de ne pas être dirigé sur les parois de la serre, dévié par un caisson métallique et redistribué par gaines flexibles sous les tables de culture (voir aussi sec. 4.3). Si cette configuration s'est avérée très pratique au niveau de la distribution de chaleur, elle a posé quelques problèmes dans le cas précis de l'expérience GEOSER, pour laquelle cette configuration n'avait pas été prévue initialement, le fonctionnement à rebours du ventilateur induisant un décrochement aéraulique à haute puissance (chute brutale du flux d'air) et bloquant le système dans un mode à haute consommation électrique et faible puissance thermique. Nous sommes finalement revenus pour les périodes suivantes à la configuration initiale, en déplaçant les rangées de plantes hors courant d'air et en travaillant sur des cultures plus basses.

Afin de tester le même système de distribution dans la serre à air (pour le système de stockage/déstockage uniquement, vu son découplage avec le système de chauffage), nous avons momentanément remplacé sa bouche de sortie conventionnelle par une série de bouches latérales, reliées aux mêmes gaines de distribution flexibles. Celles-ci ne permettaient cependant plus un balayage du stock à sens inversés lors du déstockage et cette configuration fut également abandonnée.

4. BILANS ENERGETIQUES ET AGRONOMIQUES

4.1 Gestion des serres et contrainte climatique

Suite à la phase de construction des serres et mise en place de la chaîne de mesure, la phase d'expérimentation à proprement parler s'est déroulée en 3 périodes recouvrant 17 mois (tab. 3 ainsi que annexe 2 pour plus de détail) :

- Une période de mise en route sur 2 mois (novembre à décembre 1993), pour vérification du fonctionnement correct des systèmes de stockage et de la chaîne de mesure.
- Une période de mise hors service des stockages sur 3 mois (janvier à mars 1994), afin de vérifier l'équivalence thermique des trois serres.
- Une période de comparaison des systèmes serres/stockages sur 12 mois (avril 1994 à mars 1995), afin de tirer un bilan énergétique annuel complet. Alors que les trois premiers mois de cette phase se sont déroulés avec une distribution de chaleur légèrement modifiée des serres à eau et à air (gainés flexibles et flux d'air inversé respectivement unidirectionnel, cf. sec. 3.4), les 9 derniers mois se sont déroulés sous configuration normale. Entre deux, à l'occasion d'une levée des contraintes agronomiques lors d'un changement de culture, nous avons laissé les serres monter à 45 puis 35 °C, afin d'observer le comportement des systèmes en conditions extrêmes.

Au niveau agronomique les deux premières périodes ont été consacrées exclusivement à la culture de mufliers et lisianthus. Les douze mois de comparaison des systèmes ont quant à eux successivement abrité des concombres puis à nouveau des mufliers et lisianthus, moins gourmands en température.

Tableau 3 : Synthèse de la gestion thermique et agronomique des serres.

Période	Configuration aéroconv. / ventilateur	Consignes (*) jour / nuit / aération	Cultures	Dates
Mise en route	normale	16.6 / 16.6 / 20.0	mufliers+lisianthus	01.11.93 – 22.12.93
Stockage off	---	16.9 / 16.7 / 20.8	mufliers+lisianthus	23.12.93 – 24.03.94
Stockage on	inversé / sens unique	21.7 / 19.4 / 27.4	concombres	25.03.94 – 20.06.94
"	normale	22.0 / 22.0 / 39.2	---	21.06.94 – 06.07.94
"	normale	17.1 / 16.5 / 21.4	mufliers+lisianthus	07.07.94 – 24.03.95

(*) serre témoin, valeurs moyennes sur la période

Tableau 4 : Consigne de chauffage des serres témoin (ST), à eau (SE) et à air (SA), météo standard (Std) vs. mesurée (Mes), ainsi que contrainte climatique induite.

Mois	Consigne °C		Ensoleillement Température MJ/m ² °C				Contrainte K.jour (**)						
	ST	SE	SA	Std	Mes	Std	Mes	°C max (*)	°C min (*)	Mes	Std	Mes	
Avr	22.0	22.0	22.0	497	527	9.0	8.6	21.7	26.7	1.0	-0.8	388	402
Mai	20.7	20.7	20.7	621	616	13.6	15.3	24.9	27.2	4.5	6.1	220	172
Jun	20.2	20.2	20.2	637	737	16.3	18.4	28.4	31.8	7.0	2.6	133	104
Jul	18.7	18.7	18.7	706	738	20.1	22.6	31.8	34.3	11.6	11.2	40	15
Aou	18.0	18.0	18.0	598	596	19.0	20.2	30.1	32.5	9.8	9.8	37	31
Sept	18.0	18.0	18.0	434	358	15.3	14.6	28.0	27.2	3.8	3.0	103	123
Oct	18.0	18.0	18.0	298	309	10.1	10.4	20.0	22.2	1.9	1.0	245	238
Nov	17.9	17.9	17.9	163	169	3.9	7.5	14.8	18.8	-3.7	-1.9	420	312
Dec	14.7	14.7	14.7	129	135	0.3	1.8	7.5	12.6	-6.0	-7.6	446	398
Jan	14.8	14.8	14.8	155	151	-0.6	-0.1	7.2	9.0	-8.2	-10.0	477	459
Fev	14.9	14.9	14.9	223	205	1.1	4.3	11.2	15.3	-8.8	-2.6	387	297
Mar	18.8	16.6	16.6	377	413	5.6	6.2	22.5	24.0	-6.6	-4.2	411	391
Année	18.1	17.9	17.9	4838	4954	9.5	10.9					3307	2944

(*) maxima et minima horaires (***) par rapport à la consigne de la serre témoin

L'année météorologique standard [METEONORM] de Conthey (Vallée du Rhône, altitude 550 m, climat continental clair avec 2019 heures d'ensoleillement et 575 mm de précipitations) engendre pour le chauffage à 20°C une contrainte totale de 3'950 K.jour (3'360 K.jour lorsque limitée à la saison de chauffage, définie par une moyenne journalière inférieure à 12°C). Pour la consigne pratiquée de fin mars 94 à fin mars 95 dans la serre témoin (moyenne de 18°C sur les quelques 7'500 heures durant lesquelles la consigne excède la température externe) cette contrainte chute à 3'310 K.jour et finalement à 2'940 K.jour (17.9°C, 7'100 heures) pour la météo réelle de cette année là (tab. 4), plus clémente que de coutume (+1.4°C en moyenne annuelle). Cette valeur est à mettre en relation avec un ensoleillement annuel brut de 4'950 MJ/m² (+2 % par rapport à l'année standard), dont 2'690 MJ/m² (-12 %) lorsque la consigne excède la température externe, soit une intensité météorologique moyenne de 10.6 W/K.m² sur ces périodes.

Finalement, le principe de la consigne identique dans les trois serres n'ayant été violé que sur les 2 dernières semaines de l'expérience (fig. 15), les contraintes climatiques effectives des serres à eau et à air ne diffèrent que de -2.2 % par rapport à celle de la serre témoin.

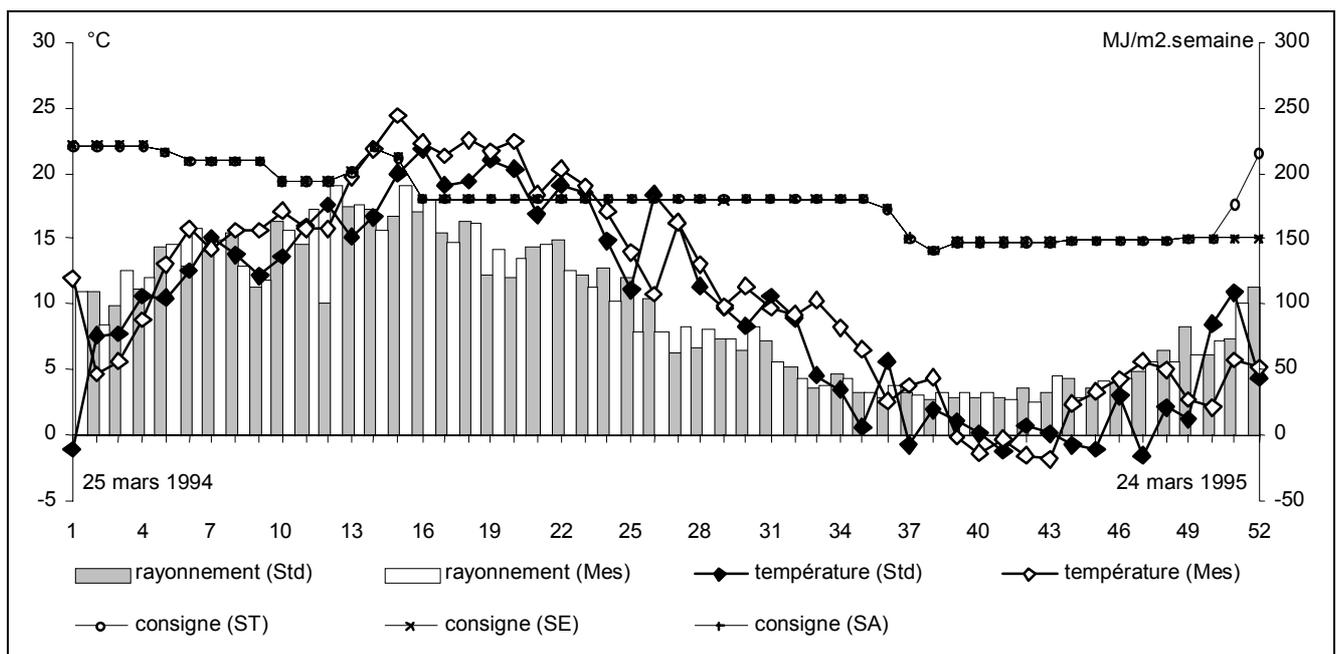


Figure 15 : Consigne de chauffage des serres témoin (ST), à eau (SE) et à air (SA) ainsi que météo standard (Std) vs. mesurée (Mes), dynamique hebdomadaire (25 mars 1994 – 24 mars 1995).

4.2 Bilans énergétiques

Période sans stockage

Antérieurement aux douze mois de comparaison des systèmes, durant le trimestre de mise hors service des stockages, la demande de chauffage (tab. 6) est très similaire pour les serres témoin, à eau (+3.6 %) et à air (-4.7 %). Dans la serre à eau, où l'air est puissamment brassé par les aéroconvecteurs, l'écart peut s'expliquer par une température plus homogène et donc plus élevée que dans la serre témoin (+0.2°C en période de charge thermique, tab. 5), donc une contrainte thermique légèrement supérieure (+1.4 %). Dans la serre à air, il peut provenir de l'enveloppe légèrement moins étanche (cf. sec. 3.3) qui entraîne une température (-0.8°C) et une contrainte thermique (-5.6 %) plus basses. Malgré une levée de consigne passagère dans la serre à air qui provoque un épisode de 10 jours de stockage, mais pas de déstockage, les pertes diffusives vers le sous-sol restent également en bonne concordance, de même que les pertes par l'enveloppe et le captage solaire, reconstitués par équilibrage des bilans (cf. sec 3.3).

Notons encore que durant cette période sans stockage/déstockage, les aéroconvecteurs de la serre à eau ont été bloqués à une puissance électrique très faible (moyenne de 40 W sur la période) mais largement suffisante au fonctionnement à large ΔT , d'où une consommation électrique 3 fois plus faible que dans les serres témoin et à air.

Tableau 5 : Températures et contraintes climatiques des trois serres pendant la mise hors service des stocks (23 décembre 1993 – 24 mars 1994), en période de charge thermique.

	consigne (*)	serre témoin	serre à eau	serre à air
température de l'air				
à 2m		17.8 °C	17.5 °C	16.9 °C
à 1m		15.4 °C	16.0 °C	14.7 °C
moyenne	16.7 °C	16.6 °C	16.8 °C	15.8 °C
contrainte thermique	952 K.jour	943 K.jour	957 K.jour	890 K.jour

*) serre témoin

Tableau 6 : Bilan des serres (GJ) pendant la période de mise hors service des stocks (23 décembre 1993 – 24 mars 1994).

Inputs(+) / Ouputs(-)	Serre témoin	Serre à eau	Serre à air
Serres :			
<u>en charge thermique</u>			
chauffage	61.2	63.5	58.4
déstockage		---	---
électricité aéroconv. (+ pompe circul.)	0.6	0.2 + ~0	0.6
diffusion vers(-) / depuis(+) sol	-1.1	-1.4	-0.7
captage solaire	7.3	6.9	7.2
pertes par enveloppe	-68.0	-69.2	-65.5
total	0	0	0
<u>hors charge thermique</u>			
stockage		---	-0.7
électricité aéroconv. (+ pompe circul.)		---	---
diffusion vers(-) / depuis(+) sol	-0.7	-0.8	-0.5
captage solaire	21.5	21.0	22.5
pertes par enveloppe	-20.8	-20.2	-21.3
total	0	0	0

Période avec stockage

Durant l'année de comparaison complète des systèmes (25 mars 1994 - 24 mars 1995), les bilans de stocks (tab. 7 ainsi que fig. 16) se décomposent de la façon suivante.

Dans la serre à eau, la chaleur stockée (328 MJ/m²) l'est aux 2/3 à partir de gains solaires, le reste provenant du stockage intempestif de chaleur fossile en période de chauffage, suite à la "surchauffe" ponctuelle de la serre due aux puissants aéroconvecteurs. Le déstockage (273 MJ/m²) représente tout de même 80% de la chaleur stockée. Au reliquat capacitif près (3 MJ/m² emmagasinés suite aux trois mois de mise hors service des stockages) le solde est perdu en pertes diffusives vers le sous-sol de la serre. A noter que l'importante consommation électrique contribue directement au bilan de la serre et non à celui du stock.

Dans le cas de la serre à air, le stockage sous-terrain de chaleur sensible (268 MJ/m²) s'élève à environ 80% de celui de la serre à eau. Il est accompagné d'une importante contribution par condensation (2'800 lit) dont plus de la moitié est directement évaporée pendant la période de stockage. Le reste est pour les 2/3 évaporé en phase de déstockage, le solde ne compensant pas l'élimination par drainage des tubes (630 lit) : le déficit d'une centaine de litres corrobore l'hypothèse d'un apport supplémentaire de gouttelettes en provenance du système de brumisation (cf. sec. 3.3). Le déstockage de chaleur sensible (93 MJ/m²) ne s'élève finalement qu'à 35% de celui de la serre à eau. Il ne représente surtout qu'un gros tiers de sa contrepartie emmagasinée. Les deux autres tiers (auxquelles s'ajoutent l'électricité du ventilateur et le bilan net des échanges latents) se dissipent quasi exclusivement en pertes diffusives, pour un reliquat capacitif identique à la serre à eau. Ces importantes pertes par diffusion (4 fois plus que dans la cuve à eau) se répartissent à proportions

sensiblement égales en direction du sous-sol et de la serre, la moitié de cette dernière composante contribuant en période de charge thermique au maintien de la consigne dans la serre.

Tout comme pour la dynamique horaire, la dynamique hebdomadaire comparée de ces deux systèmes (fig. 17 et 18) permet d'apprécier le fonctionnement distinct d'un stockage capacitif compact (cuve à eau) par rapport à un stockage diffusif étendu (sous-sol). Si le premier se caractérise par un champ de températures homogènes, jouxtant un sol relativement indépendant (avec une dynamique saisonnière proche de celle d'un sol non-perturbé), le stockage en sol affiche quant à lui un gradient de température important dans sa couche active, qui se délimite mal de ses couches voisines inférieures et supérieures. Il en résulte un déphasage qui s'observe particulièrement bien à la suite du pic de stockage des 14 et 15^{ème} semaines (serres en fluctuation libre), quand la diffusion de chaleur se poursuit longuement dans le sous-sol de la serre à air alors que la température de cuve de la serre à eau chute rapidement au niveau du sol environnant. On observe également l'importance des pertes diffusives du stockage en sous-sol, dues aux grandes surfaces d'échange, ainsi que celle des échanges latents. Finalement, le décompte des heures de chauffage met clairement en évidence le fonctionnement alternatif chauffage/déstockage de la serre à eau (durée de chauffage inférieure à la serre témoin, fig. 17, l'anomalie des 33 à 36^{ème} semaines provenant d'un fonctionnement de la pompe de brassage quasi continu mais sans appel à la chaudière), contrairement à la serre à air où les systèmes fonctionnent en parallèle (durée de chauffage similaire à la serre témoin, fig. 18).

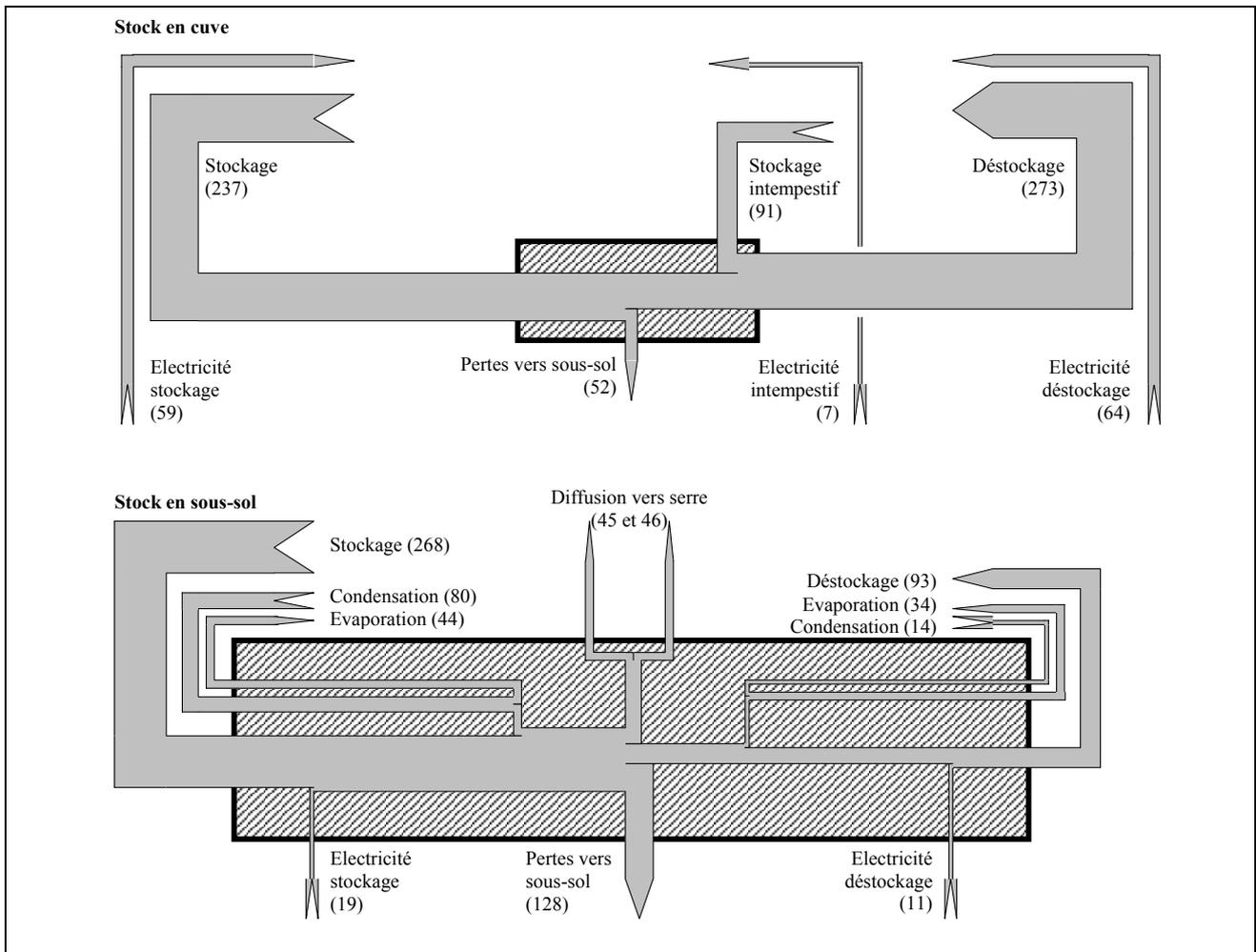


Figure 16 : Bilans annuels des stocks en MJ/m² (25 mars 1994 – 24 mars 1995).

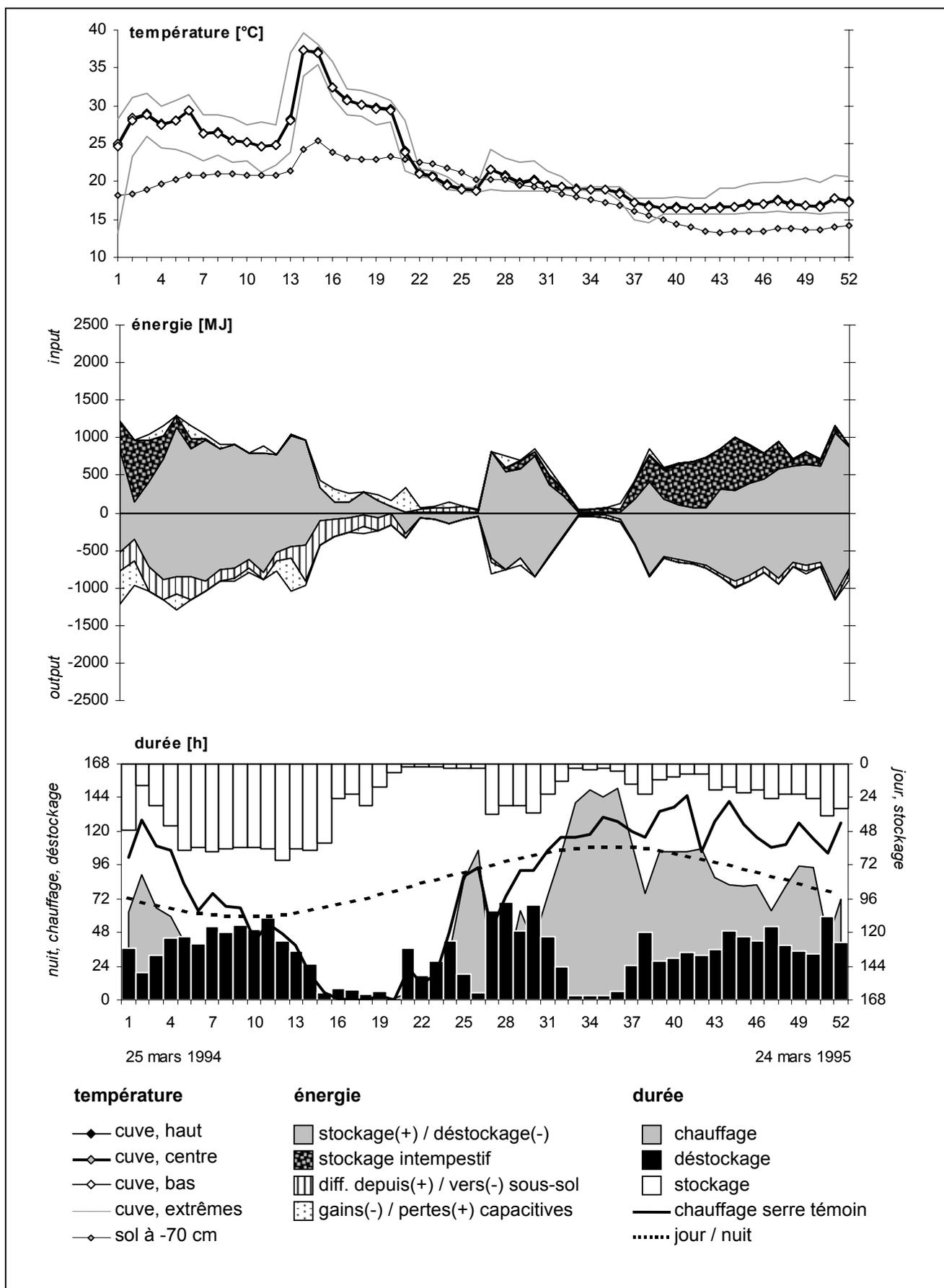


Figure 17 : Serre à eau, températures, bilan énergétique et durées de fonctionnement du stockage, dynamique hebdomadaire (25 mars 1994 – 24 mars 1995).

