



**CONTROLE COMMANDE
DE LA VENTILATION**

**EXPERIMENTATION
LOGIQUE FLOUE**

RAPPORT

Marie-Noëlle MARSAULT
Jean-Marie APVRILLE
Jean-Claude MARTIN

Septembre 2001

SOMMAIRE

1	FONCTIONS DE LA COMMANDE DE LA VENTILATION.....	3
2	DONNEES DE BASE.....	4
2.1	LES POLLUANTS	4
2.2	DONNEES AERAUQUES	4
2.3	DONNEES DE TRAFIC	4
3	SYSTEMES DE COMMANDE.....	5
3.1	LES SYSTEMES DE REGULATION RECENSES.....	6
3.2	LES SYSTEMES CONNUS EN TUNNEL	6
3.2.1	<i>Régulation par seuils.....</i>	<i>6</i>
3.2.2	<i>Régulation par seuils avec anticipation (Trafic) et expérimentation PID.....</i>	<i>8</i>
4	LA LOGIQUE FLOUE.....	10
4.1	INTRODUCTION	10
4.2	LA COMMANDE FLOUE	13
4.2.1	<i>Généralités</i>	<i>13</i>
4.2.2	<i>Principes.....</i>	<i>13</i>
4.2.3	<i>Régulateur</i>	<i>14</i>
4.3	APPLICATIONS POSSIBLES EN TUNNEL	15
5	APPLICATION AU TUNNEL DE LA CROIX-ROUSSE.....	16
5.1	PRESENTATION DU TUNNEL.....	16
5.2	LE MODE DE COMMANDE ACTUEL	17
5.3	PRESENTATION DE L'EXPERIMENTATION	18
5.4	REGULATION FLOUE AVEC DEUX VARIABLES D'ENTREE : CO ET OPACITE	20
5.4.1	<i>Partition des valeurs mesurables de CO en sous-ensembles flous.....</i>	<i>20</i>
5.4.2	<i>Partition des valeurs mesurables de CO sous travaux en sous-ensembles flous.....</i>	<i>20</i>
5.4.3	<i>Partition des valeurs mesurées d'opacité en sous-ensembles flous.....</i>	<i>21</i>
5.4.4	<i>Prise de décision</i>	<i>21</i>
5.4.5	<i>Les sorties (régimes de ventilation)</i>	<i>21</i>
5.5	REGULATION FLOUE AVEC TROIS VARIABLES D'ENTREE : CO, OPACITE ET TRAFIC	22
5.6	RESULTATS DES DIFFERENTES PHASES DE L'EXPERIENCE	23
5.6.1	<i>Fonctionnement initial (observé en seconde étape).....</i>	<i>23</i>
5.6.2	<i>En fonctionnement logique floue sur niveaux de CO et opacité (3ème étape).....</i>	<i>23</i>
5.6.3	<i>En fonctionnement sur niveaux et variations de trafic (Dernière étape).....</i>	<i>24</i>
5.7	LIMITES DE L'EXPERIENCE.	25
	➤ <i>Expérience partielle</i>	<i>25</i>
	➤ <i>Caractéristiques du ventilateur régulé inappropriées.....</i>	<i>25</i>
	➤ <i>Implantation des capteurs de trafic inappropriée.</i>	<i>25</i>
	➤ <i>Critères de comparaison faussés</i>	<i>25</i>
6	ENSEIGNEMENTS ET CONCLUSIONS	26
6.1	LES ENSEIGNEMENTS A TIRER.....	26
6.1.1	<i>Conditions d'utilisation de la logique floue.....</i>	<i>26</i>
6.1.2	<i>Aspects positifs de la logique floue</i>	<i>26</i>
6.2	EN CONCLUSION.....	27

ANNEXES

Bibliographie

1 Fonctions de la commande de la ventilation

En règle générale un système de ventilation est mis en place pour répondre à deux objectifs :

- assurer aux usagers en tunnel une qualité de l'air satisfaisante en termes de sécurité (présence du CO) et de confort (opacité),
- permettre en cas d'incendie d'extraire le maximum des fumées produites par celui-ci.

En exploitation normale, c'est à dire la plus grande partie du temps, il faut satisfaire au premier objectif. Pour cela il faut fournir un débit d'air suffisant dans le tunnel ; il faut aussi tendre à limiter le plus possible la dépense en énergie électrique pour réduire les coûts, et donc fournir la quantité d'air juste nécessaire au bon moment. Le système de régulation à mettre en œuvre doit être suffisamment performant pour garantir que les niveaux de CO et/ou d'opacité n'atteindront jamais des valeurs qui dégradent la sécurité et le confort offerts aux usagers traversant le tunnel.

En cas d'incendie les actions de désenfumage doivent être le plus rapide possible avec des débits d'extraction très importants concentrés sur les zones du sinistre. Une fois l'incendie détecté, les commandes sont lancées par des procédures *d'urgence* plus ou moins automatiques, et il est toujours possible d'agir manuellement sur ces séquences de désenfumage préétablies. Il ne s'agit pas d'une régulation à proprement parler.

La commande des équipements assurant le désenfumage n'est pas traitée dans le présent document.

Un bon système de commande automatique de ventilation doit à la fois être rationnel et économique, en s'adaptant au mieux aux besoins, c'est à dire maintenir des conditions ambiantes correctes pour les usagers en tunnel en fonction des paramètres suivants :

- La toxicité de l'air : le traceur usuel est le monoxyde de carbone (CO), complété maintenant par les oxydes d'azote (NO_x),
- L'opacité de l'air est le paramètre représentatif des conditions de visibilité de l'utilisateur et du confort général,
- La vitesse du courant d'air en tunnel peut représenter un danger physique pour les piétons au-delà de 8 m/s (tunnel bidirectionnel) et 10 m/s (tunnel unidirectionnel).

Des niveaux de pollution admissibles (toxicité en CO et opacité) sont préconisés par le CETU et figurent en annexe 1. Le dioxyde d'azote fait l'objet de diverses indications dans l'annexe 1.

La ventilation est dimensionnée de façon que les débits d'air soient suffisants pour maintenir, en toutes circonstances, la pollution en dessous des seuils admissibles.

La capacité maximale de la ventilation, correspondant au cas d'exploitation le plus défavorable sera donc très peu employée

2 Données de base

Les données ci-dessous sont celles qui sont habituellement mesurées en tunnel et sur le réseau routier adjacent.

2.1 Les polluants

Ainsi que cela a été mentionné dans le § 1, il s'agit :

- Du monoxyde de carbone CO, mesuré par des capteurs dans une plage de mesures de concentration de 0-300 ppm.
Les principaux types de capteurs sont les analyseurs à absorption infrarouge, les analyseurs catalytiques (ou thermochimiques) et les détecteurs à cellule électrochimique. Ce sont ces derniers qui sont les plus utilisés en France dans les tunnels routiers.
- Des suies et particules en suspension dans l'air : elles conditionnent la transparence de l'atmosphère (opacité) et sont quantifiées par la mesure du coefficient d'extinction linéique K ; qui est l'atténuation que subit un faisceau de lumière qui traverse une tranche de l'atmosphère polluée, d'une épaisseur d'un mètre. L'étendue des appareils de mesure est en général de 13 ou 15.10⁻³ m⁻¹. Ces appareils sont, soit des transmissiomètres, soit des diffusiomètres.
- Des oxydes d'azotes (NO_x = NO + NO₂). Ces polluants sont encore assez peu mesurés dans les tunnels routiers français, mais l'installation de capteurs permettant de les mesurer est appelée à se développer. Ils peuvent être à chimiluminescence ou électrochimique. Les valeurs rencontrées en tunnel sont de l'ordre de 4 à 10 ppm pour NO et de 0,5 à 1 ppm pour NO₂.

2.2 Données aérauliques

Il s'agit essentiellement de la vitesse de l'air en tunnel, mesurée par des anémomètres, à moulinet, à thermistance, à système sonique ou à effet Vortex.

2.3 Données de trafic

Elles peuvent être relevées en amont du tunnel ou dans le tunnel lui-même. Dans le premier cas, l'intérêt est évident pour une anticipation des besoins, dès lors qu'on est sûr que le trafic mesuré empruntera le tunnel (ce qui peut être très complexe en ville ou dans le cas de voies avec de nombreux échangeurs). Dans le second cas des données relevées en tunnel, il n'y a pas d'intérêt direct pour la commande de la ventilation. Ces relevés constituent plutôt une vérification a posteriori de la bonne marche de la régulation, ou permettent d'établir une base de données statistiques si le trafic présente des courbes d'évolution répétitives.

Les données de trafic utiles sont les comptages par sens à chaque pas de temps (de l'ordre de la minute), la composition du parc en différenciant pour le moins VL et PL, et la vitesse.

Les moyens d'accéder à ces données sont variés :

- Il peut s'agir de données relevées à un péage, si le tunnel ou la voie sont concédés. Mais cela pose des problèmes si le péage est situé à une seule tête du tunnel.
- L'installation de boucles de détection électromagnétiques dans la chaussée peut être spécifique au tunnel; le choix de l'emplacement est libre, mais il faut prendre en charge la transmission des données sur des distances assez longues (plusieurs km).
- L'utilisation de stations routières existantes (type SIREDO) est possible mais, là encore, le choix des données et l'emplacement de la station peuvent ne pas être adaptés aux besoins.
- En milieu urbain, les données sont souvent plus nombreuses et plus denses géographiquement (systèmes d'informations routières).

La précision des données à relever (comptages horaires, ou en temps réel) doit dépendre de l'utilisation qui en sera faite. En tout état de cause, un comptage temps réel avec un calcul de moyenne sur une période glissante semble mieux adapté pour réaliser du contrôle-commande.

