

# Commande Prédicative Adaptative Directe d'un Groupe de Conditionnement d'Air Passif.

Riad Riadi, Rousseau Tawegoum, Ahmed Rachid, Gérard Chasseriaux

► **To cite this version:**

Riad Riadi, Rousseau Tawegoum, Ahmed Rachid, Gérard Chasseriaux. Commande Prédicative Adaptative Directe d'un Groupe de Conditionnement d'Air Passif.. 5ème Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Sep 2008, Bucaret (RO), Roumanie. <hal-00729108>

**HAL Id: hal-00729108**

**<https://hal-agrocampus-ouest.archives-ouvertes.fr/hal-00729108>**

Submitted on 28 Feb 2013

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Commande Prédicative Adaptative d'une Unité de Conditionnement d'Air Passif

R. Riadi<sup>1</sup>, R. Tawegoum<sup>1</sup>, A. Rachid<sup>2</sup> et G. Chassériaux<sup>1</sup>

**Résumé**—Le sujet de cet article est la commande prédictive généralisée adaptative indirecte (IAGPC) de la température d'un groupe de conditionnement d'air. Le système est destiné à maintenir un climat variable (température, humidité) dans les chambres de culture et serres horticoles. Le cycle thermodynamique régissant le fonctionnement du groupe de conditionnement est passif (sans cycle de compression et absorption, pas de fluide frigorigène polluant). Cependant, ce groupe de conditionnement est un système complexe, à cause de sa structure MIMO à paramètres variant dans le temps. L'approche récursive à facteur d'oubli fixe a été adoptée pour estimer en temps réel les paramètres du système, et adapter simultanément les paramètres du contrôleur GPC. Le contrôle de chaque sous-système de l'unité de conditionnement nous a permis l'application d'un contrôle hiérarchisé du système global. Les résultats obtenus par cette architecture de contrôle décentralisé ont permis d'atteindre les performances locales désirées avec un bon rejet des perturbations de charge, ainsi qu'une bonne robustesse vis-à-vis des variations paramétriques dues aux changements de point de fonctionnement.

**Mots Clefs**— commande adaptative indirecte, commande prédictive généralisée, conditionnement d'air, contrôle décentralisé, système à paramètres variant.

## I. INTRODUCTION

Les unités de conditionnement d'air utilisées généralement pour la climatisation des enceintes de cultures sont le plus souvent constituées de batteries chauffantes et d'échangeurs froids. Le refroidissement de ces derniers étant assuré par un cycle frigorifique à compression [1], [2]. Outre son coût énergétique et les frais de maintenance élevés, ce type d'installation n'est pas neutre au plan environnemental à cause des rejets possibles des fluides frigorigènes utilisés.

Le prototype du groupe de conditionnement d'air étudié utilise un principe passif sans cycle à compression [3], [4]. La spécificité de ce système est de pouvoir maintenir le

Manuscript received January 1, 2008

This work was supported in part by "Le conseil général du département Maine et Loire, France".

R. Riadi, R. Tawegoum and G.Chassériaux are with Unité de Sciences Agronomiques appliquées à l'Horticulture SAGAH A\_462, INH-INRA-UA, 2, rue Le Nôtre 49045 Angers, France ([riad.riadi@inh.fr](mailto:riad.riadi@inh.fr), [rousseau.tawegoum@inh.fr](mailto:rousseau.tawegoum@inh.fr)).

A. Rachid, with the Université de Picardie Jules Verne. IUP GEII. 33 rue Saint LEU 80000 Amiens, France.

microclimat souhaité avec des consignes de température et d'humidité variables et découplées.

Malgré la simplicité du principe du fonctionnement, sa structure MIMO présente un fort couplage interne température-humidité relative, et une instationarité due au changement de point de fonctionnement durant le contrôle [5]. On peut aussi mentionner la présence des perturbations climatiques externes de type tendance sinusoïdale sur les sorties à contrôler (température, humidité).

Pour toutes ces raisons de complexité de modèle, il a été nécessaire de mettre en œuvre une stratégie adaptative, afin de définir une commande qui garantira les performances désirées face aux perturbations externes ou aux variations paramétriques du système durant son fonctionnement.

La synthèse de la commande prédictive généralisée (GPC) proposée par Clarke [6], [7], fait partie des méthodes de commande utilisables comme une stratégie de contrôle adaptatif. Pour être utilisée, elle doit donc être couplée à une méthode d'identification réalisée en ligne [8], [9], [10], [11]. Cette méthode a été utilisée avec succès dans des applications industrielles sous différentes formes [12], [13], [14], [10], [15], [16], [17]. Parmi les avantages de la commande prédictive généralisée, [6] et [18] mentionnent qu'elle peut s'appliquer à des procédés à retard pur variable, à des procédés à non minimum de phase et qu'elle ne pose pas de problème apparent lorsque le modèle du procédé comporte trop de paramètres, contrairement aux stratégies de placement de pôles ou de commande linéaire quadratique.

Cet article propose l'application de la synthèse de loi de commande prédictive généralisée adaptative indirecte, sous une architecture décentralisée. L'article est organisé comme suit : la première partie présente une description du système, la deuxième, la théorie de la commande prédictive adaptative indirecte. Les résultats expérimentaux de la IAGPC décentralisée sont discutés dans la troisième partie.