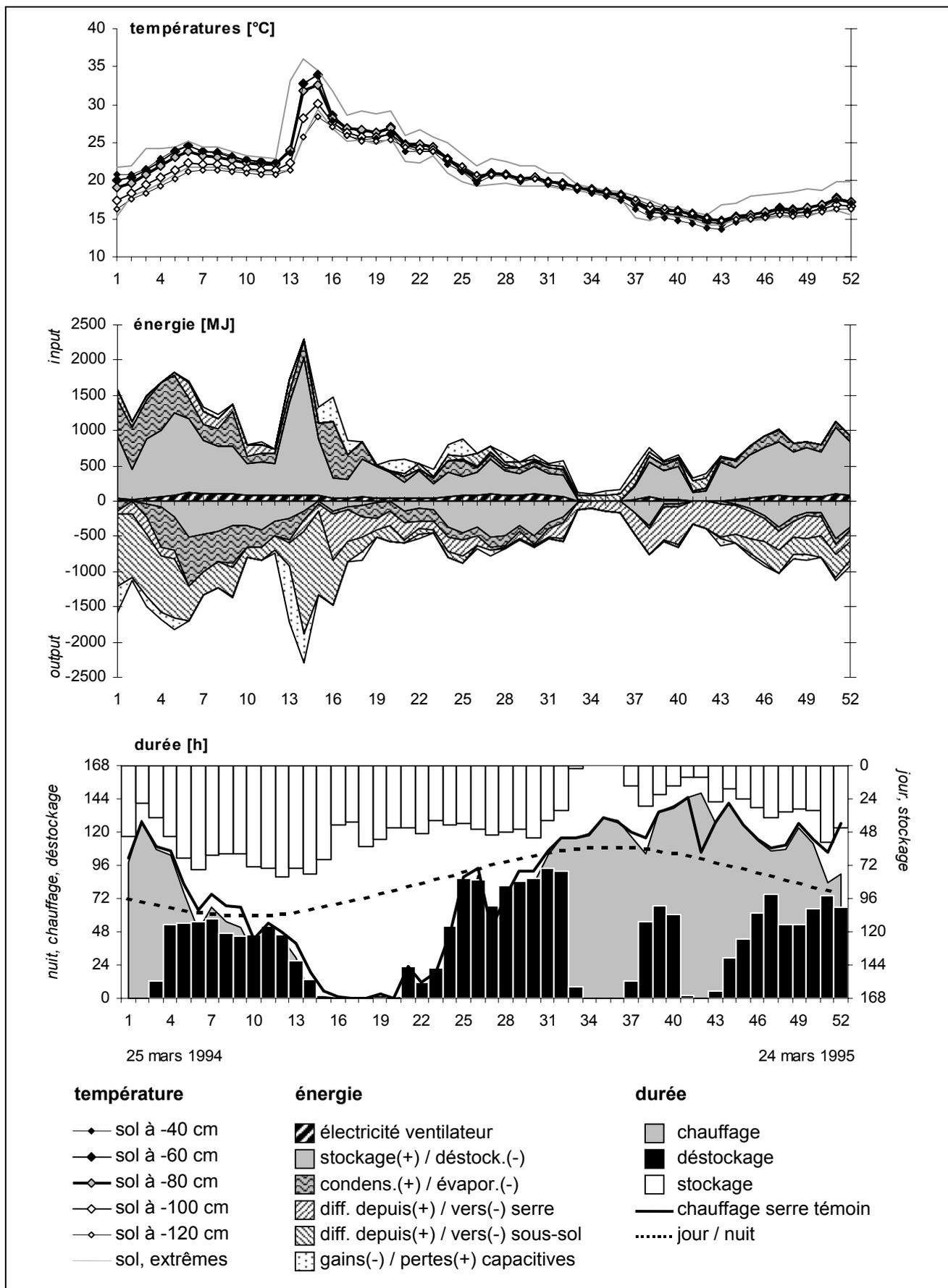


Figure 18 : Serre à air, températures, bilan énergétique et durées de fonctionnement du stockage, dynamique hebdomadaire (25 mars 1994 – 24 mars 1995).

Pendant cette même année de comparaison des systèmes, l'analyse comparée des serres donne les bilans suivants (tab. 8 et fig 19 à 22).

Excepté durant les trois mois d'été, pendant lesquels il n'est pas besoin de faire appel au chauffage, la période hors charge thermique (4'470 heures) se calque relativement bien sur la longueur du jour (fig. 17 ou 18), indiquant que la plupart du temps les apports solaires sont sinon excessifs, du moins suffisants à maintenir la température prescrite. Ainsi, dans la serre témoin, le captage solaire effectif pendant cette période ne représente que 25% du rayonnement incident, pour sa plus grande part directement rejeté par ventilation naturelle. Ce captage contrôlé permet aisément de maintenir une température moyenne supérieure (+5.5 K) à la consigne (18.7 °C), en contrant des pertes qui ont lieu essentiellement par l'enveloppe et très accessoirement par le sol. Inversement, l'autre moitié du temps (principalement de nuit), l'ensoleillement résiduel (5 % du total annuel) est insuffisant à lui seul à maintenir une température qui, à peine supérieure à la consigne, engendre des pertes effectives une fois et demie plus importantes que hors chauffage. Ce dernier (1'415 MJ/m²), de l'ordre de grandeur du captage solaire annuel total, induit une consommation électrique des aéroconvecteurs quasiment négligeable (18 MJ/m²).

On retrouve dans la serre à eau des pertes sensiblement égales à celles de la serre témoin, tant par l'enveloppe que par le sol (le léger accroissement de ces dernières pouvant provenir du fort brassage d'air, qui induit une température proche du sol plus élevée, tab. 7). Alors que hors charge thermique elles sont toujours compensées par captage solaire direct, un supplément de 4.8 % de l'ensoleillement annuel est envoyé dans la cuve. Déduction faite du stockage intempestif, n'en sont en période de chauffage récupérés que 273 – 91 = 182 MJ/m² (13 % du chauffage de la serre témoin, tab. 9). Cette valeur est à comparer aux 202 – 18 = 184 MJ/m² de surconsommation électrique totale, dont 125 MJ/m² en charge thermique ("économie" de chauffage supplémentaire de 9 %), le système ne produisant finalement dans l'état guère mieux qu'une substitution fossile/électricité (COP = 1.7). Quoiqu'il en soit, pour une même température intérieure, on obtient finalement dans la serre à eau une somme d'apports hors solaire (chauffage, électricité, déstockage net) quasiment identique à ceux de la serre témoin (-0.6%), cohérence qui met en valeur la précision des mesures (cf. sec. 3.3).

Par comparaison, 5.4 % de l'ensoleillement annuel est stocké dans le sol de la serre à air et bien que seul un gros tiers de cette énergie soit récupérée par déstockage actif, en charge thermique la diffusion de chaleur vers la serre contribue au maintien de sa consigne, ce qui par rapport à la serre témoin correspond à un gain passif de 46 + 24 = 70 MJ/m². Le déstockage net (actif et passif) s'élève ainsi à 163 MJ/m² (11% du chauffage de la serre témoin), quasiment aussi haut que dans la serre à eau, cette fois-ci pour une surconsommation électrique globale de seuls 28 MJ/m² (COP = 5.8). L'étanchéité moins bonne de cette serre peut finalement expliquer sa température de 1K inférieure aux deux autres (-6.4% sur la contrainte climatique) qui, contrebalancée par un coefficient de transmission effectif légèrement supérieur (+6.2 %), explique une somme d'apports hors solaire (chauffage, électricité, déstockage net) et une perte par enveloppe identiques à celles de la serre témoin.

Tableau 7 : Températures et contraintes climatiques des trois serres pendant l'année de comparaison des systèmes (25 mars 1994 – 24 mars 1995), en période de charge thermique.

	consigne (*)	serre témoin	serre à eau	serre à air
température de l'air				
à 2m		18.6 °C	17.8 °C	17.7 °C
à 1m		16.7 °C	17.5 °C	16.1 °C
moyenne	17.4 °C	17.7 °C	17.7 °C	16.9 °C
contrainte thermique	2224 K.jour	2275 K.jour	2272 K.jour	2129 K.jour

*) serre témoin

Tableau 8 : Bilan des stocks et des serres (GJ) pendant l'année de comparaison des systèmes (25 mars 1994 – 24 mars 1995).

Inputs(+) / Ouputs(-)	Serre témoin	Serre à eau	Serre à air
Stocks :			
<u>activation</u>			
stockage		22.8	25.7
déstockage		-26.2	-9.0
stockage intempestif		8.7	
condensation			9.1
évaporation			-7.5
électricité ventilateur			3.0
total		5.3	21.3
<u>réponse</u>			
gains capacitifs (*)		-0.3	-0.3
pertes diffusives		-5.0	-21.0
total		-5.3	-21.3
Serres :			
<u>en charge thermique</u>			
chauffage	135.8	105.5	120.4
déstockage		26.2	9.0
stockage intempestif		-8.7	
électricité aéroconv. (+ pompe circul.)	1.7	11.4 + 2.4	1.5
diffusion vers(-) / depuis(+) sol	-2.3	-3.9	4.4
captage solaire	18.6	17.6	18.4
pertes par vitrage	-153.8	-150.5	-153.7
total	0.0	0.0	0.0
<u>hors charge thermique</u>			
stockage		-22.8	-25.7
électricité aéroconv. (+ pompe circul.)		3.5 + 2.2	
diffusion vers(-) / depuis(+) sol	-5.3	-6.2	4.3
captage solaire	110.0	124.8	124.8
pertes par vitrage	-104.7	-101.5	-103.4
total	0.0	0.0	0.0

(*) Pour équilibrer le bilan, les gains capacitifs sont considérées comme des outputs du stock.

Tableau 9 : Economie de chauffage et surplus électrique (25 mars 1994 – 24 mars 1995).

	serre à eau		serre à air	
	MJ/m ² .an	Δ ¹⁾	MJ/m ² .an	Δ ¹⁾
surplus thermiques				
déstockage	273	19.3 %	93	6.6 %
stockage intempestif	-91	-6.4 %		
Δ diffusion ²⁾			70	4.9 %
Δ électricité ²⁾	125	8.8 %	-2	-0.1 %
total	307	21.7 %	161	11.4 %
surplus électriques	MJ/m ² .an		MJ/m ² .an	
Δ électricité ³⁾	184		28	
COP	1.7		5.8	

1) économie de chauffage, relativement à la la serre témoin.

2) par rapport à la serre témoin, en charge thermique.

3) par rapport à la serre témoin, total.

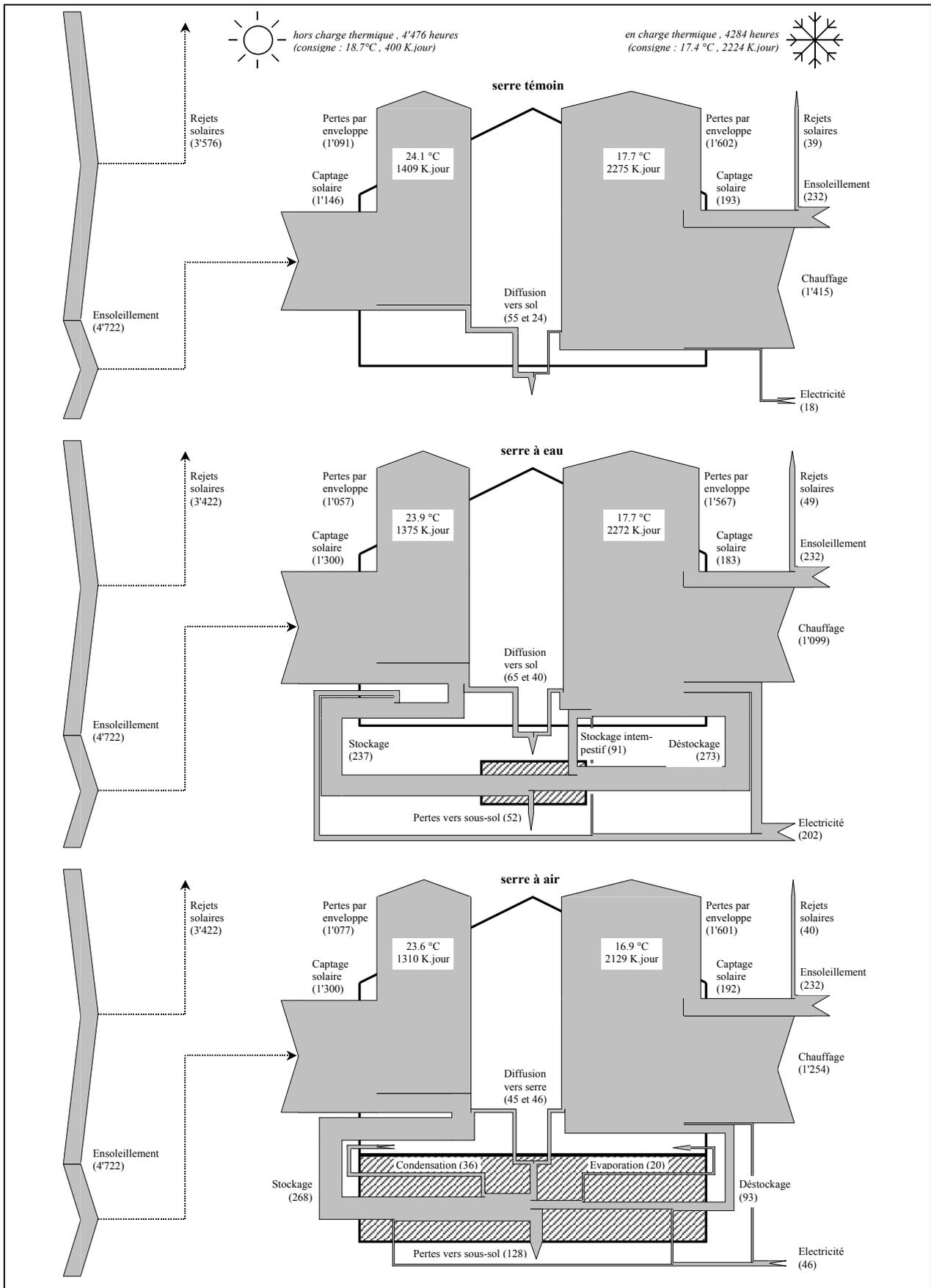


Figure 19 : Bilans annuels des stocks et des serres en MJ/m² (25 mars 1994 – 24 mars 1995).

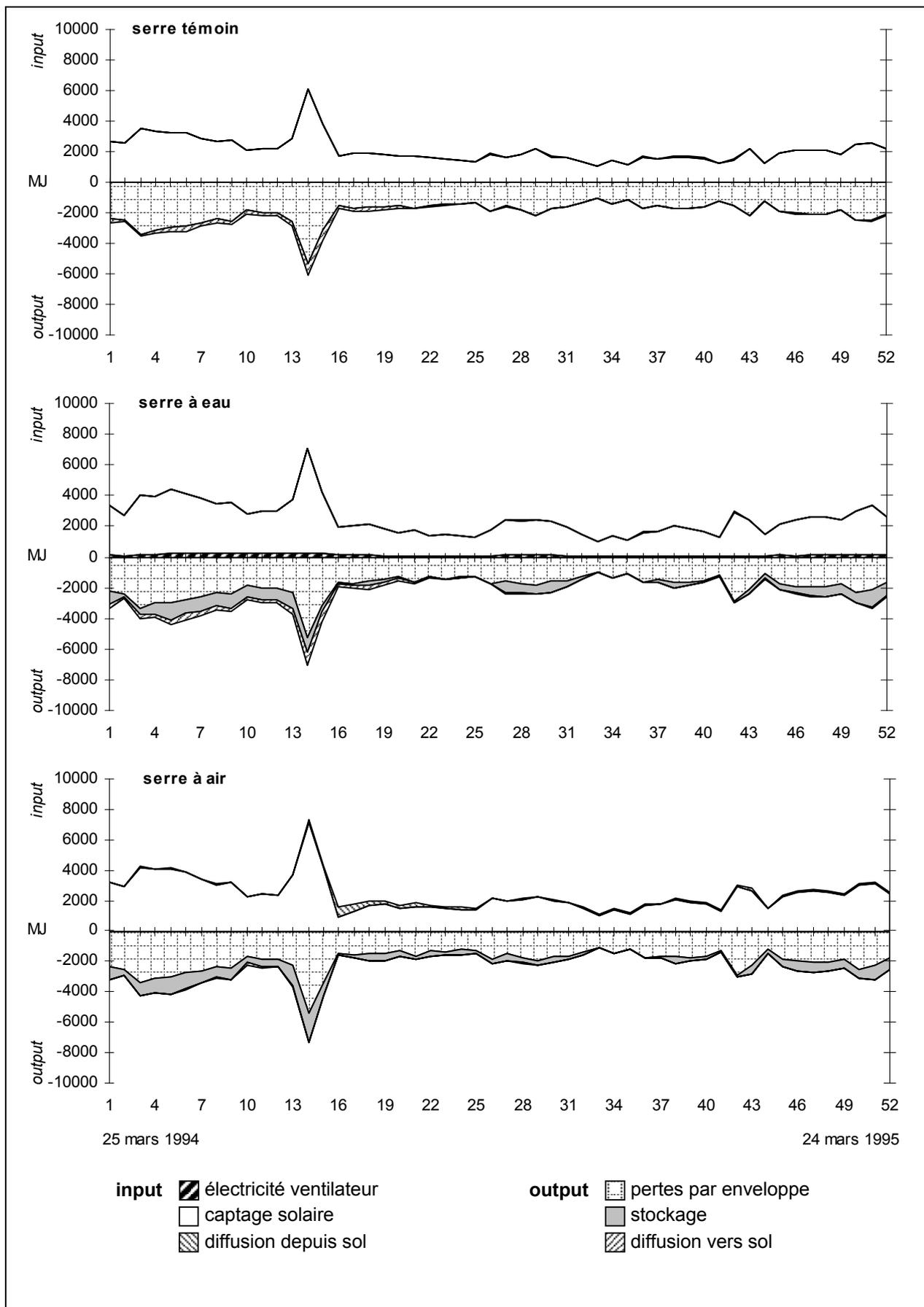


Figure 20 : Bilan des serres hors charge thermique, dynamique hebdomadaire (25 mars 1994 – 24 mars 1995).

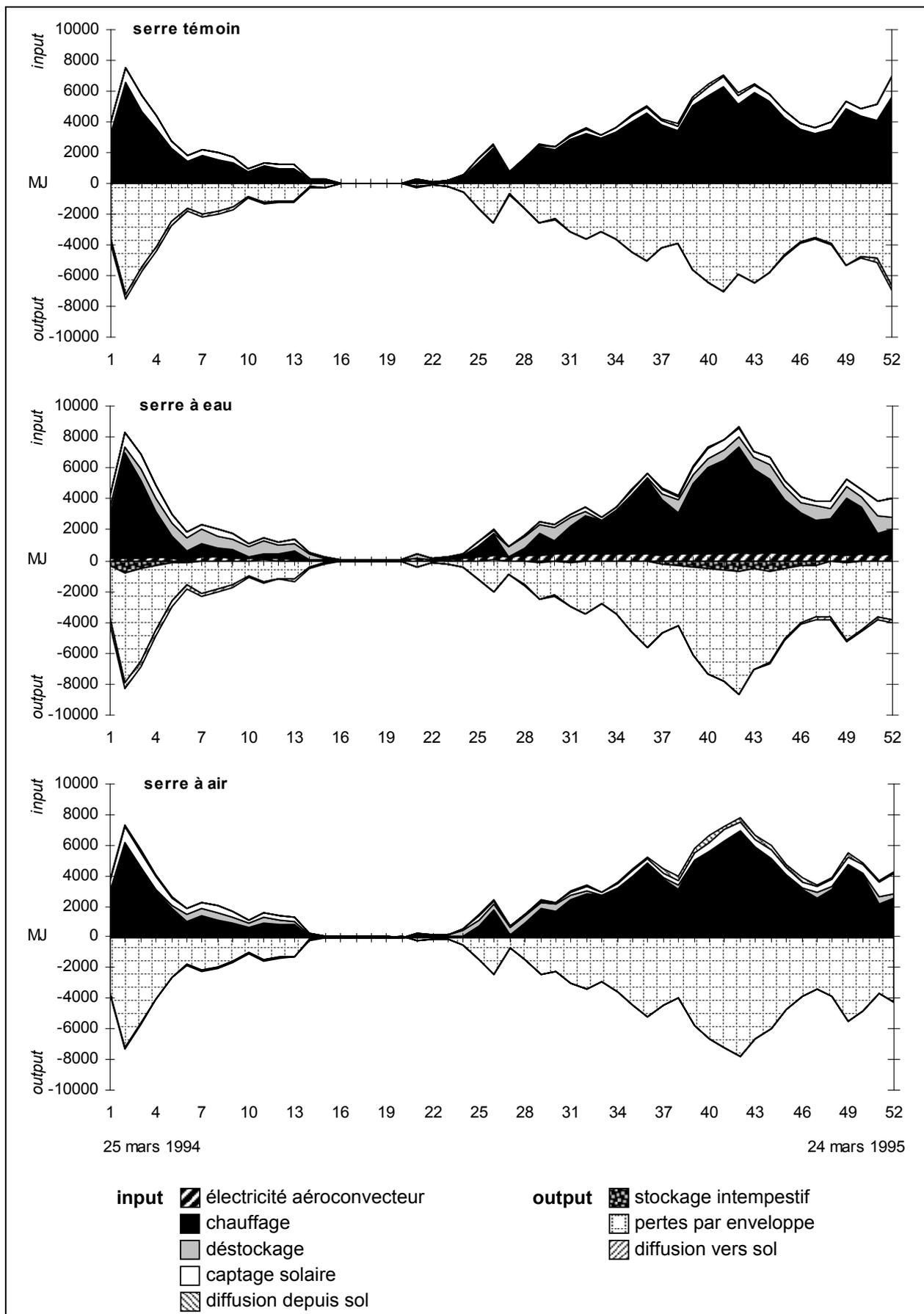


Figure 21 : Bilan des serres en charge thermique, dynamique hebdomadaire (25 mars 1994 – 24 mars 1995).

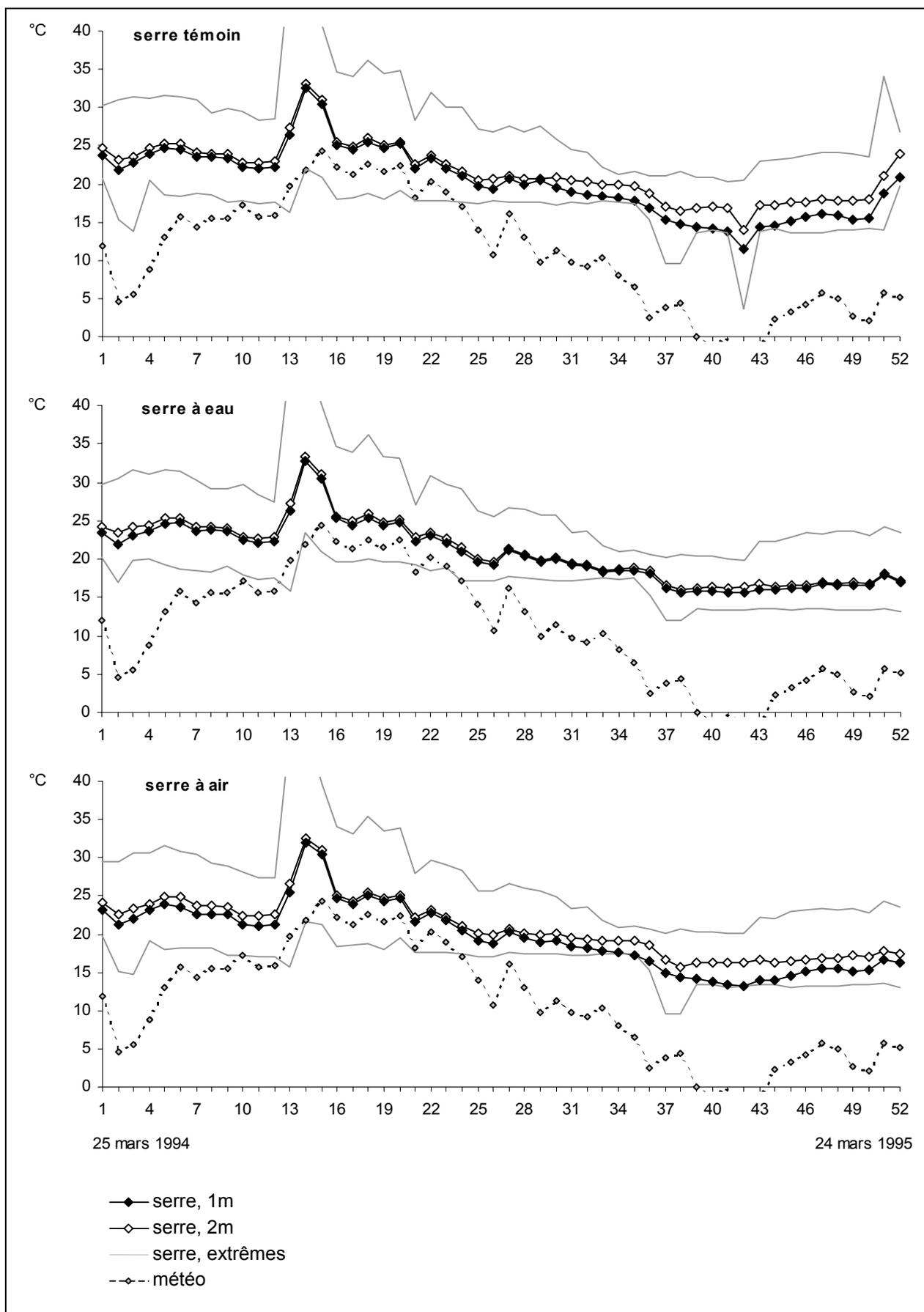


Figure 22 : Températures des serres (moyennes et extrêmes) et météo, dynamique hebdomadaire (25 mars 1994 – 24 mars 1995).

Stockage/déstockage versus potentiel solaire récupérable

Les résultats effectifs de stockage/déstockage observés dans les serres à eau et à air peuvent être mis en relation avec le potentiel d'énergie solaire théoriquement récupérable en base journalière. Celui-ci se définit (fig. 23) comme l'excédent de captage solaire journalier maximal de la serre témoin (captage solaire maximal hors charge thermique, calculé à partir de la surface de captage solaire maximale, sec. 4.3, dont on déduit les pertes par l'enveloppe et par le sol), à concurrence des besoins thermiques journaliers de la serre (chauffage et électricité des aéroconvecteurs). Ce potentiel récupérable (676 MJ/m^2) est particulièrement important en mi-saison, lorsque énergie incidente et besoins thermiques sont de même amplitude. Il s'élève à un quart de l'excédent solaire total (2792 MJ/m^2), qui ne tient lui pas compte de la contrainte du besoin et supposerait pour être utilisable de passer à un stockage saisonnier.

