

Identification du microclimat d'une culture hors-sol sous serre : système hiérarchisé fortement perturbé

Jean DUPLAIX, Nathalie PESSEL, Frédéric LAFONT¹ & Jean-François BALMAT²

Laboratoire des Sciences de l'Information et des Systèmes
UMR 6168 Marseille, CNRS

¹ IUT Toulon, BP 20132, 83957 La Garde Cedex, France.

Correspondant : duplaix@univ-tln.fr ; pessel@univ-tln.fr ; lafont@univ-tln.fr

² UFRST, BP 20132, 83957 La Garde Cedex, France.

balmat@univ-tln.fr

Résumé — Cet article traite de nos approches mises en œuvre pour résoudre le problème complexe de l'identification du microclimat d'une serre. Il correspond à une synthèse écrite dans l'esprit de la session invitée : "Modélisation expérimentale pour les systèmes environnementaux". Les références bibliographiques permettent d'avoir plus de détails pour chaque domaine retenu. Nous présentons ce système comme appartenant à la classe des systèmes hiérarchisés ouverts et très fortement perturbés. Nous insistons ensuite sur la nécessité d'obtenir un modèle de comportement dans le but de comparer différentes lois de commande. Une approche paramétrique d'identification en ligne sur un modèle global du microclimat permet de faire un premier point critique et surtout d'améliorer notre connaissance du système. Nous construisons et testons une approche par apprentissage sur la base d'une modélisation multi-structure. Avant de conclure et d'envisager quelques perspectives, nous essayons de dégager quelques pistes de réflexion pour l'automaticien dans la mise en place d'une boucle de recyclage de la solution nutritive imposée à court terme par les normes européennes de rejet zéro pour les cultures hors-sol sous serres.

Mots-clés— **Identification paramétrique, expertise, analyse en composantes principales, réseaux de neurones, logique floue.**

I. INTRODUCTION

La culture sous serre est un système hiérarchisé à trois niveaux [17] représenté sur la figure 1. Les conditions météorologiques agissent sur la serre, la plante et sa récolte sans que l'homme puisse gérer celles-ci. La serre est un abri qui va permettre, grâce à des commandes et en fonction de son contenu de culture, de fabriquer un microclimat favorable à la plante. La récolte en relation avec l'état de la plante, les conditions économiques et le coût conditionne les bénéfices de l'exploitant.

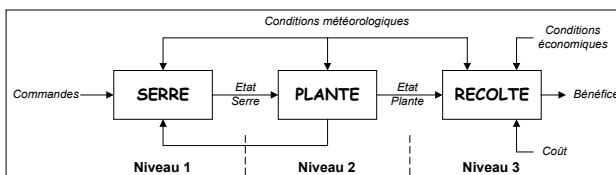


Fig.1. Structure hiérarchique du système.

Le cœur du système est la plante, une étude de ses besoins est fondamentale. L'évolution d'une plante est liée à la présence de lumière, de chaleur, d'eau, de gaz carbonique et d'éléments minéraux apportés par le sol [11]. Deux réactions résument la photosynthèse : une réaction photochimique qui correspond à l'oxydation de l'eau qui nécessite de la lumière

et une réaction biochimique très sensible à la chaleur qui conduit à la réduction du chlore à partir du gaz carbonique et la production d'eau et de glucose [12]. Une culture hors sol sous serre est une solution à la bonne gestion de l'ensemble des contraintes. Pour la partie aérienne de la plante, il faut donc assurer un bon éclairage (choix de la structure ou/et éclairage artificiel), ainsi qu'une température satisfaisante associée à une humidité relative convenable et une bonne aération ou un apport de gaz carbonique. Pour la partie racinaire, une solution nutritive circulant dans un substrat permet l'apport d'eau chargée d'engrais. Au niveau de la régulation, un point fondamental est à noter : la plante est vivante et sa croissance est conditionnée par un rendement optimal à condition de rester dans un domaine compris entre la déficience (manque) et la toxicité (excès). Les objectifs actuels sont la recherche de la minimisation des coûts énergétiques, de la consommation d'eau et d'engrais. Certains introduisent les énergies renouvelables [13], d'autres l'étude et l'optimisation de la circulation de l'air à l'intérieur de la serre [4] [7] bien souvent complétées par une boucle de recyclage de la solution nutritive. Le modèle de connaissance au sens biologique et énergétique d'un tel système est d'une grande complexité. Cependant il est indispensable d'obtenir un modèle pour avoir la possibilité de comparer des lois de commande dans ce contexte multivariable avec un environnement de perturbations météorologiques non reproductible. Nous avons choisi de développer une approche de modélisation expérimentale en se limitant au niveau 1 : celui de la gestion du microclimat avec comme grandeurs réglées la température et l'hygrométrie internes. Notre système expérimental est une serre chapelle plastique Richel d'une surface de 80 m² ouvrant à 50% installée sur le campus de l'Université du Sud Toulon-Var. Les mesures sont faites en fonctionnement boucle fermée avec des lois de commande logiques en présence de plantes. La serre est en fonction pour la production des boutures des plantes d'agrément des parterres du campus.

