

# AMELIORATION DE LA VENTILATION DU TUNNEL DE KHERRATA IMPROVEMENT OF THE VENTILATION OF THE TUNNEL OF KHERRATA

R. ALKAMA, A. MECHOUCHE, S. BOUKOU

Laboratoire de Génie Electrique  
Université de Béjaia, Algérie

## RESUME

Dans cet article nous présentons un système intelligent qui améliore la ventilation du tunnel routier de Kherrata dans la wilaya de Béjaia. Il tient compte des mesures de pollution (opacité et monoxyde de carbone), du sens et de la vitesse du vent naturel ainsi que du comptage du nombre de véhicules légers, moyens et lourds. Nous avons modélisé l'évolution de la pollution en fonction du temps et du nombre de véhicules qui constituent les sources de pollution. Des enregistreurs installés aux bornes des capteurs durant une période de dix jours nous ont permis de vérifier le modèle. Nous avons simulé, sous MATLAB, le taux de pollution dans le tunnel en tenant compte du nombre de véhicules constituant le trafic et de la pollution extérieure. L'intérêt du système réside dans l'amélioration des conditions de sécurité (prévention d'accidents) et l'optimisation de la ventilation en termes d'économie d'énergie.

**MOTS CLES :** Pollution, tunnel, ventilation, modélisation.

## ABSTRACT

In this paper we present an intelligent regulation system for ventilation of Kherrata road tunnel in wilaya of Béjaia. It is based on pollution measurement (soot and carbone monoxide), detection of direction and speed of ambient wind and vehicle number count. We modellised pollution variation with respect to time and number of vehicles wich are the sources of pollution. The model is verified by results of pollution measurements with recorders connected to the sensors. We simulated, in MATLAB, the pollution rate taking into account the number of vehicles crossing the tunnel and the external pollution. The system interest is improvment in security conditions (accident prevention), ventilation optimization and energy economy.

**KEY WORDS :** pollution, tunnel, ventilation, modelisation

## 1. INTRODUCTION

Lors du passage des véhicules dans un tunnel de longueur importante, les gaz d'échappement s'accumulent et risquent de causer des accidents par l'asphyxie à cause du monoxyde de carbone (CO) ou par réduction de la visibilité à cause de la suie. L'évacuation de ces gaz, par une ventilation appropriée, est indispensable. La ventilation, qui permet de dégager l'air pollué et d'introduire l'air frais, doit dépendre du taux de pollution dans le tunnel et de la direction du vent naturel à l'extérieur. Aussi faudrait-il installer des capteurs de mesure de CO, d'opacité et de direction du vent naturel. Dans le tunnel de KHERRATA, d'une longueur de 5700 mètres, sont installées deux séries de 41 ventilateurs chacune. Lorsque le seuil 1 de pollution [1] est atteint la première série de ventilateurs est déclenchée. La deuxième série est activée dès le seuil 2 alors qu'un signal d'alarme avec fermeture des accès au tunnel est actionné après le dépassement du seuil 3 de pollution.

Dans le cas où un capteur de pollution est défaillant, il peut soit déclencher la ventilation maximale en permanence et engendrer inutilement une forte consommation d'énergie, soit ne pas déclencher la ventilation et causer une catastrophe à l'intérieur du tunnel. D'autre part, en présence

de brouillard ou d'incendie à proximité de l'entrée du tunnel, il est inutile de ventiler et d'introduire de l'air extérieur plus pollué ou plus opaque.

Notre travail consiste à réguler la ventilation du tunnel même s'il y a défaillance de capteur et ce en utilisant un micro-ordinateur qui tient compte des résultats de mesure de la pollution mais aussi du nombre de véhicules constituant le trafic et de la qualité de l'air à l'extérieur du tunnel.

## 2. PRINCIPES DES CAPTEURS UTILISES

**Capteur d'opacité :** L'opacité est due à la fumée dégagée en majorité par les véhicules Diesel [2]. Sa mesure est basée sur l'atténuation d'un faisceau lumineux [3]. Il mesure de 0 à 100 % lorsque l'opacité varie de 0 à 2 mg/m<sup>3</sup>.