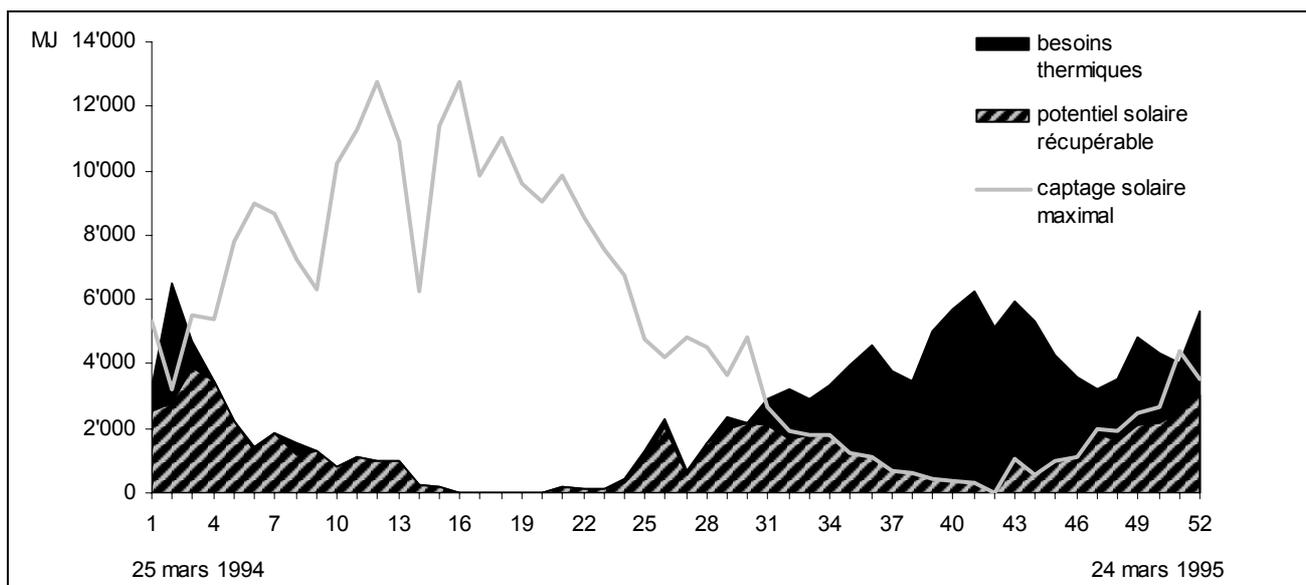


Figure 23 : Potentiel de stockage récupérable, dynamique hebdomadaire (25 mars 94 – 24 mars 95).

Ainsi le stockage solaire effectivement réalisé représente, dans la serre à eau comme dans la serre à air, un bon tiers du potentiel théoriquement récupérable en base journalière (tab. 10). Quant au stockage net (une fois déduit le stockage intempestif de la serre à eau, respectivement ajouté le surplus de diffusion passive de la serre à air), il s'élève dans les deux cas à environ un quart du potentiel théorique, dont les pics de mi-saison ne sont que partiellement absorbés (fig. 24).

Enfin, accessoirement au calcul des besoins thermiques de la serre, la méthode du potentiel solaire récupérable est également implémentée de façon simplifiée (en base mensuelle) dans le logiciel Horticorn [JOLLIET et LERESCHE, 1989]. En complément à nos mesures, celui-ci permet de mettre en évidence (annexe 5) la nécessité de travailler l'enveloppe de la serre et la distribution de chaleur avant de s'attaquer au stockage. Ainsi, par rapport à une enveloppe simple, une réduction de 40% des besoins thermiques est réalisée en utilisant du verre hortiplus (-15%), du double vitrage latéral (-14%) et un écran thermique (-12%), tant au niveau des besoins annuels que pour les puissances nominales de chauffage. Dans le cas de cultures basses, une distribution de chaleur au niveau du sol permettrait une économie supplémentaire de 9% par rapport à une distribution par aéroconvecteurs, qui favorise d'importants gradients thermiques, impropres à satisfaire une consigne proche du niveau du sol. Quoi qu'il en soit et malgré la prise en compte de ce phénomène de gradient, la reproduction par simulation des besoins thermiques de la serre témoin à partir de la météo et du climat intérieur mesurés n'a été possible qu'en diminuant artificiellement de 1K sa température extrapolée linéairement à 50 cm du sol. Finalement, eu égard à la simplicité du calcul, le potentiel d'énergie solaire récupérable qui en est déduit (520 MJ/m^2) se recoupe relativement bien avec celui obtenu plus haut, via le bilan thermique mesuré de la serre.

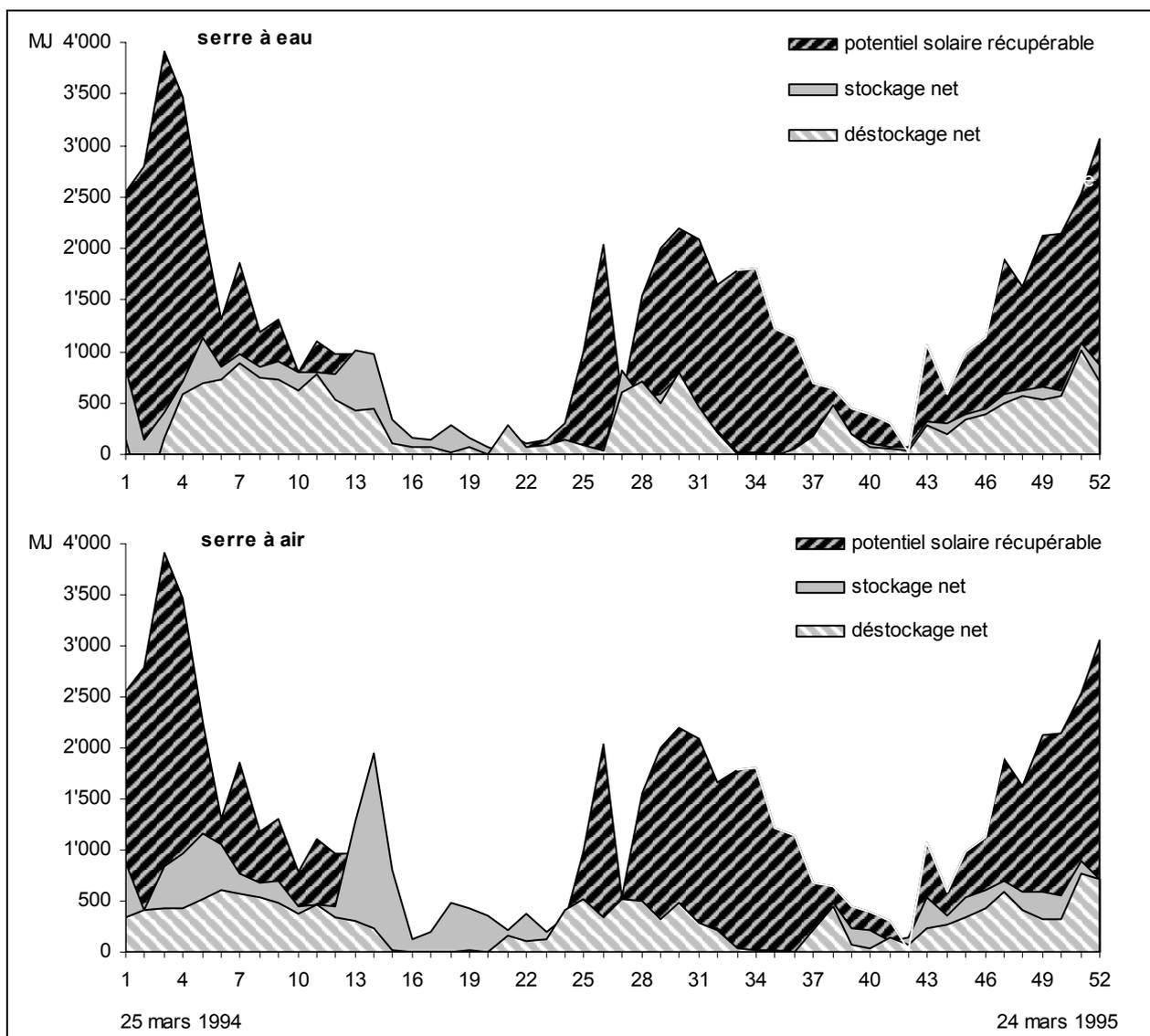


Figure 24 : Stockage/déstockage nets versus potentiel solaire récupérable, en dynamique hebdomadaire (25 mars 94 – 24 mars 95).

Tableau 10 : Valeurs potentielle, brute et nette du stockage/déstockage (25 mars 94 – 24 mars 95).

	serre à eau		serre à air	
	MJ/m ²	%	MJ/m ²	%
potentiel récupérable	676	100	676	100
stockage	237	35	268	40
déstockage brut	273	40	93	14
déstockage net	182	27	163	24

4.3 Bilan agronomique

Les conclusions que l'on peut tirer quant au stockage et à la valorisation de chaleur solaire en horticulture sont légitimées par le bon comportement des cultures dans les trois serres.

Durant la phase de mise hors service des stocks, une première culture de mufliers et de lisianthus (novembre 93 - mars 94), a donné des récoltes comparables dans les serres témoin et à air, alors que le développement plus rapide dans la serre à eau, dû à une température moyenne plus élevée, se traduit par une récolte plus précoce (12 jours d'avance). La durée de culture plus courte s'est traduite par une qualité commerciale inférieure mais le rendement financier, par unité de surface et de temps de culture, est le même pour les trois serres. Durant la phase active, deux autres cultures de ces mêmes fleurs ont successivement eu lieu durant l'été (juillet - octobre 94) et l'hiver (novembre 94 - mars 95) : moins influencé par les appoints de chauffage, la première a donné des résultats homogènes pour les trois serres, alors que la seconde (fig. 25) a confirmé les premiers résultats, qui ont encore été reproduits lors d'une quatrième période de culture (hiver 95 - 96) située en dehors de la phase de mesure thermique.

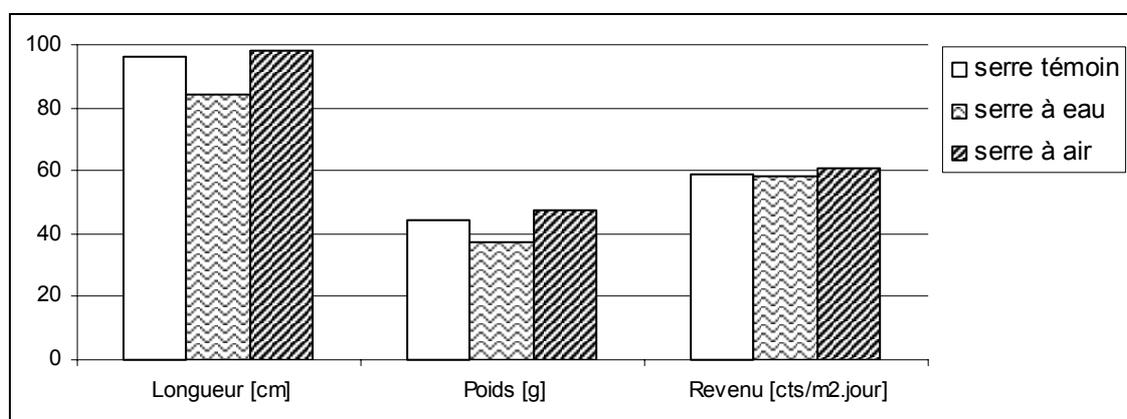


Figure 25 : Rendement de la culture hivernale de mufliers (novembre 94 – mars 95).

Une première culture de concombres a été conduite pendant la phase de mise en place du système de mesure (juillet - octobre 93). Les rendements ont été semblables dans les serres témoin et à air (6.2 kg/plante du 20 août au 1er octobre), alors qu'il ont été de 16% inférieurs dans la serre à eau où le développement des plantes et les rendements ont été influencés négativement par le violent courant d'air des aéroconvecteurs (cf. sec. 3.5). La distribution de chaleur a temporairement été modifiée en conséquence pour une deuxième culture de ce même légume (mars – juin 94, fig. 26), entraînant des récoltes de bonne qualité et sans différence significative entre les trois serres, résultats confirmés par une troisième culture (été 95) située en dehors de la phase de mesure thermique.

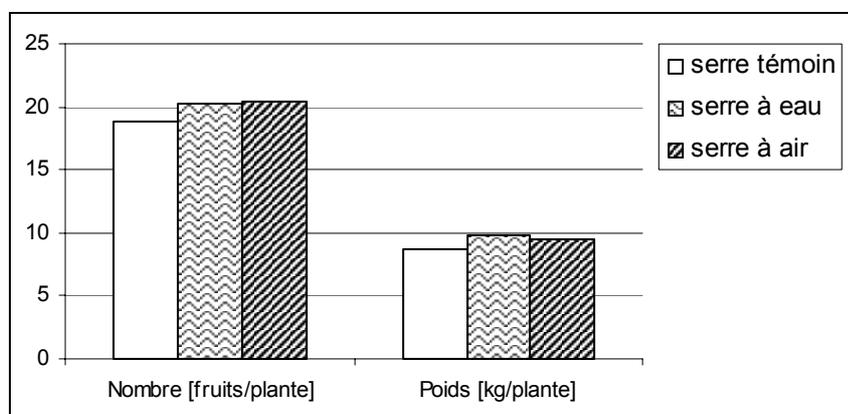


Figure 26 : Rendements de la culture printanière de concombre (mars – juin 94).

Ainsi, la climatisation des serres au moyen d'échangeurs air/eau ou de la ventilation d'un registre de tuyaux enterrés est possible sans influence négative sur les cultures de concombres, muflers et lisianthus. Toutefois, lors de cultures hautes, il est souhaitable de pouvoir disposer d'un circuit de chauffage prioritaire dans la zone des racines, pour éviter le dépérissement des plantes proches de l'injection d'air (cf. sec. 3.5). Dans le cadre de Geoser il a ponctuellement été réalisé une distribution canalisée d'air chaud sous les tables de culture en adaptant des gaines de distribution, mais pour obtenir des écoulements d'air suffisants il aurait fallu transformer respectivement les boîtiers de la cheminée de sortie (stock en terre) et des aérothermes (stock en citerne). Cela n'a pas pu être réalisé pour des raisons de coût.

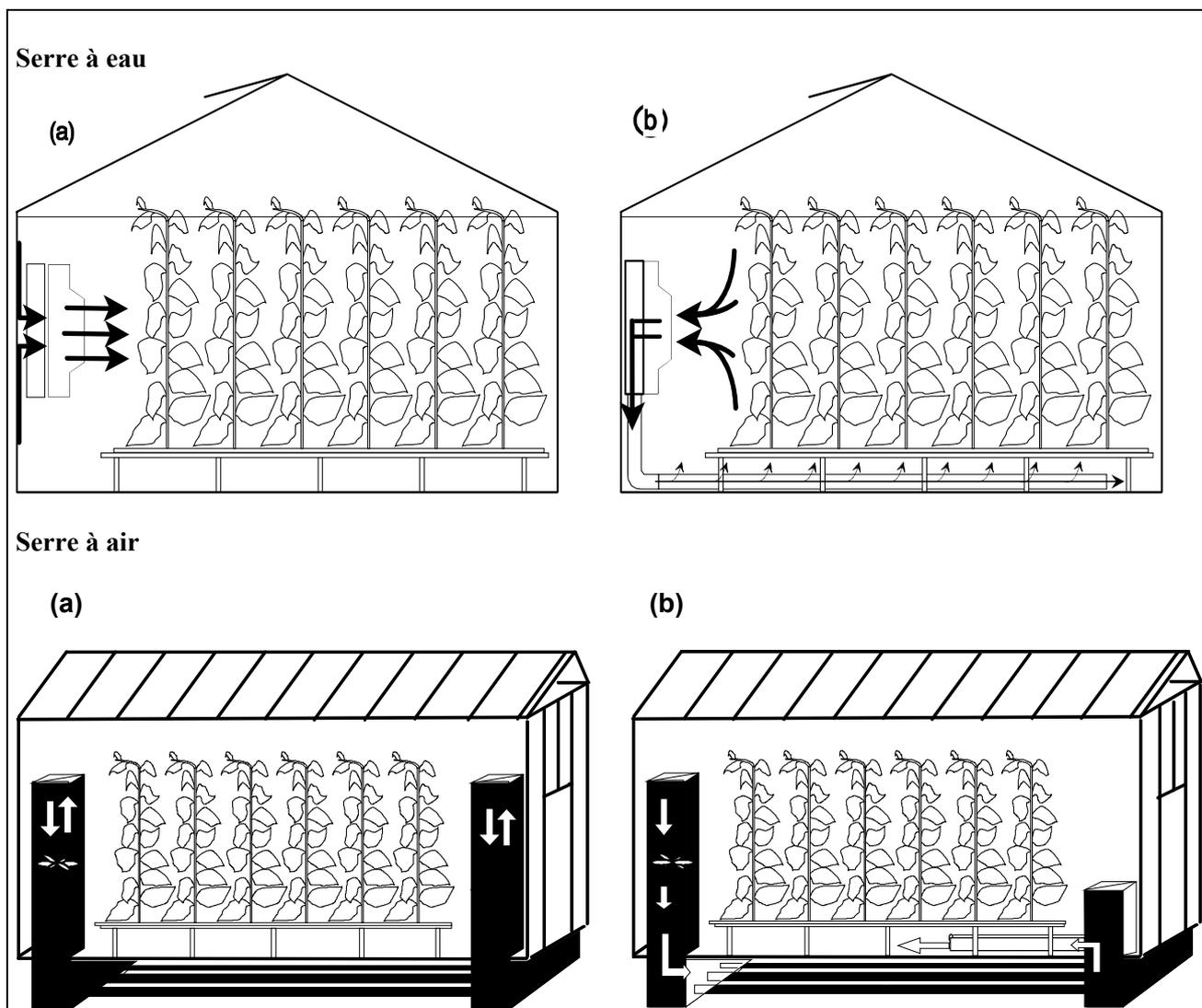


Figure 27 : Configurations a) d'origine ; b) ponctuellement modifiée pour distribution de chaleur au niveau des racines.

Finalement, un système de stockage peut être envisagé aux conditions suivantes :

- Le stockage et les dispositifs d'échange thermique ne doivent pas entraver le travail, ni faire de l'ombre ou provoquer des mouvements d'air violents. La chaleur doit être distribuée de manière que les températures soient homogènes dans les cultures.
- La gestion optimale des stocks ne doit pas s'opposer à la fourniture de gaz carbonique, ni empêcher d'utiliser la chaleur dégagée lors de la combustion destinée à générer le gaz; la puissance de chauffage correspondante, libérée durant la journée, est d'environ 30W/m^2 .
- La mise à profit des stocks doit être compatible avec toutes les stratégies actuellement envisageables pour la gestion du climat, en partie avec les stratégies DIF et DROP préconisées pour certaines espèces (inversion des températures diurne et nocturne, respectivement abaissement temporaire prononcé de la température aux alentours de l'aube ou du crépuscule).

5. OPTIMISATION DES SYSTEMES

5.1 Simulation numérique

Afin de délimiter de possibles configurations optimales des deux systèmes de stockage étudiés ici et d'en identifier les paramètres déterminants, nous avons en parallèle à la campagne de mesure in situ mis sur pied un outil de simulation numérique approprié. Celui-ci a été développé dans le cadre de l'environnement TRNSYS, logiciel de simulation modulaire pour systèmes énergétiques dynamiques.

Pour la serre à eau, un grand effort a commencé par être porté sur l'utilisation combinée de modules préexistants, incluant :

- Un modèle de serre prenant en compte les échanges radiatifs et convectifs dans l'espace intérieur et entre l'enveloppe et l'extérieur, ainsi que le calcul à partir d'un fichier météo des gains solaires sur chaque orientation de vitrage.
- Le bilan de captation solaire et d'évapotranspiration de la culture agronomique.
- Des consignes de chauffage/aération fixes.
- La ventilation naturelle par ouvrants progressifs.
- Le contrôle de la lumière par écrans mobiles, en fonction du niveau d'ensoleillement et du programme d'exploitation.
- Un modèle de cuve de stockage stratifiée, avec calcul simplifié de la déperdition dans le sol.
- Un modèle d'échangeur air/eau à débit variable.

Pour la serre à air, un nouveau module a été développé et validé pour le stockage diffusif en sous-sol [HOLLMULLER et LACHAL, 2001], incluant :

- La possibilité de contrôler le sens du flux d'air.
- Le calcul des échanges sensibles et latents entre celui-ci et les tubes, ainsi que la possibilité de traiter d'éventuelles infiltrations d'eau.
- La prise en compte des pertes de charges.
- La diffusion tridimensionnelle de la chaleur dans le sol.
- Un contrôle flexible de la géométrie et des conditions aux bords.

Lors d'une première série de simulations nous avons utilisé ce module en version « stand-alone », avec comme input les données de température et humidité mesurées dans la serre, c'est-à-dire en négligeant d'éventuelles variations du climat intérieur et des durées de stockage/déstockage dus à une configuration alternative du stock.

Nous avons en un second temps entrepris l'intégration de ces deux approches en un ensemble cohérent, comprenant pour le stockage l'un ou l'autre des modèles détaillés, couplé en ce qui concerne la serre et son interaction avec la météo à un seul et même modèle, simplifié au strict nécessaire. Ce projet dépasse toutefois le cadre du présent mandat, si bien que les optimisations présentées ici se basent sur la double approche décrite plus haut, complétée par quelques calculs par règle de trois, notamment en ce qui concerne les consommations électriques.

5.2 Optimisation de la serre à eau

Par rapport aux résultats de mesure (tab. 11, config. no 0), l'optimisation du stockage en cuve passe nécessairement par l'éradication du stockage intempestif et le contrôle de la consommation électrique.

La première mesure devrait sans problème pouvoir être atteinte par une révision de l'algorithme de régulation. On en évalue l'effet en considérant comme "solaire" la partie du stockage intempestif qui aura prématurément chauffé le stock et aurait normalement dû être réalisé hors charge thermique : elle s'estime sur une base journalière en considérant le stockage total effectivement réalisé (solaire + intempestif) à concurrence du potentiel récupérable (cf. sec 4.2), le reliquat étant considéré comme du stockage fossile, qu'on déduit également du déstockage total afin d'en obtenir la composante "solaire". Les valeurs ainsi corrigées s'élèvent à 255 MJ/m² pour le stockage pour 200 MJ/m² pour le déstockage. Ces estimations, que nous prenons ici comme base de comparaison (config. no 1), est confirmé par une simulation numérique qui

se base sur une consigne de chauffage (20/18 °C jour/nuit) légèrement supérieure à la moyenne mesurée et qui donne lieu à 237 MJ/m² de déstockage.

Si l'éradication du stockage intempestif induit une légère hausse du déstockage net, on observe également une légère baisse de la consommation électrique qui lui est sous-jacente et qui contribue également aux apports thermiques dans la serre. Ainsi, pour un COP quasiment inchangé, l'économie nette de chauffage (301 MJ/m², soit 21.3 % du chauffage de la serre témoin) s'avère finalement légèrement moindre que pour la configuration mesurée.

On peut sur cette base évaluer (config. no 2) la suppression du pincement de température opéré sur le circuit auxiliaire et la réduction subséquente de la puissance électrique en mode chauffage, ramenée à sa valeur initiale de 40 W (cf. sec 3.4). Bien que la réduction d'électricité doive être thermiquement compensée par un appel accru à la chaudière, il en résulte une économie nette de chauffage tout à fait acceptable (16.5 %), pour un COP quelque peu amélioré. Cependant, la réelle augmentation de ce dernier doit inévitablement passer par la mise en place d'aéroconvecteurs plus efficaces et un équilibrage plus attentif des flux d'air et d'eau. Ces mesures devraient probablement permettre une réduction d'un facteur 2 ou 3 de la consommation électrique en mode stockage/déstockage, induisant une économie de l'ordre de 200 MJ/m² (14 %) pour un COP aux alentours de 10.

Finalement, pour un COP assez stable, une diminution/augmentation du volume de cuve par un facteur 2 (config. 5 et 6) induit une diminution/augmentation par un facteur 0.9 / 1.1 de l'économie de chauffage (14.2 / 15.5 %), signe d'un choix robuste mais non exagéré de ce paramètre (100 lit/m²).

Une série de simulations complémentaires portant sur un coefficient d'échange amélioré des aéroconvecteurs (taille/nombre) devrait enfin pouvoir induire, tout comme pour la serre à air, une économie de chauffage de l'ordre de 340 MJ/m² (50 % du potentiel récupérable) pour un COP de l'ordre de 10.

Tableau 11 : Optimisation potentielle du système de stockage en cuve.

No	Paramètres ¹⁾		Bilan						COP
	Intempestif	Chauff. W _{el} ²⁾	(Dé)stock W _{el} ²⁾	Cuve lit/m ²	Stock MJ/m ²	Déstock. MJ/m ²	Therm. ³⁾ MJ/m ²	Elec. ⁴⁾ MJ/m ²	
0	Oui	625	1050	100	237	182 ⁵⁾	307	184	1.7
1	Non				255	200	301	165	1.8
2	Non	40	1050		255	200	234	97	2.4
3	Non	40	525		255	200	210	42	5.0
4	Non	40	315		255	200	201	20	10.0
5	Non	40	315	50	223	175	174	16	10.8
6	Non	40	315	200	276	217	219	23	9.6

1) Seuls sont indiqués les paramètres qui diffèrent de la configuration mesurée (no 0).