3 Systèmes de commande

Les systèmes de contrôle-commande d'équipements de ventilation qui existent peuvent être classés en deux groupes :

- Les systèmes qui mesurent le taux de CO et le niveau d'opacité produits par le trafic dans un ouvrage donné, et qui agissent ensuite sur la ventilation pour maintenir ou faire descendre soit le taux de CO, soit l'opacité en dessous des seuils préétablis.
 - Ceux qui mesurent différents paramètres du trafic pour ensuite, connaissant les caractéristiques du tunnel, en déduire le débit d'air devant être assuré pour que le taux de CO et l'opacité ne dépassent les seuils qui ont été préétablis.
- Les systèmes du premier groupe agissent *à posteriori* : Lorsqu'un seuil est dépassé, en CO ou en opacité, de l'air frais est insufflé jusqu'au moment où le taux correspondant est redescendu à une valeur inférieure au seuil. En termes d'asservissement un système qui fonctionne ainsi est difficile à maîtriser. Il peut présenter des risques de pompage (le niveau de CO oscille en permanence autour du seuil) avec pour conséquence une usure prématurée des équipements à cause des sollicitations 'démarrage / arrêt' répétées en permanence. Il amène aussi des pointes de consommation très fortes. En effet, il n'est pas insufflé de l'air frais tant que l'un des seuils (CO ou opacité) n'a pas été franchi. Lorsque celui-ci est dépassé le taux de CO continue très souvent de croître bien au-delà avant que l'air frais insufflé se fasse ressentir et induise une baisse du taux.
 - Les systèmes du second groupe agissent *par anticipation* : Le système n'attend pas d'avoir détecté un dépassement de seuil pour agir. L'efficacité, ainsi que la mise au point de cette régulation, sont améliorées si le recueil des données relatives au *trafic* s'effectue en *amont du tunnel*.

3.1 Les systèmes de régulation recensés

Une première recherche bibliographique a permis de dénombrer six techniques de régulation :

- par seuils
- par seuils avec anticipation (trafic)
- par PID (Proportionnelle Intégrale Dérivée)
- par PID avec anticipation (trafic)
- par anticipation seule (trafic)
- par logique floue

Certaines techniques, expérimentées en tunnel, font l'objet ici d'une description détaillée suivie d'un exemple concret d'application.

3.2 Les systèmes connus en tunnel

3.2.1 Régulation par seuils.

3.2.1.1 Principes

C'est le mode de régulation préconisé jusqu'à présent par le CETU, et mis en œuvre dans la quasi-totalité des tunnels routiers français.

Ce mode de régulation repose sur la constatation qu'il est toujours plus difficile d'asservir la ventilation aux causes multiples de la pollution, (trafic, contre-pressions atmosphériques aux têtes du tunnel) qu'à la pollution elle-même (mesure en retour du taux de pollution par les capteurs dans le tunnel).

Ce système présente certes l'avantage de reposer sur des résultats de mesures fiables, mais aussi l'inconvénient de ne faire réagir l'installation de ventilation qu'à *posteriori*. Il y a donc lieu de s'assurer que le temps de réaction de la ventilation, après détection d'un besoin, ne sera pas excessif, car cette situation peut conduire à des dépassements du niveau de pollution admissible en tunnel et induire des consommations d'énergie excessives.

3.2.1.2 Capteurs et seuils

Des capteurs de pollution, analyseurs de CO pour les gaz toxiques et opacimètres pour les fumées, transmettent en parallèle des informations qui seront comparées à des seuils préétablis dont le dépassement induit des ordres de changement de régime aux ventilateurs. Ces seuils ne sont pas les mêmes selon que l'évolution de la teneur en polluant dans le temps est positive ou négative. Autrement dit ceci permet d'établir des règles « plus sévères » (seuil plus bas : S1 dont l'usage est précisé ci-après) pour arrêter la ventilation si la teneur en polluants diminue et passe sous S1, et inversement un peu « moins sévère » (seuil plus haut: S2, voir aussi ci-après) pour mettre en route la ventilation lorsque la teneur des polluants augmente et passe au-dessus de S2.

Ce fonctionnement entre S1 et S2 est analogue à celui qui peut être mis en place entre S2 et S3, à la différence que l'arrêt est remplacé par la diminution de régime, et la mise en route par l'augmentation de ce dernier.

Le seuil S3 est dit généralement seuil d'alarme1, auquel il est aussi ajouté un seuil encore plus élevé dit d'alarme2 qui implique que la ventilation fonctionne au maximum, quelle que soit la situation antérieure, et que le tunnel soit éventuellement fermé, les normes de pollution étant dépassées.

Ce système en plages de fonctionnement assure une certaine stabilité au système : Voir algorithme ci-dessous.

3.2.1.3 Exemples de seuils

	Concentration en CO	Coefficient d'extinction
Seuil bas S1	80 ppm	$5 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$
Seuil haut S2	100 ppm	$7,5 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$
Seuil d'alarme1	150 ppm	$11 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$
Seuil d'alarme2	250 ppm	$12 \times 10^{-3} \text{ m}^{-1}$

D'une manière courante, ces plages de régulation sont fixes, mais doivent être réglables si besoin par l'exploitant.

En période de circulation difficile (congestion, blocage), des niveaux de pollution plus élevés que ceux de la plage de régulation apparaissent malgré la mise en œuvre de la ventilation à plein régime. Ces niveaux que l'on calcule permettent de dimensionner l'installation.

3.2.1.4 Algorithme de fonctionnement

- *Le dépassement du seuil S2 en CO ou en opacité* entraîne le passage au régime supérieur de ventilation, mais il est nécessaire que le taux de pollution détecté par l'ensemble des capteurs (CO **et** opacité) descende en dessous du seuil S1 pour que le régime de ventilation soit ensuite baissé.
- La descente en régime n'est exécutée qu'au terme du cycle suivant :
 1/ Premier temps : CO **ou** opacité dépasse S2 => Mise en route du régime supérieur
 2/ Second temps : CO **et** opacité redescendent tous les deux sous S2, **puis sous S1**
 => La tendance générale à l'abaissement du taux de pollution est assurée, et dans ce cas seulement, la descente en régime est autorisée. Cette plage S2->S1 évite en principe les instabilités de fonctionnement de la ventilation.

- *Le dépassement des seuils S3 et S4 (ou alarme1 & alarme2) précipite la montée en régime, ce qui signifie que le régime des ventilateurs, ou le nombre des ventilateurs en fonctionnement est augmenté, de 2 unités si possible.*

Suivant la solution technique retenue pour assurer les variations du débit des ventilateurs, une temporisation à la descente en régime est souvent prévue, pour limiter le nombre horaire de démarrage des moteurs.

Dans le cas du système transversal, la détermination des régimes de ventilation en air vicié est effectuée automatiquement, soit à partir des régimes de ventilation en air frais, soit à partir des mesures effectuées par un ou plusieurs anémomètres en tunnel pour limiter les vitesses d'air à 8 ou 10 m/s. La corrélation entre ces deux régimes de fonctionnement est généralement modifiable pour s'adapter, si nécessaire, aux constatations du service exploitation.

Jusqu'à présent, la pollution en oxyde d'azotes n'a pas été prise en compte par ce type de régulation à seuils. En effet cette préoccupation est relativement récente et les seuils correspondants n'avaient pas fait l'objet de réflexions approfondies. Cependant, ceux-ci ont fait l'objet d'une première approche, et à ce jour il est envisageable d'étendre cette logique de régulation à ce troisième paramètre, la concentration en NO₂.

Gardons toutefois à l'esprit que plus le nombre de paramètres à prendre est important, plus une régulation de type simple comme celle ci-dessus risque de s'éloigner de l'optimum économique. D'autre part, les paramètres liés à la sécurité sont impératifs. Il devient alors intéressant de mettre sur pied des régulations plus fines et élaborées.

3.2.2 Régulation par seuils avec anticipation (Trafic) et expérimentation PID.

3.2.2.1 Expérience belge (Seuils avec situations types)

La mise au point théorique du principe d'anticipation est due à M. Jacques E.J (« Study of the automatic control of the longitudinal ventilation of a complex road tunnel) BHRA, Durham 1994. L'anticipation de la régulation est nécessaire au vu de l'inertie de la masse d'air à ventiler. Elle se base sur les caractéristiques du trafic empruntant le tunnel, ce trafic étant à l'origine de la pollution.

Outre les concentrations moyennes de pollution, (CO, NO), la vitesse et la densité linéaire du trafic sont mesurées à chaque instant. Le système est conçu comme un système expert qui se base sur des situations types construites expérimentalement sur les couples vitesse-densité du trafic en quelques points du tunnel. Le système détermine à chaque cycle de mesure la configuration de ventilation idéale à mettre en œuvre, par analogie aux situations type. Il adapte ensuite ce résultat en fonction des contraintes matérielles (ventilateurs alimentés indépendamment ou non) et choisit la solution devant optimiser le nombre de démarrage de chacun d'entre eux.

Cette application est notamment opérationnelle depuis trois ans au tunnel de Belliard au centre de Bruxelles.

3.2.2.2 Système utilisé dans le tunnel de Chamoise (Système PID, puis à consigne par paliers)

Un système de régulation basé sur une anticipation des besoins en ventilation a été mis en place dans le tunnel de Chamoise lorsqu'il était constitué d'un seul tube.

Situé sur l'autoroute A40, le tunnel de Chamoise mesure 3300 mètres. A chaque tête une station de ventilation comporte deux moteurs, air frais et air vicié. La ventilation est du type transversal partiel : De l'air frais est insufflé le long du tunnel grâce à des bouches régulièrement réparties. Les ventilateurs d'air vicié ne sont utilisés que pour évacuer les fumées en cas d'incendie ou; plus rarement, pour limiter la vitesse d'air longitudinal. Le niveau de pollution en tunnel est analysé par des analyseurs de CO et des opacimètres; des anémomètres complètent le dispositif.

La ventilation a donc été considérée comme un système asservi pour lequel les grandeurs d'entrées sont le CO, l'opacité et le trafic, la valeur de sortie étant la consigne de vitesse à appliquer aux armoires de commande des ventilateurs d'air frais.

L'inertie importante des masses d'air en tunnel amène des temps de réponses importants : 6 à 10 minutes. Des boucles magnétiques de comptage ont donc été installées à environ 8 km en amont de chaque tête. Les entrées sont paramétrables et l'algorithme de régulation a été mis au point de manière à pouvoir:

- anticiper la pollution,
- conserver son efficacité en cas de panne partielle des capteurs sans intervention de l'opérateur.