**Capteur de CO :** Le CO, produit essentiellement par les véhicules à essence [2], est un gaz toxique et asphyxiant. Il réagit avec l'hémoglobine 200 fois plus que l'oxygène. Des capteurs électrochimique ou à semi-conducteur [4] peuvent être utilisés. Le principe du capteur installé dans le tunnel repose sur la combustion catalytique

et la mesure de l'élévation de température engendrée.

**Capteur de sens et vitesse du vent :** Quatre jauges de déformation sont collées sur une plaque flexible plastique et placées dans un pont de Weatstone. Le signe de la tension de déséquilibre du pont dépend du sens du vent et son amplitude est proportionnelle à la vitesse du vent.

**Capteur de véhicules :** Un câble piézo-électrique traversant la route délivre des impulsions à chaque passage de véhicule. L'amplitude des impulsions dépend du poids des véhicules et permet de les classer en véhicules légers, moyens et lourds. Les véhicules légers sont supposés à essence tandis que les véhicules moyens et lourds sont supposés à gasoil. Une précédente étude statistique [5] a montré une très bonne corrélation entre l'opacité mesurée dans le tunnel et le nombre de véhicules diesel qui le traversent.

### 3. MODELISATION DE LA POLLUTION

Pour pouvoir réguler la ventilation à partir du nombre de véhicules, il faut connaître l'évolution de la pollution engendrée en tenant compte de l'émission des véhicules, du sens et de la vitesse du vent et des turbulences intérieures et extérieures.

L'équation résolue par le modèle est l'équation (1) de conservation de la masse à l'intérieur du tunnel, où il est supposé que l'air est mélangé le long des axes radiaux à l'axe du tunnel ( $y$  et  $z$ ) grâce essentiellement à la circulation des véhicules :

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial Cu}{\partial x} = \frac{\partial T_{atm}}{\partial x} + \frac{\partial T_{veh}}{\partial x} + S - P \quad (1)$$

Où

- $C$  représente la concentration de la pollution ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ),
- $u$  la vitesse du vent à l'intérieur du tunnel (m/s),
- $S$  la source de pollution ( $\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ s}$ ),
- $P$  la quantité d'air frais introduite dans le tunnel ou celle de l'air pollué poussée vers l'extérieur par unité de temps ( $\mu\text{g}/\text{m}^3 \text{ s}$ ),
- $T_{atm} = K \partial C / \partial x$  les turbulences extérieures,
- $T_{veh} = nCu_{veh}$  les turbulences dues aux véhicules (effet de pistonnement),
- $u_{veh}$  la vitesse des véhicules,
- $K$  le coefficient de dispersion et
- $n$  un paramètre lié aux sections du tunnel et des véhicules.

L'équation peut être résolue par la méthode des volumes finis à une dimension si on considère une variation spatiale  $C(x, t)$  [6]. Si on suppose que la pollution est bien mélangée à l'intérieur du tunnel de longueur  $L$  et de section  $A$ , il ne subsistera que les variations par rapport aux extrémités du tunnel  $C_{sud}$  et  $C_{nord}$  et les variations en fonction du temps  $C(t)$ . La résolution est simplifiée.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = -\frac{1}{L} \left[ \left( C(u + nu_{veh}) - K \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{gauche} - \left( C(u - nu_{veh}) - K \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{droite} \right] + S - P$$

En remplaçant  $P$  par

$$P = R (C - C_{ext})$$

où

$R$  est le taux d'échange avec l'extérieur

$C_{ext}$  est la concentration à l'extérieur

et en supposant que les concentrations aux extrémités sont les mêmes  $C_{sud} = C_{nord} = C_{ext} = C1$ , l'équation devient :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{1}{L} (C1 - C) \left( u + nu_{veh} + 2 \frac{K}{L} + \frac{R}{A} \right) + S \quad (3)$$

Sa solution est :

$$C(t) = C(\infty) \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right] \quad (4)$$

Où :

$$C(\infty) = C_1 + \frac{SL}{u + nu_{veh} + 2 \frac{K}{L} + \frac{R}{A}} \quad (5)$$

et :

$$\tau = \frac{L}{\left( u + nu_{veh} + 2 \frac{K}{L} + \frac{R}{A} \right)} \quad (6)$$

La concentration de pollution est directement proportionnelle à la source de pollution que sont les véhicules.