II. MODÈLE GLOBAL DU MICROCLIMAT

Dans cette section, après avoir décrit le système, nous présentons notre approche de l'identification paramétrique.

A. Généralités

Les grandeurs réglées sont limitées en interne à la température T_i en °C et l'hygrométrie relative H_i en %. Les grandeurs réglantes sont le chauffage Ch (commande binaire

0 ou 1), l'ouvrant Ov en ° (0 à 33°), le rideau d'ombrage Om en m (4x3m maximum) et la brumisation Br (commande binaire 0 ou 1). Une station météorologique sur un mât de 2 mètres au dessus du toit de la serre mesure la température Te en °C, l'hygrométrie relative He en %, le rayonnement global Rg en W/m^2 et la vitesse du vent Vv en km/h. Deux indications pour la sécurité ouvrant complètent les mesures : direction du vent et détection de pluie. La figure 2 présente le schéma entrées-sorties retenues.

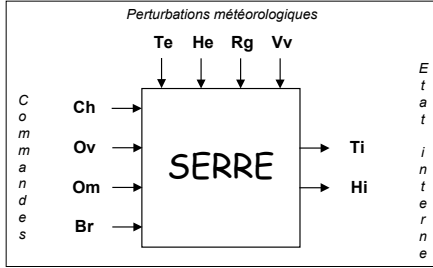


Fig.2. Schéma du modèle global du microclimat

B. Identification paramétrique

Nous avons choisi une structure simple du modèle tout en sachant que l'approche d'identification paramétrique devait déboucher sur un modèle évolutif peu stationnaire et non adapté à nos objectifs [3] [5]. Cependant la démarche présente un grand intérêt pour la connaissance du système. L'état interne est décrit par une matrice de 20 paramètres et un vecteur de 10 mesures ($\dim(A) = 2 \times 2$, $\dim(B, D) = 2 \times 4$) :

$$\begin{bmatrix} \hat{T}_{i_{k+1}} \\ \hat{H}_{i_{k+1}} \end{bmatrix} = \hat{\theta}_k^T \cdot M_k \quad (1)$$

$$\text{avec } \hat{\theta}_k^T = \begin{bmatrix} \hat{A}_k & \hat{B}_k & \hat{D}_k \end{bmatrix}$$

$$\text{et } M_k^T = \begin{bmatrix} T_{i_k} & H_{i_k} & O_{v_k} & C_{h_k} & B_{r_k} & O_{m_k} & T_{e_k} & H_{e_k} & R_{g_k} & V_{v_k} \end{bmatrix}$$

$$\text{Le vecteur d'erreur est alors } \begin{bmatrix} \varepsilon_{1k+1} \\ \varepsilon_{2k+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} T_{i_{k+1}} \\ H_{i_{k+1}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \hat{\theta}_{1k}^T \\ \hat{\theta}_{2k}^T \end{bmatrix} \cdot M_k \text{ et}$$

$$\text{le critère à minimiser est } J_k = \sum_{i=0}^k \varepsilon_{1i}^2 + \sum_{i=0}^k \varepsilon_{2i}^2 \quad (2)$$

Nous avons choisi d'appliquer un algorithme des moindres carrés récursifs pondérés à trace constante. La pondération permet d'introduire un facteur d'oubli des mesures passées par rapport aux mesures récentes pour tenir compte de la non stationnarité du système. La trace constante est un moyen de prendre en compte le fait que les signaux d'entrées sont peu riches et excitants.

Un résultat essentiel de cette approche d'identification a été de constater que la prédiction des états internes était très satisfaisante. Ceci n'est pas anormal pour un système à évolution lente avec un pas d'échantillonnage de 1 à 3 mn suivant les essais. D'autre part, compte tenu du nombre important de paramètres du modèle, nous nous sommes posés la question de l'influence de l'initialisation. Nous avons ainsi

comparé sur une journée l'évolution des coefficients du modèle à partir d'une matrice nulle et d'une matrice initialisée par son état atteint à la fin de la journée précédente. Le calage des deux modèles est atteint avec des temps variants de 12 à 30 heures. Les paramètres évoluent tous et commencent seulement à évoluer pour les commandes suite à leur sollicitation pour le modèle initialisé à zéro. Nous n'avons pas utilisé la possibilité de les figer après la disparition des actions. Pour illustrer ces résultats, les figures 3, 4 et 5 présentent l'évolution des écarts entre la différence des coefficients du modèle sur 3 jours pour la matrice d'état (influence en interne de la température sur la température et l'hygrométrie), pour la matrice de commande (influence de l'ombrage sur la température et l'hygrométrie) et pour la matrice de perturbation (influence de la vitesse du vent sur la température et l'hygrométrie).