Pour le calcul de la consigne deux solutions ont été étudiées :

- Calcul par PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé).
- Calcul par paliers.

Solution PID

Soit E l'écart entre la consigne et la valeur à réguler. Le signal de sortie d'un contrôleur PID est, pour une part, proportionnelle à E , pour une autre part proportionnelle à l'intégrale de E (ce qui aplanit l'effet des variations instantanées) et à la dérivée par rapport au temps de E de manière à « prédire » quelque peu l'évolution du phénomène. La pondération entre ces 3 facteurs de proportionnalité permet d'ajuster la réponse aux besoins du système, tout en évitant si possible le phénomène dit de « pompage » dans lequel la réponse du régulateur oscille sans arrêt autour d'une valeur moyenne. A noter qu'un régulateur PID n'est généralement pas adapté aux processus non linéaires, c'est à dire ceux pour lesquels les variables à commander ne varient pas linéairement avec E , l'écart à minimiser.

L'utilisation d'un PID n'a pas permis d'atteindre les objectifs fixés : d'une part se tenir au-dessous des seuils de pollution autorisés par la législation tout en dépensant le moins d'énergie électrique possible et d'autre part éviter tout phénomène de pompage au niveau des ventilateurs.

Solution par paliers sur plusieurs variables

Le fonctionnement retenu a donc été celui avec une consigne calculée par paliers. Les paliers sont déterminés par les seuils suivants :

- 10 seuils de 10 en 10 couvrent la plage allant de 0 à 100% d'opacité,
- 10 seuils de 30 en 30 couvrent la plage allant de 0 à 300 ppm de CO,
- 10 seuils de 250 en 250 couvrent la plage allant de 0 à 2 500 véhicules/heure.

Concrètement le système de régulation par paliers fonctionne ainsi :

a) Tout d'abord les informations issues des différents capteurs sont mises en forme pour pouvoir être comparées :

- Mise en cohérence, détection de panne éventuelle du capteur, lissage
- Mise à l'échelle
- Pondération des capteurs de pollution en fonction de leur position en tunnel.

b) Les débits de trafic sont calculés toutes les 30 secondes

c) La consigne à appliquer aux ventilateurs est choisie. Ce choix se fait en fonction de la valeur la plus contraignante. Le poids le plus élevé a été attribué au trafic ; la pollution se positionnant en chien de garde : Si le niveau de celle-ci monte anormalement les régimes à mettre en œuvre sont immédiatement revus à la hausse quel que soit le niveau de trafic. Le plus souvent la ventilation est donc pilotée par le paramètre trafic ; la mesure étant faite en amont de l'ouvrage, le besoin en ventilation est anticipé ce qui rend plus aisé le maintien d'un taux de pollution en tunnel acceptable tout en évitant l'usage d'une ventilation à niveau élevé.

Ce système de fonctionnement par paliers a permis, semble t'il, d'éviter les phénomènes de pompage précédemment rencontrés avec le régulateur PID, et les seuils ont été suffisamment respectés.

Lors de la première année de sa mise en service un gain de 15 % sur les coûts d'énergie fut observé alors que le trafic augmentait de 4 % par rapport à l'année précédente.

4 La logique floue

4.1 Introduction

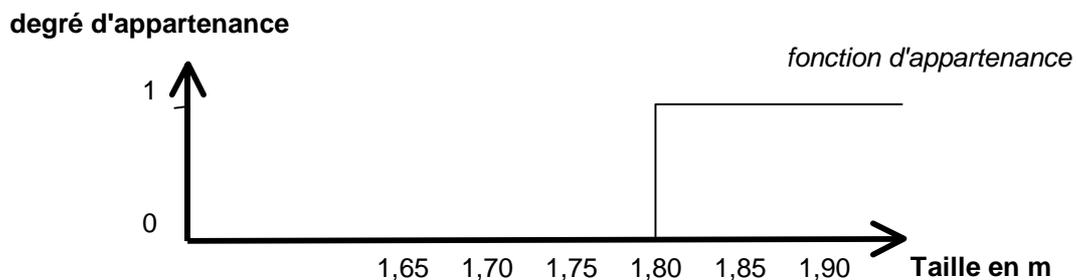
Les connaissances dont nous disposons sur une situation quelconque sont généralement imparfaites, soit parce que nous avons un doute de leur validité, elles sont alors *incertaines*, soit parce que nous éprouvons une difficulté à les exprimer clairement, elles sont alors *imprécises*. Ces deux types d'imperfections dans les connaissances sont souvent intimement mêlées, mais n'ont cependant pas présenté la même importance dans les préoccupations scientifiques.

En ce qui concerne l'*incertain*, il a été abordé par la notion de probabilité dès le XVIIème siècle par Pascal et Fermat. Cependant, celle-ci ne permet ni de traiter des croyances subjectives, ni de résoudre le problème posé par les connaissances imprécises ou vagues.

Ces dernières n'ont été prises en considération qu'à partir de 1965, lorsque L.A Zadeh, professeur à l'Université de Berkeley en Californie, a introduit la notion de *sous-ensemble flou* (en anglais "Fuzzy set") dans une généralisation de la théorie classique des ensembles, admettant des situations intermédiaires entre le tout et le rien. Les développements de cette notion fournissent des moyens de représenter et de manipuler des connaissances imparfaitement décrites, vagues ou imprécises, et ils établissent une interface entre des données décrites symboliquement (avec des mots) et numériquement (avec des chiffres). L.A Zadeh a ensuite développé la *théorie des possibilités*, à partir de 1978, qui permet, dans un formalisme proche de celui des sous-ensembles flous, de traiter des incertitudes sur des connaissances.

Dans la théorie classique des ensembles, dans un référentiel donné, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble donné. Si on considère alors le degré d'appartenance d'un élément à un ensemble il sera égal à 1 si cet élément appartient à l'ensemble considéré et égal à 0 s'il n'y appartient pas. Dans la théorie des ensembles flous un élément peut appartenir complètement à un ensemble (degré d'appartenance de 1) mais il peut aussi 'presque' y appartenir : il possèdera alors un degré d'appartenance de 0,9. Cette approche conduit à construire une fonction d'appartenance et à partir de celle-ci de définir un sous-ensemble flou. Il est tout à fait possible de construire plusieurs fonctions d'appartenance ; ainsi un élément donné peut appartenir à différents sous-ensembles flous avec des degrés d'appartenance différents pour chaque sous-ensemble. Un exemple va permettre de clarifier notre propos.

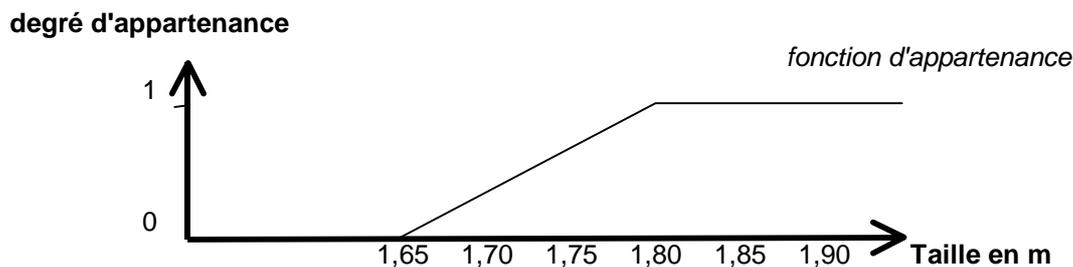
Considérons un ensemble de personnes dans lequel on souhaite déterminer un sous-ensemble constitué par les personnes grandes. Pour cela on fixe arbitrairement une taille en dessous de laquelle une personne ne sera pas considérée comme grande : par exemple 1,80 mètres. Il est alors facile de créer deux sous-ensembles : un constitué par les personnes dont la taille est supérieure ou égale à 1,80 m et l'autre constitué par les personnes qui mesurent moins de 1,80 mètres. En termes de fonction d'appartenance nous aurons alors la courbe suivante :



Toutefois pour les personnes qui ne sont pas considérées comme grandes, la situation est identique pour une qui mesure 1,65 m et une autre qui mesure 1,79 m : les deux n'appartiennent pas au sous-ensemble « grandes », alors qu'instinctivement on a tendance à considérer que celle mesurant 1,79 m « appartient presque » au sous-ensemble « grandes ».

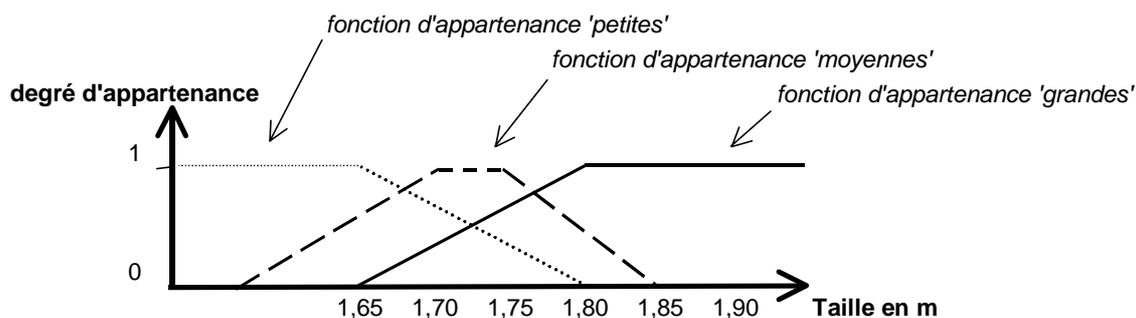
Avec des sous-ensembles classiques il n'est pas possible de prendre en compte cette notion « d'appartient presque ». Par contre la théorie des ensembles flous le permet. Pour cela elle va, dans l'exemple qui nous intéresse, considérer qu'une personne appartient au sous-ensemble « grandes » avec un certain degré d'appartenance. Ce degré peut varier de 0 à 1 et, dans notre exemple, la personne de 1,79 m pourra appartenir au sous-ensemble « grandes » avec un degré de 0,95 et celle de 1,65 m avec un degré de 0. La fonction d'appartenance prend alors la forme

suivante (pour simplifier on a retenu une forme linéaire mais d'autres allures de courbes sont tout à fait envisageables) :



Il est alors possible avec la fonction d'appartenance représentée ci-dessus de construire le sous-ensemble flou « grandes ».