### 4. VERIFICATION DU MODELE

Pour vérifier le modèle d'évolution de la pollution, nous avons installé des enregistreurs de pollution dans le tunnel et compté le nombre de véhicules entrant et sortant du tunnel sur une période de dix jours (du 02 au 12 juillet 2000). Les enregistrements obtenus ont été échantillonnés à raison d'une valeur toutes les 5 minutes. La valeur relevée à l'instant  $t$  correspond à la pollution émise par les véhicules entrant durant la période  $t-5$  min à  $t$  et par ceux qui sortent de  $t$  à  $t+5$  min. Les 5 minutes représentent le temps moyen de traversée du tunnel.

La figure 1 montre l'opacité mesurée durant 24 heures le 06 juillet 2000. Nous avons choisi cette journée de grande circulation à cause du jour de marché et du nombre important d'estivants de l'est qui fréquentent les plages de la côte entre Béjaia et Jijel. Les heures de pointe où le trafic est maximal, ainsi que le palier de la nuit où la circulation est quasi nulle, sont très visibles. Le minimum apparu vers 18 h est dû à la fermeture du tunnel pour permettre l'évacuation de la quantité importante de pollution dans le tunnel. Le tunnel est fermé chaque fois que la ventilation n'arrive pas à maintenir un taux de pollution acceptable dans le tunnel. Durant la fermeture, les véhicules doivent emprunter l'ancienne route sinueuse.

Sur la figure 2 sont comparées l'opacité mesurée et celle calculée à partir du modèle (4) durant trois heures (le 04 juillet 2000 de 10h30 à 13h30). La source  $S$  est liée au nombre de véhicules  $N_{veh}$  et à leurs poids respectifs  $P_{veh}$  par :

$$S = E_b N_{veh} P_{veh}$$

où

$E_b$  représente l'émission de base d'un véhicule diesel [2].

L'évolution est quasi identique. L'écart relatif entre les deux courbes ne dépasse pas 10%. Par conséquent, le modèle peut être utilisé pour simuler l'évolution de la pollution et engendrer les signaux de commande des ventilateurs.