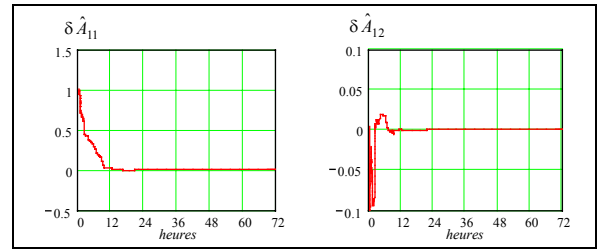


Fig.3. Evolution écart paramètres relatifs à T_{i_k} et H_{i_k} sur $T_{i_{k+1}}$

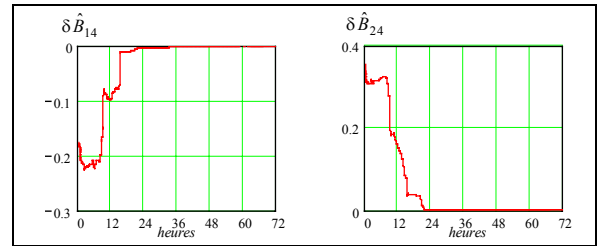


Fig.4. Evolution écart paramètre relatif à O_{m_k} sur $T_{i_{k+1}}$ et $H_{i_{k+1}}$

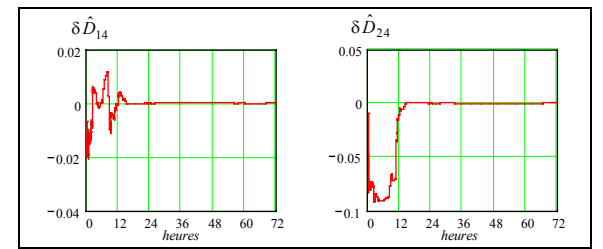


Fig.5. Evolution écart paramètre relatif à V_{v_k} sur $T_{i_{k+1}}$ et $H_{i_{k+1}}$

Une conclusion de cette étude est qu'un modèle adaptatif n'est pas utilisable pour comparer le comportement du système pour différents algorithmes de commande : le modèle variant en fonction de la commande appliquée. Notre choix s'est orienté vers des modèles obtenus par apprentissage sur des périodes de plus en plus longues de plusieurs jours voire des mois. La technique étant toujours la même : choix d'une journée la plus « riche » possible et application de techniques d'apprentissage par réseaux de neurones [1] [2], par logique floue [1] [6] et par algorithmes génétiques [1]. Une conclusion essentielle de toutes ces approches est la même : les résultats sur la journée voire les journées apprises sont satisfaisants

mais il apparaît en général des écarts non acceptables sur les journées non apprises semblables ou non.

Pour cette raison, l'idée d'une approche multi-modèle nous a semblé pertinente. Ainsi, nous avons développé une structure neuronale constituée de deux types de réseaux de neurones (multicouches pour chaque modèle et une carte de Kohonen pour la supervision) [2]. Les résultats obtenus encourageants ont permis d'envisager la définition de structures plus performantes en tenant compte de l'analyse des données et de la connaissance experte du système. Ce constat nous a conduit à nous intéresser à un modèle multi-structure.

III. MODÈLE MULTI-STRUCTURE

La notion de type de fonctionnement de la serre est fortement lié à son contenu, en toute rigueur au cycle de vie de la plante. Le terme type est préféré à celui de période de la journée : une journée à très forte couverture nuageuse sera considérée comme un type de fonctionnement nuit. Cependant, il faut distinguer la nuit et le jour en étant vigilant au moment du passage de la nuit au jour. En effet le rideau d'ombrage est en général fermé la nuit pour minimiser le volume à chauffer, la partie haute de la serre est alors plus froide que la partie basse. Une ouverture sans précaution du rideau provoque un choc thermique sur la plantation. Par contre, le passage du jour à la nuit n'est pas gênant. Ces points fondamentaux font partie de l'expertise. Nous sommes en mesure de préciser les grandeurs de commande actives ainsi que les perturbations météorologiques significatives pour chaque type de fonctionnement.

A. Inventaire des entrées commande et perturbation

Pour le type nuit, le seul actionneur possible est le chauffage, le rideau est fermé, l'ouvrant est fermé et la brumisation est interdite ; le rayonnement est quasiment nul. Pour le jour, toutes les commandes peuvent être activées, l'ensemble des perturbations sont prises en compte. Au passage nuit-jour, la brumisation reste interdite et le rideau reste fermé, il ne pourra s'ouvrir que quand la température interne haute augmentera avec la montée du rayonnement : certains automates de serre programment une ouverture du rideau progressive pour permettre de limiter la « brutalité » de la transition. Dans le but de minimiser encore le nombre d'entrées, une analyse en composantes principales (CP) à partir des perturbations météorologiques et des grandeurs réglées, est effectuée pour chaque type de fonctionnement.