## II. DESCRIPTION DU SYSTEME

Le groupe de conditionnement d'air est composé de deux voies "Fig. 1": une voie dite sèche (ou non saturée) et une voie dite humide (ou saturée). L'air ambiant y est insufflé par le

même ventilateur turbine.

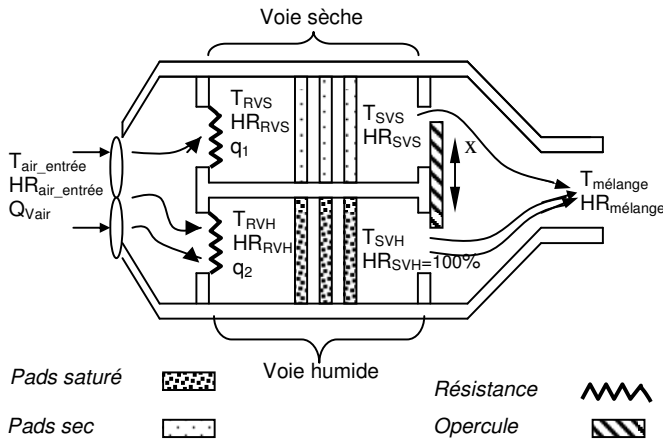


Fig. 1. Système de conditionnement d'air.

Dans la voie humide l'air ambiant est d'abord réchauffé lors du passage dans un échangeur à résistance chauffante. Il est ensuite progressivement saturé en vapeur d'eau en traversant plusieurs panneaux humidificateurs en nids d'abeilles réalisés en matière cellulosique (pads); et voit alors sa température baisser (transformation isenthalpique) [19]. L'alimentation en eau du pad est réalisée par une pompe en recyclage entre la rampe d'injection située dans sa partie supérieure et un bac de récupération disposé à sa base.

Dans la voie sèche l'air ambiant est réchauffé par une résistance chauffante, puis traverse des pads secs mis en place de façon à équilibrer les pertes de charges entre les deux voies.

La répartition des proportions des deux airs prétraités en amont (voie sèche et voie humide), est réalisée par un opercule "Fig. 1" actionné par un moteur à courant continu. Le mélange des deux débits est homogénéisé à la sortie du groupe et contribue à maintenir le climat désiré à l'intérieur de la salle de culture.

Les caractéristiques physiques de ce mélange sont issues des bilans de masse et d'énergie, ce qui mène à trois équations différentielles [5].

$$\frac{dT_{mélange}}{dt} = -\frac{\alpha(x) Q_{Vair}}{V_{mélange}} [T_{mélange} - T_{SVS}] - \frac{(1-\alpha(x)) Q_{air}}{V_{mélange}} [T_{mélange} - T_{SVH}] \quad (1)$$

où  $T_{mélange}$  est la température du mélange ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{SVS}$  la température de sortie voie sèche,  $T_{SVH}$  la température de sortie voie humide ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $\alpha(x) \in [0,1]$  le pourcentage du débit

d'air dans la voie sèche (%),  $x$  le pourcentage d'ouverture de l'opercule (%),  $Q_{Vair}$  le débit volumique total d'air ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $\rho_{air}$  la masse volumique de l'air ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ),  $C_{air}$  la chaleur spécifique de l'air ( $\text{J}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$ ),  $V_{mélange}$  le volume de la zone de mélange et  $q_1$ ,  $q_2$  les débits volumique d'air dépendant de la position de l'opercule "Fig. 1".

Le débit volumique total d'air  $Q_{Vair}$  est donné par:

$$Q_{Vair} = q_1 + q_2 = \alpha(x)Q_{Vair} + (1-\alpha(x))Q_{Vair} \quad (2)$$

Une description complète du comportement physique des deux voies est donnée à travers les étapes suivantes :

1) Dans la voie sèche la température de l'air  $T_{RVS}$  après la résistance est considérée égale à la température de l'air sortie voie sèche  $T_{SVS}$ . La température d'air en sortie voie sèche est alors donnée par :

$$\frac{dT_{SVS}}{dt} = \frac{-\alpha(x)Q_{Vair}}{V_{VS}} [T_{SVS} - T_{air\_entrée}] + \frac{k_{RVS}}{\rho_{air} C_{air} V_{VS}} U_{VS} \quad (3)$$

avec  $T_{air\_entrée}$  la température d'air d'entrée ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $U_{VS}$  la tension de chauffage voie sèche (V),  $k_{RVS}$  un coefficient de proportionnalité entre tension de chauffage et puissance de chauffe ( $\text{J}/\text{S}$ ),  $C_{air}$  la chaleur spécifique de l'air ( $\text{J}/\text{kg } ^{\circ}\text{C}$ ),  $V_{VS}$  le volume de la voie sèche ( $\text{m}^3$ ). Puisqu'il n'y a ni ajout ni extraction d'eau dans la voie sèche, l'humidité absolue d'air d'entrée est conservée.

$$HA_{air\_entrée} = HA_{RVS} = HA_{SVS} \quad (4)$$

Où  $HA_{air\_entrée}$ ,  $HA_{RVS}$ ,  $HA_{SVS}$ , sont respectivement les humidités absolues d'air d'entrée, de l'air après la résistance chauffante voie sèche et de l'air en sortie voie sèche ( $\text{kg d'eau}/\text{kg air sec}$ ).