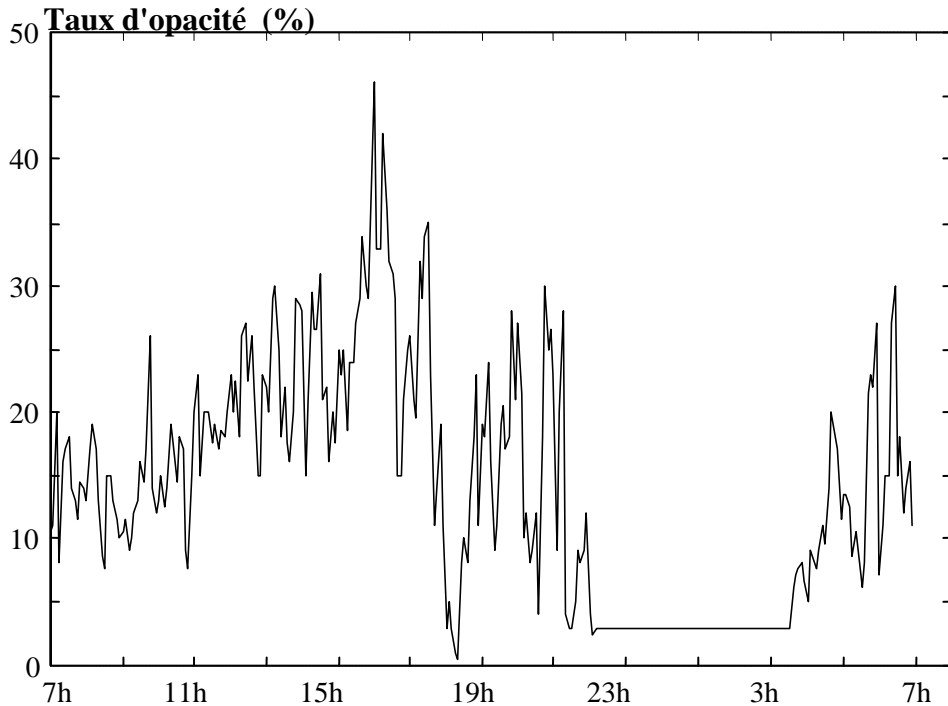


Figure 1 : Taux d'opacité mesurée du 06/07/00 à 7h au 7/07/00 à 7h

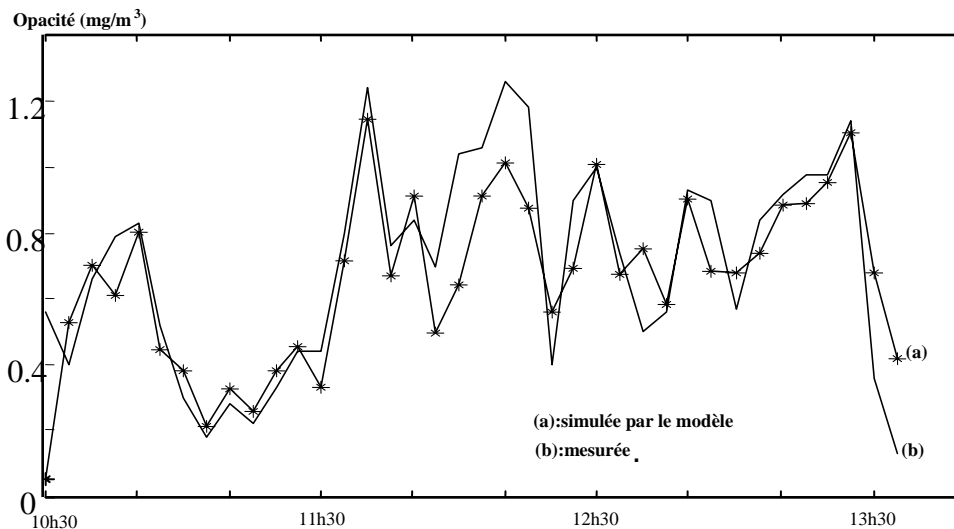


Figure 2 : Opacités simulée et mesurée du 04/07/00 de 10h30 à 13h30.

## 5. REGULATION DE LA VENTILATION

Notre objectif ne s'arrête pas à la simulation du taux de pollution ou de la qualité de l'air dans le tunnel comme dans des travaux précédents [7] [8]. Nous devons générer des signaux de commande des moteurs asynchrones qui entraînent les ventilateurs et éventuellement des signaux

d'alarme à chaque fois que le seuil 3 de pollution est dépassé ou que l'adéquation pollution – nombre de véhicules n'est pas respectée. Dans des travaux antérieurs, la ventilation a été simulée à l'aide du programme NMF (Neural Model Format) [9] ou en utilisant la logique floue avec un schéma multi – niveaux [10]. Nous avons opté pour une régulation numérique sous

MATLAB. Sur la figure 3 est représenté le schéma de la régulation analogique déjà existante. La ventilation est déclenchée chaque fois que la pollution dépasse des seuils préfixés. Le fonctionnement dépend de la fiabilité des capteurs de pollution dont l'entretien et le réétalonnage devraient être permanents, du temps de réponse et de la temporisation à choisir. Ces difficultés amènent les agents de surveillance du tunnel à utiliser la commande manuelle à partir de la salle de contrôle selon leur appréciation du trafic.

Sur la figure 4 est représenté le schéma de la régulation informatisée que nous proposons. Les entrées sont : le taux de CO à l'intérieur et à l'extérieur du tunnel, le taux d'opacité à l'intérieur et à l'extérieur du tunnel, les seuils de CO et d'opacité, la direction du vent naturel et surtout le nombre de véhicules empruntant le tunnel (légers, moyens et lourds).