2) Puissances moyennes.

3) Apports thermiques en charge thermique (déstockage + surplus électrique).

4) Consommation électrique totale, surplus par rapport à la serre témoin (18 MJ/m²).

5) Déstockage net (déstockage – stockage intempestif).

5.3 Optimisation de la serre à air

De même, pour le stockage en sous-sol, nous reprenons comme base de comparaison les résultats de la configuration mesurée (tab. 12, config. no 0). Ceux-ci sont assez bien reproduits par une première simulation numérique (stockage/déstockage : 247 / 85 MJ/m² ; diffusion vers serre hors/en charge thermique : 56 / 29 MJ/m²) qui, par simple règle de trois, définit les facteurs de renormalisation appliqués aux simulations subséquentes.

Avant d'explorer la possibilité d'accroître les performances du système, nous commençons par évaluer l'importance de deux effets particuliers : l'infiltration d'eau par le système de brumisation et la réversibilité du flux d'air pour le stockage/déstockage.

Dans la configuration de base, les échanges latents observés dans les tubes ne sont reproduits dans la simulation numérique qu'à condition d'y définir un régime d'infiltration d'eau qui correspond vraisemblablement aux gouttelettes du système de brumisation entraînées par le flux d'air (cf. sec 4.3). La suppression (techniquement difficile) de cette infiltration d'eau et de l'évaporation qui en découle (config. no 1) permettrait un report partiel au déstockage de la puissance latente sur la puissance sensible et ainsi un léger accroissement de l'énergie de chauffage économisée.

Par rapport à cette dernière configuration, l'abandon de la stratégie de stockage/déstockage à contreflux (config. no 2) ne présenterait quant à lui quasiment aucune perte sur le rendement global du système, la perte de puissance aéroulque du ventilateur en mode inversé compensant la stratification du stock.

Tableau 12 : Optimisation potentielle du système de stockage en sol.

No	Paramètres ¹⁾		Bilan								
	Infilt.	Sens	Isol. Prof.	Ecart	Diam.	Débit	Stock	Déstock.	Therm. ³⁾	Elec. ⁴⁾	COP
			cm	cm	cm	m ³ /h ²⁾	MJ/m ²	MJ/m ²	MJ/m ²	MJ/m ²	
0	On	2	80	10	15	6'600	268	93	161	28	5.8
1	Off						237	106	182	28	6.6
2	Off	1					234	104	180	28	6.5
3	Off					3'300	173	60	125	2	56.1
4	Off					9'900	281	143	224	98	2.3
5	Off					13'200	314	173	256	236	1.1
6	Off		120				189	116	203	27	7.4
7	Off		150				190	117	204	27	7.4
8	Off			25			247	100	198	28	7.2
9	Off			40			243	103	197	28	7.2
10	Off			60			239	105	188	28	6.8
11	Off				22	11'600	288	150	231	27	8.5
12	Off				33	19'700	334	193	276	27	10.2
13	Off				52	34'200	380	235	322	26	12.4
14	Off			4		10'500	319	173	263	27	9.8
15	Off			4	33	25'700	373	229	317	26	12.2
16	Off		50&80			13'200	403	236	340	56	6.1

1) Seuls sont indiqués les paramètres qui diffèrent de la configuration mesurée (no 0).

2) Débit nominal.

3) Apports thermiques en charge thermique (déstockage + surplus diffusif – défaut électrique).

4) Consommation électrique totale, surplus par rapport à la serre témoin (18 MJ/m²).

Ceci étant, l'optimisation du stockage en sous-sol doit passer par une augmentation des énergies stockées/déstockées, tout en maintenant la consommation électrique au niveau raisonnable observé. A cet effet nous étudierons ci-dessous plusieurs alternatives à la configuration mise en oeuvre dans l'expérience Geoser.

Pour une géométrie inchangée on observe ainsi (config. 4 à 5) que si l'accroissement du débit d'air par un facteur 1.5 ou 2 entraînerait une augmentation sensible de l'économie de chauffage, de l'ordre de grandeur de celle observée dans la serre à eau, la surconsommation électrique deviendrait elle aussi catastrophique (accroissement des pertes de charge au cube de la vitesse), alors qu'une diminution par un facteur 2 (config. no 3) induirait toujours une économie de chauffage raisonnable (8.8 %) pour un COP défiant cette fois-ci toute concurrence.

L'isolation inférieure du stock, simulé ici par des conditions adiabatiques à 40 ou 70 cm sous le plan des tubes (config. no 6 et 7), ne permettrait quant à elle qu'une trop légère amélioration eu égard aux frais supplémentaires de mise en oeuvre. Au contraire, une disposition moins profonde des tubes (config. no 8 à 10) permettrait à moindre coût d'atteindre la même économie de chauffage (13 à 14 %), principalement par

augmentation de la diffusion passive vers la serre. Seules des contraintes agronomiques, en l'occurrence absente pour cause de culture hors-sol, ne devraient ainsi dicter une excavation importante.

Dans la mesure des possibilités constructives, une piste intéressante consisterait à opter pour des tubes à plus grand diamètre (config. no 11 à 13). Contraint par la largeur de la serre, la réduction de leur nombre est compensée par une plus grande surface d'échange, mais surtout par une section qui va au carré du rayon et qui permet, à pertes de charges égales, de fortement accroître le débit d'air. Le passage à des diamètres de 22, 33 ou 52 cm permettrait ainsi de viser une économie de chauffage de 16 à 23 %, pour un COP aux alentours de 10. Il convient cependant de noter que les débits d'air alors mis en œuvre correspondent à un renouvellement d'air de 75 à 160 volume par heure (vitesse moyenne dans la serre de 10 à 30 cm/s), probablement irréaliste dans la gamme supérieure.

De même, en augmentant le nombre des tubes par diminution de leur écartement (config. 14), il est possible de passer à un débit nominal de 10'500 m³/h (choisi de manière à garder les pertes de charges invariables) et d'accroître ainsi l'économie de chauffage à quelques 19 %. Avec des tubes de 33 cm (config. no 15), le même écartement conduirait à une économie de 22 % pour un COP de 12.

Il est enfin intéressant de noter que la longueur de diffusion journalière se situant aux alentours de 15 cm, la superposition de plusieurs couches de tubes à 30 cm de distance l'une de l'autre peut également amener un effet multiplicatif des énergies stockées/déstockées, mais également des pertes de charges (config. no 16). Cette remarque ouvre également le champ à des options constructives dans lesquelles une partie seulement de la surface d'emprise de la serre est utilisée pour le stockage multicouche, avec cependant une perte au niveau de la diffusion passive vers la serre.

6. CONCLUSIONS

Trois serres horticoles, dont deux équipées de systèmes différents de stockage des excédents solaires, et soumises à un même programme agronomique, ont fait l'objet de mesures physiques détaillées sur un cycle annuel complet. L'analyse approfondie des données, en provenance de plus de cent points de mesure, ainsi qu'une série de simulations numériques, permettent de tirer les conclusions suivantes :

- Les systèmes de stockage n'ont pas d'influence négative sur les cultures, qui ont systématiquement donné des récoltes similaires dans les trois serres.
- Substitution électricité / fossile mise à part, nous avons mesuré dans les serres avec stockage en cuve et en sous-sol une économie nette d'énergie de chauffage de 13 et 11% (180 et 160 MJ/m².an), ce qui correspond environ à un quart du potentiel d'excédents solaires théoriquement récupérables par stockage journalier (680 MJ/m².an).
- Dans l'état, ces résultats sont accompagnés d'une surconsommation électrique bien maîtrisée pour le stockage en sous-sol (COP = 5.8), mais beaucoup trop élevée pour le stockage en cuve (COP = 1.7). Cette dernière n'est pas inhérente au système, mais à une géométrie prototype et à une régulation non adaptée à la dynamique du système.
- Une étude complémentaire par simulation numérique montre qu'il serait possible, sous nos climats et pour une température de consigne moyenne de 17.5°C, de passer pour l'un et l'autre des systèmes à une économie nette de chauffage de l'ordre de 25% (340 MJ/m².an), avec une bonne maîtrise (COP ~10 atteignable) de la consommation électrique. Une telle optimisation peut être réalisée avec un ensemble relativement varié de configurations géométriques, du moins pour ce qui concerne le stockage en sous-sol.
- Comme pour toute production renouvelable complétée par un système de chauffage auxiliaire, on peut déduire des expériences acquises que le bon fonctionnement des installations dépend de la robustesse et de la simplicité des systèmes, qu'il faut éviter de fragiliser par trop de sophistication technique et logicielle.

7. REMERCIEMENTS

Cette expérience n'aurait pas été possible sans les institutions et personnes suivantes, que nous tenons à remercier :

- Les techniciens qui ont mis un précieux savoir-faire au service des mesures réalisées dans des conditions parfois difficiles: Eric Pampaloni du CUEPE et Jean-Michel Gillioz du RAC-Fougères.
- Les membres du comité de projet, qui ont suivi l'avancement de la recherche avec attention : le Prof. Willi Weber du CUEPE, le Dr. Charly Darbellay du RAC-Fougères et M. Alain Légeret de l'Ingenieur Schule Wädenswil.
- L'Office fédéral de l'énergie qui a financé le projet, en particulier le responsable du programme Jean-Christophe Hadorn et son regretté prédécesseur Pierre Bremer, ainsi que le Dr. Gerhard. Schriber, coordinateur de la recherche.
- L'Office des constructions fédérales (actuellement : Office fédéral des constructions et de la logistique), et son architecte responsable d'alors Heinrich von Kaenel.
- Le LESO – EPFL qui a aimablement mis à disposition le matériel de mesure de l'étanchéité des serres, et en particulier le Dr. Jean-Bernard Gay, initiateur des travaux sur la thermique des serres.
- Le Dr. Thierry Boulard, de l'INRA, qui a mis à disposition l'algorithme se trouvant à la base du module de simulation numérique pour tubes enterrés.

BIBLIOGRAPHIE

- ALVAREZ, S.; CEJUDO, E.; RODRIGUEZ J.; GUERRA J., 1991. Full scale experiments in EXPO'92, the bioclimatic Rotunda, in PLEA'91, Architecture and Urban Space, edited by S. Alvarez and al. Kluwer Academic Publisher, pp. 209-216.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING ENGINEERS, 1989. ASHRAE Handbook : Fundamentals, Ch. 6.
- BAILLE, A. et BOULARD, T., 1986. An overview of solar greenhouses projects in France. Second CNRE workshop on solar heating of greenhouses, Thessaloniki. FAO Roma.
- BASCETINCELIK, A., 1985. Greenhouse solar collection with a heat storage system for the Cukurova region. Second CNRE workshop on solar heating of greenhouses, Thessaloniki. FAO Roma.
- BAILEY, B., 1988. Principles of environmental control, p. 17-41. In: Energy conservation and renewable energies for greenhouse heating. REUR technical series 3, FAO/ENEA, Roma.
- BAKKER, J.C., 1995. Greenhouse climate control: constraints and limitations. Acta horticulturae 399, 25-35.
- BERTIN, N. et HEUVELINK, E., 1993. Dry matter production in a tomato crop: comparison of two simulation models. Journal of Horticultural Science 68(6)995-1011.
- BOULARD, T.; FOUCARD, J.C.; MEVEL, A., 1984. Localisation du chauffage du sol et d'air en fonction du stade de développement des plantes; application aux cultures d'iris, tulipes, glaïeuls et lis. Acta Horticulturae 148, 815-819.
- BOURGEOIS, M.; CALAME, F.; DANLOY, L.; GAY, J.B.; JOLLIET, O.; MANTILLERI, S.; MONCOUSIN, C.; MUNDAY, G.L.; REIST, A., 1986. Serre-pilote CERN. Rapport final 1982-1985. CERN, Genève.
- BREDENBECK, H., 1982. Study on utilization of solar energy for heating of greenhouses in Greece. TASPO Bulletin no. 16, Braunschweig.
- BREDENBECK, H., 1984. Rock bed storage inside of greenhouses. Acta horticulturae 148, 739-744.
- CASTILLA PRADOS, N.; MONTERO, J.I.; BRETONES, 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 february 1985. FAO Roma.
- CHIAPALE, J.-P.; BAVEL van, C.H.M.; SADLER, E.G., 1983: Comparison of calculated and measured performance of a fluid-roof and a standard greenhouse. Energy in agriculture 2(75-89).
- COCKSHULL, K.E., 1988. The integration of plant physiology with physical changes in the greenhouse climate. Acta Horticulturae 229, 113-123.
- COCKSHULL, K.E., 1992. Crop environments. Acta Horticulturae 312, 77-85.
- DANLOY, L.; GAY, J.B.; JOLLIET, O.; MERCIER, A.; MUNDAY, G.L. et REIST, A., 1986. CERN's experimental glasshouse heating systems with warm water. FAO-CNRE Bulletin no 15, 20-27.
- DARMRATH, J., 1983. Utilization of solar energy in the greenhouse . Supplementary investigations with the solar installation type Hannover. Bulletin 15, TASPO book distributors Braunschweig.
- EGGERS, H., 1986. Vergleichendes Forschungs- und Demonstrationsprojekt zur Nutzung der Sonnenenergie für die Beheizung energiesparender Gewächshäuser. Abschlussbericht, Landwirtschaftskammer Rheinland.
- GOSSELIN, A. et TRUDEL, M.J., 1984. Effect of soil heating on plant productivity and energy conservation in northern greenhouses. Acta Horticulturae 148, 853-858.
- GRAFIADELLIS, M., 1985. Research on greenhouse solar heating systems in the agricultural research center of northern Greece. CNRE workshop on solar heating of greenhouses, Cyprus february 1985. FAO Roma.

- GRAFIADELLIS, M., 1986. Development of a passive solar system for heating greenhouses. 2nd FAO/CNRE workshop on solar greenhouse heating, Thessaloniki. FAO Roma.
- HENDRIKS, L. et UEBER, E., 1995. Alternative methods of regulating the elongation growth of ornamental plants: a current assessment. *Acta Horticulturae* 378, 159-167.
- HOLLMULLER, P.; LACHAL, B., 2001. Cooling and preheating with buried pipe systems : monitoring, simulation and economic aspects. *Energy and Buildings*, 33/5, pp. 509-518.
- HUREWITZ, J.; MALETTA, M. et JANES, H.W., 1984. The effects of root-zone heating at normal and cool air temperatures on growth and photosynthetic rates of tomatoes. *Acta Horticulturae* 148, 871-876.
- JAFFRIN, A. et CADIER, P., 1982. Latent heat storage applied to horticulture: La Baronne solar greenhouse. *Solar energy* 28, 313-323.
- JELINKOVA, H., 1986. Solar water collectors and passive solar system for the heating of greenhouses. Second CNRE workshop on solar heating of greenhouses, Thessaloniki. FAO Roma.
- JOLLIET, O. et LERESCHE, F., 1989. HORTICERN, logiciel de calcul des consommations d'énergie d'une serre horticole. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne.
- KOOISTRA, E., 1984. Energy saving temperature regimes for vegetable growing. *Acta Horticulturae* 148, 561-566.
- KURTAN, S., 1985. The use of solar energy for greenhouse heating in Hungary. CNRE workshop on solar heating of greenhouses, Cyprus february 1985. FAO Roma.
- LACHAL, B.; WEBER, W.; GUISAN, O., 1992. Simplified methods for the thermal analysis of multifamily and administrative buildings. *ASHRAE Transactions*, part 1, pp. 1151-1159.
- LEFEBVRE, A., 1989. Atomization and sprays. Hemisphere Publishing Corporation.
- LEVAV, N., 1985. Solar heating of greenhouses in Israel. CNRE workshop on solar heating of greenhouses, Cyprus february 1985. FAO Roma.
- LISKOLA, K., 1983. Solar heat stores for cultivation under plastic film coverings. *Building bulletin* 6/191.
- McAVOY, R.J. et JANES, H.W., 1984. The effects of root zone heating in conjunction with standard and cool night conditions on the growth of chrysanthemums. *Acta Horticulturae* 148, 843-852.
- MAVROANOPOULOS, G. et KIRITSIS, S., 1985. The performance of a greenhouse heated by an earth-air heat exchanger. CNRE workshop on solar heating of greenhouses, Cyprus february 1985. FAO Roma.
- MUSY, A.; SOUTTER, M., 1991. *Physique du sol*. Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne.
- NIR, A.; AMIEL, A.; KRANT, J. et EPSTEIN, M., 1981. Solar heat supply for greenhouses with stratified soil heat storage: data collection and feasibility study. *Acta Horticulturae* 115, 591-597.
- PORTALES, B., 1984. Etude et expérimentation du chauffage solaire de serres à stockage thermique souterrain. Thèse, Université de Valenciennes.
- PHOTIADES, I.; BREDENBECK, H., 1986. Solar heating of greenhouses in Cyprus. Second CNRE workshop on solar heating of greenhouses, Thessaloniki. FAO Roma.
- PICCIURO, G. et MARTINCIGH, L., 1987. Prototype of solar bio-climatic greenhouse. In: *Greenhouse heating with solar energy*. REUR technical series 1. FAO/ENEA Roma, p. 167-170.
- RAZAFINJOHANY, E., 1989. Etude comparative dans les serres agricoles de deux systèmes de stockage de la chaleur. Influence de l'humidité de l'air. Thèse, 148 p. Université de Perpignan.
- REIST, A.; BAUMGARTNER, J.P.; BURNIER, J.; CALAME, F.; DANLOY, L.; DARBELLAY, C.; GAY, J.B.; JOLLIET, O.; MERCIER, A.; MONCOUSIN, C. et MUNDAY, G.L., 1989. HORTICERN, une synthèse de la gestion de l'énergie en horticulture. Rapport, 100p.
- REIST, A. et GYSI, C., 1990. Cultures hors sol: bilan écologique. *Revue suisse de viticulture, arboriculture et horticulture* 22(4)223-235.

- RODRIGUEZ, E.; ALVAREZ, S.; MARTIN, R., 1991. Water drop as a natural cooling resource, physical principles, in PLEA'91, Architecture and Urban Space, edited by S. Alvarez and al. Kluwer Academic Publisher, pp. 499-504.
- REPETTI, R., 1984. Climatisation des serres par ombrage contrôlé. Congrès solaire international, Nice.
- SANTAMOURIS, M; ARGIRIOU, A. et VALLINDRAS, M., 1994. Design and operation of a low energy consumption passive solar agricultural greenhouse. *Solar energy* 52(5)371-378.
- SCHAUPMEYER, C.A., 1984. Response of a commercial rose crop to root zone warming. *Acta Horticulturae* 148, 825-826.
- SLACK, G. ; FENLON, J.S. et HAND, D.W., 1988. The effects of summer CO₂ enrichment and ventilation temperatures on the yield, quality and value of glasshouse tomatoes. *Journal of horticultural science* 63, 119-129.
- WINDEN van, C.M.M., 1988. Soilless culture technique and its relation to the greenhouse climate. *Acta Horticulturae* 229, 125-132.
- WULSTER, G.J. et JANES, H.W., 1984. The effect of elevated root zone temperatures of various duration on growth and development of several poinsettia cultivars. *Acta Horticulturae* 148, 835-842.
- ZABELTITZ von, Chr. ed., 1987. Greenhouse heating with solar energy. REUR technical series 1. FAO/ENEA Roma, 200p.
- ZAMIR, N, et ARBEL, A., 1986. Recent experience with hydrosolaric greenhouses in Israel. Second CNRE workshop on solar heating of greenhouses, Thessaloniki. FAO Roma.
- ZERONI, M.; NIR, A. et KOPEL, R., 1984. Root zone heating as an element in energy conservation in a seasonal heat storage greenhouse. *Acta Horticulturae* 148, 859-864.

ANNEXE 1
SYSTEME DE MESURE

Remarques quant à la notation

De façon générale les acronymes de désignation des sondes se composent :

- 1) du type de grandeur physique (p.ex. T pour température, H pour humidité relative, HA pour humidité absolue, W pour débit d'eau, WA pour débit d'air, P pour puissance, etc.)
- 2) de l'acronyme de désignation de la serre (st, se et sa pour les serres témoin, à eau et à air)
- 3) d'un acronyme de localisation de la sonde ou grandeur en question dans la serre, respectivement dans le sous-système.

La grandeur Tsass3_80 désigne ainsi une Température de la serre à air, à savoir celle de sous-sol du puit no 3, à 80 cm de profondeur).

Acquisition et traitement

Afin de pouvoir évaluer les deux systèmes de stockage en question et les comparer à un fonctionnement normal (sans stockage), nous avons été amenés à faire, dans les deux serres en question ainsi que dans la serre de référence, des mesures de tous les principaux flux d'énergie (thermique et électrique) et de masse.

Le système de mesure consiste à la base de 80 sondes étalonnées par le CUEPE et découplées du système de régulation. Il s'agit en particulier de la mesure des conditions météorologiques, du climat intérieur, des températures de terrain à différentes profondeurs, de celles d'eau et d'air dans les circuits de stockage et de chauffage ainsi que des débits correspondants, des débits d'eau dispensés par le système de brumisation, des humidités relatives d'entrée/sortie des tubes enterrés ainsi que de la récolte de condensat en leur extrémité, et finalement des puissances électriques des aérochauffeurs et ventilateurs.

Ces sondes sont reliées à un datalogger Campbell CR7 qui fait une acquisition instantanée toute les 30 secondes et enregistre les valeurs moyennées par pas de 5 minutes. Hormis l'acquisition des grandeurs primaires, cet appareil calcule 13 grandeurs déduites instantanément des premières, telles les flux de chaleur (séparées en valeurs positive et négative) et les humidités absolues d'entrée/sortie des tubes enterrés.

L'ensemble de ces 93 grandeurs est rapatrié par modem vers un PC du CUEPE à Genève, de façon bihebdomadaire. Un programme (écrit en Pascal) contrôle l'exactitude des données transmises (heure et fréquences d'enregistrement, nombre de valeurs par pas de 5 minutes, nombre de pas), teste les valeurs correspondant aux principales mesures pour déceler des pannes dans les sondes ou un éventuel bruit électrique dans les mesures et découpe le fichier transmis en fichiers journaliers, en format ASCII CSV.

Une première analyse phénoménologique se fait à partir de 13 plots de travail prédéfinis recouvrant les principales mesures sur une durée de 48 heures. Ceux-ci sont régulièrement tirés et distribués à chacune des institutions intervenantes, et servent à la fois de base de suivi des mesures et de référence de travail.

A cela s'ajoute une série grandeurs dérivées à posteriori à partir des mesures décrites plus haut, çàd sur une base de moyennes par pas de temps de 5 minutes. Il s'agit soit de grandeurs n'ayant pas eu le temps ou l'espace de stockage nécessaire pour être intégrées au programme d'acquisition du datalogger, soit de grandeurs dont la nécessité est apparue en cours d'analyse.

Nous avons également récolté 60 valeurs enregistrées également par pas de 5 minutes à partir des commandes et des mesures effectuées par les automates de régulation des serres. Certaines de ces grandeurs, comme les données climatiques intérieures et extérieures, font double emploi avec notre chaîne de mesure, ce qui permet de contrôler et de déceler d'éventuelles pannes ou dérives dans les sondes. D'autres, comme l'ouverture des fenêtres, la fermeture des écrans de protection, les températures de consigne et autres données de régulation, fournissent des informations complémentaires, intéressantes en particulier pour la simulation dynamique des systèmes. L'ensemble de ces valeurs, enregistrés sur place par un PC sous forme de fichiers mensuels parfois lacunaires, est également lu par un programme Pascal qui les teste et découpe en fichiers journaliers, en ASCII CSV.

L'enregistrement de ce total de 153 grandeurs par pas de temps de 5 minute, nécessaire à la compréhension fine de la dynamique très nerveuse des serres agricoles (peu d'inertie) représente finalement quelques 68'000 données journalières, soit 23 mio de données sur les 17 mois d'acquisition. Soulignons enfin le caractère extrêmement complet de ces mesures - 17 mois par pas de 5 minutes, sans panne d'acquisition en ce qui concerne la chaîne de mesure à proprement parler - ce qui les rend potentiellement intéressantes pour des études ultérieures (en ne pensant rien qu'aux mesures météorologiques ou aux climats intérieurs des serres, rarement disponibles en telle résolution temporelle).

Mesures

Sondes et étalonnage

Dans le tableau suivant (tab. 1), les 93 mesures prises par la chaîne de mesure sont regroupés en quatre groupes : météo, serre témoin, serre à air, serre à eau. Pour chaque mesure on y trouve une description, le type de sondes utilisée, la dénomination, l'unité de mesure (telle que stockée dans les fichiers journaliers) et la précision. Suite à cela se trouvent les figures décrivant l'emplacement des sondes dans les serres (fig. 1 à 3), puis une description précise des sondes et de leur étalonnage.

Tableau 1 : Liste des sondes.