2) Dans la voie humide, la conservation de la chaleur dans les pads et dans la résistance chauffante est donnée par les équations suivantes :

$$\frac{dT_{RVH}}{dt} = \frac{-(1-\alpha(x))Q_{Vair}}{V_{RVH}} [T_{RVH} - T_{eau\_entrée\_pad}] + \frac{k_{RVH}}{\rho_{air} C_{air} V_{RVH}} U_{VH} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}
\frac{dT_{SVH}}{dt} = & \frac{-(1-\alpha(x))Q_{Vair}}{V_{pad}} [T_{SVH} - T_{RVH}] \\
& - \frac{h A_{pad}}{\rho_{air} C_{air} V_{pad}} [T_{RVH} - T_{eau\_entrée\_pad}] \\
& + L_V (T_{eau\_entrée\_pad}) \frac{(1-\alpha(x))Q_{Vair}}{C_{air} V_{pad}} \\
& \times [HA_{sat}(T_{air\_entrée}) - HA_{air\_entrée}]
\end{aligned} \quad (6)$$

où  $T_{RVH}$  est la température d'air (°C) après la résistance chauffante de la voie humide,  $T_{eau\_entrée\_pad}$  la température d'eau entrant dans les pads,  $U_{VH}$  la tension de chauffage (V) proportionnelle à la puissance de chauffe,  $HA_{sat}(T_{eau\_entrée\_pad})$  l'humidité absolue de saturation à la température d'eau entrée,  $k_{RVH}$  un coefficient de proportionnalité entre la tension et la puissance de chauffe (J/sV),  $\rho_{eau}$  la masse volumique de l'eau (kg/m<sup>3</sup>),  $C_{eau}$  la chaleur spécifique de l'eau (J/kg °C),  $V_{RVH}$  le volume de la zone de chauffage dans la voie humide (m<sup>3</sup>),  $V_{pad}$  le volume des pads (m<sup>3</sup>),  $A_{pad}$  la surface d'échange des pads, (m<sup>2</sup>),  $L_V(T_{eau\_entrée\_pad})$  la chaleur latente (J/kg d'eau) à la température de l'eau d'entrée,  $h$  est le coefficient de convection (J/m<sup>2</sup>s).

Pour tenir compte du transfert de masse eau-air dans la voie humide, l'humidité absolue en sortie voie humide est donnée par :

$$\begin{aligned}
\frac{dHA_{SVH}}{dt} = & - \frac{(1-\alpha(x))Q_{Vair}}{V_{pad}} [HA_{SVH} - HA_{air\_entrée}] \\
& + \frac{(1-\alpha(x))Q_{Vair}}{V_{pad}} [HA_{sat}(T_{air\_entrée}) - HA_{air\_entrée}]
\end{aligned} \quad (7)$$

où  $HA_{SVH}$ , est l'humidité absolue en sortie voie humide (kg eau/kg air sec).

La température  $T$  (°C) et l'humidité relative  $HR$  (%) sont des propriétés communément mesurées de l'air. Elles sont fortement couplées par les relations thermodynamiques nonlinéaires suivantes :

$$HA = \frac{0.622 PS(T) HR}{PA - PS(T) HR} \quad (8)$$

avec  $PA$  la pression atmosphérique (N/m<sup>2</sup>) et  $PS(T)$  la pression de vapeur saturante (N/m<sup>2</sup>), dépendant de la

température est donnée par :

$$PS(T) = 10^5 \frac{101325}{760} 10^{(0.66+0.031 T - 1.285 \cdot 10^{-4} T^2 + 2.939 \cdot 10^{-7} T^3)} \quad (9)$$

La complexité du modèle dynamique, particulièrement ce qui concerne le transfert de vapeur d'eau (échanges de masse et en chaleur latente et sensible) rend difficile leurs exploitations pour l'identification et le contrôle. De plus, la mesure des débits d'air en sortie du groupe de conditionnement d'air, pour diverses positions de l'opercule a montré une relation nonlinéaire entre le débit d'air et le pourcentage d'ouverture de l'opercule [20]. Ces considérations nous ont amené à mettre en œuvre les modèles paramétriques entrées-sorties pour piloter la température et l'humidité relative.

Le modèle de la dynamique du groupe de conditionnement d'air montre que le système est MIMO et non linéaire [5] avec trois variables d'entrées incontrôlables, vues comme perturbations externes  $T_{air\_entrée}$ ,  $HR_{air\_entrée}$ ,  $T_{eau\_entrée}$ . Les autres entrées de commande sont  $U_{VS}$ ,  $U_{VH}$  et  $x$ , qui représentent respectivement la tension appliquée aux bornes de la résistance chauffante de la voie sèche, la tension appliquée aux bornes de la résistance chauffante et de la voie humide et la position de l'opercule. Les deux sorties à contrôler sont la température du mélange d'air  $T_{mélange}$  et l'humidité relative du mélange d'air  $HR_{mélange}$ .