De la même manière nous pouvons construire les sous-ensembles « moyennes » (taille comprise entre 1,70 et 1,75 m) et « petites » (taille inférieure à 1,65 m) caractérisés chacun par une fonction d'appartenance.



Ainsi une personne de taille égale à 1,72 m appartient aux trois sous-ensembles flous « petites », « moyennes » et « grandes » avec des degrés d'appartenance qui valent respectivement 0,5 , 1 et 0,5.

A la théorie des ensembles classiques est associée la logique booléenne dans laquelle une proposition est vraie (degré de vérité égal à 1) ou fausse (degré de vérité égal à 0). De la même manière la théorie des ensembles flous a permis d'élaborer une logique floue avec des degrés de vérité qui peuvent prendre toutes les valeurs comprises dans l'intervalle [0,1]. La logique floue est souvent désignée sous le nom de 'Fuzzy logique', le mot 'Fuzzy' est un terme anglais qui signifie indistinct, brouillé, mal défini ou mal localisé.

Les opérateurs 'OU' et 'ET' utilisés en logique booléenne se retrouvent en logique floue mais ils n'ont pas la même signification :

- Le 'OU' booléen correspond aux maximums des fonctions d'appartenance en logique floue. Ainsi dans le graphe précédent il est *toujours VRAI*, (degré 1, soit 100%), que l'on peut qualifier une personne OU « petite » OU « moyenne » OU « grande », sauf si elle

mesure entre 1m65 et 1m70 ou entre 1m75 et 1m80 (la qualification la plus probable est comprise entre 85% et 100%).

- Le 'ET' booléen correspond à la zone graphique commune à toutes les fonctions d'appartenance de logique floue.
Selon les définitions du graphe ci-dessus, une personne peut être qualifiée à la fois « petite », « moyenne » et « grande » qu'entre 1m65 et 1m80 avec tout au plus 50% de certitude.

4.2 La commande floue

4.2.1 Généralités

La logique floue a connu une première application concrète, dans le domaine de la régulation, en 1974 avec la réalisation d'un contrôleur flou par une équipe de chercheurs britanniques dirigée par le professeur Mamdani. A la fin des années 80, suite aux nombreuses applications 'floues' réalisées au Japon, d'autres pays industriels (USA, Allemagne, France, etc.) ont alors développé des applications à base de logique floue.

La commande floue fait de plus en plus l'objet de réalisations effectives, en particulier dans le domaine industriel. Elle permet de traiter les problèmes de commande de processus à partir des connaissances des experts ou opérateurs qualifiés.

Lorsque l'on ne dispose pas d'un modèle défini au sens classique du terme, la commande floue peut être considérée comme une démarche adaptée. Dans ce cas, on élabore la loi de commande en codant les connaissances des experts, opérateurs, pilotes, ..etc, qui savent contrôler le processus. L'utilisation d'un codage flou permet de représenter leur caractère graduel et nuancé. Ainsi, cette démarche revient à modéliser le comportement de l'opérateur en charge de la commande, et non le processus à commander.

La commande floue a le même but qu'une commande réalisée en automatisme classique, c'est-à-dire la gestion automatique d'un processus, en fonction d'une consigne donnée, par action sur les variables qui décrivent le processus.

4.2.2 Principes

Pour représenter le système à réguler, il faut envisager toutes les variables qui décrivent l'état dans lequel il se trouve. Dans le cas d'un tunnel, il s'agit par exemple du taux de CO, de l'opacité, du niveau de luminance, etc. Ensuite les variables qui permettent d'agir sur le processus doivent être caractérisées (débit d'air frais, nombre de machines en fonctionnement, régimes d'éclairage en service), de façon à respecter une consigne de fonctionnement (seuils admissibles de pollution, niveau d'éclairement, etc.).

Par exemple si la ventilation a pour consigne de rester au-dessous des seuils admissibles de pollution, il est possible d'exprimer une règle telle que : si le taux de CO augmente rapidement, mais reste en dessous d'un seuil, alors il faut faire passer au régime supérieur un ventilateur sur deux.

L'élaboration des règles se fait à travers des descriptions linguistiques ("augmente rapidement" "relativement faible"). Pour pouvoir les exploiter, il faut déterminer les variables impliquées ; c'est à dire, d'une part les variables d'entrée mises en jeu et leur règles de variation (pente et valeur du taux de CO, conditions de luminosité sur l'entrée du tunnel), et d'autre part les variables de sortie mises en jeu dans la partie conclusion des règles (régimes de ventilation, régimes d'éclairage).

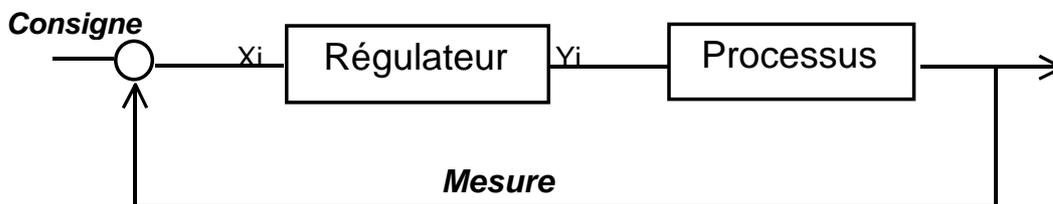
Ensuite toutes les caractérisations d'une même variable ("augmente un peu", "baisse fortement") doivent être recherchées et représentées par des sous-ensembles flous de l'ensemble de définition de la variable de telle sorte que toute situation soit envisagée, c'est-à-dire que tout point de l'ensemble appartienne, avec un degré non nul, à au moins un de ces sous-ensembles flous.

Des fonctions d'appartenance triangulaires ou trapézoïdales sont souvent choisies, mais d'autres types de courbes sont utilisables, telles que des sinusoides ou des exponentielles. Les règles sont alors transcrites en utilisant les descriptions floues de variables.

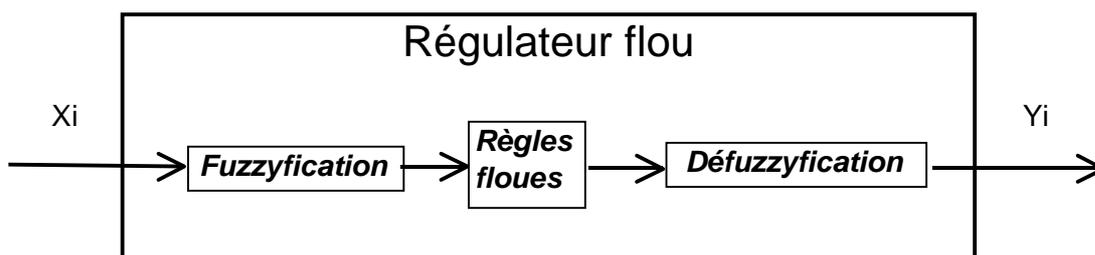
4.2.3 Régulateur

Plusieurs applications industrielles à base de logique floue ont été réalisées ces dernières années et, plus récemment, des régulateurs permettant d'assurer le contrôle automatique d'un processus industriel ont commencé à être commercialisés.

Dans une chaîne de contrôle automatique de processus ce type de régulateur s'insère de la même manière qu'un régulateur classique (voir schéma ci-dessous).



Dans un régulateur 'flou' les variables d'entrées (X_i) et de sorties (Y_i) restent bien évidemment les mêmes mais elles sont l'objet d'un traitement en entrée et en sortie. Tout d'abord elles sont traduites en variables floues ; cette opération est appelée la 'fuzzyfication'. Ensuite en sortie elles sont remises sous forme de variables classiques ; cette opération est appelée la 'défuzzyfication'. Entre ces deux étapes la logique floue agit sur les variables au travers de règles qui auront été entrées dans le régulateur.



Les moyens les plus répandus pour déterminer les règles de commande sont les suivants :

- enquête auprès d'experts pour qu'ils explicitent leurs connaissances ou d'opérateurs qualifiés pour qu'ils décrivent leur savoir-faire. L'enquête peut être effectuée, soit par interrogation orale, soit par questionnaire,
- observation des actions de commande réalisées par l'opérateur qualifié, et établissement de liaisons entre les données d'entrée et de sortie correspondantes pour le processus contrôlé,
- apprentissage des règles de commande à partir d'expériences, par ajustement à l'objectif de la commande,
- détermination d'un modèle flou du processus contrôlé, à partir d'une description linguistique de ses caractéristiques.

4.3 Applications possibles en tunnel

Compte tenu des qualités présentées par la logique floue, il est tentant de vouloir l'utiliser *systématiquement* à la place de la logique booléenne. Il faut cependant être prudent, car pour utiliser au mieux la logique floue il faut disposer d'un processus pour lequel les règles traditionnelles sont *complétées par une connaissance empirique*. En effet ce mode de régulation atteint le maximum de ses possibilités uniquement si, à des règles bien connues et incontournables, il est possible d'intégrer le savoir-faire du projeteur et/ou de l'exploitant.

En tunnel l'expérience des concepteurs et des utilisateurs est une réalité très concrète, c'est donc une première raison qui peut inciter à utiliser la logique floue en tunnel. La seconde est que parmi tous les équipements qui sont mis en œuvre dans un tunnel certains sont asservis à des seuils ; il est alors tout à fait envisageable d'utiliser un régulateur flou pour assurer cette tâche d'asservissement. Le fonctionnement de la ventilation, par exemple, se prête parfaitement à une utilisation de la logique floue car il est possible de déterminer des variables d'entrée (le taux de CO, le niveau d'opacité), des variables de sortie (mise en route / arrêt de ventilateurs) et des consignes (les seuils à ne pas dépasser).

