
Climatisation d'un bâtiment à l'aide d'un système à débit d'air variable

Impact de la régulation sur la consommation d'énergie et la qualité de l'air

^{*,**} S. Ginestet, ^{*} D. Marchio

^{*} Ecole des Mines de Paris, Centre Energétique et Procédés,
60, Bd Saint Michel
F- 75272 Paris

^{**} Université Bordeaux I-ENSAM-ENSCP-CNRS,
Laboratoire TREFLE UMR 8508,
Esplanade des Arts et Métiers
F- 33405 Talence Cedex

stephane.ginestet@iut.u-bordeaux1.fr

RÉSUMÉ.

Au moment de la conception de la climatisation d'un ouvrage comportant une salle de conférence, dont l'utilisation risque d'être variable, il apparaît intéressant d'envisager un apport d'air neuf maîtrisé, notamment pour optimiser les consommations d'énergie de chauffage/refroidissement de l'air neuf. Basé sur un site expérimental, les travaux présentés ici montrent comment définir une régulation qui permette d'allier respect de la qualité d'air et amélioration des consommations énergétiques. Le problème de régulation envisagé est ici celui de la gestion de la qualité de l'air, associé à une maîtrise des débits d'air neuf.

ABSTRACT. When designing an air handling unit for a conference room, of which the use is likely to be variable, it appears interesting to consider a contribution of controlled new air, in particular to optimize consumption of energy of heating/cooling of the new air. Based on an experimental site, the work presented here shows how to define a regulation which makes it possible to combine respect of the quality of air and improvement of energetic consumption. The problem of regulation considered is here that of the management of the quality of the air, associated a control of the outdoor air rates.

MOTS-CLÉS: régulation multivariable, consommation d'énergie, qualité de l'air intérieur

KEYWORDS: multivariable control, energy consumption, indoor air quality

1. Introduction

L'étude porte sur l'amélioration énergétique d'une centrale de traitement d'air permettant l'introduction d'un débit d'air variable. La principale difficulté de l'étude réside ici dans le couplage entre débit d'air neuf et qualité de l'air (Allard *et al.*, 1998). Ce couplage est ici modélisé, en vue d'en assurer le contrôle. Une linéarisation de ce processus doit alors être réalisée, afin de se rapprocher des techniques de paramétrage des régulateurs disponibles dans la littérature (systèmes linéaires). Le paramétrage systématique de régulateurs est alors décrit en détail puis effectué. Les méthodes de paramétrage de l'automatique des systèmes continus linéaires sont mises à profit pour effectuer ce travail:

- tout d'abord par l'approche monovariante (méthode « partial matched model ») (Kamimura *et al.*, 1994):
- ensuite par l'assimilation à un système multivariable (méthode du modèle multivariable)

La programmation est réalisée au moyen d'un logiciel de programmation graphique Simulink, fonctionnant sous environnement Matlab.

2. Site expérimental

La salle de conférence (Morisot *et al.*, 2004) desservie est une salle pouvant contenir jusqu'à environ 300 personnes. La salle est sans vitrage. Les dimensions de cette salle de conférence sont: $L = 17,4$ m, $l = 13,8$ m et $h = 5,2$ m. La salle est très bien isolée. Elle est en contact avec l'extérieur au niveau du plafond et est située au-dessus d'un vide sanitaire. La centrale de traitement d'air, mise en route en octobre 2001, assure le chauffage et le renouvellement d'air du local.

Le contrôle de la batterie chaude se fait par l'intermédiaire d'une vanne trois voies, disposée de manière à réguler la température d'eau. Le débit d'air soufflé est ici variable, ainsi que le débit de renouvellement d'air. Il est asservi par un régulateur PID (paramétré de manière empirique (méthode *trial and error*)). La consigne est de maintenir constante la température d'air à la reprise est d'avoir une concentration en CO_2 inférieure à 800 ppm.