### III. ELEMENTS DE LA COMMANDE PREDICTIVE ADAPTATIVE

#### A. La synthèse de la commande prédictive généralisée (GPC)

La méthode décrite dans ce paragraphe est celle de Clarke [6] donnée pour le cas des modèles SISO.

Le modèle de base, qui est un modèle linéaire discret CARIMA (Controlled Auto-Regressive Integrated Moving Average) défini pour représenter le comportement dynamique d'un procédé autour d'un point de fonctionnement nominal est donné par la forme suivante:

$$A(q^{-1})\Delta y(k) = B(q^{-1})\Delta u(k-d) + \varepsilon(k) \quad (10)$$

$y(k)$  est la sortie du système,  $u(k)$  est la commande,  $\varepsilon(k)$  une séquence aléatoire indépendante d'un bruit blanc gaussien.  $\Delta(q^{-1}) = 1 - q^{-1}$  est l'opérateur différence.  $A(q^{-1})$ ,  $B(q^{-1})$ , sont des polynômes respectivement d'ordre  $n_a$ ,  $n_b$  :

$$\begin{aligned}
A(q^{-1}) &= 1 + a_1 q^{-1} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a} \\
B(q^{-1}) &= b_0 + b_1 q^{-1} + \dots + b_{n_b} q^{-n_b}
\end{aligned}$$

Le critère à minimiser est composé de la somme quadratique de l'erreur de prédiction de sortie et de l'incrément de commande :

$$J = \sum_{j=N_1}^{N_2} \left( w(k+j) - \hat{y}(k+j) \right)^2 + \lambda \sum_{j=1}^{N_u} (\Delta u(k+j-1))^2 \quad (11)$$

Avec :  $\Delta u_j(k+j) = 0$ , pour  $j \geq N_u$

$w(k+j)$  les valeurs de la référence à l'instant  $k+j$ ,  
 $\hat{y}(k+j)$  les prédictions de la sortie à l'instant  $k+j$ ,  
 $\Delta u(k+j-1)$  les futurs incréments de commande à l'instant  $k+j-1$ ,  $N_1$  l'horizon de prédiction minimal,  $N_2$  l'horizon de prédiction maximal,  $N_u$  horizon de commande,  $\lambda$  facteur de pondération de l'incrément de commande.

La prédiction sur un horizon à  $j$  pas de la sortie est obtenue par l'équation suivante :

$$y(k+j/k) = F_j(q^{-1})y(k) + H_j(q^{-1})\Delta u(k-1) + G_j\Delta u(k+j-1) + E_j\mathcal{E}(k+j) \quad (12)$$

Où  $F_j, E_j, G_j, H_j$  sont des polynômes issus de la résolution des équations Diophantienne [18].

La prédiction optimale de la sortie  $y(k+j)$ , au sens des moindres carrés, compte tenu de l'information disponible à l'instant ' $k$ ' est donnée par :

$$\hat{y}(k+j) = G_j(q^{-1})\Delta u(k+j-1) + \ell_j \quad (13)$$

avec :  $\ell_j = F_j(q^{-1})y(k) + H_j(q^{-1})\Delta u(k-1)$

Après une écriture sous forme matricielle on obtient :

$$\hat{Y} = G\Delta U + L \quad (14)$$

Avec :  $\hat{Y}^T = \left[ \hat{y}(k+1) \cdots \hat{y}(k+N_2) \right]$

$$\Delta U^T = \left[ \Delta u(k) \cdots \Delta u(k+N_2-1) \right]$$

$$L^T = \left[ \ell_1(k+1) \cdots \ell_{N_2}(k+N_2) \right]$$

La synthèse de la commande prédictive généralisée est obtenue par la minimisation du critère quadratique, donné par "(11)" dans sa forme matricielle :

$$J = (W - \hat{Y})^T (W - \hat{Y}) + \lambda \Delta U^T \Delta U \quad (15)$$

Après la substitution des futures sorties par leurs prédictions en se basant sur le principe d'équivalence certaine [11], le

vecteur de commande optimale  $\Delta U_{opt}$  qui minimise, sans contraintes, le critère "(15)", soit :

$$\frac{\partial J(\Delta U)}{\partial \Delta U} = 0 \quad (16)$$

est donné par :

$$\Delta U_{opt} = \left[ G^T G + \lambda I \right]^{-1} G^T (W - L) \quad (17)$$

En fait, seule la première commande est réellement appliquée; on en déduit donc :

$$u_{opt}(k) = u(k-1) + \bar{G}(W - L) \quad (18)$$

Avec  $\bar{G}$ , la première ligne de la matrice  $\left[ G^T G + \lambda I \right]^{-1} G^T$

La structure RST équivalente du contrôleur est donnée par l'équation suivante [14]:

$$S(q^{-1})\Delta u(k) = T(q^{-1})w(k+N_2) - R(q^{-1})y(k) \quad (19)$$

### B. Algorithme d'adaptation paramétrique

L'adaptation paramétrique doit être faite de manière à assurer la stabilité du système de commande adaptative et éventuellement les performances requises.