B. Structure et détermination des sous-modèles

Les résultats de cette analyse en composantes principales montrent des corrélations entre la température extérieure et le rayonnement au lever du soleil. Aucune corrélation entre les grandeurs d'entrées existe la nuit. Le cercle de corrélation le plus intéressant est celui du fonctionnement de type jour [14] [15] (fig. 6). Les grandeurs hygrométriques interne et externe sont corrélées. Un autre groupement d'entrées possible comprend les températures interne et externe ainsi que le rayonnement. La vitesse du vent reste dans tous les cas une grandeur isolée. Le fait que le jour la température interne soit en corrélation avec le rayonnement et la température externe est un point très intéressant d'un point de vue industriel. En effet, les mesures d'une station météorologique peuvent être partagées par un ensemble de serres situées sur une aire de

production. Les installateurs prêchent toujours pour la minimisation du nombre de capteurs et apprécient qu'une mesure globale donne de bonnes indications sur un comportement local.

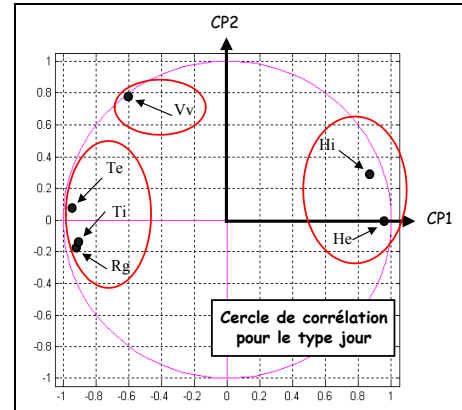


Fig.6. Cercle de corrélation des entrées : type jour

A partir de ces résultats, nous pouvons construire des sous-modèles associés aux 3 types de fonctionnement. Cette modélisation a été réalisée sur la base de réseaux de neurones multicouches à apprentissage supervisé et rétro-propagation du gradient [15]. Nous donnons les résultats pour la journée d'apprentissage pour le modèle global (fig.7) et des 3 sous-modèles types limités à la gestion de la température interne. Nous pouvons dans chaque cas apprécier les différences relatives en nombre de neurones pour la couche cachée et en nombre de paramètres pour les réseaux.

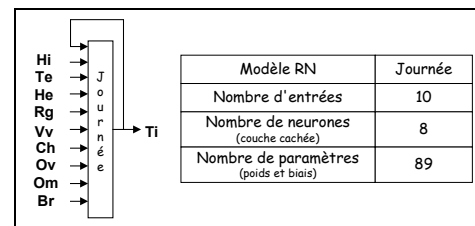


Fig.7. Modèle global

La figure 8 montre que pour le fonctionnement type nuit seule la commande de chauffage est autorisée.

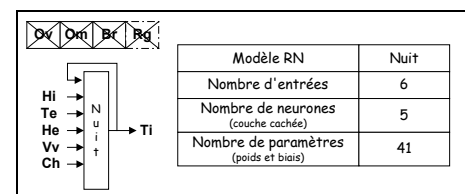


Fig.8. Modèle type nuit

La transition nuit-jour appelée « lever » se produit aussi au passage jour-nuit. Sa durée est brève, nous notons la corrélation température externe et rayonnement en figure 9.

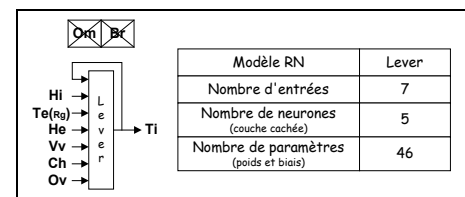


Fig.9. Modèle type lever

Pour le modèle type jour (fig. 10), la corrélation température extérieure, rayonnement et température intérieure permet d'avoir un modèle sans rebouclage de la température intérieure donc identifiable par des données externes. Cette remarque est aussi valable pour la corrélation entre les hygrométries externe et interne sans rebouclage de l'hygrométrie interne.

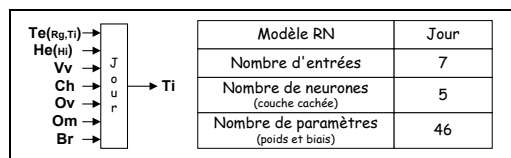


Fig.10. Modèle type jour

Nous allons pouvoir maintenant réaliser des simulations de comportement du système en définissant une gestion de commutation des sous-modèles.