Le principe d'une expérimentation sur une installation réelle a donc été retenu. Le choix de l'installation qui serait régulée en logique floue a été difficile à faire :

- Il a fallu convaincre un exploitant d'accepter de tester ce nouveau mode de contrôle avec tous les risques inhérents.
- Il a fallu trouver un ouvrage où les caractéristiques même de la ventilation existante permettent de pallier une éventuelle défaillance du régulateur flou.
- Enfin, l'ouvrage devait être géographiquement proche pour pouvoir y aller fréquemment sans perdre trop de temps en trajets.

L'exploitant des tunnels de la Communauté Urbaine de Lyon (Grand Lyon) a répondu favorablement à une demande faite par le CETU et a proposé de remplacer l'automate

programmable actuel de la station n°3 située au centre du tunnel de la Croix-Rousse par un automate intégrant un système à logique floue ; les contraintes énoncées au paragraphe précédent étant satisfaites cette proposition a donc été retenue. Ensuite, pour aider à la mise en œuvre pratique de ce nouveau produit, un constructeur, la société SIEMENS, a été associé aux essais et l'exploitant du tunnel de Croix-Rousse s'est assuré le concours d'une société de service compétente en logique floue.

5 Application au tunnel de la Croix-Rousse

5.1 Présentation du tunnel

Situé à Lyon le tunnel routier sous la Croix-Rousse est un ouvrage bidirectionnel à 4 voies (2 dans chaque sens), chaque voie ayant une largeur de 2,65 mètres. La largeur totale de l'ouvrage entre piédroits est de 14 mètres. La longueur est de 1 752 mètres. Le gabarit autorisé en hauteur est de 4,30 mètres.

En termes d'équipements de ventilation le tunnel comporte 5 stations de ventilation équipées chacune de 2 puits : un pour insuffler de l'air frais, l'autre pour extraire de l'air vicié. Un faux-plafond et deux cloisons verticales délimitent dans la partie haute de la voûte et sur une grande partie de la longueur de l'ouvrage (1 626m) une gaine d'air vicié dans la partie centrale et deux gaines d'air frais latérales. Chaque station assure la ventilation d'un tronçon d'environ 320 mètres (1/5 de l'ouvrage).

Le système de ventilation adopté pour le tunnel de la Croix-Rousse est de type transversal ; c'est à dire que l'air frais est insufflé dans la partie basse (bouches disposées tous les 1,28 mètres sur chaque trottoir) et l'air vicié aspiré en partie haute (bouches axiales dans le plafond tous les 1,28 mètres également).

Les différentes possibilités de commande de la ventilation sont les suivantes :

- commande manuelle locale qui s'effectue machine par machine à partir de l'armoire de démarrage,
- commande manuelle à distance qui s'effectue à partir du poste de commande et par machine,
- commande automatique : indépendante par station. Elle est asservie à la concentration en oxyde de carbone et à la mesure de l'opacité du tunnel.

Une prise de CO est implantée dans chaque tronçon de ventilation et reliée à un analyseur de CO installé dans la station correspondante. Trois opacimètres situés au 1/5, au milieu et aux 4/5 de la longueur du tunnel sont affectés : l'un aux stations 1 et 2, l'autre à la station 3 et le troisième aux stations 4 et 5.

5.2 Le mode de commande actuel

La régulation de la ventilation consiste en un asservissement direct des débits d'air frais aux taux de pollution relevés ; le fonctionnement des ventilateurs d'air vicié est asservi à celui des ventilateurs d'air frais.

Au début des essais les seuils utilisés par le Grand Lyon étaient les suivants, l'écart entre les 2 valeurs représentant la plage d'hystérésis :

- pour le CO en exploitation normale

<i>CO</i>	<i>Seuils en ppm</i>	Numéro de la station				
		1	2	3	4	5
Seuil de	Descente rapide	48/54	48/54	48/54	48/54	48/54
	Descente unitaire	54/56	54/56	54/58	54/56	54/56
	Maintien	56/63	56/63	58/63	56/63	56/63
	Montée unitaire	63/76	63/76	63/76	63/76	63/76
	Montée rapide	> 76	> 76	> 76	> 76	> 76

Une montée unitaire correspond au passage au régime de ventilation immédiatement supérieur à celui qui est en cours et une descente unitaire correspond à un passage au régime immédiatement inférieur. En montée rapide le régime en cours est augmenté de 2 et en descente rapide il est diminué de 2.

Ainsi pour un régime en cours R_n si le taux de CO mesuré est de 78 alors la ventilation en cours va être augmentée jusqu'à atteindre le régime R_{n+2} .

- pour le CO avec des travaux réalisés sous circulation

<i>CO travaux</i>	<i>Seuils en ppm</i>	Numéro de la station				
		1	2	3	4	5
Seuil de	Descente rapide	< 24	< 24	< 24	< 24	< 24
	Descente unitaire	24/30	24/30	24/30	24/30	24/30
	Maintien	30/39	30/39	30/39	30/39	30/39
	Montée unitaire	39/48	39/48	39/48	39/48	39/48
	Montée rapide	> 48	> 48	> 48	> 48	> 48

- pour l'opacité – Exploitation normale

<i>Opacité</i> <i>Seuils en 10⁻³/m</i>		Numéro de la station				
		1	2	3	4	5
Seuil de	Descente unitaire	< 7,7	< 7,7	< 4,9	< 7,7	< 7,7
	Maintien	< 7,7 / 8,4	< 7,7 / 8,4	< 4,9 / 7,0	< 7,7 / 8,4	< 7,7 / 8,4
	Montée unitaire	> 8,4	> 8,4	> 7	> 8,4	> 8,4

Les seuils de la station 3 (station située au centre du tunnel) sont un peu différents des 4 autres, ce qui a permis expérimentalement de maintenir un temps de fonctionnement homogène entre les stations. Le CO étant primitivement considéré comme le traceur principal de la ventilation, les seuils le concernant ont été très détaillés. Mais depuis les émissions de polluants des véhicules ont évolué, et le CO est devenu minoritaire la plupart du temps face aux seuils d'opacité. Or, il n'y a que deux seuils de régulation pour l'opacité avec une grande disparité entre la station 3 et les quatre autres.

5.3 Présentation de l'expérimentation

Pour les raisons indiquées au § 4.3 ci-dessus, l'expérimentation a été effectuée en concertation avec la Communauté Urbaine de Lyon et la société SIEMENS qui a fourni gracieusement pour l'expérience un nouveau système à logique floue.

Ce système ne devait équiper qu'une seule des 5 stations de ventilation régulièrement réparties le long du tunnel. Il fut choisi la station n°3 au vu sa situation centrale pour laquelle les conditions aérauliques sont à priori équilibrées dans un tunnel bidirectionnel. De plus l'accès à son régulateur est particulièrement aisé..

Comme toutes les autres stations, la station n°3, est équipée d'un automate programmable qui, en ce qui concerne la ventilation, acquiert les informations issues des analyseurs de CO et des opacimètres. En fonction des seuils fixés, il élabore les régimes de ventilation à mettre en œuvre. La première partie de la manipulation a donc consisté à mettre en parallèle sur l'automate existant le nouvel automate équipé d'un contrôleur flou. Un interrupteur a été disposé sur le pupitre du poste de commande pour permettre de revenir très facilement à la situation antérieure, en utilisant l'ancien automate.

L'installation du nouvel automate s'est effectuée dans le cadre d'un programme en quatre étapes, dont chacune a fait l'objet de plusieurs semaines d'acquisition . Toutes les données recueillies ont été traduites sous forme de graphiques qui représentent soit l'évolution journalière de tous les paramètres propres à une situation, soit l'évolution journalière d'un paramètre donné sur toute la longueur du tunnel.

Les données recueillies ont été les suivantes :

- ♦ taux de CO,
- ♦ niveau d'opacité,

- ♦ régime d'air frais,
- ♦ régime d'air vicié,
- ♦ nombre de véhicules par période de 10 mn.

1ère étape. Elle a consisté à vérifier tous les capteurs de l'ouvrage et à les réétalonner si nécessaire. Le système de régulation à seuils activant les séquences de montée ou descente de régime a été conservé. Le but de cette première étape a été de remettre le fonctionnement de toutes les stations à un niveau identique : Il a été ainsi possible, autant que faire se peut, de déterminer une *situation de référence* sur :

- ♦ Le fonctionnement de la régulation en place
- ♦ Les caractéristiques générales du trafic selon le calendrier. (Jours ouvrés, jour fériés, journées particulières de la semaine, etc.)

Cette situation est matérialisée par les courbes de variation des paramètres CO et opacité relevés en cours de journée au niveau des 5 stations de ventilation en fin d'année 1998 (Cf courbes du 7 décembre en exemple en annexe 2 : Graphe1).

2ème étape. Elle a consisté à faire fonctionner la régulation de la station n°3 avec l'automate logique floue mais avec un fonctionnement identique à celui d'origine. Pour cela on a défini des fonctions d'appartenance de type "1" ou "0". Le but de cette seconde étape a été de s'assurer que le nouvel automate fonctionnait correctement et donnait des résultats équivalents à ceux du régulateur précédent.

3ème étape. C'est à partir de cette étape que l'expérimentation proprement dite a vraiment commencé. Une régulation de type floue a été mise en place et il a donc fallu procéder à :

- ♦ un choix de variables d'entrée,
- ♦ une fuzzyfication de ces variables,
- ♦ l'établissement de règles floues,
- ♦ la défuzzyfication des variables de sortie.