La commande prédictive peut être combinée avec un algorithme d'adaptation paramétrique robuste pour obtenir un système de commande adaptative, grâce au principe d'équivalence certaine qui consiste à remplacer le modèle de commande par son estimée à chaque période d'échantillonnage [11], [21], [22], [23].

L'auto-ajustement des régulateurs est réalisé par l'estimation en temps réel des paramètres des polynômes  $A(\hat{a}, q^{-1}), B(\hat{b}, q^{-1})$  du modèle par l'algorithme d'identification récursif à facteur d'oubli fixe suivant [21]:

$$\hat{\theta}(k) = \hat{\theta}(k-1) + \frac{\varepsilon(k)\Phi^T(k-1)F(k-1)}{1 + \Phi^T(k-1)F(k-1)\Phi(k-1)} \quad (20)$$

$$\varepsilon(k) = y(k) - \hat{\theta}(k-1)\Phi(k-1) \quad (21)$$

$$F(k) = \frac{1}{\eta} \left[ F(k-1) - \frac{F(k-1)\Phi(k-1)\Phi^T(k-1)F(k-1)}{\eta + \Phi^T(k-1)F(k-1)\Phi(k-1)} \right] \quad (22)$$

Avec :  $\hat{\theta}(k) = \left[ \hat{a}_1(k), \dots, \hat{a}_{na}(k), \hat{b}_d(k), \dots, \hat{b}_{nb}(k) \right]$

$$\Phi^T(k-1) = \left[ y(k-1), \dots, y(k-na), u(k-d), \dots, u(k-nb) \right]$$

Où  $\hat{\theta}$  est le vecteur contenant les coefficients de  $A(\hat{a}, q^{-1}), B(\hat{b}, q^{-1})$ ,  $\Phi$  vecteurs de variables des mesures,  $F$  la matrice de covariance et  $\eta$  est le facteur d'oubli ( $0 < \eta \leq 1$ ).

#### IV. RESULTATS EXPERIMENTAUX DE LA COMMANDE PREDICTIVE ADAPTATIVE DECENTRALISEE

Vu la complexité du modèle le groupe de conditionnement d'air, l'architecture de contrôle décentralisée "Fig. 2", a été choisie pour réaliser l'objectif thermodynamique décrit par le diagramme psychrométrique "Fig. 3", consistant à imposer la même consigne de température pour chaque voie : sèche et humide, sous hypothèse que la température du mélange soit identique à celle obtenue dans chacune des voies. Afin de valider la faisabilité de cette stratégie thermodynamique, nous ne nous intéresserons dans un premier temps qu'au contrôle des différentes températures de chaque sous-système.

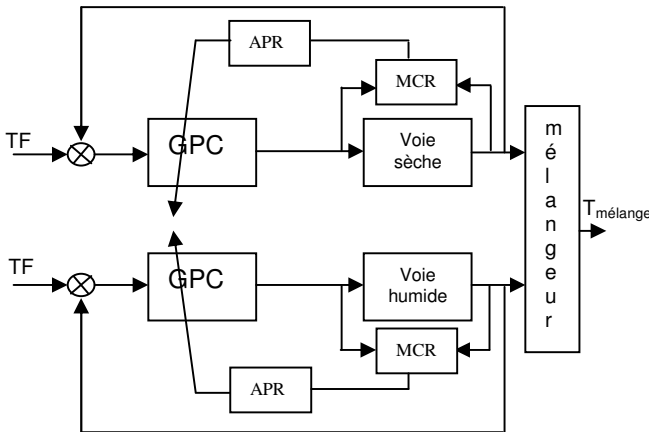


Fig. 2. Stratégie IAGPC décentralisée

Les modèles paramétriques de température de la voie sèche et de la voie humide sont de la forme :

$$(1 + a_{11}(k)q^{-1} + a_{12}(k)q^{-2} + a_{13}(k)q^{-3})T_{SVS}(k) = b_{11}(k)U_{VS}(k-1) + b_{12}(k)U_{VS}(k-2) \quad (23)$$

$$(1 + a_{21}(k)q^{-1} + a_{22}(k)q^{-2} + a_{23}(k)q^{-3})T_{SVH}(k) = b_{21}(k)U_{VH}(k-1) + b_{22}(k)U_{VH}(k-2) \quad (24)$$

Concernant l'algorithme d'estimation, les paramètres des modèles ont été initialisés par des vecteurs nuls et la matrice de covariance  $F(0) = 10^5$ , avec un facteur d'oubli fixe  $\eta = 0,97$ .

Pour faciliter la convergence de l'algorithme d'estimation régressive, une séquence d'excitation persistante (SBPA) a été appliquée durant les 70 premières itérations "Fig. 4", "Fig. 7", avant de passer la main à l'algorithme de commande prédictive généralisée en temps réel.