C. Supervision par logique floue

La sélection du type de modèle a été réalisée par commutation ou fusion par des blocs de logique floue. Les entrées choisies sont respectivement la vitesse du vent avec deux états (faible, fort), la valeur du rayonnement (sombre, voilé, lumineux) et les variations du rayonnement (nuageux, voilé, clair). La sortie du dernier bloc sélectionne le sous-modèle (fig. 11). La sortie du premier bloc : indice de rayonnement est obtenue par la méthode du centre de gravité. Cette dernière est aussi utilisée en sortie du second bloc avec ou sans pondération suivant le fonctionnement du sélecteur en mode commutation ou mode fusion. Les inférences floues sont de type de Mandani min-max [15].

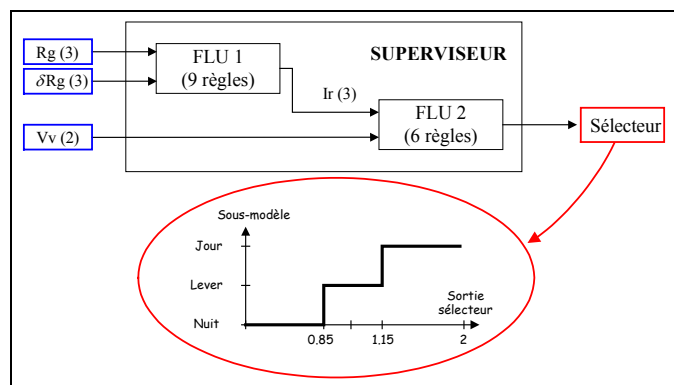


Fig.11. Supervision et sélection par commutation du sous-modèle

D. Fichiers d'essai et résultats

Pour conduire les essais, nous avons choisi un fichier d'apprentissage : celui de la journée du 10 mars où tous les actionneurs sont sollicités. Les fichiers du 11 mars et 12 mars sont les journées de validation. L'intérêt de ces deux journées est que la première est similaire à la journée d'apprentissage. Alors que la deuxième est très différente. Ces trois journées sont synthétisées pour les grandeurs réglées en table 1, pour la météo en table 2 et pour les commandes en table 3. Nous notons que pour les états internes température – hygrométrie, leur moyenne, min et max sont très semblables pour les deux premières journées et les commandes sont très voisines. La dernière journée conduit à un fonctionnement de la serre sans

aération, un coût en chauffage plus important, la consigne de température interne pour les 3 journées est de $21 \pm 1^\circ\text{C}$.

TABLE 1
BILAN MICROCLIMAT

		Ti (°C)	Hi (%)
10 mars	Moy	23.4	22.7
	Min	19.0	13.3
	Max	28.4	30.5
11 mars	Moy	23.7	21.2
	Min	19.2	11.3
	Max	27.7	30.5
12 mars	Moy	21.7	37.0
	Min	19.9	24.1
	Max	23.3	59.9

TABLE 2
BILAN PERTURBATIONS

		Te (°C)	He (%)	Rg (W/m ²)	Vv (km/h)	Pluie (%/j)
10 mars	Moy	8.0	46.7	129.7	3.9	
	Min	0.3	24.4	0	0	0
	Max	16.6	68.0	472.5	11.9	
11 mars	Moy	8.6	39.5	138.5	4.6	
	Min	2.5	18.2	0	0	0
	Max	16.8	47.6	456.9	12.2	
12 mars	Moy	8.4	68.0	12.2	5.3	
	Min	5.7	47.6	0	0	15.9
	Max	10.5	92.6	59.4	12.9	

L'analyse comparée des enregistrements météorologiques des trois journées fait apparaître des moyennes de température externe sensiblement identiques avec des min-max en relation avec la couverture nuageuse (cas du 12 mars). L'influence du vent par temps clair a pour conséquence une hygrométrie plus faible surtout au niveau du maximum. Mises à part ces légères différences, les journées du 10 et 11 mars sont assez semblables.

TABLE 3
BILAN COMMANDES

	Ch (%/j)	Ov (%/j)	Om (%/j)	Br (%/j)
10 mars	35.5	23.1	72.1	3.5
11 mars	31.8	24.4	73.1	3.9
12 mars	46.4	0	66.6	3.3

Nous présentons les résultats de la supervision du multi-modèle pour la journée d'apprentissage en figure 12. Le domaine temporel pour les 3 diagrammes correspond à une journée soit 480 échantillons pris toutes les 3 minutes. Sur cette figure, nous visualisons sur la journée l'état du sélecteur, la comparaison de la température mesurée et celle estimée, l'évolution de l'écart entre ces deux températures et l'état du sélecteur avec la moyenne de l'écart et la variance sur la journée. Nous pouvons remarquer que l'évolution de la température interne mesurée fait apparaître un phénomène d'hystérésis de l'ordre de $\pm 1.5^\circ\text{C}$ dû au fonctionnement du chauffage. Le système de chauffage est un aérotherme d'assez forte puissance (58 kw) qui a un cycle de commande propre avec des temps figés. En particulier avant de « souffler » l'air, un préchauffage de l'air entrant est effectué pour éviter un choc thermique au niveau des plantes.