3. Linéarisation du processus

La qualité de l'air intérieur est ici vue en tant que concentration de CO_2 dans l'air. Dans le cadre de cette étude, on cherche à étudier la gestion de la qualité de l'air d'un local par l'intermédiaire de régulateurs qui vont agir sur les débits d'air. L'entrée du régulateur la plus simple à envisager et la plus pratique à utiliser est celle qui sera donnée par une sonde (ou pondération de sondes).

Le modèle retenu sera le modèle à mélange parfait. Dans le cas du contrôle du taux de polluants gazeux dans une zone (mélange parfait), la relation liant les entrées (débit d'air provenant du milieu extérieur Q (m^3/s), émission de polluant q

(m³/s)) et la sortie (concentration intérieure C_i (ppm), que l'on cherchera à contrôler) est de la forme [1] :

$$V \cdot \frac{dC_i}{dt} = Q \cdot C_e - Q \cdot C_i + q \quad [1]$$

Cette relation, et les solutions temporelles associées, sont fortement non linéaires et couplées, ce qui pose de sérieuses difficultés pour paramétrer un régulateur (contrôlant C_i en ajustant Q , par exemple). Afin de résoudre ce problème, une linéarisation en deux étapes est proposée (Ginestet, 2005), linéarisation qui permettra de se rapprocher des méthodes de paramétrage classiques.

La première étape consiste à introduire une variation de débit de ventilation dQ , qui va se traduire par une variation de concentration intérieure δC_i .

On peut simplifier l'équation de transfert, ce qui se traduit ici par (Figure 1):

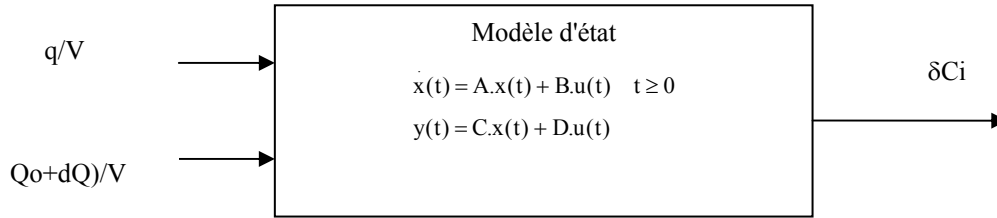


Figure 1 : Equation de transfert linéarisée sous forme de modèle d'état linéaire

avec:

$$A = \left[-\frac{Q_0}{V} \right] \quad B = [1 \quad (C_e - C_{i0})] \quad C = [1] \quad D = [0 \quad 0]$$

La seconde étape du processus de linéarisation consiste à prendre en compte la variation de ces coefficients (lorsque des variations successives de débit sont introduites). Un algorithme est créé. Le programme est ensuite réalisé (sous Matlab/Simulink). Le comportement non linéaire est alors comparé au modèle linéarisé correspondant. Des résultats sont présentés sur la Figure 2.

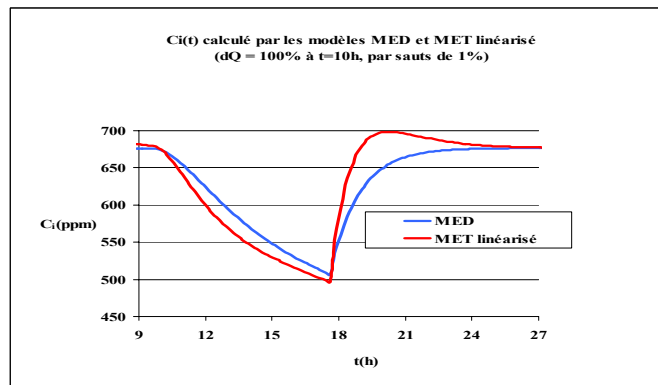


Figure 2 : Variation de la concentration intérieure de CO₂ obtenue par simulation au moyen des modèles (modèle équation différentielle) et (modèle d'état linéarisé)

4. Méthodes de régulation monovariante

Dans certaines configurations (occupation constante), le débit d'introduction (ou d'émission) de polluants peut être considéré comme constant pendant une période limitée (salles de conférences). Dans ce cas l'entrée, en réalité une perturbation non contrôlable, $u_1=q/V$ est supposée constante. Le système peut alors être représenté comme sur la Figure 3.