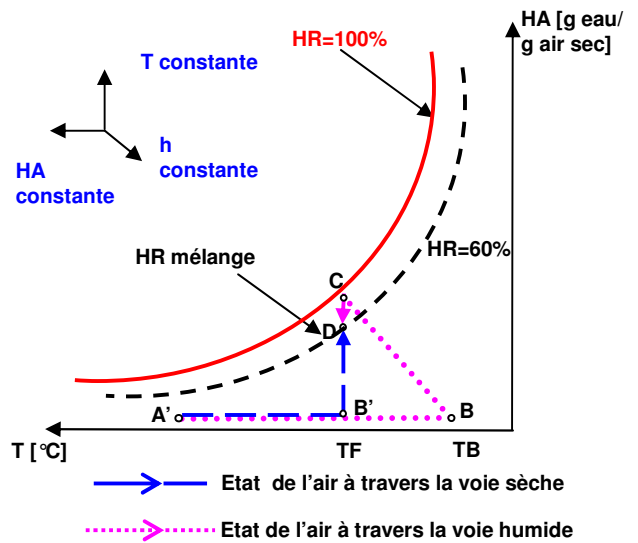


Fig. 3. Diagramme psychrométrique de la stratégie thermodynamique.

Pour l'algorithme de commande GPC, l'horizon de prédiction minimale a été fixé à une valeur  $N_1 = 1$ , un horizon de prédiction maximale  $N_2 = 14$  et  $N_u = 7$  pour l'horizon de commande.

Les codes d'identification régressive et de commande GPC ont été développés sous MATLAB® communicant avec un automate programmable (Télémechanique) à travers une interface développée sous DELPHI®. Les différentes températures sont mesurées par des capteurs Pt100 et la position de l'opercule par un codeur incrémental. La période d'échantillonnage est  $T_e = 30$  secondes.

"Fig. 5" et "Fig. 8" représentent l'évolution des paramètres des voies sèche et humide, traduisant ainsi l'instationnarité du système. La corrélation entre les variations du débit d'air dans chacune des voies et l'évolution des paramètres montre la capacité de l'algorithme d'identification régressive à détecter ces variations.

Malgré ces variations paramétriques, on remarque, une bonne poursuite des différentes séquences de la consigne de température, par la voie sèche "Fig. 4" et la voie humide "Fig. 7", ainsi que la température du mélange "Fig. 10", malgré une erreur statique de moyenne  $0,5$  °C, ce qui est acceptable dans le cadre de notre étude. Cette erreur statique pour le cas de température du mélange, est causée par les pertes de chaleur à travers les parois durant l'écoulement dans le convergent. Elle est une conséquence du contrôle décentralisé non supervisé ou en d'autres termes d'un contrôle en boucle ouverte du sous-système du mélange.

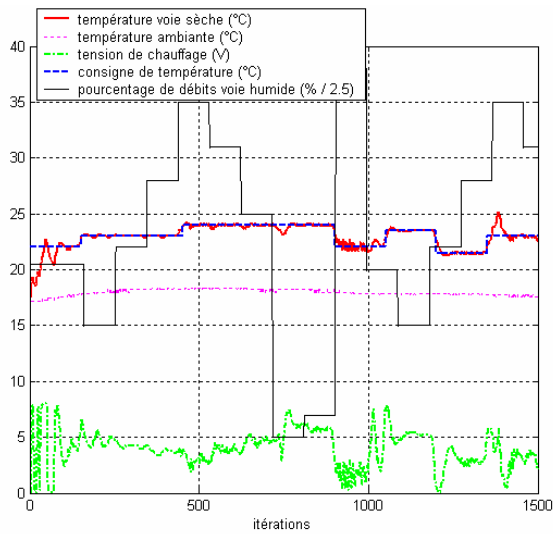


Fig. 4. Contrôle IAGPC de la température d'air de la voie sèche

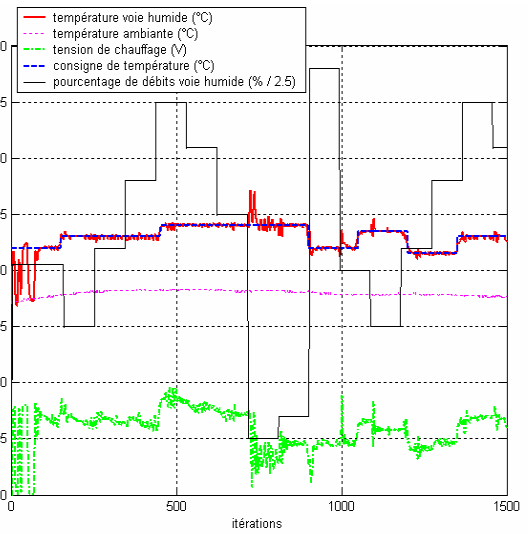


Fig. 7. Contrôle IAGPC de la température d'air de la voie humide.