L'erreur pour le type jour est minimale et en particulier nous avons une réponse à une question posée qui concernait un éventuel comportement différent avant et après le point haut du soleil. Il semble qu'il n'y ait aucune raison de définir deux zones. Cette réponse n'était pas facile à mettre en évidence sur les approches paramétriques qui traduisaient l'aspect dynamique du système et faisaient apparaître de grandes variations d'estimation autour du passage au zénith du soleil.

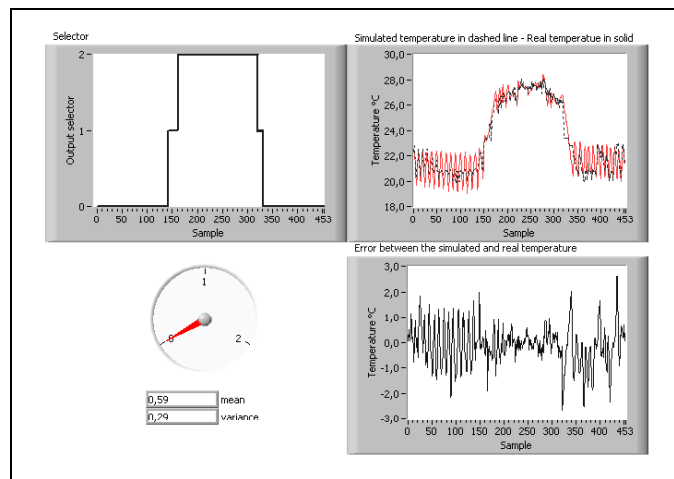


Fig.12. Supervision de la journée d'apprentissage

Nous donnons en table 4 les résultats de la comparaison sur les trois journées d'apprentissage et de tests de l'estimation de la température interne à partir du modèle global et du multi-modèle. Il est intéressant de noter une estimation en moyenne et en variance sensiblement constante pour la modélisation de type multi-structure. L'estimation à partir du modèle global est satisfaisante pour la journée apprise mais beaucoup moins bonne même pour la journée du 11 mars pourtant très similaire à celle qui a servi pour l'apprentissage. Ces résultats sont encourageants et peuvent être étendus à la gestion de l'hygrométrie. Des tests sont aussi envisagés sur d'autres journées très éloignées de la zone fin d'hiver.

TABLE 4
COMPARAISON EN MOYENNE ET VARIANCE

		10 mars (apprentissage)	11 mars (validation)	12 mars (validation)
Modèle global	Moyenne	0.72 °C	1.58 °C	1.45 °C
	Variance	0.49 °C	1.52 °C	1.44 °C
Multi-modèle	Moyenne	0.60 °C	0.74 °C	0.62 °C
	Variance	0.29 °C	0.39 °C	0.34 °C

Pour terminer cette présentation, nous allons étendre l'approche en faisant l'inventaire de ce que peut être l'apport de l'automatique au niveau 2 de ce système (plante) en abordant la gestion de la solution nutritive.

IV. BOUCLE DE RECYCLAGE DE LA SOLUTION NUTRITIVE

Nous allons maintenant nous intéresser aux besoins de la plante. L'aspect énergétique au sens de la lumière et de la chaleur correspond aux contraintes étudiées au niveau 1 du système hiérarchique concernant la gestion du microclimat de la serre. L'apport en matière organique qui se résume au carbone, à l'oxygène et à l'hydrogène est fourni par le dioxyde de carbone et l'eau. Nous allons donc vers la gestion

d'une autre grandeur réglée qui est le gaz carbonique. La gestion de l'apport en eau est liée en hors-sol à la production de la solution nutritive. L'eau est le support conducteur des facteurs indispensables pour l'évolution de la plante au sens des minéraux : macroéléments (azote, phosphore, soufre, potassium,...) et oligo-éléments (fer, manganèse, zinc, cuivre,...) [11]. Un autre point important est directement lié à la gestion de la solution nutritive : nous devons connaître le besoin de la plante.

Concernant l'apport en gaz carbonique, la mise au point de régulateurs robustes pour la gestion simultanée de la température (ventilation) et de la concentration en CO₂ a été présentée par R. Linker et al. [8]. Une autre étude intéressante a montré que la mesure du CO₂ est un indicateur de l'état de stress hydrique de la plante bien plus significatif que la température et hygrométrie de la serre [9]. Dans la plupart des serres, un bilan de rayonnement de la veille permet la programmation de la gestion de la solution nutritive pour le lendemain ce qui, selon certaines conditions météorologiques n'est pas satisfaisant. Le souhait d'aller vers une gestion temps réel est évident. Dans le cadre d'une thèse en cotutelle avec le Mexique [16], une étude a été menée dans notre serre expérimentale sur la mesure de l'évapotranspiration. Cela impose la mise en place d'une balance lysimétrique pour évaluer la perte en eau de la plante.