DESCRIPTION	SONDE	DENOMIN.	UNITE	PRECISION
METEO				
Ensoleillement global horizontal	Pyranomètre Kipp&Zonnen CM-11	Gsol	W/m2	2[%]
Température	Résistance Pt100	Text	degC	0.1[°C]
Humidité	Rotronic MP/300	Hext	%	5[%]
Pluie (init. Condensation aéro. MD4)	Pluviomètre ARG100	Pluie (Cseaero)		7[%]
SERRE TEMOIN				
Température 2m	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tst2	degC	0.2[°C]
Humidité 2m	Rotronic MP/300	Hst2	%	5[%]
Température 1m	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tst1	degC	0.2[°C]
Température sur écran	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tstec	degC	0.2[°C]
Température sol, -40 cm	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tstss_40	degC	0.15[°C]
Température sol, -70 cm	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tstss_70	degC	0.15[°C]
Débit Volumétrique d'eau chauffage	Débitmètre Aquametro Woltman SMH 50	Wstch	Lt	2[%]
Température chauffage entrée	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	TstchE	degC	0.1[°C]
Température chauffage sortie	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	TstchS	degC	0.1[°C]
Condensation verres	Home made	CstV		
Volume Fog	Débitmètre Aquametro type PMW	DstFog	Lt	3[%]
Puissance de chauffage	Déduit de Wstch, TstchE, TstchS	PstCh	kW	4[%]
SERRE A AIR				
Température de référence #1	Résistance Pt100	PT100sa	degC	0.03[°C]
Température 2m	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsa2	degC	0.2[°C]
Humidité 2m	Rotronic MP/300	Hsa2	%	5[%]
Température 1m	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsa1	degC	0.2[°C]
Température sur écran	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsaec	degC	0.2[°C]
Débit Volumétrique d'eau chauffage	Débitmètre Aquametro Woltman SMH 50	Wsach	Lt	3[%]
Température chauffage entrée	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	TsachE	degC	0.15[°C]
Température chauffage sortie	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	TsachS	degC	0.15[°C]
Vitesse d'air total	Anémomètre Miniair 6	VsaAirTot	m/s	3[%]
Vitesse d'air dans tube	Anémomètre Miniair 6	VsaAirTub	m/s	5[%]
Etat du flux (stockage/déstockage)	Lecture sur l'automate de régulation	VsaAirSens		
Température entrée air	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	TsaaE	degC	0.2[°C]
Température sortie air	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	TsaaS	degC	0.2[°C]
Humidité rel. entrée air	Rotronic MP/300	HsaaE	%	5[%]
Humidité rel. sortie air	Rotronic MP/300	HsaaS	%	5[%]
Température air tube entrée	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsatu7	degC	0.2[°C]
Température air tube 1/6	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsatu6	degC	0.2[°C]
Température air tube 1/3	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsatu5	degC	0.2[°C]
Température air tube 1/2	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsatu4	degC	0.2[°C]
Température air tube 2/3	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsatu3	degC	0.2[°C]
Température air tube 5/6	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsatu2	degC	0.2[°C]
Température air tube sortie	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsatu1	degC	0.2[°C]
Température tube paroi, 2/3	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsatu3p	degC	0.15[°C]
Température tube paroi, 1/3	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsatu5p	degC	0.15[°C]
Température sol -40 cm (2/3)	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsass3_40	degC	0.15[°C]
Température sol -60 cm (2/3)	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsass3_60	degC	0.15[°C]
Température sol, -80 cm (2/3)	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsass3_80	degC	0.15[°C]

Température sol -100 cm (2/3)	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsass3_100	degC	0.15[°C]
Température sol -120 cm (2/3)	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsass3_120	degC	0.15[°C]
Température sol -150 cm (2/3)	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsass3_150	degC	0.15[°C]
Température sol -40 cm (1/3)	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsass5_40	degC	0.15[°C]
Température sol -60 cm (1/3)	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsass5_60	degC	0.15[°C]
Température sol -80 cm (1/3)	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsass5_80	degC	0.15[°C]
Température sol -100 cm (1/3)	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsass5_100	degC	0.15[°C]
Température sol -120 cm (1/3)	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsass5_120	degC	0.15[°C]
Température sol -150 cm (1/3)	Thermocouple type T avec Tréf#1(Pt100)	Tsass5_150	degC	0.15[°C]
Condensation stockage	Pluviomètre ARG100	CsaSt		7[%]
Puissance électrique ventilateur	Puissancemètre BAUER	PsaVent	W	2[%]
Condensation verres	Home made	CsaV		
Volume fog	Débitmètre Aquametro type PMW	DsaFog	Lt	3[%]
Puissance de chauffage	Déduit de Wsach, TsachE, TsachS	PsaCh	kW	4[%]
Humidité abs. entrée air	Déduit de HsaaE	HAsaaE	daPa	5[%]
Humidité abs. sortie air	Déduit de HsaaS	HAsaaS	daPa	5[%]
SERRE A EAU				
Température de référence #2	Résistance Pt100	PT100se	degC	0.03[°C]
Température 2m	Thermocouple type T avec Tréf#2(Pt100)	Tse2	degC	0.2[°C]
Humidité 2m	Rotronic MP/300	Hse2	%	5[%]
Température 1m	Thermocouple type T avec Tréf#2(Pt100)	Tse1	degC	0.2[°C]
Température sur écran	Thermocouple type T avec Tréf#2(Pt100)	Tseec	degC	0.2[°C]
Température sol, -40 cm	Thermocouple type T avec Tréf#2(Pt100)	Tsess_40	degC	0.1[°C]
Température sol, -70 cm	Thermocouple type T avec Tréf#2(Pt100)	Tsess_70	degC	0.1[°C]
Débit Volumétrique d'eau chauffage	Débitmètre Aquametro Woltman SMH 50	Wsech	Lt	1[%]
Température chauffage entrée	Thermocouple type T avec Tréf#2(Pt100)	TsechE	degC	0.1[°C]
Température chauffage sortie	Thermocouple type T avec Tréf#2(Pt100)	TsechS	degC	0.1[°C]
Condensation verres	Home made	CseV		
Débit Volumétrique stockage	Débitmètre Aquametro Woltman SMH 50	Wsest	Lt	1[%]
Température stockage entrée	Thermocouple type T avec Tréf#2(Pt100)	TsestE	degC	0.1[°C]
Température stockage sortie	Thermocouple type T avec Tréf#2(Pt100)	TsestS	degC	0.1[°C]
Température aéro entrée, eau	Thermocouple type T avec Tréf#2(Pt100)	TseaeE	degC	0.1[°C]
Température aéro sortie, eau	Thermocouple type T avec Tréf#2(Pt100)	TseaeS	degC	0.1[°C]
Température aéro entrée, air	Thermocouple type T avec Tréf#2(Pt100)	TseaaE	degC	0.2[°C]
Température aéro sortie, air	Thermocouple type T avec Tréf#2(Pt100)	TseaaS	degC	0.2[°C]
Humidité rel. aéro entrée, air	Rotronic MP/300	HseaaE	%	5[%]
Humidité rel. aéro sortie, air	Rotronic MP/300	HseaaS	%	5[%]
Pélectrique aéro 1,2	Puissancemètre ABB	PseAero	W	2[%]
Température stockage bas	Thermocouple type T avec Tréf#2(Pt100)	TsestB	degC	0.1[°C]
Température stockage milieu	Thermocouple type T avec Tréf#2(Pt100)	TsestM	degC	0.1[°C]
Température stockage haut	Thermocouple type T avec Tréf#2(Pt100)	TsestH	degC	0.1[°C]
Volume Fog	Débitmètre Aquametro type PMW	DseFog	Lt	3[%]
Puissance de chauffage	Déduit de Wsech, TseaeoE, TsechS	PseCh	kW	7[%]
Puissance de stockage selon boucle cuve à eau	Déduit de Wsest, TsestE, TsestS	PseStPos	kW	7[%]
Puissance de déstockage selon boucle cuve à eau	Déduit de Wsest, TsestE, TsestS	PseStNeg	kW	7[%]
Puissance de stockage selon boucle principale	Déduit de Wsech, TseaeoS, TsechS	PseSt2Pos	kW	7[%]
Puissance de déstockage selon boucle principale	Déduit de Wsech, TseaeoS, TsechS	PseSt2Neg	kW	7[%]
Puissance de stockage selon aéroconvecteurs	Déduit de Wsest, TseaeoE, TseaeoS	PseStAeroPos	kW	7[%]
Puissance de déstockage selon aéroconvecteurs	Déduit de Wsest, TseaeoE, TseaeoS	PseStAeroNeg	kW	7[%]
Humidité abs. aéro entrée, air	Déduit de HseaaE	HAsaaE	daPa	5[%]
Humidité abs. aéro sortie, air	Déduit de HseaaS	HAsaaS	daPa	5[%]

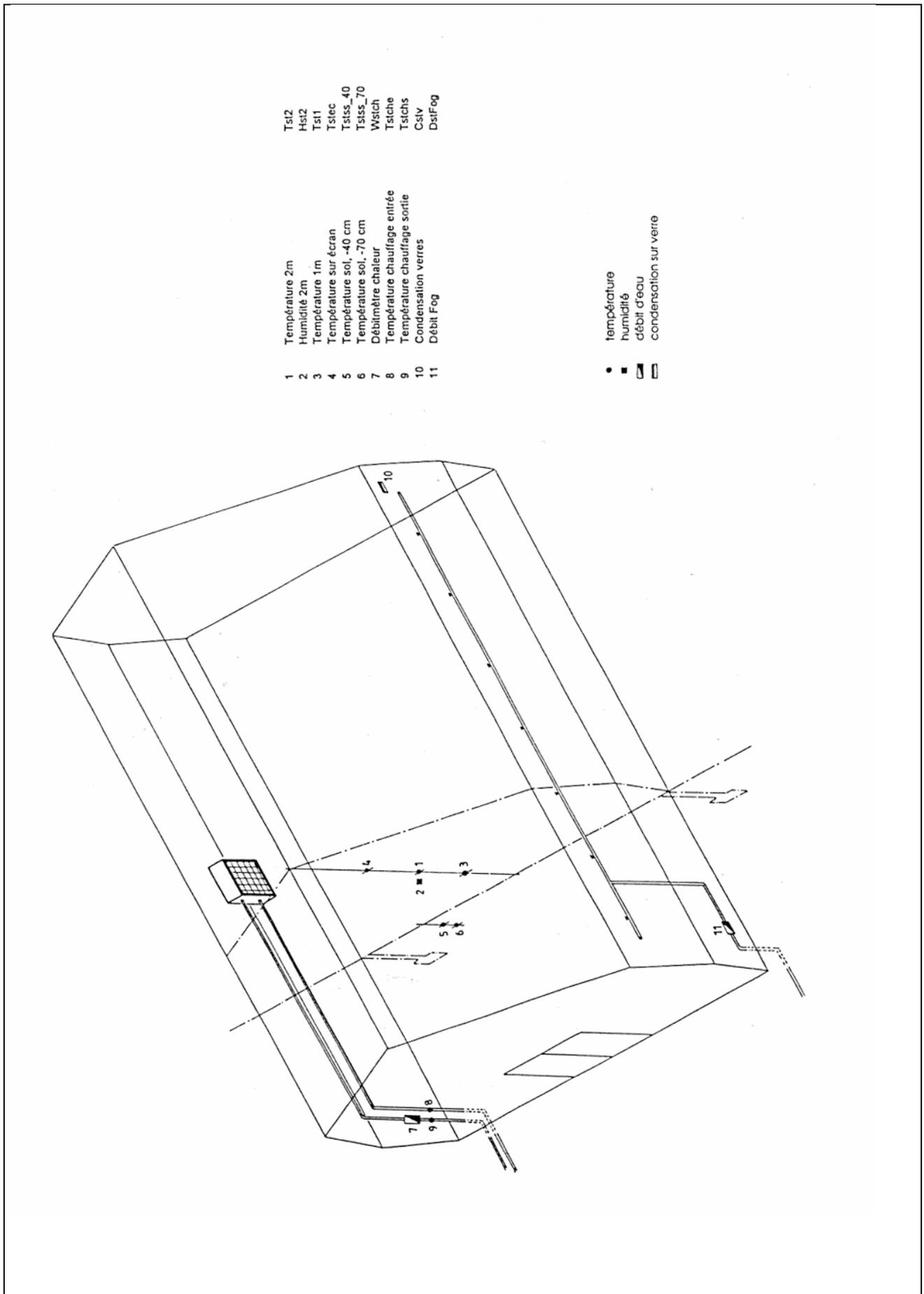


Figure 1 : Système de mesure de la serre témoin.

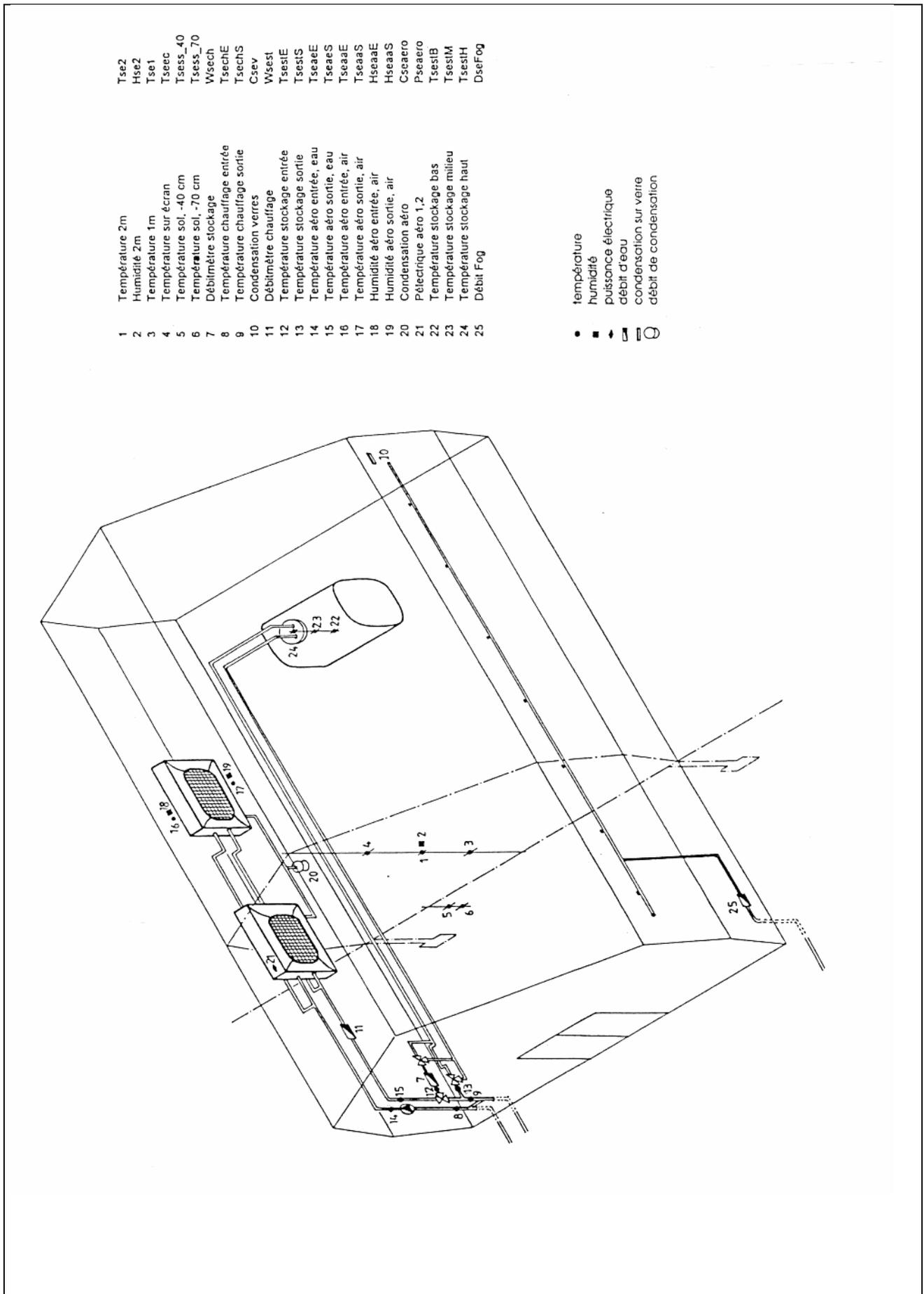


Figure 2 : Système de mesure de la serre à eau.

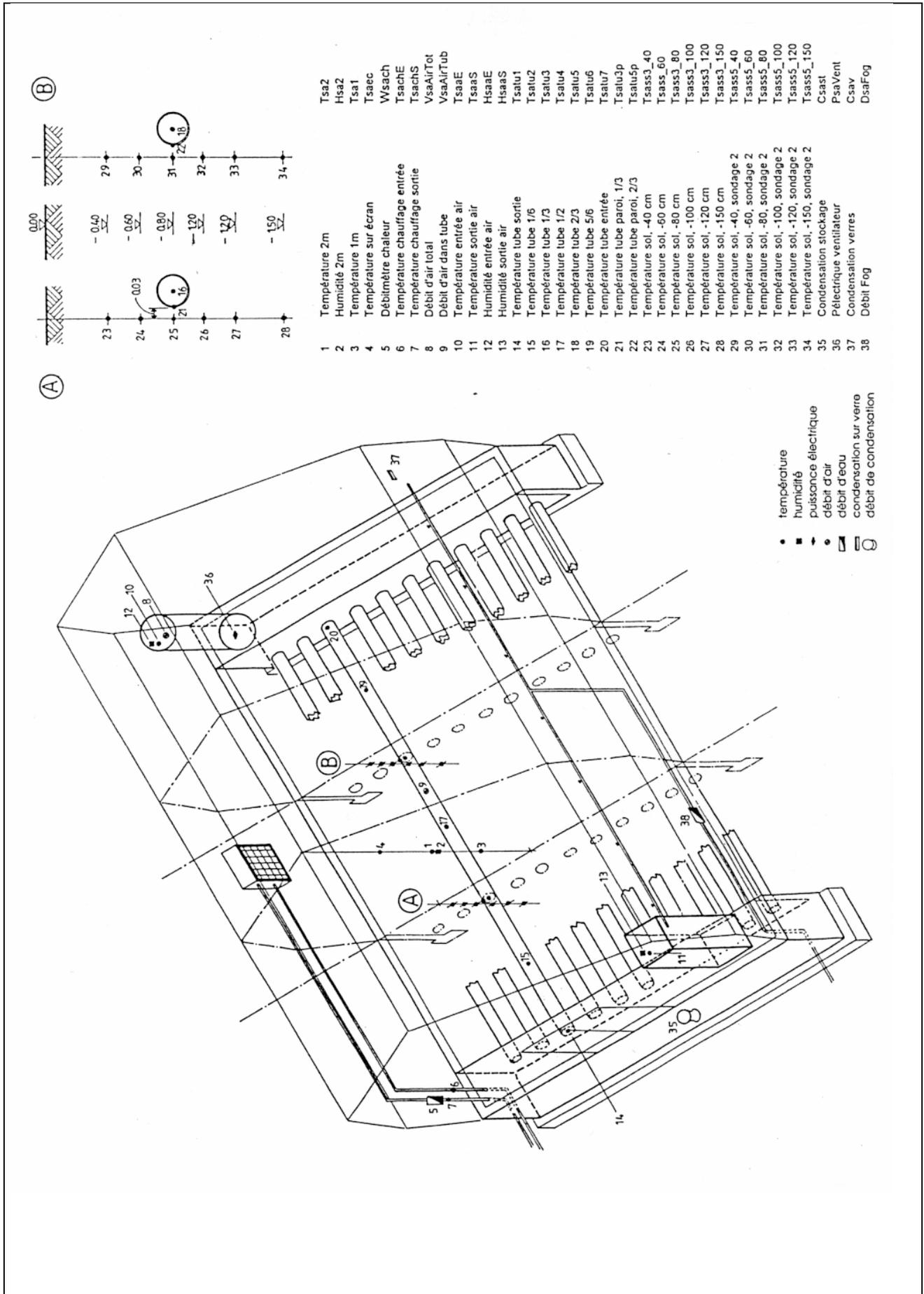


Figure 3 : Système de mesure de la serre à air.

La liste détaillée des sondes (mise en place et étalonnées avec soin par Javier Gil, ancien collaborateur du CUEPE), ainsi que des grandeurs déduites on-line, est la suivante.

Températures

Les mesures de température au niveau des systèmes sont réalisées à l'aide de thermocouples blindés cuivre-constantan (type T). Ces thermocouples sont isolés électriquement sur la jonction chaude avec des gaines rétractables et placés dans des doigts des gants préalablement remplis de graisse thermique pour transistors afin de favoriser un bon contact thermique avec le milieu à mesurer, cela pour la mesure de températures d'eau dans les circuits de chauffage. Chacun de ces thermocouples a été étalonné en utilisant des thermomètres de référence au mercure ayant une précision de 0.01°C et une correction individuelle (instantanée) est effectuée dans le programme d'acquisition.

Les températures d'air sont aussi mesurées à l'aide de thermocouples blindés, la jonction chaude étant chaque fois placée dans une enceinte en aluminium ventilée (avec une vitesse d'air de l'ordre de 2 m/s).

L'ensemble des thermocouples installés dans les serres témoin et à air ont une température de référence commune, l'ensemble des jonctions froides étant logées dans une boîte remplie d'huile de glycérine (isolant électrique et bon conducteur thermique). Les contacts sont réalisés sur un circuit imprimé. Les deux jonctions des thermocouples utilisés pour le calcul d'un flux de chaleur sont disposés à côté l'une de l'autre (5mm) ce qui assure une excellente mesure de la différence de température vue par les jonctions chaudes. De façon identique, une deuxième boîte rassemble l'ensemble des thermocouples de la serre à eau.

La mesure de la température extérieure ainsi que celles des températures de référence pour les thermocouples (jonctions froides) sont réalisées à l'aide de sondes de platine type Pt100. La mesure est réalisée par la méthode de 4 fils et pour la mesure du courant on utilise des résistances de précision (2 ppm/K) qui ont été préalablement étalonnées. Ces sondes Pt100, grâce aux corrections individuelles instantanées (calibrées avec les étalons de 0.01°C de précision) nous permettent d'avoir une précision absolue meilleure que 0.03°C.

En tenant compte, dans les boîtes à huile, des gradients de température pouvant exister entre les jonctions froides et les sondes de référence, la précision absolue des mesures de température est meilleure que 0.1°C. La mesure des ΔT , nécessaire aux calculs de puissances, est quant à elle bien plus précise (de l'ordre du centième de degré) puisque limitée uniquement par la représentativité de la mesure elle-même (par exemple gradient dans le fluide mesuré).

Ensoleillement

Une mesure d'ensoleillement global horizontal a été installée sur place. Cette mesure est réalisée à l'aide d'un solarimètre Kipp&Zonnen CM-11 qui a été calibré par rapport à un pyranomètre étalon régulièrement testé au centre mondial de la météorologie (WMO) à Davos-Suisse. La précision sur cette mesure est de 2%.

Débits d'eau

Les mesures de débits se font avec des débitmètres volumétriques. Pour les mesures des débits d'eau de chauffage on utilise 4 débitmètres mécaniques (avec un système de couplage optique pour l'émission des impulsions) marque Aquametro type Woltmann SMH. Les volumes d'eau utilisés pour la brumisation sont mesurés par 3 débitmètres mécaniques Aquametro type Topaze PMW.

Humidités relatives

Les mesures d'humidité relative se font à l'aide de sondes Rotronic type MP-300 qui sont aussi logées dans des enceintes en aluminium ventilées. Ces sondes possèdent déjà un écran qui protège l'élément sensible des échanges radiatifs (grille métallique très fine). Ces sondes ont été calibrées et testées avec des solutions de chlorure de lithium non saturées qui servent d'étalon d'humidité. Etant donnée la difficulté d'un étalonnage du capteur de température de cette sonde et suite à des observations du temps de réponse, on a décidé de ne pas utiliser la sortie en température de ce capteur. La précision absolue de la mesure d'humidité a été observée (dans les 8 sondes testées) comme étant meilleure que 5% (les différences entre les sondes étant de l'ordre de 2%).

Vitesses et sens d'air

On mesure la vitesse de l'air qui circule dans la cheminée d'entrée de l'échangeur air-terrain ainsi que dans l'un des 24 tubes enterrés dans lesquels il est distribué, les débits correspondants étant calculés séparément à posteriori (voir plus loin). Pour ce type de mesure on utilise les capteurs Schiltknecht Miniair6 équipés d'une tête de lecture de taille très petite et avec une conception qui la rend peu sensible à l'angle formé avec la direction du flux. Ce dernier point est important puisque l'une de nos sondes est "enterrée" et que l'on n'a donc pas de moyen de contrôler son alignement parfait par rapport au flux.

Lors d'essais en laboratoire on a pu confirmer la précision de 2% donnée par le fabricant.

A ces mesures de vitesse s'ajoute une mesure de l'état du flux (stockage/déstockage), qui est lue sur l'automate de régulation: il s'agit là de l'unique couplage, par ailleurs libre d'interférence puisque isolé galvaniquement, entre la chaîne de mesure et la régulation. La valeur instantanée de cette grandeur est de 0 lorsque le système se trouve en phase de stockage, de 1 autrement (phase de déstockage ou phase neutre). La valeur moyennée par 5 minutes, comprise entre 0 et 1, détermine l'état prioritaire pendant les 5 minutes, ainsi que le sens correspondant du flux.

Pluviomètres

On utilise le capteur ARG100 de Campbell pour la mesure du volume d'eau condensée dans l'échangeur air-terrain et pour la mesure de la pluie. A l'origine, la deuxième sonde était destinée à la mesure de la condensation dans un des aéroconvecteurs de la serre à eau. On a préféré l'utiliser pour la mesure de la pluie étant donnée la difficulté d'adapter un système de récolte ou récupération de l'eau condensée dans ces appareils et à cause de l'importance secondaire de cette mesure.