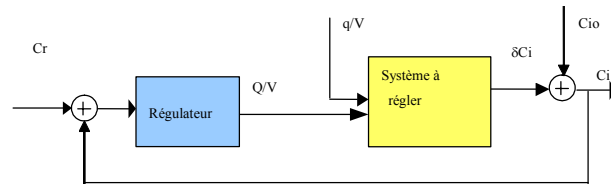


Figure 3 : Schéma représentant le système et le régulateur associé

4.1. Méthodes existantes

Parmi les méthodes de régulation d'un système monovariante, nous pouvons citer la résolution utilisant les fonctions de transfert (Ouederni, 1990) ou la méthode "partial matched model" (Kitamori, 1980). Elle est développée dans plusieurs articles de Kitamori. Elle permet de calculer les coefficients K et T_i du régulateur en fonction des paramètres du système.

L'ensemble (régulateur + système à régler) en boucle fermée est donné par sa fonction de transfert. Un système d'équations de correspondance entre le modèle et le système (associé au régulateur) est alors construit par analogie des coefficients de p , p^2 , $p^3 \dots$ du dénominateur des deux équations représentant les deux systèmes. On en déduit l'expression des paramètres du régulateur. La programmation (Figure 4) est réalisée sous Matlab/Simulink, et permet ainsi un paramétrage systématique des régulateurs.

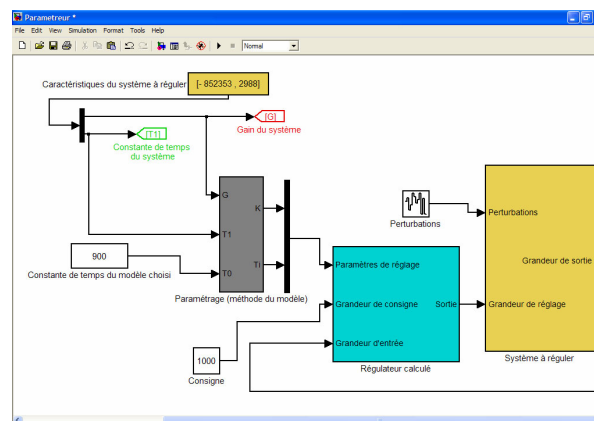


Figure 4: Parametreur (en gris), du régulateur (en bleu) et du système réglé (en jaune)

Un essai est alors effectué avec les données du site expérimental (cet essai n'est pas comparé aux mesures, les données du site expérimental sont utilisées ici pour avoir un ordre de grandeur des phénomènes : constante de temps, débits, volumes...).

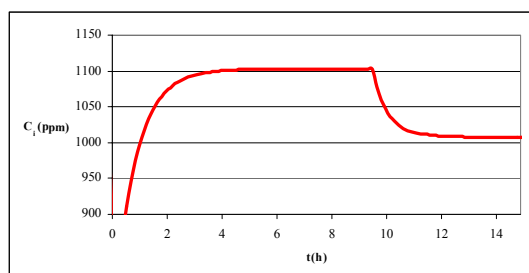


Figure 5 : Concentration intérieure de CO_2 obtenue par régulation PID (méthode « partial matched model » (consigne = 1000 ppm, demandée à $t=8h$)).

Le temps de réaction du régulateur est ici un peu long. Il est possible d'améliorer ces résultats en utilisant les méthodes développées dans (Ouederni, 1990).

4.2. Conclusion pour les méthodes monovariable

Les méthodes monovariables appliquées à la régulation de modulation de débit apparaissent simples à appliquer, et donnent de bons résultats en termes de maintien de consigne. Toutefois, elles nécessitent de disposer d'un calculateur permettant de calculer les paramètres du régulateur et ne sont pas suffisamment adaptables.