Les variables retenues pour la réalisation de cette étape ont été le CO et l'opacité.
Voir graphe 3, annexe 2 (été 1999). Cette étape est décrite plus loin au §5.4

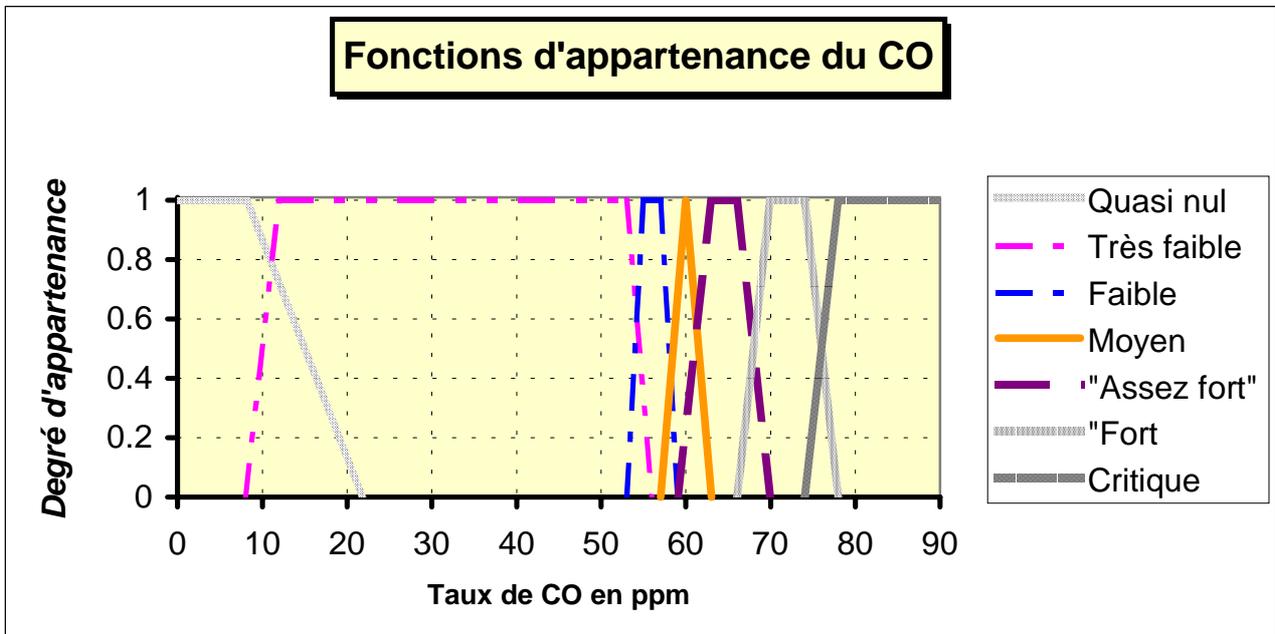
4ème étape. Une variable d'entrée importante fut introduite avec effet prioritaire : le niveau du trafic. Les comptages de trafic ne sont pas situés en amont de l'ouvrage mais comme la montée de pollution est en retard de plusieurs minutes sur la montée de trafic on a pu ainsi dans cette quatrième étape aller vers un fonctionnement anticipant les montées de pollution. Les variables d'entrée CO et opacité ne sont alors prises en compte qu'en second lieu pour éviter tout dépassement de seuil.

Voir graphe 4 de juin 2000, annexe 2. Cette étape est décrite plus loin au § 5.5

5.4 Régulation floue avec deux variables d'entrée : CO et opacité

Ce fut la 3ème étape de l'expérimentation, après avoir réétalonné l'ensemble des capteurs et vérifié le bon fonctionnement de l'automate en logique floue.

5.4.1 Partition des valeurs mesurables de CO en sous-ensembles flous.



Remarquons que sept fonctions d'appartenance ont été définies pour le taux de CO en tunnel, alors que la régulation antérieure n'utilisait que 5 seuils sur chacun desquels s'attachait une zone d'hystérésis. En fait l'examen montre que ces seuils ont été fidèlement repris (à une unité près) et qu'une zone pour les très basses valeurs (<20ppm) a été créée pour ne pas confondre une situation à 48 ppm ou moins avec celle d'une absence quasi totale de CO.

CO - Seuils de régulation classique en exploitation normale :	48/54
	54/58
	58/63
	63/76
	> 76

CO - Étendues des fonctions floues : <i>[12-53] = étendue de la zone à degré 1</i>	[0-8] 22	Quasi nul
	8 [12-53] 56	Très faible
	53 [55-57] 59	Faible
	57 [60] 63	Moyen
	59 [63-66] 70	Fort
	66 [70-74] 78	Très fort
	74 [80-90]	Critique

5.4.2 Partition des valeurs mesurables de CO sous travaux en sous-ensembles flous

Les courbes d'appartenance sont exactement du même type que celles ci-dessus, mais les limites sont plus basses :

Seuils de régulation classique sous travaux :	<24	Étendues des fonctions floues sous travaux : [19-23] = Zone à degré 1	[0-9] 11	Quasi nul
	24/30		8 [10-17] 19	Très faible
	30/39		17 [19-23] 25	Faible
	39/48		23 [25-29] 31	Moyen
	>48		29 [31-38] 40	Fort
			38 [40-47] 49	Très fort
			47 [49-60]	Critique

5.4.3 Partition des valeurs mesurées d'opacité en sous-ensembles flous

En opacité, le nombre de fonctions d'appartenance est le même que celui des seuils de régulation déjà existant, c'est à dire 3

Seuils de régulation classique selon l'opacité :	<4,9	Étendues des fonctions floues relatives à l'opacité : [5-6,6] = Zone à degré 1	[0-4,7] 5,1	Faible
	4,9 / 7		4,7 [5-6,6] 7	Moyen
	>8,4		6,6 [7-10]	Fort

5.4.4 Prise de décision

L'application de règles floues associées à l'ensemble des couples CO – opacité, conduit à la définition d'un ensemble d'états flous permettant chacun la détermination d'un régime de ventilation.

En logique floue, chaque état du système induit en réalité plusieurs réponses possibles, mais à des degrés divers. Cet ensemble de réponses est le résultat de la combinaison des règles à l'aide d'opérateurs d'intersection « ET », d'union « OU », voire de calcul comme celui du centre de gravité des surfaces des fonctions d'appartenance.

Le processus de défuzzification des variables de sortie permet en définitive l'adoption d'un régime de ventilation précis.

Dans l'expérience du tunnel de la Croix Rousse, la combinaison des règles « ET » « OU » a été jugée suffisante.

5.4.5 Les sorties (régimes de ventilation)

Elles sont exprimées en nombre de régimes (de 0 à 3) dont il faut diminuer ou augmenter celui qui est en cours. Ces résultats sont donc tout à fait analogues à ceux donnés par le régulateur classique.

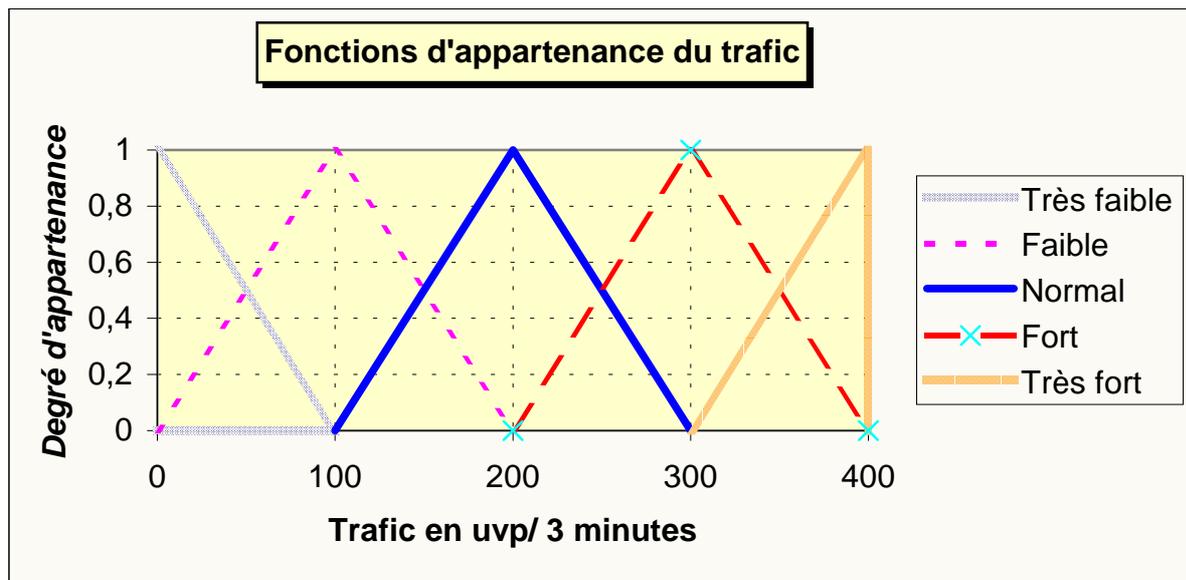
A noter que le ventilateur d'air frais de la station 3 a été équipé de manière à fonctionner sous 8 régimes de fonctionnement différents.

Voici un exemple de ces règles :

Si	CO	TRES FAIBLE	et	OPACITE	FORTE	alors	Régime	Ventilation	= - 1
Si	CO	TRES FAIBLE	et	OPACITE	MOYENNE	alors	Régime	Ventilation	= - 2
Si	CO	TRES FAIBLE	et	OPACITE	FAIBLE	alors	Régime	Ventilation	= - 2
Si	CO	MOYEN	et	OPACITE	FORTE	alors	Régime	Ventilation	= + 1
Si	CO	MOYEN	et	OPACITE	MOYENNE	alors	Régime	Ventilation	=
Si	CO	MOYEN	et	OPACITE	FAIBLE	alors	Régime	Ventilation	=
Si	CO	TRES FORT	et	OPACITE	FORTE	alors	Régime	Ventilation	= + 3
Si	CO	TRES FORT	et	OPACITE	MOYENNE	alors	Régime	Ventilation	= + 2
Si	CO	TRES FORT	et	OPACITE	FAIBLE	alors	Régime	Ventilation	= + 2

5.5 Régulation floue avec trois variables d'entrée : CO, opacité et trafic

En 4ème étape d'expérimentation, les trafics ont été à leur tour répartis en sous-ensembles flous, selon les fonctions d'appartenance du graphe ci-dessous.