On a testé minutieusement les deux sondes dont on dispose, ce qui nous a permis de vérifier la précision donnée par le fabricant dans le domaine de travail normal (jusqu'à 1.6 litres/heures, correspondant approximativement à une pluie de 30 mm/heures), respectivement de trouver une erreur d'étalonnage d'une d'entre elles (qui a été renvoyée en fabrique pour ré-étalonnage). Pour les débits plus importants qui risquaient de se produire, notre étalonnage a permis la construction d'une fonction réponse qui tient compte de la dégradation de la réponse de ces appareils en fonction du débit (de l'ordre de 8% pour un débit de 6 litres par heure, correspondant approximativement à une pluie de 120 mm/heure).

Puissances électriques

Pour la mesure de puissances électriques consommées par les aérochauffeurs de la serre à eau et le ventilateur de stockage/déstockage de la serre à air, on utilise deux puissance-mètres triphasés de marque ABB et C.BAUER et de classe 0.5 (ce qui signifie une précision meilleure que 2 % dans toute la plage de mesure).

Condensation verres

Une mesure de condensation, basée sur un diviseur de tension actionné par la présence d'eau, était prévue et instrumentée sur les verres de chacune des serres. La mesure, difficile et d'importance mineure, n'a finalement pas été calibrée ni utilisée.

Puissances thermiques

Le calcul des puissances thermiques liées à un circuit d'eau (chauffage des trois serres, stockage et déstockage en cuve à eau) se fait sur la base des mesures de débit et des températures d'entrée/sortie des éléments du circuit en jeu (circuit de chauffage, boucle de stockage/déstockage en cuve à eau, aérochauffeurs)

En ce qui concerne les puissances de stockage/déstockage en cuve à eau, notre système de mesure permet une triple redondance: d'une part par le calcul de la puissance échangée dans les aéroconvecteurs; d'autre part par celle, correspondante, échangée dans la cuve à eau: cette dernière peut se calculer soit avec le débit et les températures d'entrée/sortie de la boucle de stockage/déstockage passant par la cuve à eau, soit avec le débit de la boucle principale, la température de sortie des aéroconvecteurs et la température de sortie de la boucle principale. Afin de bien distinguer les valeurs de stockage et déstockage, qui peuvent se croiser sur un

même pas de temps d'acquisition de 5 minutes, on somme séparément les composantes positives et négatives de ces puissances au cours de chaque pas de temps.

Contrairement au cas des circuits d'eau, les puissances thermiques liées au flux d'air dans l'échangeur sous-terrain de la serre à air se sont fait "à posteriori" et par pas de 5 minutes, raison pour laquelle elles ne figurent pas sur la liste des sondes (tab. 1).

Afin de déterminer les puissances échangées dans les tubes, le débit d'air est tout d'abord déduit des mesure de vitesse, ce qui se fait via une mesure ponctuelle de distribution radiale des vitesses dans la cheminée de captage du flux d'air (distincte selon le sens du flux). Le débit massique se calcule alors via la loi des gaz parfaits. La puissance totale cédée au terrain est alors évaluée par la différence d'enthalpie entre l'air humide à l'entrée et à la sortie de l'échangeur, moins l'enthalpie condensat [Am. Soc. of HVAC, 1989]. La puissance sensible étant déterminée sur la base du débit et des températures d'entrée/sortie, on en déduit la puissance latente.

Humidités absolues:

Afin de pouvoir établir un bilan d'eau dans les systèmes traversés par de l'air humide (tubes enterrés, aéroconvecteurs), les humidités relatives d'entrée/sortie sont converties en humidités absolue, via la pression de saturation, donnée par une fonction polynomiale interne au datalogger.

Mesures de tiers

Les grandeurs acquises à partir de l'automate de régulation DGT correspondent soit à des valeurs mesurées par des sondes qui lui sont propres, soit à des valeurs de consigne, ou encore à des valeurs d'état de la régulation. Contrairement à la chaîne de mesure mise en place par nos soins, celle-ci possède des pannes d'acquisition occasionnelles, de quelques minutes à quelques jours.

Dans le tableau suivant, on retrouve pour chacune de ces grandeurs une description, le code (tel que fourni par DGT, fabricant de l'automate de régulation), la dénomination et l'unité de mesure.

Tableau 2 : Liste des mesures acquises via l'automate de régulation.

DESCRIPTION	CODE	DENOMIN.	UNITE
METEO			
Vent	50	Vent	m/s
Direction vent	51	DirVent	1/2
Température	55	TextDgt	degC
Ensoleillement	56	GsolDgt	W/m2
Luminosité	54	Lum	klux
Luminosité corrigée	4	LumCorr	klux
SERRE TEMOIN			
Température 1,5m	1	T1.5st	degC
Ouverture ouvrant 1	6	Ouv1st	%
Ouverture ouvrant 2	7	Ouv2st	%
Temp. humide 1,5m	10	Thumst	degC
Humidité rel. 1,5m	11	H1.5st	%
Consigne chauffage	90	TstRegCh	degC
Consigne aération	96	TstRegAe	degC
Position du rideau	590	Ridst	%
Temp. départ d'eau primaire	2	Tstprim	degC
Temp. de toile	9	Ttoilest	degC
Jour/Nuit	74	J/Nst	1/0
Vitesse baisse temp. soir	150	VstTneg	degC/h
Vitesse augm. temp. matin	151	VstTpos	degC/h
Diff. temp. chauffage/aér.	301	DTstReg	degC
Temp. jour 1,5m	101	TstJour	degC
Temp. nuit 1,5m	102	TstNuit	degC
Bande-P coté opp. vent pour 100%	326	M2_326	degC
Bande-P coté au vent pour 100%	327	M2_327	degC
SERRE A AIR			
Température 1,5m	1	T1.5sa	degC
Ouverture ouvrant 1	6	Ouv1sa	%
Ouverture ouvrant 2	7	Ouv2sa	%

Temp. humide 1,5m	10	Thumsa	degC
Humidité rel. 1,5m	11	H1.5sa	%
Consigne chauffage	90	TsaRegCh	degC
Consigne aération	96	TsaRegAe	degC
Position du rideau	590	Ridsa	%
Temp. départ d'eau primaire	2	Tsaprim	degC
Temp. de toile	9	Ttoilesa	degC
Jour/Nuit	74	J/Nsa	1/0
Vitesse baisse temp. soir	150	VsaTneg	degC/h
Vitesse augm. temp. matin	151	VsaTpos	degC/h
Diff. temp. chauffage/aér.	301	DTsaReg	degC
Temp. jour 1,5m	101	TsaJour	degC
Temp. nuit 1,5m	102	TsaNuit	degC
Bande-P coté opp. vent pour 100%	326	M3_326	degC
Bande-P coté au vent pour 100%	327	M3_327	degC

SERRE A EAU

Température 1,5m	1	T1.5se	degC
Ouverture ouvrant 1	6	Ouv1se	%
Ouverture ouvrant 2	7	Ouv2se	%
Temp. humide 1,5m	10	Thumse	degC
Humidité rel. 1,5m	11	H1.5se	%
Consigne chauffage	90	TseRegCh	degC
Consigne aération	96	TseRegAe	degC
Position du rideau	590	Ridse	%
Temp. départ d'eau primaire	2	Tseprim	degC
Temp. de toile	9	Ttoilese	degC
Jour/Nuit	74	J/Nse	1/0
Vitesse baisse temp. soir	150	VseTneg	degC/h
Vitesse augm. temp. matin	151	VseTpos	degC/h
Diff. temp. chauffage/aér.	301	DTseReg	degC
Temp. jour 1,5m	101	TseJour	degC
Temp. nuit 1,5m	102	TseNuit	degC
Bande-P coté opp. vent pour 100%	326	M4_326	degC
Bande-P coté au vent pour 100%	327	M4_327	degC

Validation des mesures par redondance

Afin de vérifier la robustesse des mesures, nous avons en fin d'expérience effectué une série de validation par comparaison des grandeurs redondantes.

Météo

Un premier test, en valeurs journalières, consiste à comparer nos données météo à celles de la régulation (fig. 4).

Pour la température l'équivalence apparaît comme excellente. Pour l'ensoleillement la corrélation est satisfaisante, quoique un facteur d'environ 2/3 existe entre la mesure de l'automate de régulation et la nôtre. Ceci est dû au fait que nous mesurons le spectre complet, alors que la régulation ne prend que le spectre visible, utile aux plantes.

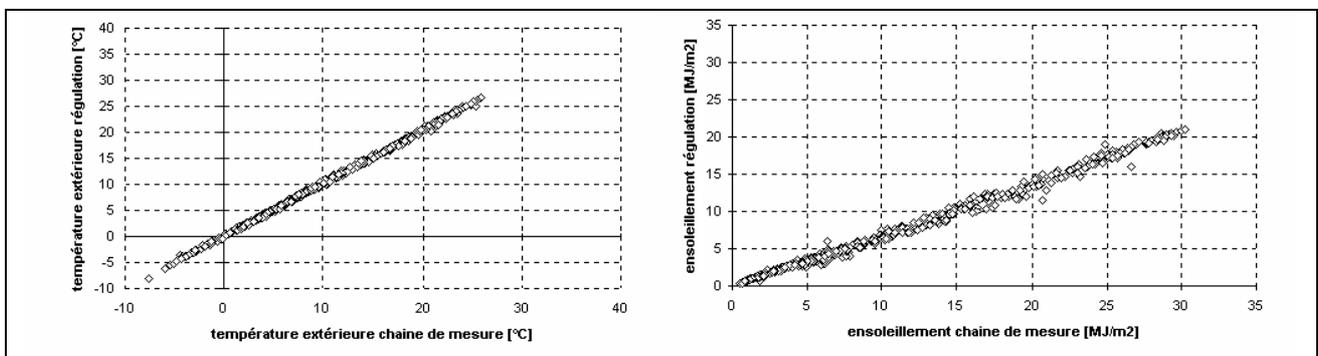


Figure 4 : Météo prise par la chaîne de mesure et par l'automate de régulation, valeurs journalières.

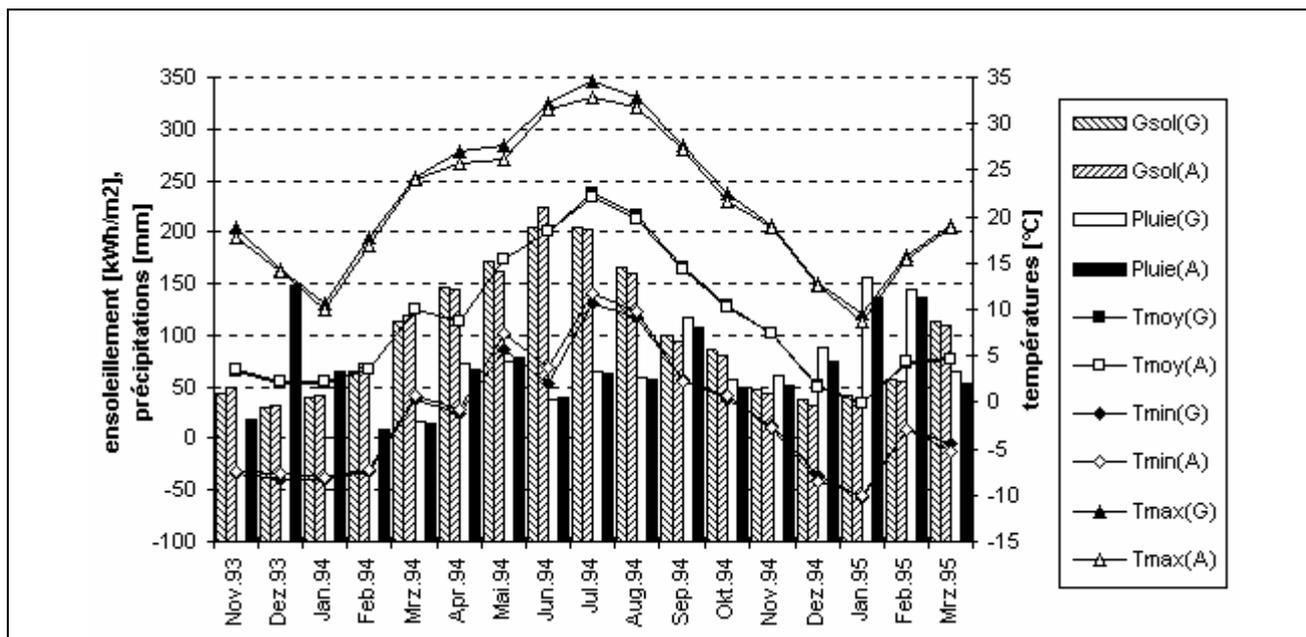


Figure 5 : Météo de la chaîne de mesure et du réseau ANETZ, valeurs mensuelles.

Une deuxième vérification consiste à comparer nos mesures aux mesures mensuelles du réseau ANETZ, compilées par la Station fédérale de recherche agronomique de Changins (fig. 5). On remarque une bonne équivalence des températures moyennes (moins de 0.5°C d'écart mensuel, 0.05°C d'écart sur les 17 mois) et les ensoleillements (moins de 7 kWh/m² d'écart mensuel, sauf en juin 94, et moins de 0.5 kWh/m² d'écart sur les 17 mois, correspondant à moins de 0.5% d'écart relatif). Les températures extrêmes, qui sont dans notre cas des moyennes par 5 minutes, sont plus nerveuses que les moyennes horaires du réseau ANETZ (jusqu'à 1.8°C d'écart mensuel). Seule la mesure de pluie, secondaire pour l'analyse, est nettement plus forte que celle du réseau ANETZ (en moyenne 6 mm d'écart mensuel, soit 9% d'écart sur les 13 mois disponibles à la comparaison).

Climats intérieurs

Comme pour la météo, nos mesures de climats intérieurs des serres (à 2m) peuvent être comparées, en moyenne journalière, avec celles en provenance de l'automate de régulation (à 1.5m). Si la corrélation en température est excellente, celle en humidité relative est bien plus dispersée (fig. 6). Cette dispersion serait peut-être légèrement corrigée par une comparaison en humidité absolue, mais elle relève avant tout d'un gradient en humidité pouvant exister lors de la brumisation (voir plus bas la comparaison entre climat dans la serre à air et à l'entrée du stock), ainsi que d'un fonctionnement parfois erroné des sondes de régulation qui fonctionnent sur le principe de la température humide. Ces sondes doivent donc régulièrement être approvisionnée en eau, un manque d'humidification conduisant à une surestimation de l'humidité relative, comme cela est observé ici.

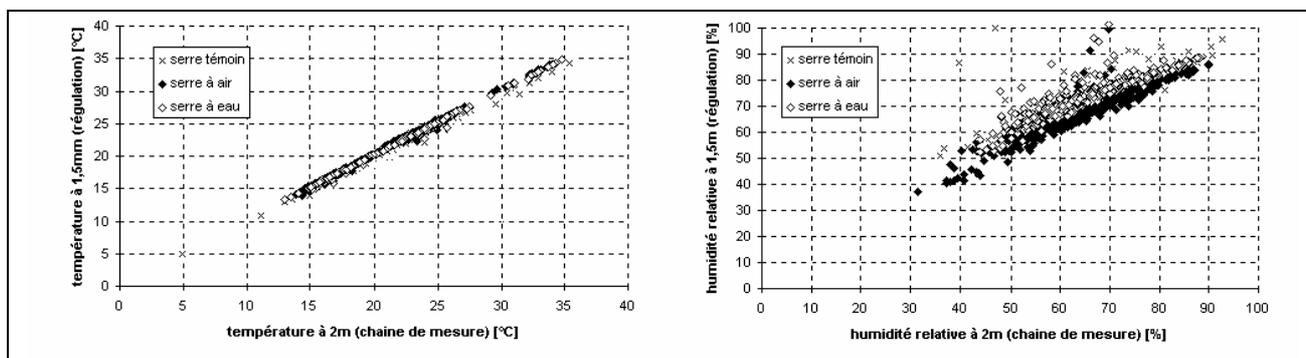


Figure 6 : Climats intérieurs des serres prises par la chaîne de mesure et par l'automate de régulation, valeurs journalières.

Serre à eau, puissances de stockage/déstockage

Nous testons ici l'équivalence des trois décomptes possibles pour la chaleur fournie/soutirée au stock à eau. Vu la panne du débitmètre W_{sest} (boucle de stockage) jusqu'à fin mai 94, cette concordance est primordiale. Afin de pouvoir remplacer les valeurs de stockage/déstockage ainsi devenues caduques par les valeurs correspondantes calculées sur la boucle principale, nous représentons ci-dessous, hors période de panne, la relation entre les intégrales journalières des unes et des autres (fig. 7). Nous distinguons pour cela les stockage et déstockage "purs" de leur homologue "intempestifs" (mise en route erronée de la boucle de stockage/déstockage en période de chauffage, suite à surchauffe ponctuelle de la serre).

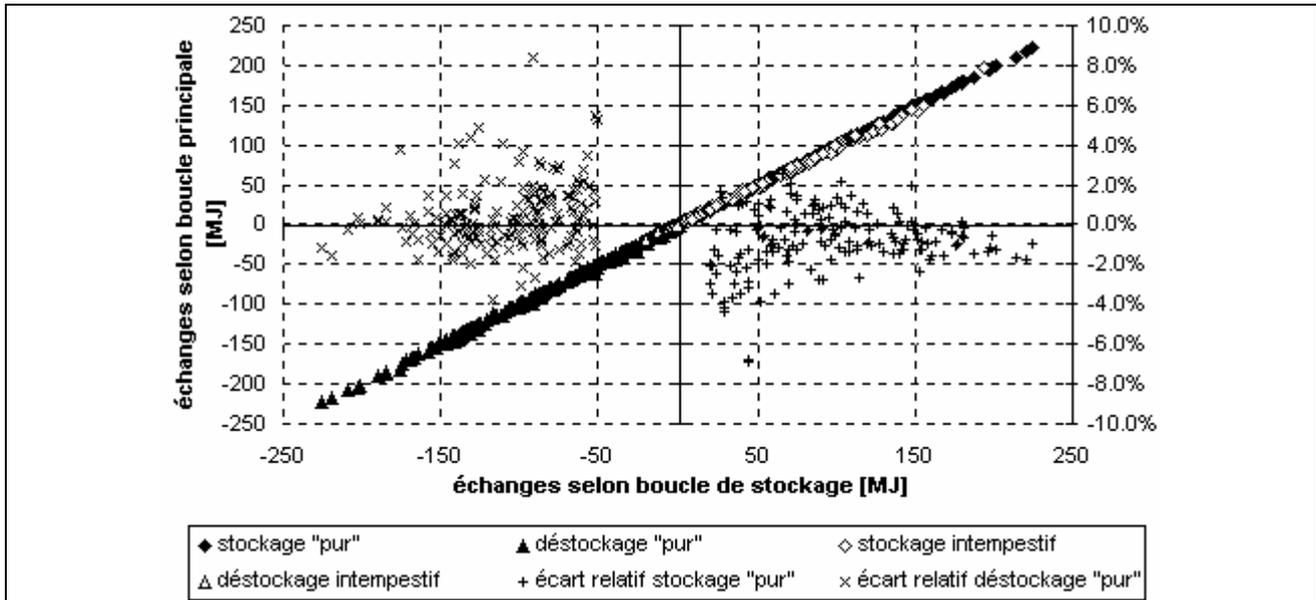


Figure 7 : Puissances de stockage/déstockage de la serre à eau décomptées selon la boucle principale ou secondaire, valeurs journalières.

En mode de stockage/déstockage « pur » la corrélation est excellente ainsi que le montrent les écarts relatifs: ils sont centrés et inférieurs à 5% pour des sommes journalières supérieures à 20 MJ (stockage), respectivement 50 MJ (déstockage). En bilan annuel cet écart relatif est dans les deux cas inférieur au pourcent (cf. tableau ci-dessous), ce qui est extrêmement satisfaisant vu des faibles écarts de température entrée/sortie sous-jacents à la mesure: en moyenne annuelle 0.69 K lors du stockage, 0.52 K lors du déstockage, avec des moyennes journalières se limitant dans les deux cas à 1.5 K. Les écarts entre débitmètres étant eux-même de l'ordre du pourcent (comme indiqué par le fabricant et vérifié ponctuellement hors régime transitoire, lorsque les vannes trois voies sont complètement ouvertes), on en déduit une erreur de mesure sur les ΔT inférieure au pour-cent, soit inférieure à 0.01 K, comme prévu par l'étalonnage. En mode intempestif la corrélation est bien moins bonne, indiquant clairement un régime transitoire, marqué par une inhomogénéité du système.

Tableau 3 : Corrélations entre puissances thermiques selon boucle principale et boucle de stockage (19/5/94 au 31/3/95).

état	ΔT K	débit kW	puissance MJ/jour	énergie MJ/jour	écart abs. ¹⁾ MJ/jour	écart rel. ¹⁾
stockage "pur"	0.69	5.60	4.59	53.8	-0.42	-0.78%
déstockage "pur"	0.52	5.74	4.02	66.3	-0.46	0.69%
stockage intempestif	3.27	3.45	13.07	24.5	-0.90	-3.67%
déstockage intempestif	0.06	3.56	2.00	1.2	0.07	-5.61%

1) boucle principale - secondaire

L'excellente corrélation nous a finalement permis, lors des bilans, de substituer le décompte temporellement défectueux calculé selon la boucle de stockage par celui calculé selon la boucle principale.

Serre à air, stockage/déstockage par courant d'air non contrôlé

Dans le cas de la serre à air, il est important de vérifier qu'il n'y ait pas eu de la ventilation non-contrôlée dans les tubes, entraînant des échanges thermiques non comptabilisés. De tels échanges pourraient avoir lieu dans deux cas : soit lors de phases transitoires (arrêt/enclenchement du ventilateur en début/fin de pas de temps de 5 minutes, que l'on détecte par analyse de l'état au pas de temps précédent/suivant) ; soit encore par un courant d'air naturel, sans mise en marche du ventilateur. Ce dernier cas se subdivise lui-même en trois sous-cas: 1) $V_{saAirTot} < 0$ et $V_{saAirTub} < 0$ lorsqu'on a affaire à une situation de thermocirculation pouvant partiellement vidé le stock ; 2) $V_{saAirTot} < 0$ et $V_{saAirTub} = 0$ lorsque le courant d'air est un courant convectif à l'intérieur de la cheminée d'accès au stock, exposée au soleil, ce qui n'affecte en principe pas le stock ; 3) $V_{saAirTot} = 0$ et $V_{saAirTub} < 0$ lorsqu'il s'agit d'une erreur de mesure.

Tableau 4 : importance relative des différents types de courants d'air non-comptabilisés qui traversent le stock en terre.

Type de courant d'air	Fraction énergétique	Fraction temporelle
transitoire	0.01%	4.88%
thermocirculation	0.00%	0.05%
convection	0.03%	0.34%
erreur	0.00%	0.05%
total	0.04%	5.32%

Nous avons analysé l'apparition de ces cas tout au long de la période active de l'expérience (avril 94 à mars 95, à l'exception du 8 avril 94 où l'étalonnage des débits de vitesse a faussé les mesures) et comparés les échanges qui leur correspondent à ceux obtenus lors des périodes de stockage/déstockage standards. Cette dernière comparaison s'est faite par l'intermédiaire d'une grandeur cumulative unique, définie comme la somme en valeurs absolues des composantes (positives et négatives, sensibles et latentes) de l'échange. Cette analyse (tab. 4) montre clairement que ces phénomènes sont négligeables au niveau de l'énergie mise en jeux. Soulignons à ce propos que la fraction temporelle présentée ici correspond aux nombre de pas de temps (par 5 minutes) pendant lesquels le phénomène en question est apparu, ce qui dans le cas du régime transitoire ne signifie pas qu'il ait eu lieu tout au long du pas de temps, bien au contraire.

Serre à air, relation entre débits dans la cheminée d'entrée et dans les tubes enterrés

Quoique de peu d'importance pour établir les bilans énergétiques, il nous a semblé intéressant d'établir la relation entre débits d'air (respectivement vitesses) mesurés dans la cheminée d'entrée et dans l'unique tube appareillé du stock à air, ainsi que de vérifier leur congruence tout au long de l'expérience.

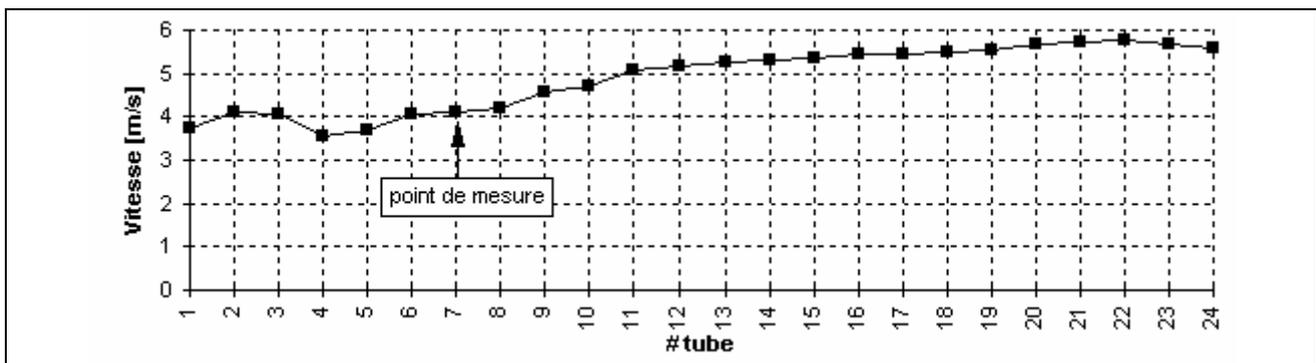


Figure 8 : Etalonnage de la distribution de vitesse dans le registre de tubes enterrés.