A l'issue de cette partie, il a été montré qu'il est possible de paramétrer de manière systématique un régulateur de débit de renouvellement d'air, en fonction d'une consigne de taux de CO_2 , et ce pour une occupation (débit de polluant) constante. Pour pouvoir prendre en compte une variation de l'occupation, il faut faire appel à des méthodes de paramétrage multivariable.

5. Méthodes de régulation multivariable

La plupart des configurations réelles (débit d'émission de polluants q variable (occupation variable, i.e.), concentration introduite C_e variable (humidité de soufflage, i.e.)), sont des configurations complexes à appréhender. Elles peuvent toutefois faire l'objet d'une modélisation particulière, en considérant le système comme multivariable. Nous étudions le cas où q variable, et C_e constante. Il s'agit ici d'un cas proche du cas expérimental, à savoir une salle de conférence pour laquelle l'occupation (donc le dégagement de CO_2) va varier. La représentation du système est la même que précédemment (Figure 3).

5.1. La méthode du modèle

La plupart des méthodes de paramétrage de régulateurs multivariables ont été analysées puis synthétisées dans (Ginestet, 2005). La méthode du modèle a été retenue. On relève ici la présence d'une entrée contrôlable (C_i) et d'une perturbation (q). Un modèle de référence a été établi à l'aide de Simulink¹.

$$A_{ref} = \begin{bmatrix} -2.44.10^{-4} & 0 \\ 0 & -2.44.10^{-4} \end{bmatrix} \quad B_{ref} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -392.2.10^{-6} \end{bmatrix} \quad C_{ref} = [1 \quad 1] \quad D_{ref} = [0 \quad 0]$$

A partir de ce modèle de référence, un régulateur (à deux dimensions) est paramétré. Les paramètres physiques de la salle de conférence (mesures, notamment de C_i et C_e) sont mises à profit pour effectuer une simulation sur une journée. La simulation est réalisée à partir de Simulink, et en utilisant en partie la bibliothèque Simbad du CSTB (Simbad, 2005). La consigne C_r est fixée à 800 ppm (pour vérifier la robustesse du régulateur), puis est montée à 1000 ppm (référence réglementaire pour le renouvellement d'air). On obtient alors les résultats de la Figure 6.

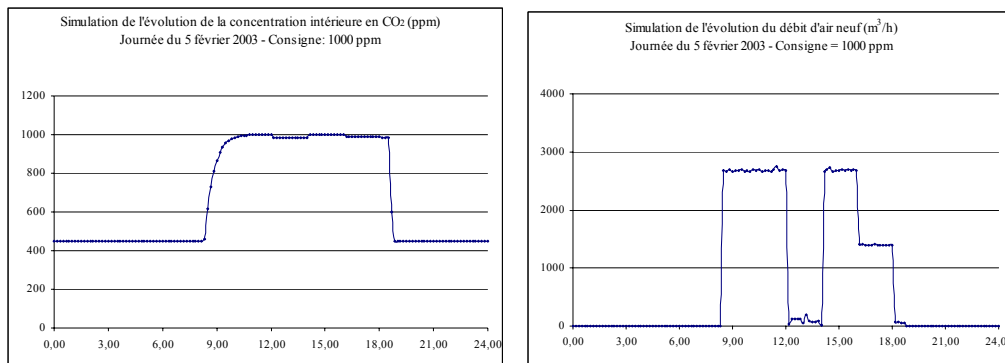


Figure 6 : Concentration en CO_2 simulée à l'intérieur de la salle de conférence (consigne = 1000 ppm) (gauche) et débit d'air neuf (m^3/h) simulé pour la salle de conférence (consigne = 1000 ppm) (droite)

Sur la journée du 5 février 2003, à partir des mesures de températures (extérieure et de soufflage), il est possible d'évaluer les gains en consommation thermique obtenus par le changement de consigne.

¹ Pour déterminer le système (modèle) de référence: création sous Simulink un modèle d'état de référence qui sert de modèle test, calcul à partir de l'équation en régime permanent la valeur du débit à introduire pour obtenir C_r , (pour $C_r = 650$ ppm, il faut avoir en régime établi $dQ = 0.1885.Q$, soit une valeur d'entrée $u_{ref} = 1.1885.Q$).