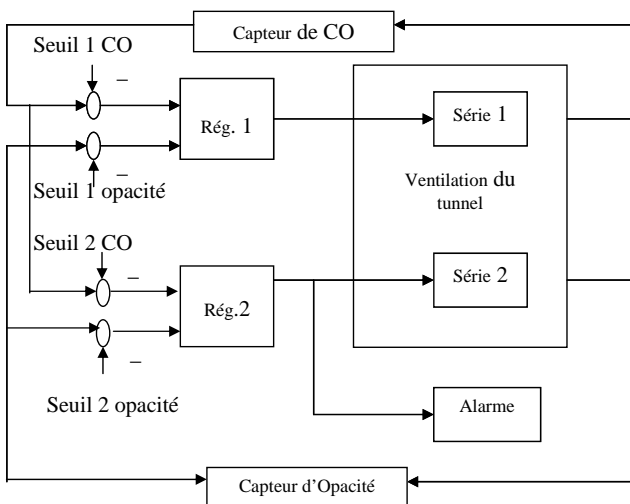


Figure 3 : Schéma de la régulation analogique existante

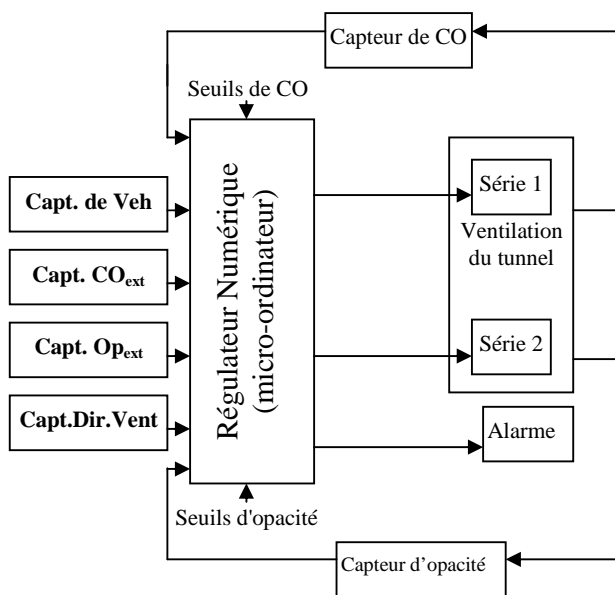


Figure 4 : Schéma de la régulation numérique proposée

Les sorties sont les signaux de commande de la première série de ventilateurs au seuil 1 (33 % de  $2\text{mg}/\text{m}^3$  d'opacité), de la deuxième série au seuil 2 (50 % de  $2\text{mg}/\text{m}^3$  d'opacité) et des alarmes et fermetures des accès au seuil 3 (75 % de  $2\text{mg}/\text{m}^3$  d'opacité). Un programme adéquat permet de gérer d'une façon optimale les entrées et de délivrer les signaux de commande nécessaires.

La comparaison de l'état de pollution, avec et sans régulation numérique, illustrée par la figure 5 montre que l'opacité est considérablement stabilisée par la régulation. Dans ces résultats de simulation, nous pouvons remarquer que le taux d'opacité qui pouvait atteindre 60 % avec la régulation analogique reste inférieur à 30 % avec la régulation numérique.

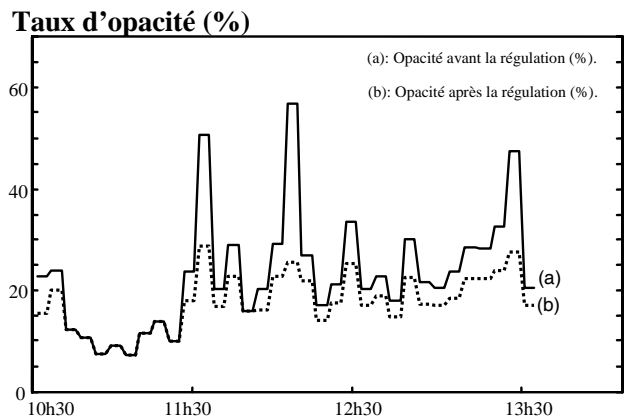


Figure 5 : Opacité avant et après la régulation de la ventilation.

Les signaux d'alarme apparaissent aussi lorsqu'il y a une forte pollution supérieure au seuil 2 alors que le nombre de véhicules dans le tunnel n'est pas important. Cette apparition se fait chaque fois que le nombre de véhicules en présence est inférieur à 10% du nombre de véhicules qui créeraient cette pollution selon le modèle. Ceci pourrait provenir soit de la défaillance de capteurs de mesure soit de la présence d'incendie (accident) source de pollution.

D'autre part, avant d'insuffler de l'air extérieur vers le tunnel notre système de ventilation prévoit de vérifier qu'il est moins pollué que l'air à l'intérieur du tunnel. Il peut être plus pollué s'il y a un incendie à proximité du tunnel ou un brouillard intense de grande opacité. La figure 6 montre la réaction du système lorsque nous lui introduisons des données de pollution extérieure  $C_{ext}$  supérieures à la pollution à l'intérieur du tunnel (de 12h40 à 13h20). Il arrête la ventilation et déclenche un signal d'alarme.