Une première relation (fig. 8) se déduit d'un étalonnage effectué le 8 avril 94, au cours duquel la distribution de vitesse entre les différents tubes a été mesurée pour un flux d'air total constant (4.57 m/s correspondant à 1.86 m³/s). En supposant le profil de vitesse à l'intérieur de chaque tube égal à celui du tube normalement appareillé, on en déduit les débits individuels, dont la somme (1.81 m³/s) est à 3% près égale au débit mesuré dans la cheminée d'entrée. Le rapport entre débit total et débit dans le tube appareillé se situe ainsi à 29.5, soit un peu plus que le nombre de tubes enterrés, qui est de 24.

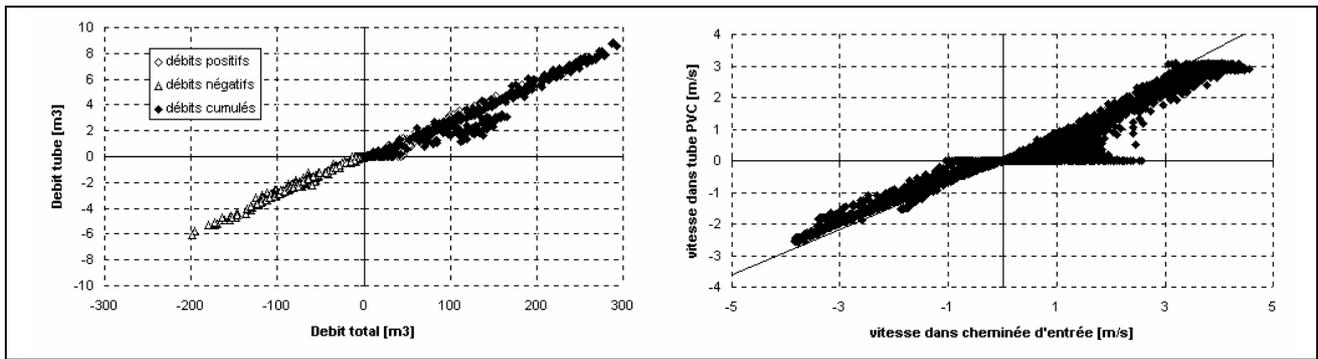


Figure 9 : Relation entre débits (somme journalière) et vitesse (moyenne horaire) dans la cheminée d'entrée et dans le tube PVC appareillé.

Une analyse à posteriori des valeurs journalières de ces débits (fig. 9) montre une relation très stable, hormis au printemps 94, où le flux d'air a été bloqué dans un état unidirectionnel : ce phénomène pourrait dès lors provenir d'une simple saleté encrassant légèrement le débitmètre du tube et évacuée par simple retour au contreflux. Une régression linéaire forcée effectuée sur l'ensemble des points se situant hors de cette période indique cependant un rapport de 35.6 (en sens positif) respectivement 34.4 (en sens négatif) entre débit total et débit dans le tube, ce qui indique une répartition de flux entre les tubes différente que celle de l'étalonnage du 8 avril 94. Cette différence pourrait en fait provenir de la vitesse de coupure des anémomètres. A faible néanmoins mesurable vitesse dans la cheminée d'air peut en effet correspondre une mesure "nulle" dans le tube enterré. Lors de régime transitoire (enclenchement/déclenchement du ventilateur) ce effet porte également conséquence sur les mesures à relativement haute vitesse, ainsi que le confirme quelques analyses ponctuelles. Nous représentons ici ce phénomène par la relation en moyenne horaire des deux mesures de vitesse (fig. 9). On y voit bien que si la vitesse dans le tube chute systématiquement à zéro pour une faible vitesse totale, elle se situe, même à haut régime, régulièrement en dessous de sa valeur théorique, donnée par l'étalonnage du 8 avril.

Serre à air, climat dans la serre et à l'entrée du stock

Les températures et humidités mesurées dans la serre à air sont en principe égales à celles mesurées à l'endroit où le flux d'air entre dans le stock (dans la cheminée « d'entrée » du stock, au fond de la serre, lorsque le flux est positif, dans celle « de sortie », à l'avant de la serre, lorsque le flux est négatif). Ce principe permet de vérifier la consistance des mesures d'entrée/sortie du stock, nécessaires au calcul des puissances d'échange. A cet effet nous présentons dans les figures ci-dessous les corrélations pour les températures et humidités absolues, en moyennes journalières.

Si la corrélation en température est bonne, on s'aperçoit que les humidités absolues présentent elles une dispersion relativement importante, surtout dans le cas du flux positif. Ce phénomène provient vraisemblablement du système de brumisation, dont les gouttelettes en suspension dans l'air n'ont pas le temps de s'évaporer avant leur aspiration par le ventilateur, ainsi que cela est explicité dans l'analyse des bilans énergétiques.

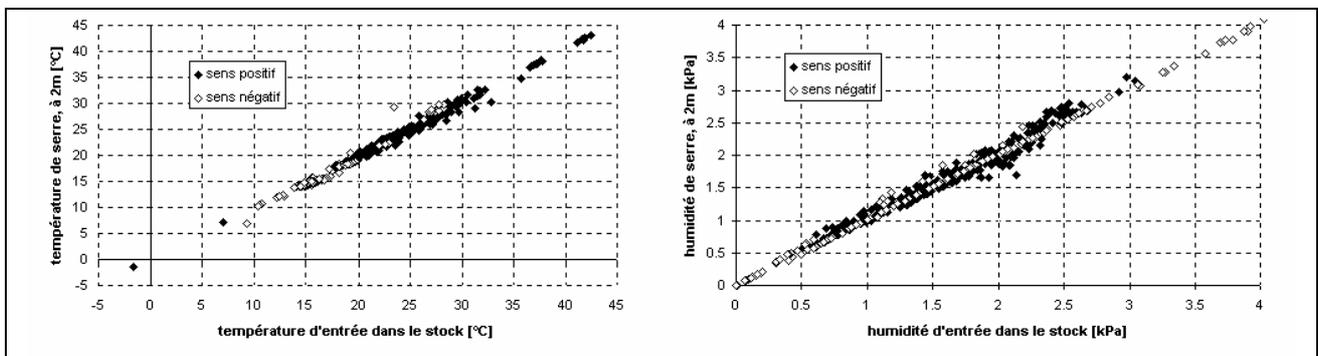
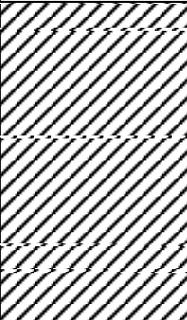
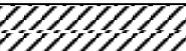
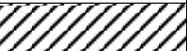


Figure 10 : corrélations en moyennes journalières entre les températures et humidités à l'entrée du stock en terre et au centre de la serre à 2m de hauteur.

ANNEXE 2
CALENDRIER

Tableau 1 : vue synoptique des phases de l'expérience.

date	périodes	sens des flux d'air	culture	consignes	divers	
nov 93	1) test	1) SE:normal SA:double	1) mufliers	1) 18/18/20	1)	
déc 93				2) 16/16/20		
jan 94	2) comparaison serres				3) 4)	
fév 94					5) 6) 7)	
mar 94					8)	
	3) stockage printemps	2) SE:inversé SA:négatif 3) SE:inversé SA:positif	2) concombres	3) 23/21/26	9)	
avr 94				4) 23/21/28	10) 11) 12)	
				5) 23/21/30	13) 14) 15)	
mai 94				6) 22/19/30	16)	
				7) 22/19/28		
jui 94				8) 20/18/24		
					17) 18)	
				4) fluctuation libre	4) SE:normal SA:double	
jui 94	5) stockage été- automne		3) mufliers	11) 18/18/22	19)	
aoû 94						
sep 94						
oct 94						20) 21)
nov 94				6) stockage hiver		4) mufliers
déc 94	13) 16/16/18 14) 14/16-10/20 15) 16/14/20					
jan 95						
fév 95	16) 16/14/22					
mar 95						

Listes datées des périodes et évènements

périodes:

<u>no</u>	<u>date</u>	<u>description</u>
1)	1.11.93 - 22.12.93	test fonctionnement stocks
2)	23.12.93 - 23.3.94	comparaison serres (stocks hors service)
3)	24.3.94 - 20.6.94	stockage printemps
4)	21.6.94 - 6.7.94	fluctuation libre
5)	7.7.94 - 28.10.94	stockage été-automne
6)	29.10.94 - 13.3.95	stockage hiver

sens des flux d'air:

<u>no</u>	<u>date</u>	<u>sens des flux d'air</u>
1)	1.11.93 - 22.12.93	SE,SA: flux normal
2)	24.3.94 - 8.4.94	SE: flux inversé, SA: flux bloqué négatif
3)	9.4.94 - 20.6.94	SE: flux inversé, SA: flux bloqué positif
4)	21.6.94 - 31.3.95	SE,SA: flux normal

cultures:

<u>no</u>	<u>date</u>	<u>type</u>
1)	1.11.93 - 4.3.94	mufliers
2)	11.3.94 - 18.6.94	concombres
3)	7.7.94 - 6.10.94	mufliers
4)	29.10.94 - 9.3.95	mufliers

consignes:

<u>no</u>	<u>date</u>	<u>chauffage jour/chauffage nuit/aération jour</u>
1)	1.11.93 - 16.11.93	18/18/20
2)	17.11.93 - 10.3.94	16/16/20
3)	11.3.94 - 23.3.94	23/21/26
4)	24.3.94 - 4.4.94	23/21/28
5)	5.4.94 - 25.4.94	23/21/30
6)	26.4.94 - 6.5.94	22/19/30
7)	7.5.94 - 25.5.94	22/19/28
8)	26.5.94 - 22.6.94	20/18/24
9)	23.6.94 - 28.6.94	22/22/45 (fluctuation libre)
10)	29.6.94 - 6.7.94	22/22/35 (fluctuation libre)
11)	7.7.94 - 3.11.94	18/18/22
12)	4.11.94 - 28.11.94	18/18/20
13)	29.11.94 - 5.12.94	16/16/18
14)	6.12.94 - 13.12.94	14/16-10/18 (différentiel jour-nuit: 10-18h:14°C, 18-4h:16°C, 4-10h:10°C)
15)	14.12.94 - 17.1.95	16/14/20
16)	18.1.95 - 13.3.95	16/14/22

divers:

<u>no</u>	<u>date</u>	<u>description</u>
1)	22.11.93	panne chauffage
2)	7.12.93	changement codes de régulation 991,992,998,564
3)	2.01.94	chute températures serres (neige)
4)	4.01.94	SE: changement temporisation chauffage (codes 191,192)
5)	1.02.94	SE: débranchement des mesures de température, humidité, condensation du flux d'air dans les aérochauffeurs
6)	1.02.94	étanchéisation des boîtes de connexions de la chaîne de mesure
7)	10.02.94	mise en place de la mesure de pluie
8)	4.03.94	SE: inversion sens rotation aérochauffeurs
9)	14.03.94	SE: montage caissons aérochauffeurs (sans gaines de dist.)

- 10) 24.3.94 - 31.3.94 déplacement temporaire des sondes de température de 1m à 1.5m (comparaison avec sondes de l'automate de régulation)
- 11) 31.03.94 panne chauffage
- 12) 4.04.94 chute températures serres (neige)
- 13) 8.04.94 SA: étalonnage distribution flux dans registre souterrain
- 14) 12.04.94 SE,SA: pose gaines de distribution
- 15) 27.04.94 SA: renforcement étanchéité canal SA
- 16) 4.05.94 SA,SE: changement codes de régulation 801-809
- 17) 9.06.94 SE: mesure nocturne (décrochement à grande vitesse des aérochauffeurs inversés)
- 18) 20.06.94 SE,SA: démontage caissons (SE), couvercle (SA) et gaines de distribution, rétablissement des sens naturels de ventilation
- 19) 9.07.94 SE: inversion sondes TseaeE et TsechE (travail terminé le 11/8)
- 20) 12.10.94 mesures étanchéité
- 21) 27.10.94 ST: inondation

ANNEXE 3

MESURE D'ETANCHEITE DES SERRES

Date

12 octobre 1994

Participants

J.M. Gilloz, P. Hollmuller, P. Jaboyedoff, B. Lachal, E. Pampaloni, A. Reist

Méthode

Pour chacune des serres on mesure la différence de pression dP_{ext} entre l'extérieur et l'intérieur de la serre ainsi que la différence de pression par effet Venturi dP_{ven} entre l'extérieur et l'intérieur de la buse du ventilateur. Le ventilateur étant calibré, on déduit de cette deuxième mesure le débit d'air v . L'étanchéité à l'air est donnée par la relation

$$v=U \cdot dP_{ext}^n$$

où U et n sont déterminés par régression linéaire. On caractérise alors chacune des serres par son comportement à une différence de pression de 50 Pa, à savoir par son débit de fuite v_{50} , son taux de renouvellement d'air n_{50} et sa surface équivalente S_{eq50} . Cette dernière s'obtient par la relation

$$S_{eq50}=v_{50} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{2 \cdot 50}}$$

où ρ est la masse volumique de l'air.

Matériel

Ventilateur calibré, fausse porte et appareils de mesure du LESO.

Mesures:

- sur la serre à eau (MD4), une série de mesure avec la petite buse (diamètre 222mm) qui n'a pas permis de dépasser les 15 Pa et deux séries avec la buse moyenne (diamètre 353 mm), avec et sans écran thermique.
- sur les serres témoin (MD2) et à air (MD3) une seule série de mesure avec la buse moyenne (diamètre 353 mm), sans écran thermique.

Résultats

	U *	ln(U) *	n	v_{50}	n_{50}	S_{eq50}
	m ³ /h			m ³ /s	h ⁻¹	m ²
Serre témoin	1699	7.44	0.55	1.16	9.8	0.13
Serre à air	2008	7.61	0.56	1.40	11.9	0.16
Serre à eau	1950	7.58	0.47	1.16	9.8	0.13
” , avec écran	1859	7.53	0.51	1.18	10.1	0.13
” , petite buse	1871	7.53	0.55	1.27	10.8	0.14

* Pour dP_{ext} en mmH₂O et v en m³/h

Conclusions

L'étanchéité à l'air est semblable pour les serres témoin et à eau (identique à 50 Pa). La serre à eau est plus perméable (+20% à 50 Pa), ce qui s'explique par son accès au canal technique. L'écran thermique n'a pas d'effet sur l'étanchéité des serres.

ANNEXE 4
ANALYSE DU SOL

Demandeur

A.Reist, D. Pivot

Prélèvement

7 juillet 1995, J.A. Neyroud

Conditions

La serre MD4 des Fougères est destinée à des essais liés au transport de chaleur. Le sol est composé de sable apporté sur une épaisseur de 70 cm. On n'a pas pu prélever d'échantillons en cylindres représentatifs de cette épaisseur, en raison de la sécheresse excessive du sable, qui rendait impossible tout travail en milieu non perturbé. Seule une petite surface (entrée droite) présentait des caractéristiques d'humidité permettant un prélèvement en cylindres.

On a donc prélevé:

- 6 cylindres de sol "non perturbé" à l'entrée de la serre, prfd 5-10 cm
- 4-5 kg de terre en vrac, prfd 0-30 cm, avec laquelle on a plus tard reconstitué des échantillons en cylindres (sol "reconstitué").

Relations de poids

	Poids frais g/100 cc	Poids sec g/100 cc	Dens. app.	Humidité % pds	% vol
Cylindres non perturbés	182.2	169.2	1.69	7.7	13.0
Cylindres reconstitués	151.7	150.0	1.50	1.2	1.7

Le sol de la serre est très sec, sauf à l'entrée. La différence entre cylindres non perturbés et cylindres reconstitués montre toute l'importance du "bon" prélèvement. Pour bien interpréter, il ne faudrait, en toute logique, raisonner que sur la sol non perturbé.

Relations de porosité

	Porosité au prélèvement % vol	Porosité au totale % vol
Cylindres non perturbés	26.0	36.7
Cylindres reconstitués	---	41.7

La porosité au prvt des cylindres reconstitués n'est pas mesurée (sol sec!). La porosité au prélèvement est élevée La porosité totale est en revanche basse.

Relations Hydrodynamiques

a) perméabilité

	Coeff. de perméabilité	
	cm/sec	cm/h
Cylindres non perturbés	$3.7 \cdot 10^{-3}$	13.3
Cylindres reconstitués	$7.9 \cdot 10^{-3}$	28.4

La différence est relativement faible, les deux valeurs témoignent d'une perméabilité dite "normale".

b) désorption d'eau

	Porosité au prélèvement % vol	Porosité au totale % vol
Teneur en eau à 0.02 bar	36.0	39.7
Teneur en eau à 0.05 bar	32.7	32.6
Teneur en eau à 0.10 bar	23.8	26.8
Teneur en eau à 0.33 bar	21.1	22.8
Teneur en eau à 1.00 bar	19.3	19.3
Teneur en eau à 5.00 bar	4.0	3.6
Teneur en eau à 10.0 bar	2.7	2.4
Teneur en eau à 15.0 bar	2.4	2.2
Réserve facilement utilisable (0.1 – 1.0 bar)	4.5	7.5
Réserve totale utilisable (0.1 – 15.0 bar)	21.4	24.6

Les mesures sur le sol reconstitué sont moins fiables que celles sur le sol non perturbé. La limite inférieure de l'eau facilement utilisable prête parfois à discussion. Certains auteurs, particulièrement en cult. maraîchère et en sylviculture, choisissent une limite plus basse, par exemple 0.05 bar.

ANNEXE 5

LE LOGICIEL HORTICERN

1. Présentation du logiciel

Dans le cadre de sa politique de l'énergie, le CERN décida en 1981 de construire une serre pilote en verre, chauffée avec un de ses rejets thermiques (eau tiède à 20-30 °C). Une expérience pluridisciplinaire y fut menée de 1982 à 1988 (BOURGEOIS et al, 1986; REIST et al, 1989). A cette occasion, la modélisation du comportement thermique des serres a fait l'objet d'une thèse (JOLLIET, 1989) dont est dérivé le logiciel d'application HORTICERN (JOLLIET et LERESCHE, 1989).

A partir des données caractérisant le climat, la serre et ses conditions d'utilisation, le logiciel HORTICERN calcule séparément les besoins thermiques bruts et l'énergie solaire captée dans la serre. Avec ces valeurs, il calcule ensuite la fraction de l'énergie solaire captée qui est effectivement utile au chauffage. L'énergie rejetée lors des périodes de surchauffe est également calculée, ainsi que la fraction potentiellement récupérable. Les besoins nets d'énergie auxiliaire s'obtiennent en déduisant l'énergie solaire utile des besoins totaux. La consommation d'énergie primaire se calcule comme le rapport des besoins nets divisés par le rendement global de l'installation de chauffage (fig.1).

Le calcul de l'énergie potentiellement récupérable se base sur les considérations suivantes: "En comparant l'énergie rejetée à l'énergie auxiliaire consommée (pour couvrir les besoins nets), il est possible de fixer une limite supérieure à la quantité d'énergie potentiellement récupérable au moyen d'un système de stockage a court terme. Si l'on écarte l'hypothèse d'un stockage saisonnier, le calcul doit s'effectuer au niveau du mois" (BOURGEOIS et al, p. 53).

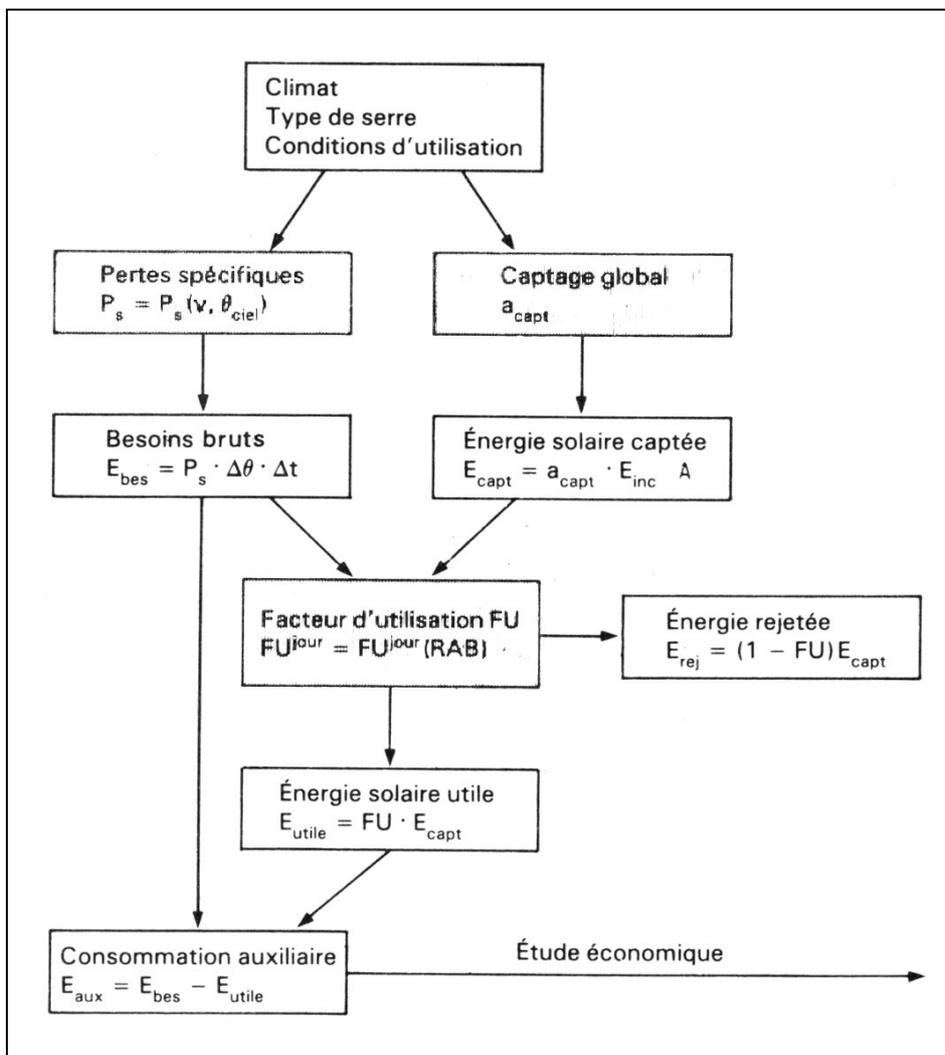


Figure 1 : Schéma de principe du calcul de la consommation auxiliaire (Jolliet, 1989).

La figure 2 montre l'évolution de l'énergie récupérable tout au long d'une période de chauffage, durant l'expérience à la serre pilote du CERN. On constate que de l'énergie est rejetée durant toute la période à l'exception du mois de janvier, et que la fraction récupérable pourrait assurer intégralement les besoins nets d'énergie auxiliaire en avril, mai, juin et octobre, partiellement en février, mars, novembre et décembre. Pour un stockage journalier, les comparaisons doivent se faire jour par jour et il faut noter que l'énergie récupérable ne diminue que de 5% par rapport au potentiel mensuel; un stockage journalier suffit donc pour récupérer la quasi totalité du potentiel mensuel.

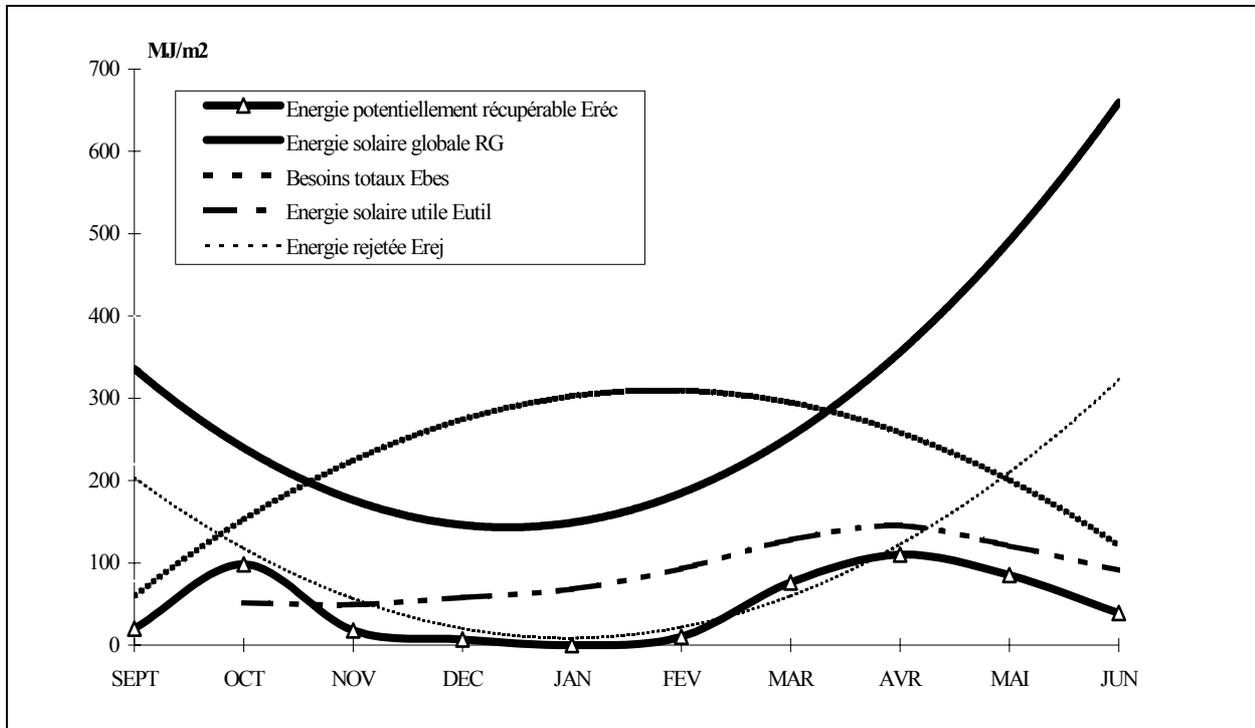


Figure 2 : Evolution de l'énergie solaire incidente (RG), des besoins totaux ainsi que de l'énergie solaire utile (FU), rejetée (Erej) et potentiellement utilisable (Erec) (tendances, d'après JOLLIET 1989)

2. Economie énergétique liée au profil de la température.

Les systèmes de chauffage influencent la consommation énergétique du fait des profils verticaux de température qu'ils engendrent. Le calcul des pertes thermiques s'effectue à partir de la température de l'air à 1.5 m au dessus du sol. La prise en compte d'un système particulier de chauffage revient donc à corriger cette température de référence en fonction du profil engendré par l'échangeur de chaleur considéré.