Une culture hors-sol montre qu'en moyenne la plante ne consomme que 60% des apports organiques. L'excédent de solution ne peut pas être rejeté dans la nature. Les normes européennes vont tendre rapidement vers un rejet zéro. Un recyclage de la solution s'impose. Nous allons décrire ce que cela implique et donner les résultats significatifs de quelques boucles de recyclage.

S. Martinez sous la direction de P. Morard a mené des expérimentations sur la culture de la tomate en hors-sol de 1996 à 2000 [10]. La table 5 synthétise la comparaison entre une culture de tomates sur un hectare en hors-sol sans et avec recyclage (Procédé d'Optimisation de la Gestion du Recyclage des Effluents des Serres : PROGRES).

TABLE 5
COMPARAISON SANS ET AVEC RECYCLAGE

	eau	engrais	production	pollution rejet engrais
sans recyclage	10000 m ³	16 tonnes	334 tonnes	7.4 tonnes
avec recyclage	7000 m ³	8 tonnes	337 tonnes	0 tonne

Des gains de 30% en eau et 50% en engrais ont été obtenus pour une production sensiblement équivalente mais avec un impact nul sur l'environnement. Des résultats tout à fait comparables sont obtenus en horticulture pour les roses en région PACA sans baisse de quantité et surtout de qualité de la fleur coupée.

Ces résultats spectaculaires imposent une analyse de la solution drainée et un rééquilibrage hydrominéral pour pouvoir réinjecter cet excès de solution dans la boucle. Ce dernier point introduit deux difficultés. Premièrement,

l'analyse est compliquée, pour l'instant elle ne se fait pas en ligne mais avec l'aide par exemple de bandelettes [10] et les données de rééquilibrage résultent souvent de l'utilisation d'un logiciel (exemple Végénut INP Toulouse [10]). En second lieu, la composition évolue avec la maturité de la plante en fonction de sa consommation en eau et de l'absorption des éléments nutritifs. Il est à préciser que la composition de la solution nutritive doit être proche de la composition minérale de la plante.

La figure 13 présente de manière synthétique la boucle de recyclage de la solution nutritive d'une culture hors-sol. Une surveillance et un ajustement en ligne du potentiel hydrogène PH (apport d'acide) et l'électroconductivité Ec (apport d'eau claire) sont des paramètres de guidage : indicateurs en relation avec l'évolution des caractéristiques de la solution drainée.

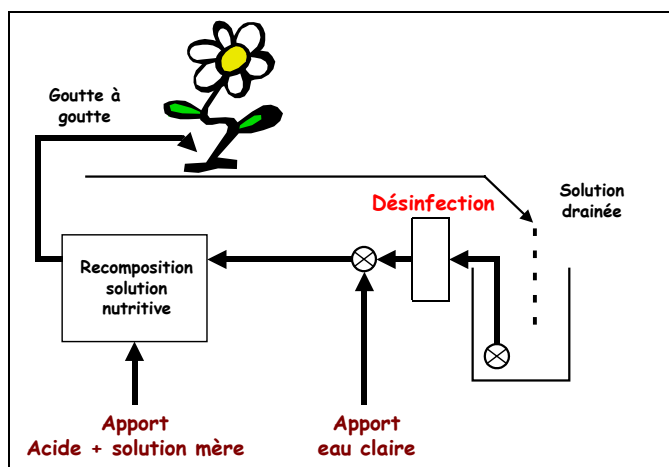


Fig.13. Boucle de recyclage de la solution nutritive

Un autre élément à gérer en recyclage est la prévention du risque phytosanitaire plus important dans une situation de boucle fermée. La désinfection est obligatoire, de nombreuses solutions ont été expérimentées. Nous citons parmi les techniques les plus utilisées : la thermo-désinfection pour les légumes et l'utilisation du chlore gazeux pour les roses. La boucle de recyclage est donc complexe. Les besoins au sens de l'automatique en accord avec l'expertise au niveau des plantes est surtout la gestion en ligne de la station de fertirrigation : reconstitution de la solution nutritive et définition des fréquences d'arrosage. Un beau challenge côté capteurs chimiques est à relever avec la mesure de l'ordre d'une douzaine d'éléments. Un point à souligner concerne la culture de la rose qui accepte le recyclage sans cet apport technique, car sa consommation des composants minéraux se fait pratiquement dans les mêmes proportions quelque soit sa maturité.