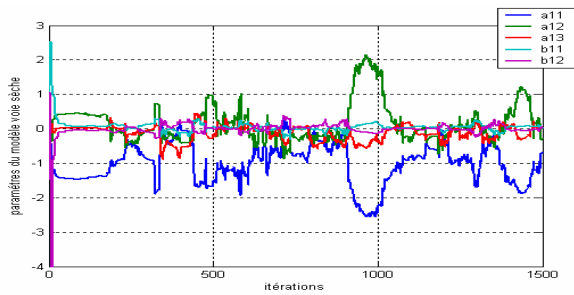


Fig. 5. Estimation des paramètres du modèle de température de la voie sèche

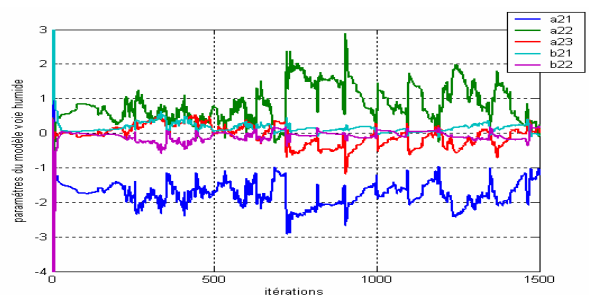


Fig. 8. Estimation des paramètres du modèle de température de la voie humide

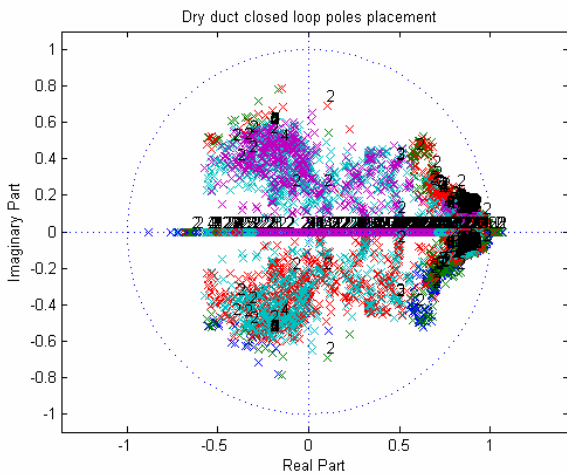


Fig. 6. Estimation du nuage des pôles de la fonction de transfert en boucle fermée à base du modèle de température de la voie sèche

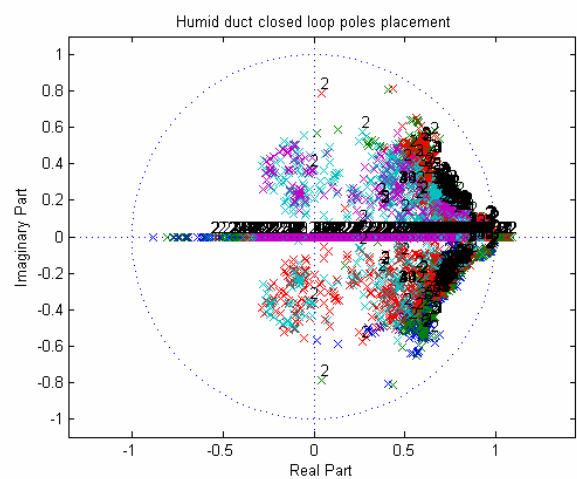


Fig. 9. Estimation du nuage des pôles de la fonction de transfert en boucle fermée à base du modèle de température de la voie humide

Un bon rejet de la perturbation, causée par la température d'air ambiant aspiré à l'entrée de l'unité de conditionnement d'air, apparaît clairement dans le maintien des températures des deux voies proches des consignes. On peut observer la tendance opposée de la commande par rapport à celle de la température ambiante "Fig. 4", "Fig. 7".

La robustesse de la commande s'observe aussi à travers le rejet de toute variation brusque dans la dynamique des températures pour chaque changement du point de fonctionnement du système. Ce dernier représente en réalité la variation de débit d'air pour chaque voie.

Les pics figurant dans la réponse de la température de la la

voie sèche "Fig. 4" et la voie humide "Fig. 7" sont dus aux changements brusques de l'ouverture de l'opercule, ce qui introduit une erreur d'estimation paramétrique et par conséquent une instabilité instantanée des systèmes en boucle fermée "Fig. 6", "Fig. 9".

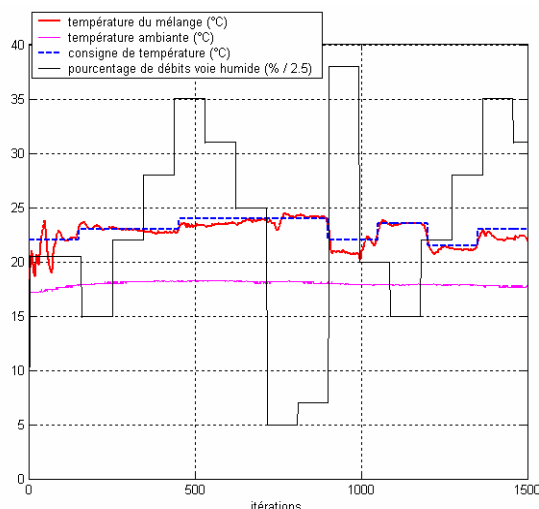


Fig. 10. Le contrôle IAGPC de la température du mélange d'air

## V. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté la synthèse de commande prédictive généralisée adaptative indirecte, appliquée à la maîtrise de la température fournie par un groupe de conditionnement d'air. Le choix de l'architecture de contrôle décentralisé qui présente l'avantage d'être modulaire et extensible, nous a permis de remédier à la complexité du contrôle global du système, tout en garantissant de performances acceptables en poursuite et en régulation, avec une bonne robustesse vis-à-vis des changements de point de fonctionnement qui sont à l'origine des variations paramétriques. Le contrôle de l'humidité et l'insertion d'un étage de supervision sur les contrôleurs locaux sont en étude, pour améliorer les performances globales.