Dans une serre, le chauffage est régulé en fonction de la température de l'air et c'est la température à la hauteur déterminante pour la croissance, qui doit être régulée à la valeur désirée par les agronomes.

Deux cas sont envisagés:

a) Des cultures hautes dont la hauteur déterminante (zone de croissance) est voisine de 1,5m; la température consignée et la température réelle dans la zone de croissance sont égales quel que soit le type d'échangeur de chaleur (par contre, la température au niveau du sol sera inférieure en cas de distribution de chaleur par aéroconvecteurs). La sonde de mesure de la température pour la régulation doit se trouver à 1,5 m, ce qui est le cas standard.

b) Des cultures basses dont la hauteur déterminante (zone de croissance) est égale ou inférieure à 0,5m; la différence entre la température consignée à 1,5m et la température réelle dans la zone de croissance à 0,5m dépend du type d'échangeur de chaleur, mais elle peut être importante. La sonde de mesure de la température pour la régulation devrait alors se trouver à 0.5m.

La figure 3 illustre l'effet d'un chauffage posé sur le sol sur le profil vertical de la température de l'air pour une valeur identique de la température consignée aux hauteurs déterminantes de 0,5 et 1,5m, et pour une distribution de chaleur par aéroconvecteurs ou tuyaux posés sur le sol.

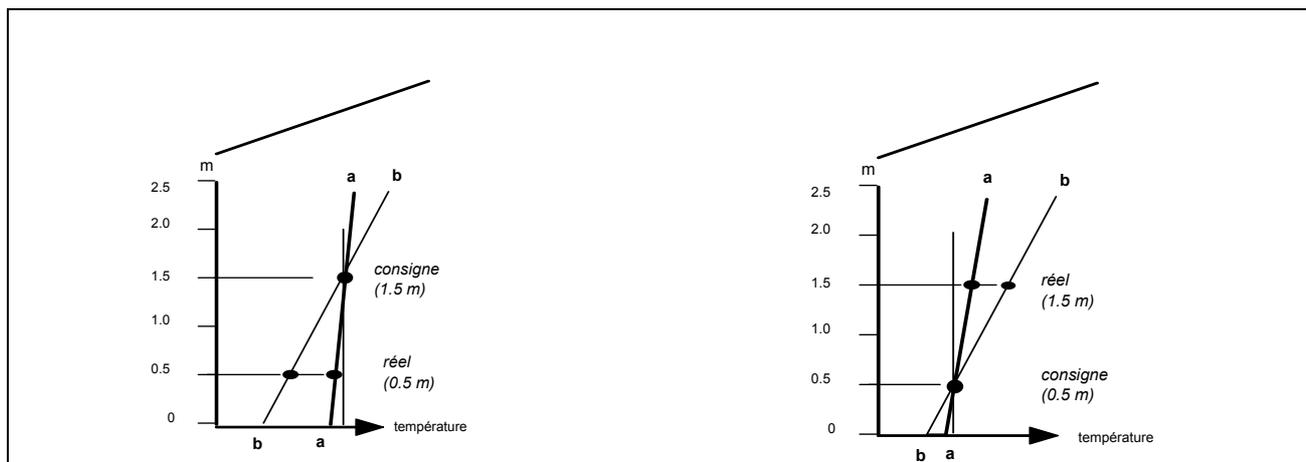


Figure 3 : Profils verticaux de la température, allure caractéristique pour un système de chauffage posé sur le sol (a) et pour les aéroconvecteurs seuls (b); la consigne est donnée sur une mesure à 1.5m (à gauche) et à 0.5m (à droite).

Il est important de signaler que les températures de consignes agronomiques introduites dans les données d'utilisation sont considérées par le logiciel HORTICERN comme les températures à réguler à 0,5m. Il importe, dans le cas de cultures basses, qu'il y ait un chauffage posé sur le sol afin que la consigne donnée ordinairement à 1.5m ne soit pas réduite à 0.5m par le gradient vertical de température, ou qu'une correction à la hausse n'invalide le résultat de calcul de consommation d'énergie .

3. Economie énergétique liée à la construction des serres

Le logiciel HORTICERN est utilisé ici pour calculer l'effet de différentes mesures constructives sur les consommations énergétiques et les puissances nominales de chauffage. Nous considérons en particulier :

- ecr : l'utilisation d'un écran thermique pour baisser la déperdition nocturne
- cvg : une distribution de chauffage au niveau de la végétation
- horti+ : l'utilisation de verre hort+
- dvl : l'utilisation de double vitrage latéral

Pour diverses combinaisons de ces mesures et pour une culture de tomates menée du 15 janvier au 15 novembre avec des consignes de températures agronomiques de 18/15/28 °C (nuit, jour, aération) nous présentons sur les figures 4 et 5 les besoins nets d'énergie auxiliaire et la puissance nominale de chauffage (température intérieure 15°C par -10°C à l'extérieur, température apparente du ciel -30°C, vitesse du vent 1,6m.s⁻¹).

Sur la figure 4 les sont également représentés les besoins nets pour des consignes de 16/13/26 °C, illustrant la sensibilité à la température de consigne agronomique ainsi qu'au pro gradient vertical de la température de l'air (qui peut donner une différence de 2K ou plus entre les températures à 1,5 et 0,5 mètres, voir paragraphe 4.3) : par rapport à la consigne précédente, les besoins sont ainsi systématiquement réduits de 25% environ pour toutes les configurations constructives envisagées.

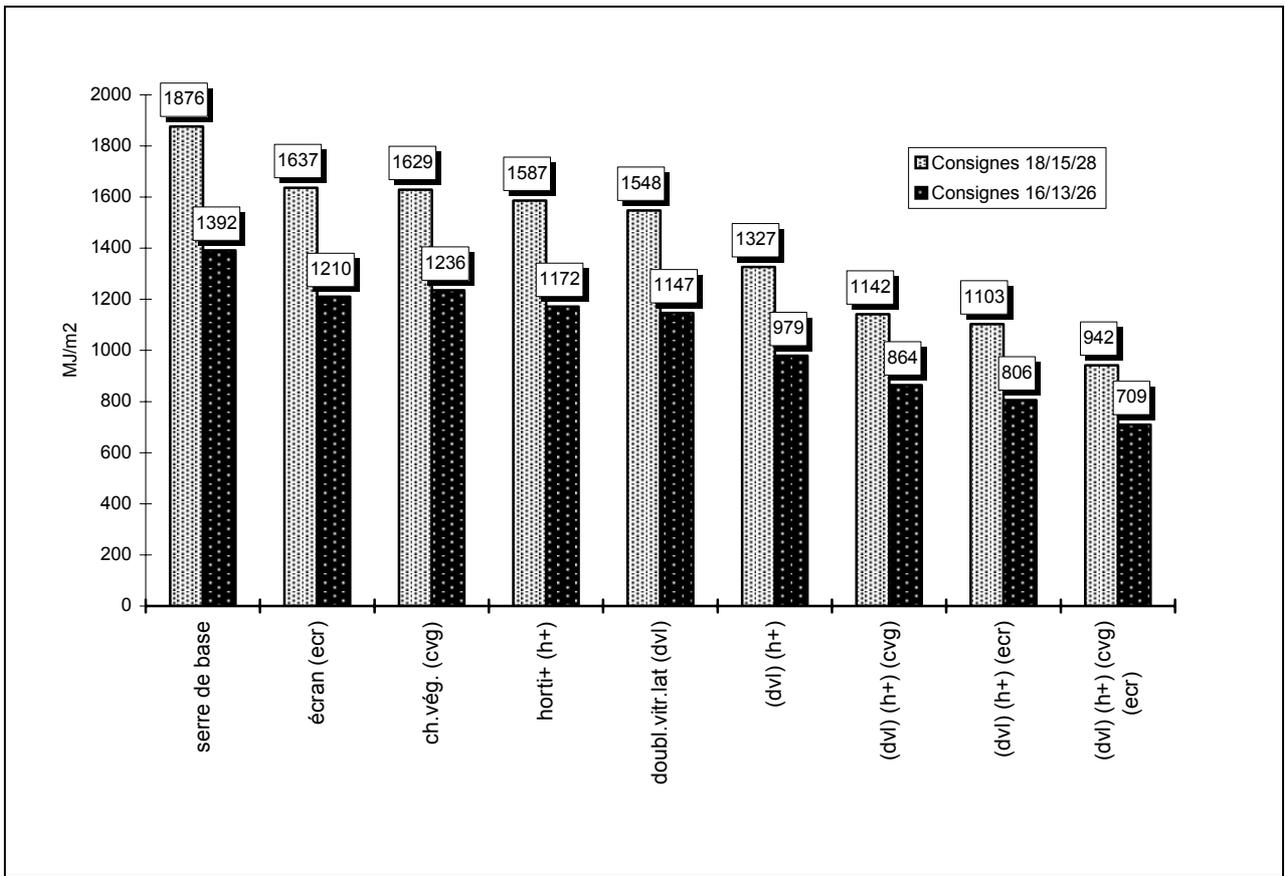


Figure 4 : Besoins nets d'énergie auxiliaire pour deux séries de consignes de température(jour/nuit/aération).

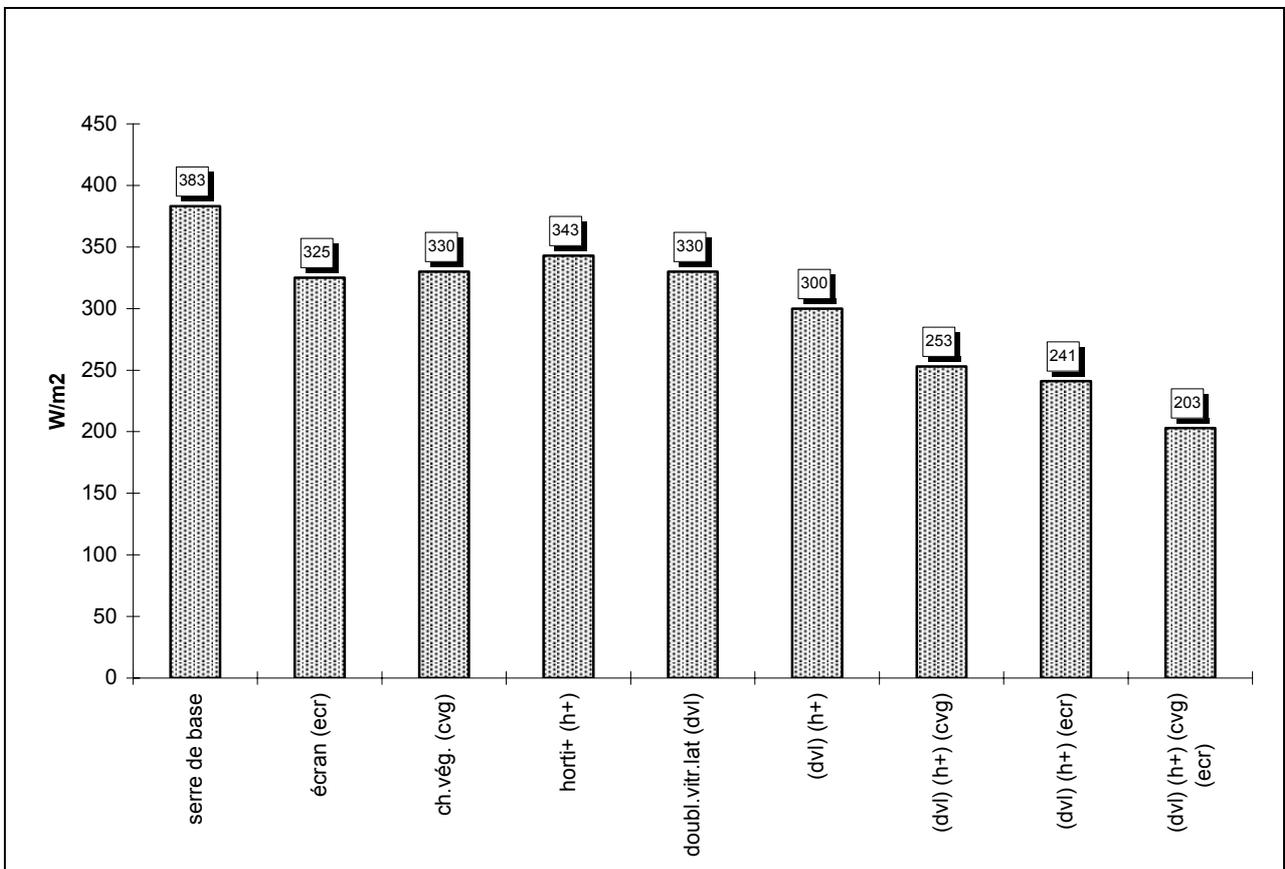


Fig.5: Puissance nominale du chauffage (15/-10/-30 °C int./ext./ciel; vent 1,6m.s⁻¹)

Par rapport à une serre standard (verre jardinier simple, distribution du chauffage par un seul circuit d'épingles aériennes, sans écran thermique), l'application de toutes les mesures d'économie envisagées permet de réduire de 50%, dans ce cas de culture, la consommation énergétique et la puissance nominale du chauffage.

Une fois toutes ces mesures prises, on constate, pour les consignes 18/15/28 °C, que l'énergie solaire potentiellement récupérable par stockage journalier est de l'ordre de 50% des besoins de chauffage subsistants.

Tableau 1 : Besoins de chauffage et énergie solaire potentiellement récupérable pour une serre optimisée au niveau de l'enveloppe et de la distribution de chaleur

Besoins bruts	Energie solaire utile	A: Besoins nets de chauffage auxiliaire	B: Energie solaire potentiellement récupérable	Rapport B/A
MJ.m ⁻² .an ⁻¹	MJ.m ⁻² .an ⁻¹	MJ.m ⁻² .an ⁻¹	MJ.m ⁻² .an ⁻¹	%
1603	661	942	442	47

4. GEOSER

A partir des données réelles de l'expérience (climat, type de serre, conditions d'utilisation), le logiciel HORTICERN est utilisé pour calculer ces besoins nets et l'énergie solaire potentiellement récupérable. Le rapport de l'énergie solaire récupérée par le stockage et effectivement utilisée pour le chauffage, divisée par l'énergie solaire potentiellement récupérable, est ensuite calculé.

Les paramètres utilisés pour le calcul sont les suivants :

- les données climatiques sont celles du climat de Conthey, mesuré durant l'expérience.
- Les données relatives aux consignes sont celles du programme de cultures, à savoir les températures de consignes agronomiques à réguler à la hauteur de 1,5m.
- Les données techniques relatives aux serres (enveloppe, cadre, écran, systèmes de chauffage) sont celles des serres neuves utilisées pour l'expérience. Seul l'écran thermique ne figurant pas dans la liste des composants proposés par le logiciel, nous avons utilisé pour cela un type d'écran dont les caractéristiques sont proches de celles de l'écran utilisé (7 au lieu de 4 W/K.m²). Il en résulte un coefficient de pertes spécifiques nocturnes de 9.2 au lieu de 8.6 W/K.m², pour un coefficient diurne inchangé de 11.9 W/K.m², soit une erreur de 5% sur le calcul des besoins de chauffage annuels.

Avec ces données le logiciel détermine une valeur de 2213 MJ/m².an pour les besoins de chauffage, soit 1.5 fois la valeur observée dans la serre témoin (fig. 6). L'explication réside essentiellement dans le fait que le logiciel se base sur une consigne à 0.5 et non à 1.5 m de hauteur. Une série de simulations supplémentaires, basées sur des consignes modifiées en conséquence, donne les résultats suivants :

- En recalculant la consigne équivalente à 0,5 m à partir des températures mesurées à 1 et 2 m, avec l'hypothèse que le gradient est constant, on obtient une demande de chauffage de 1745 MJ/m².an.
- En diminuant arbitrairement de 1K la température calculée à 0,5 m (gradient non linéaire) on obtient la valeur de 1484 MJ/m².an, supérieure de seulement 5% à la valeur mesurée dans la serre témoin. Le potentiel solaire récupérable est alors évalué à 521 MJ/m².an, à comparer aux 676 MJ/m².an déterminés par l'analyse des bilans thermique mesuré (partie principale du rapport, sec. 4.2).

Pour cette dernière configuration, les figures 7 et 8 représentent l'évolution des écarts de température et des besoin de chauffage en fonction resp. des cultures agronomiques et des mois.

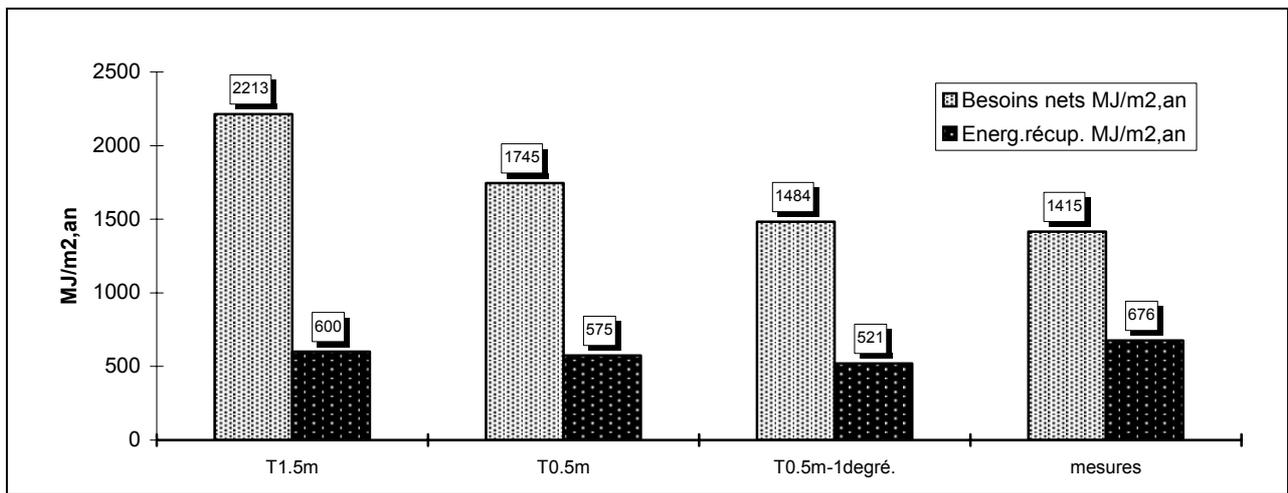


Figure 6 : Besoins de chauffage et énergie solaire potentiellement récupérable calculés pour différentes valeurs de consigne.

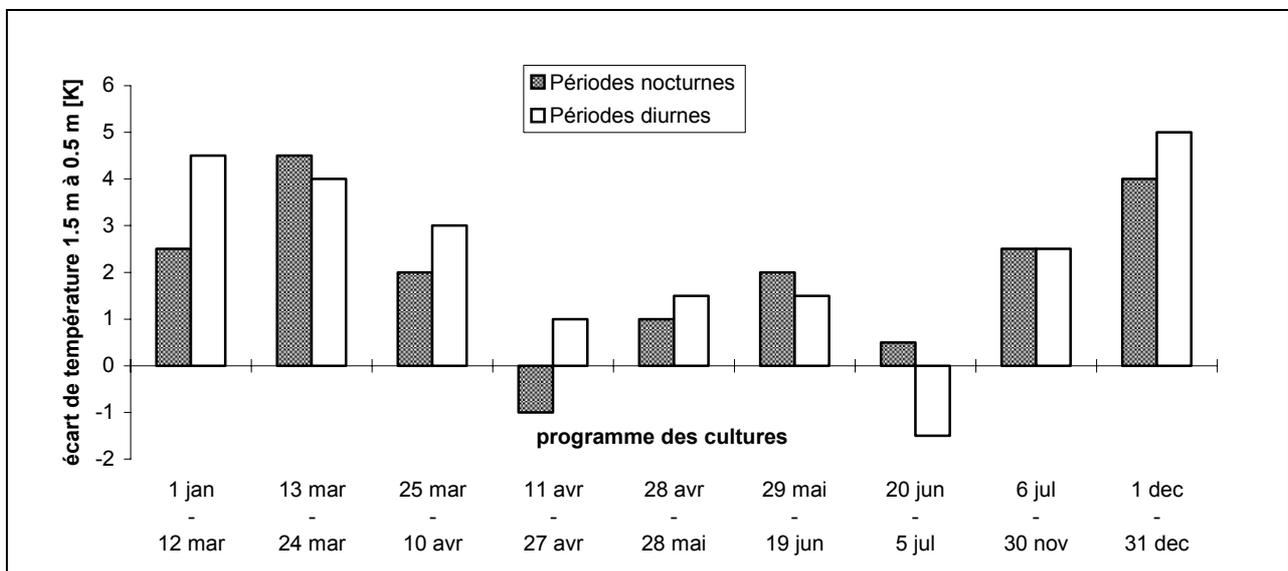


Figure 7 : Ecart de température à 1,5 - 0,5 m en fonction des programmes de culture.

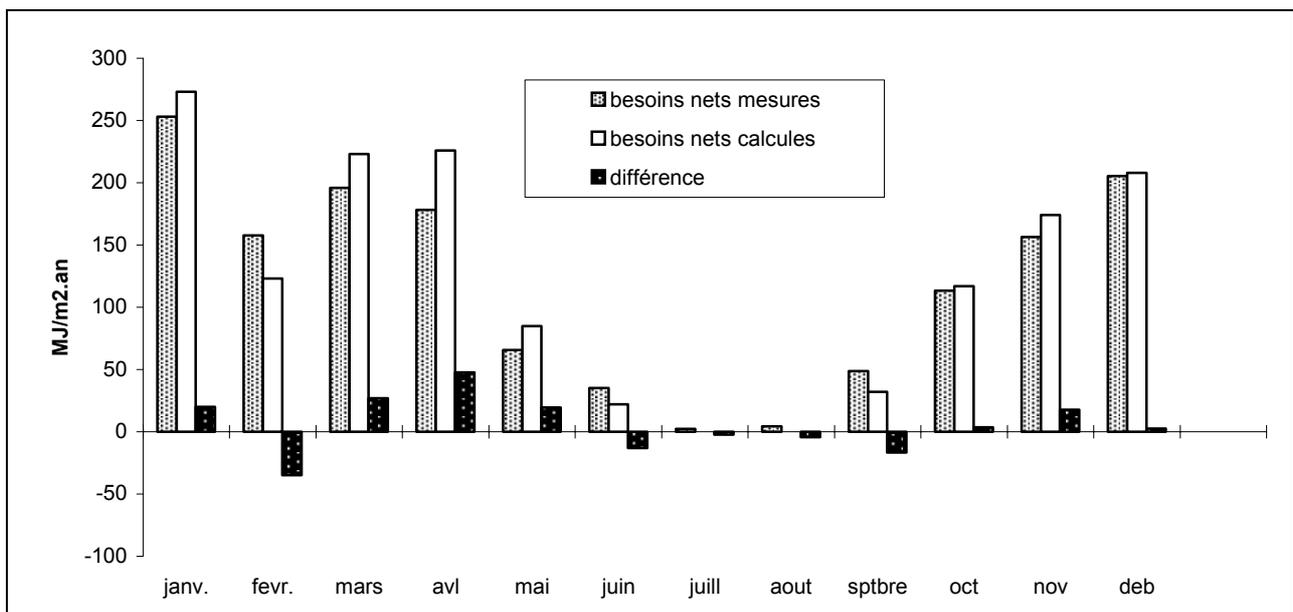


Figure 8 : Besoins nets d'énergie auxiliaire en fonction des mois

5. Conclusion

Le logiciel HORTICERN est un outil facile à utiliser pour le calcul de consommations énergétiques par culture et pour le dimensionnement de systèmes de chauffage. Il peut également servir à l'analyse de résultats d'expériences telles que celle menée sur les bilans thermiques de GEOSER.

Pour un calcul correct des pertes thermiques il est cependant important d'interpréter correctement la notion de température de référence. En effet, le gradient vertical de température de l'air est un paramètre significatif pour la consommation énergétique. Ce gradient dépend de plusieurs facteurs : la température du sol, la puissance de chauffage au niveau du sol, la différence entre les températures intérieure à 1,5m et la température extérieure, le système de distribution de chaleur fournie par les aéroconvecteurs.

A cet égard la prise en compte de ce gradient par le logiciel HORTICERN est complexe. Rappelons que dans le cas de cultures hautes il faut choisir l'option chauffage de végétation dans les données du logiciel; on peut souhaiter une adaptation du logiciel qui consisterait à imposer le choix entre culture basse ou haute et un chauffage de végétation dans le cas de la culture haute.

Enfin, il est utile de rappeler que la sonde de mesure de la température de l'air pour la régulation doit se trouver à la hauteur déterminante pour la température de consigne agronomique.