Pour transformer la logique générale de l'installation en logique d'anticipation du phénomène de pollution il faut connaître l'évolution à court terme des générateurs de pollution, c'est à dire le volume de trafic, dans chacune de ces composantes comme le %PL, et sa tendance à court terme. C'est ainsi qu'ont été définis les seuils de variation instantanés suivants, par période de 3 minutes, le niveau de variation mesuré étant alors considéré comme variable d'entrée supplémentaire du régulateur :

Variations du volume de trafic de l'instant T à l'instant $T+1$ (périodes de 3 minutes) :
 $1/3, 1/2, 1, 2, 3$

La période de 3 minutes correspond au temps d'inertie moyen (plutôt faible) de la vitesse de l'air suite à un changement de régime de ventilation

Il est ainsi possible de concevoir une régulation entièrement basée sur le trafic et ses variations, sachant que les autres variables, CO, opacité, voire NO2 jouent un rôle de « garde fou », ou « chien de garde »

La logique initiale d'anticipation a donc répondu aux règles du tableau suivant, représentant le niveau du régime de ventilation à l'instant T+1, connaissant celui à l'instant T, dénommé « N » :

Variation de trafic :	Trafic :	Très faible	Faible	Moyen	Assez fort	Fort	Très fort
1 / 3		N-2	N-2	N-2	N-1	N-1	N-1
1 / 2		N-1	N-1	N-1	N-1	N-1	N-1
1		N	N	N	N	N	N
2		N	N+1	N+1	N+1	N+1	N+1
3		N+1	N+1	N+1	N+2	N+2	N+2

Le résultat de cette logique est par la suite confronté à celui qui aurait été donné par les règles classiques basées uniquement sur les taux de CO et d'opacité. Ces données ne prévalent que si elles exigent un niveau de ventilation plus élevé.

En somme la logique classique agit en « garde fou » de la régulation en logique floue qui fonctionne par anticipation basée sur le trafic et sur ses variations instantanées.

5.6 Résultats des différentes phases de l'expérience

5.6.1 Fonctionnement initial (observé en seconde étape)

Le fonctionnement initial présentait des régimes relativement analogues d'une semaine sur l'autre, sachant que chaque journée de semaine et de Week-end /Jour férié est très typée sur ce tunnel à circulation urbaine. En effet les évolutions horaires du trafic se répètent et il en est donc de même quant aux évolutions consécutives de la pollution, dans la mesure où les conditions météorologiques, concernant la vitesse du vent, sont semblables.

Dans cette situation, il était observé un démarrage systématique de la ventilation (Air frais) aux environs de 7 heures 30 en régime élevé durant une heure. Ensuite les ventilateurs fonctionnaient à un régime intermédiaire sans discontinuité jusqu'à 21 heures. Cette situation était imposée par programmation. Le débit d'air vicié est directement lié par le régulateur à celui de l'air frais.

Exemple du 22/04/99 en annexe 2 : graphe 2)

5.6.2 En fonctionnement logique floue sur niveaux de CO et opacité (3ème étape)

La réactivité de la ventilation est devenue beaucoup plus fine, ce qui signifie qu'il fut observé des plages de plusieurs dizaines de minutes pendant lesquelles le ventilateur de la station 3 était arrêté (Le régulateur à logique floue fut implantée sur cette station).

(Exemple du 20 septembre 1999, annexe 2 : graphe 3)

Cependant ces plages de ventilation à l'arrêt ont eu tendance à devenir à la fois trop fugitives et nombreuses durant les jours où les niveaux de CO étaient un peu plus importants (≥ 20 ppm), ce qui signifie que la régulation était devenue instable. (*Phénomène dit de « pompage »*).

Cette instabilité ne put être évitée par le changement de quelques règles de régulation.. Il s'est avéré à l'analyse qu'il manquait simplement de la finesse dans l'étalement des différents niveaux de ventilation, notamment parmi les 2 niveaux les plus faibles. Il aurait fallu avoir des régimes intermédiaires entre l'arrêt et le second niveau. Les autres niveaux, plus élevés, n'étaient jamais utilisés.

Le système mis ainsi en place a donc révélé ses limites :

- Impossibilité matérielle du ventilateur à répondre à de plus fines sollicitations du régulateur.
- Manque d'anticipation dans la logique de la régulation.

Une régulation présentant un tel phénomène de « pompage » est à proscrire, car elle sollicite anormalement le matériel et ne peut être qu'inefficace, énergétiquement parlant, puisque chaque démarrage produit des appels de puissance électrique importants et donc coûteux, même s'ils sont brefs.

En conséquence cette expérience en logique floue basée sur les paramètres traditionnels de régulation, avec du matériel n'offrant pas de possibilités de commande fine, ne permet pas de conclure que les économies d'énergie consécutives à la mise en place d'un tel système soient significatives.

5.6.3 En fonctionnement sur niveaux et variations de trafic (Dernière étape)

L'anticipation des montées en pollution peut être normalement réalisée par la prise en compte des comptages *de trafic en amont du tunnel*. Cette condition étant réalisée, la régulation devrait être aussi fine que possible et éviter les phénomènes de pompage.

Cependant des raisons pratiques ont empêché l'implantation des compteurs *en amont* des deux entrées, puisque le tunnel est bidirectionnel. Les compteurs ont été placés au milieu du tunnel.

La mise au point du système de régulation sur les deux paramètres du trafic (niveau, sens de variation), selon la logique décrite ci-dessus en § 5.5, fut donc un peu délicate, mais surtout non probante quant à la stabilité du système (anticipation insuffisante).

Cependant le taux de CO fut nettement mieux maîtrisé, évoluant entre 20 et 30 ppm contre 30 et 50 auparavant, ce qui s'explique aisément : Le système installé élimine le temps nécessaire pour la détection du CO après le passage d'une pointe fugitive (ou pas) du trafic.

=> La boucle de régulation est plus rapide, sans pour autant être suffisamment anticipative pour éviter l'éventuel phénomène de pompage coûteux en énergie.

(Voir un exemple typique : Le 21 juin 2000 en annexe 2, graphe 4)

5.7 Limites de l'expérience.

➤ *Expérience partielle*

L'expérience n'a porté que sur l'une des 5 stations de ventilation, et il est donc difficile d'en tirer une conclusion transposable à un tunnel équipé de façon homogène avec un seul régulateur général ou avec des régulateurs locaux tous équipés de logique floue.

Il semble naturellement préférable de coordonner l'ensemble des unités de ventilation d'un tunnel, sachant qu'en chaque point l'état du renouvellement d'air dépend de l'ensemble des équipements de ventilation du réseau souterrain. Il peut être imaginé qu'une réponse positive plutôt assez forte d'une unité de ventilation induise une réponse inverse de l'unité adjacente qui n'aurait plus besoin de ventiler autant. Dans ce cas, il s'installerait un mouvement de balancier entre les 2 unités de ventilation, l'une ventilant fortement alors que l'autre ralentirait, la situation s'inversant quelques dizaines de minutes après. Le système deviendrait instable par oscillations périodiques.

➤ *Caractéristiques du ventilateur régulé inappropriées*

Les ventilateurs installés dans le tunnel de la Croix Rousses ont été dimensionnés à l'époque où la pollution par le CO était prépondérante et aussi plus forte qu'à l'heure actuelle. Ils sont donc surabondants pour les besoins actuels, et surtout leurs différents régimes de fonctionnement trop espacés pour répondre efficacement à une régulation fine.

➤ *Implantation des capteurs de trafic inappropriée.*

Si la régulation basée sur l'observation du trafic en amont est prometteuse en termes de finesse et d'optimisation de la régulation, l'expérience ne permet pas de le montrer complètement puisque les capteurs de trafic étaient placés en plein tunnel.

➤ *Critères de comparaison faussés*

L'expérience, inédite, fut longue à mettre en place (1998-2000) . Or dans le même temps les flux de circulation dans l'agglomération lyonnaise subirent des modifications temporaires ou définitives :

- Montée en charge du boulevard périphérique.
- Travaux omniprésents sur la voirie de l'agglomération, déclenchés par la mise en place de la première ligne du tramway.

Le trafic dans le tunnel de la Croix Rousse a fortement évolué entre 1998 et 2000 passant de 67853 véh/j à 52276 véh/j. Cette diminution du trafic n'a pas entraîné une baisse proportionnelle du fonctionnement de la ventilation dans la mesure où les travaux d'aménagement de la voirie conduits dans l'agglomération ont amené des périodes de congestion du trafic dans le tunnel. Le gain amené par la logique floue doit donc s'apprécier sur les jours à trafic semblables (en TMJA et en allure d'évolution).

6 Enseignements et conclusions

6.1 Les enseignements à tirer

6.1.1 Conditions d'utilisation de la logique floue.

La ventilation des tunnels routiers basée sur les principes de la logique floue n'en est qu'à ses débuts. Peu d'expériences ont été encore menées, mais celles l'ayant été concernent aussi des tunnels à caractère urbain.

- A priori la mise en place de la logique floue devrait surtout s'imposer sur du matériel de base (ventilateurs) *conçus pour une régulation fine*. En clair, les ventilateurs doivent être équipés d'un variateur de puissance pouvant être efficace à bas régimes et assurer donc une plage de fonctionnement continue entre l'arrêt et la puissance nominale.
- La logique devrait s'exprimer pleinement avec des prises de données permettant l'anticipation du paramètre à réguler, c'est à dire des capteurs de trafic placés en amont du sens de circulation entrant dans le tunnel. La ventilation d'un tunnel ne pouvant être spécialisée voie par voie, une ventilation régulée en anticipation par le trafic ne peut se réaliser que pour des tunnels unidirectionnels.

6.1.2 Aspects positifs de la logique floue

Une comparaison effectuée sur des journées avec des trafics comparables ¹ a permis de constater que les ventilateurs d'air frais fonctionnaient moins longtemps avec une régulation floue. Le gain de consommation moyen, estimé sur différents graphes aux trafics comparables, est de l'ordre de 10 % ; toutefois cette valeur ne doit pas être considérée comme un résultat précis mais plutôt comme une indication.

Une réduction du temps de fonctionnement entraîne naturellement un gain sur la consommation électrique, mais aussi *un gain sur la maintenance*, dans la mesure où les machines ne subissent pas trop de cycles démarrage-arrêt.

De plus, une seule station était équipée en logique floue, ce qui laisserait à penser que ce gain pourrait être un peu plus élevé si l'ensemble des 5 stations de ventilation du tunnel avait été équipé.