## REFERENCES

- [1] J.J. Hanan "Greenhouse: advanced technology for protected horticulture," pp. 236-260, 1997.
- [2] J.M. Hansen and K. Høgh Schmidt "A computer controlled chamber system design for greenhouse microclimatic modelling and control," *Proc. Int. Sym.on Plant Production in closed Ecosystems. Acta Horticulturae*, n°440, ISHS, pp. 105-110, 1996.
- [3] G. Chassériaux, R. Tawegoumand, M. Lelièvre "Thermal simulation of an air conditioning unit based on a heating system and humid corrugated pad," *20<sup>th</sup> International Congress of Refrigeration, Sidney (Australia), Paper code 720*, 1999.
- [4] R. Tawegoum, R. Teixeira and G. Chassériaux "Simulation of humidity control and temperature tracking in a growth chamber using a passive air conditioning unit," *Contol Engineering Practice Journal*, 14/8, 853-86, 2006.

- [5] R. Riadi, R. Tawegoum, A. Rachid, G. Chassériaux "Modeling and Identification of a Passive Air-Conditioning Unit using the Operating Dependent Parameters-Structure," *CESA-2006: Computational Engineering in Systems Application, Beijing, China*, 2006.
- [6] D.W. Clarke, C. Mohtadi and P.S. Tuffs "Generalized predictive control- part I. The basic algorithm," *Automatica*, 23(2), pp. 137-148, 1987.
- [7] D.W. Clarke, C. Mohtadi and P.S. Tuffs "Generalized predictive control- part II. Extensions and interpretations," *Automatica*, 23(2), pp. 149-160, 1987.
- [8] V. M. Maniar, S.L. Shah, D. G. Fischer and R. K. Mutha "Multivariable constrained adaptive GPC: theory and experimental evaluation," *Int. J. Control Signal process*, V. 11, pp. 343-365, 1997.
- [9] G. Ramond, D. Dumur, A. Libaux, P. Boucher "Direct adaptive predictive control of an hydro-electric plant," *Proceedings 10th Conference on Control Applications*, pp. 606-611, Mexico, 2001.
- [10] J.M. Dion, L. Dugard, A. Franco, M.T. Nguyen and D. Rey, "MIMO Adaptive Constrained Predictive Control Case Study: An Environmental Test Chamber," *Automatica*, Vol. 27, N. 4, pp. 611-626, 1991.
- [11] M. M'saad, J. Chebassier "Commande adaptative des systèmes, Techniques de l'ingénieur," vol. 7426, pp. 1-25, 2000.
- [12] D.W. Clarke "Application of generalized predictive control to industrial process," *IEEE Control Magazine*, 8, pp. 49-55, 1988.
- [13] G. Defaye, N. Regnier, J. Chabanon, L. Cralap and C. Vidal "Adaptive-predictive temperature control of semi-batch reactors," *Chem. Eng. Sci.* 48 (19), pp. 3373-3382, 1993.
- [14] D. Dumur, P. Boucher, K.M. Murphy, F. Déqué "On Predictive Controller Design for Comfort Control in Single Residential Housing," *ECC'97*, 1997.
- [15] M.V. LeLann, M. Cabassud and G. Casamatta "Adaptive model predictive control," *In Methods of Model Based Process Control, Nato Conference, Antalia, Turkey*, 1994.
- [16] A. Nunez-Reys, J.E. Normey-Rico, C. Bordons, E.F. Camacho "A Smith predictive based MPC in solar air conditioning plant", *Journal of Process Control*, v.15, Issue 1, pp 1-10, 2005.
- [17] J. Richalet, A. Rault, J. Testud and J. Papon "Model predictive heuristic control: Applications to industrial processes," *Automatica*, pp.413-428, 1978.
- [18] E. F. Camacho, C. Bordons "Model predictive control," *Advanced textbooks in control and signal processing*, Springer Edition, 1999.
- [19] A. Chraïbi, S. Makhlof and A. Jaffrin "Refroidissement évaporatif de l'air des serres," *Journal de Physique*, n°III, 1995.
- [20] R. Tawegoum, P.E. Bourmet, J. Arnould, R. Riadi and G. Chassériaux "Numerical investigation of an air conditioning unit to manage inside greenhouse air temperature and relative humidity," *International Symposium on Greenhouse Cooling, Almeria-Spain*, 2006, pp. 115-122.
- [21] L. Ljung "System identification," *Theory for the user*, Prentice Hall, 1999.
- [22] N.A. Corrêa, R.G. Corrêa and J.T. Freire "Adaptive control of paste drying in spouted bed using the GPC algorithm," *Brazilian Journal of Chemical Engineering, Sao Paulo dic*, v.17, n.4 -7, 2000.
- [23] I.D. Landau, L. Dugard, "Commande adaptative aspect pratiques et théoriques," *J. Masson, Ed. Paris*, pp. 1-81, 1986.