	Expérimentale	Simulée	Amélioration
Consommation thermique (kWh)	176,4	100,8	75,1 %

Tableau 1 : *Evaluation de l'amélioration de la consommation de la CTA*

Cette amélioration en consommation thermique très importante est liée au fait que pour la journée choisie, la température extérieure est relativement faible [0°C - 10°C]. Il faut aussi bien relever le fait que ici l'amélioration est liée à une variation de consigne (mais qui est bien respectée, le régulateur est défini de manière scientifique et non empirique). Les calculs ont été menés toujours sur la base du programme réalisé sous Simulink.

5.2. Conclusion pour les méthodes multivariables

Le recours aux méthodes multivariables (Larminat, 1996) est donc motivé pour la résolution de problèmes prenant plus complexes (une variation de l'occupation, du taux de polluant extérieur...). L'application développée donne elle aussi de bons résultats en ce qui concerne le maintien de la consigne. La mise en œuvre de la méthode est plus ardue que précédemment, notamment car elle nécessite l'établissement d'un modèle de référence, ce qui ne peut se faire bien souvent que de manière informatique. Néanmoins, elle permet de traiter des cas bien plus généraux que la méthode monovariable.

6. Conclusion

Après avoir réalisé une étude mathématique de la fonction de transfert simplifiée du taux de polluant dans un local, plusieurs techniques de paramétrage de régulateur ont été étudiées.

Les régulateurs ont alors été testés en simulation. Les avancées réalisées lors de cette étude peuvent trouver un prolongement naturel selon plusieurs axes.

Tout d'abord, un recours aux boîtes à outils disponibles sous l'environnement Matlab. Parmi celles-ci, la Control System Toolbox. Ainsi, les systèmes modélisés peuvent être étudiés de manière complète et systématique : observabilité, gouvernabilité, réponse, mise sous forme canonique, écriture sous forme de fonction de transfert, diagonalisation... De plus, de nombreuses techniques de paramétrage sont systématisées au moyen de fonctions de type LQ, LQR, Riccati...

Ensuite, les paramétrages ainsi réalisés peuvent être implantés sur des régulateurs réels qui travailleront en émulation ou en simulation. Les fabricants de régulateurs (industriels) sont aujourd'hui familiers de ce genre de techniques de régulation à plusieurs variables. Enfin, si les exigences en termes de maintien de qualité de l'air intérieur sont modifiées (nouvelles exigences normatives), ce travail permettra d'adapter le paramétrage de régulateurs.

7. Nomenclature

C_i	concentration intérieure de polluant (ppm)
C_e	concentration extérieure de polluant (ppm)
q	taux de dégagement de polluants (m^3/s)
Q	débit d'air extérieur (m^3/s)
t	temps (s)
V	volume de la salle (m^3)

8. Bibliographie

- Allard F., P. Blondeau et A.L. Tiffonnet *Qualité de l'air : état des lieux et bibliographie*, Université de La Rochelle, LEPTAB, 1998.
- De Larminat P., *Automatique, commande des systèmes linéaires*, 1996, Hermès, éditions Lavoisier
- Ginestet S., *Simulation dynamique des systèmes de climatisation, application aux régulations innovantes des CTA*, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 2005
- Kamimura K., A.Yamada, T. Matsuba et al (1994), Computer-Aided Tuning software for PID controllers, *Ashrae Transactions*, 94(100), pp 180-190.
- Morisot O., C. Laruelle, S. Markovic, D. Marchio, et S. Ginestet, *Garantie et maintien des performances : Implantation et test de méthodes de retro & on-going commissioning, mode de valorisation des prestation de garantie des performances énergétiques*, rapport final août 2004
- Ouderni M., *Modélisation et simulation des régulations dans les codes de calcul thermique du bâtiment*, Thèse de doctorat, Ecole des Mines de Paris, 1990
- Simbad, « SIMulation of Buildings And Devices » version 2.2, CSTB, département DDD, 2005