V. CONCLUSION

Dans ce papier, nous avons présenté un système hiérarchisé ouvert et fortement perturbé. Nous donnons les différentes approches d'identification développées. Cette démarche conduit à la construction d'un modèle de comportement du microclimat avec une approche multi-structure. Les tests, après apprentissage sur une journée, donnent des résultats satisfaisants sur des journées non apprises. Nous devons bien sûr étendre cette expérimentation sur l'ensemble des saisons

et à l'ensemble des grandeurs réglées. Nous pourrions ensuite développer et comparer des algorithmes de commande. La partie expérimentale est lourde au niveau de la maintenance surtout lorsque nous voulons gérer des plantes en situation de culture hors-sol recyclée. Côté commande, la recherche du meilleur compromis coût-performance est bien sûr une évidence. Dans ce contexte de système très perturbé où la puissance externe est considérable par rapport à la puissance interne installée, un autre point intéressant est celui de conduire une régulation à consigne mini-maxi. Il faut alors essayer de rester dans cette plage de fonctionnement. Ceci est d'ailleurs compatible avec la vie de la plante qui accepte un domaine de « confort » entre le manque et l'excès. Une gestion en temps réel de la solution nutritive devient nécessaire.

RÉFÉRENCES

- [1] J.-F. Balmat et al., Neural networks, Fuzzy logic and Genetic algorithms for greenhouse identification. Tunisian Conference on Electro-Technical and Automatic Control, JTEA'2002, pp. 356-362, 21-23 mars 2002
- [2] J.-F. Balmat, F. Lafont, Multi-model architecture supervised by Kohonen map. Sciences of Electronic, Technology of Information and Telecommunication SETIT'03, pp. 98-104, Sousse, Tunisia, 17-21 mars 2003
- [3] J. Boaventura Cunha, C. Couto and A. E. Ruano, Real time parameter estimation of dynamic temperature models for greenhouse environmental control, Control Eng. Practice, Vol 5, No 10, pp. 1473-1481, 1997
- [4] T. Boulard, C. Kittas, J. C. Roy et S. Wang, Convective and ventilation transfers in greenhouses : Determination of the distributed greenhouse climate, Biosystems Engineering, pp. 129-147, 83 (2), 2002
- [5] J. Duplaix, Historique et résultats expérimentaux de l'identification d'un système MIMO dans un contexte ouvert, peu stationnaire, non linéaire et très perturbé. Réunion du GT Identification GdR MACS le 27 novembre 2008
- [6] F. Lafont et al., Modélisation floue itérative d'une serre agricole. Mons, Rencontres Francophones sur la Logique Floue et ses Applications (LFA), pp. 281-288, 26-27 novembre 2001
- [7] C. Lebbal, Etude de la convection sous serres fermées et ouvertes en présence de la plante, Magistère en Physique énergétique de l'Université de Batna, Algérie, 2008
- [8] R. Linker, P.O. Gutman and I. Seginer, Robust controllers for simultaneous control of temperature and CO2 concentration in greenhouses, Control Engineering Practice 7, pp.851-862, 1999.
- [9] R. Linker, I. Seginer, Water stress detection in a greenhouse by a step change of ventilation, Biosystems Engineering 84, pp. 79-89, 2003
- [10] S. Martinez, Procédé d'optimisation de la gestion du recyclage des effluents des serres (PROGRES), Thèse de l'INP Toulouse (Sciences des agroressources) sous la direction de P. Morard, 2000
- [11] S. Martinez Culture hors sol Martiland Site : <http://s.martinez.free.fr>
- [12] F. Moreau et R. Prat, La photosynthèse Université P. et M. Curie <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/Photosynthese-cours/index.htm>
- [13] Rachel Joanna Catharina van Ooteghem, Optimal control design for a solar greenhouse, Thesis 2007 <http://library.wur.nl/WebQuery/wda/lang/1828335>
- [14] N. Pessel, J. Duplaix, J.F. Balmat and F. Lafont, Data analysis for neuro-fuzzy model approach., IEEE Workshop SOFA'2005, CD 015-SOFA-072.pdf, Szeged and Arad, 27-30 août 2005
- [15] N. Pessel, J. Duplaix, J.-F. Balmat, F. Lafont, A multi-structure modeling methodology, Springer Verlag (Ed.), Livre Soft computing based modeling in intelligent systems', V. E. Balas, J. Fodor, A. R. Várkonyi-Kóczy (eds), Studies in Computational Intelligence, chapter 5, pp. 93-114, 2009.
- [16] J. C. Ramos-Fernandez, Intégration de techniques floues pour la modélisation, l'identification et le contrôle de systèmes non linéaires, Thèse en cotutelle, février 2008. Directeurs : Virgilio Lopez Morales, UAEH, Pachuca (Mexique) et Gilles Enea / Frédéric Lafont USTV (France)
- [17] A.J. Udink Ten Cate, Remarks on greenhouse climate control models Acta Horticulturae, 136, 1980