Ainsi la ventilation du tunnel est régulée en tenant compte du nombre de véhicules empruntant le tunnel et de la pollution à l'extérieur en plus des résultats de mesure de pollution à l'intérieur du tunnel.

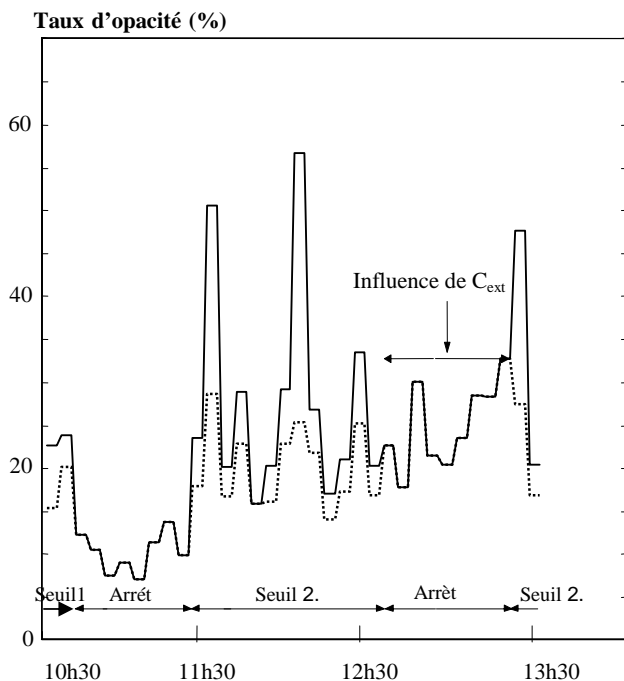


Figure 6 : Influence de la pollution extérieure sur la ventilation.

## CONCLUSION

Nous avons élaboré un système de régulation de la ventilation qui tient compte de plusieurs paramètres : opacité et concentration du monoxyde de carbone mesurées à l'intérieur et à l'extérieur du tunnel, nombre et type de véhicules entrants et sortants et sens du vent naturel. Le système permet d'optimiser la ventilation en termes de sécurité et d'économie d'énergie, de signaler toute anomalie tout en continuant à assurer sa tâche et d'éviter des accidents du type de celui du tunnel du mont blanc en France.

Sa mise en pratique nécessite l'acheminement de tous les signaux issus des capteurs de mesure à la salle de contrôle

et les appliquer, en temps réel, à un ordinateur à travers une carte d'interface et d'acquisition de données, ce que nous envisageons de faire dans une prochaine étape.

## REFERENCES

- [1] Directives de l'AIPCR publiées au congrès mondial sur la route. Sydney 1983.
- [2] Weaver C. «Air pollution from motor vehicles» Ed Word Bank, Washington 1976.
- [3] Appareil de surveillance des poussières «SIGRIST photometer». Documentation technique.
- [4] Wiegler G. & al. «Semiconductor gas sensor for detecting NO and CO traces in ambient air of road traffic». Sensors and Actuators Volume B17, (1994), pp. 93-99.
- [5] Ourtirane K. , Alkama R. «Analysis of vehicular pollution in the road tunnel of Kherrata (Algeria)». Advances in Air Pollution, Volume 11, (2002), pp.773-782.
- [6] Bellasio R. «Modelling traffic air pollution in road tunnels». Atmospheric Environment Vol 31 N°10, (1997), pp. 1539-1551.
- [7] Matsumoto K. & al. «Advanced air quality simulation model for road tunnel portals in complex terrain». International Journal of vehicle design, Vol 20, (1998), pp. 71-78.
- [8] Jaeschke W. & al. «Dispersion modelling near tunnel exits: Simulation and measurements». International journal of Environment and Pollution, Vol 8, (1997), pp. 683-689.
- [9] Bring A. & al. «Simulation and measurement of road tunnel ventilation». Tunnelling and Underground Space Technology, Volume 12, (1997), pp. 417-424.
- [10] Ping-Ho Chen & al. «Application of fuzzy control to a road tunnel ventilation system». Fuzzy Sets and Systems, Volume 100, (1998), pp. 9-28.