Par ailleurs l'observation de l'ensemble des graphes propres aux relevés de pollution montre bien que la *finesse du maintien du niveau de pollution est nettement améliorée*. Ce résultat qualitatif ne peut être dû qu'à une commande plus fine des ventilateurs, induisant par moments des fonctionnements temporaires à plein régime.

¹ Voir annexe 2 : graphes 2 et 4

6.2 En conclusion....

L'expérience réalisée à la Croix Rousse a eu d'abord le mérite d'avoir initié une démarche de rigueur de la part de l'exploitant, puisque celui-ci a dû d'abord remettre à jour le fonctionnement de son installation. Il a été ensuite sensibilisé aux avantages d'un meilleur pilotage.

Cette expérience devrait être suivie dans le temps et *complétée si possible* pour mesurer le réel impact d'une logique floue, par essence plus fine qu'une logique classique à seuils. Il convient en effet de souligner que les conditions d'expérimentation n'étaient pas optimales: une station équipée sur 5, un trafic en évolution, le comptage de trafic situé à l'intérieur du tunnel au lieu d'être à l'extérieur. Ces raisons expliquent que certains résultats ne permettent pas de mettre en évidence de manière probante l'intérêt économique d'une régulation floue. Une tendance à la baisse des coûts énergétique est perceptible, mais ceux-ci ne sont pas encore mesurables précisément.

Cette expérimentation aura cependant permis :

- De progresser grandement sur la connaissance des principes de la logique floue et des possibilités qu'elle offre théoriquement.
- D'identifier les variables d'entrée les plus adaptées à ce type de régulation, notamment la variable trafic.
- De prendre connaissance de la nécessité d'assurer un comptage *en amont* de l'ouvrage si l'on veut anticiper la régulation de ventilation.
- De mettre en évidence l'intérêt d'avoir des équipements de ventilation pouvant fonctionner sur une plage de puissance quasi-continue.

Le bilan de l'expérience est positif car notre connaissance de la régulation floue en tunnel a progressé, et la possibilité d'utiliser ce type de régulateur pour asservir la ventilation aux niveaux de pollution est vérifiée.

Enfin, sans être réellement quantifiés, des gains en consommation d'énergie ont été constatés.

ANNEXES

ANNEXE 1

NIVEAUX DE POLLUTION ADMISSIBLES EN TUNNEL

Type de tunnel	Conditions de circulation	Concentrations (ppm)	
		En 1995	> 2005
Tous	Congestion exceptionnelle	250	150
Tous	Cyclistes ou piétons	50	50
Tous	Ouvriers (8 heures)	50	50
Interurbain	Circulation fluide	150	100
Urbain	Congestion fréquente	150	75
Urbain court isolé (<1 km)	Circulation fluide	100	100
Urbain (>1 km ou en succession)	Circulation fluide	100	75

(Décroissance linéaire entre 1995 et 2005)

FUMÉES : COEFFICIENTS D'EXTINCTION ADMISSIBLES.

Type de tunnel	Conditions de circulation	Coefficient d'extinction ($10^{-3}/m$)	
		En 1995	> 2005
Tous	Congestion exceptionnelle	9	9
Tous	Cyclistes, piétons ou ouvriers (8h)	3.5	3
Urbain	Congestion fréquente	7.5	5
Urbain et Interurbain	Circulation fluide et non rapide (<60km/h)	7.5	6
Interurbain	Circulation fluide et rapide (>60 km/h)	5	5

(Décroissance linéaire entre 1995 et 2005)

NIVEAUX ADMISSIBLES EN OXYDES D'AZOTE

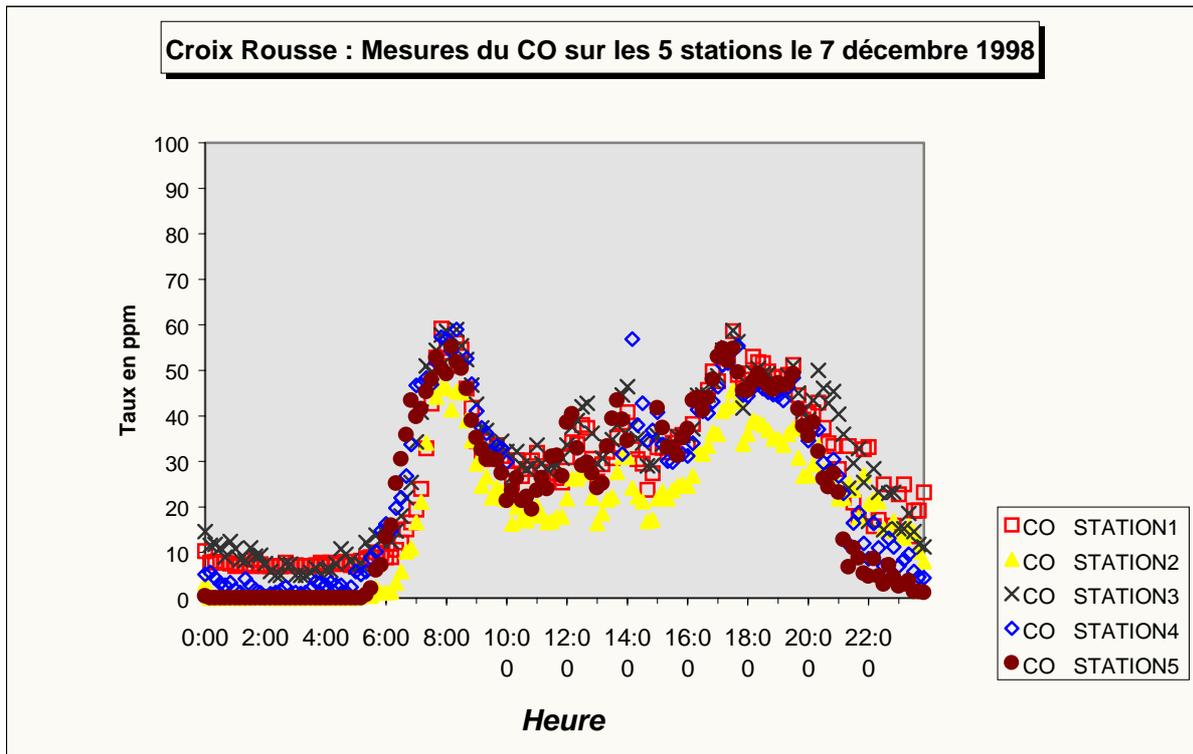
Les oxydes d'azote font l'objet d'une récente recommandation en tunnel : 0,4 ppm comme seuil limite en NO₂. (circulaire 99.329 du 8 juin 1999).

Rappelons toutefois les valeurs recommandées par ailleurs :

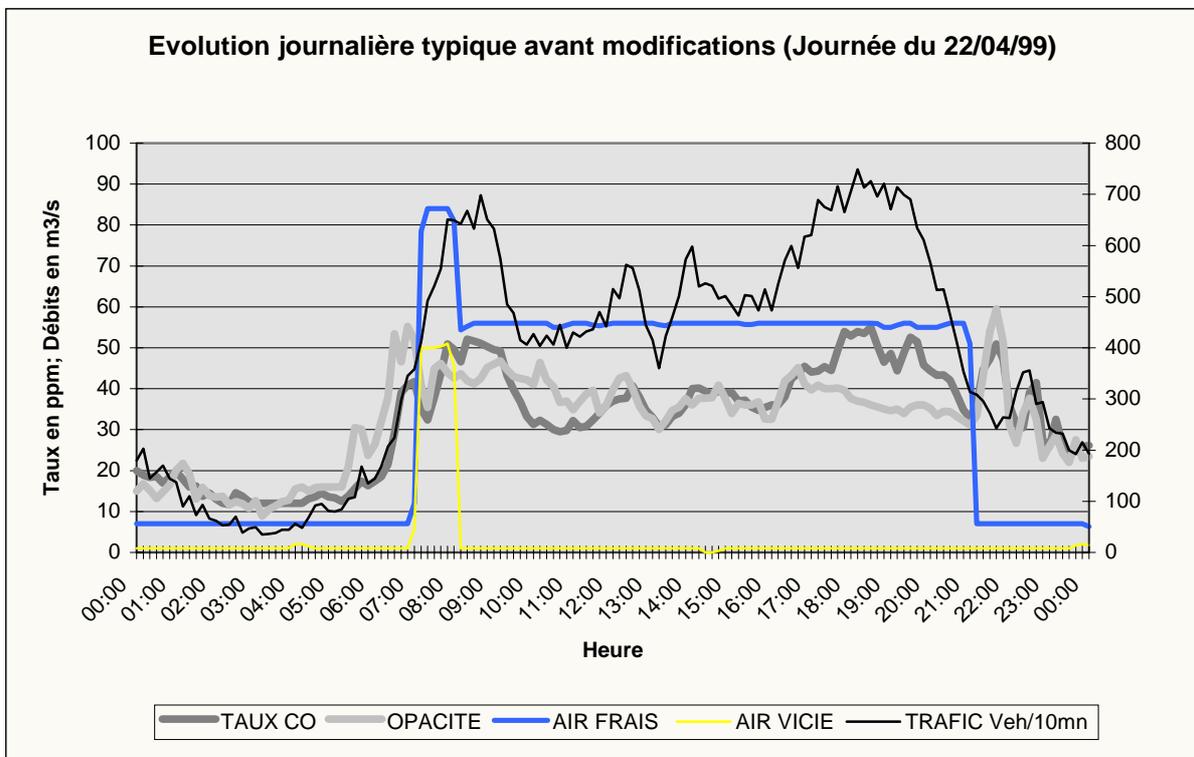
- Par l'OMS pour NO₂ : 0.210 ppm sur 1 heure, 0.080 sur 24 heures.
- Par le ministère du travail pour NO₂ : 3 ppm sur 15 mn et 2.5 ppm sur 8 heures en NO
- Par le conseil supérieur d'hygiène publique de France pour le NO : 4 ppm sur 15 mn, soit 0.4 ppm pour NO₂, le rapport NO₂/NO étant fixé à 10% pour les tunnels.

Il semblerait raisonnable d'appliquer en tunnel une valeur compatible avec la législation du travail en cas de travaux.

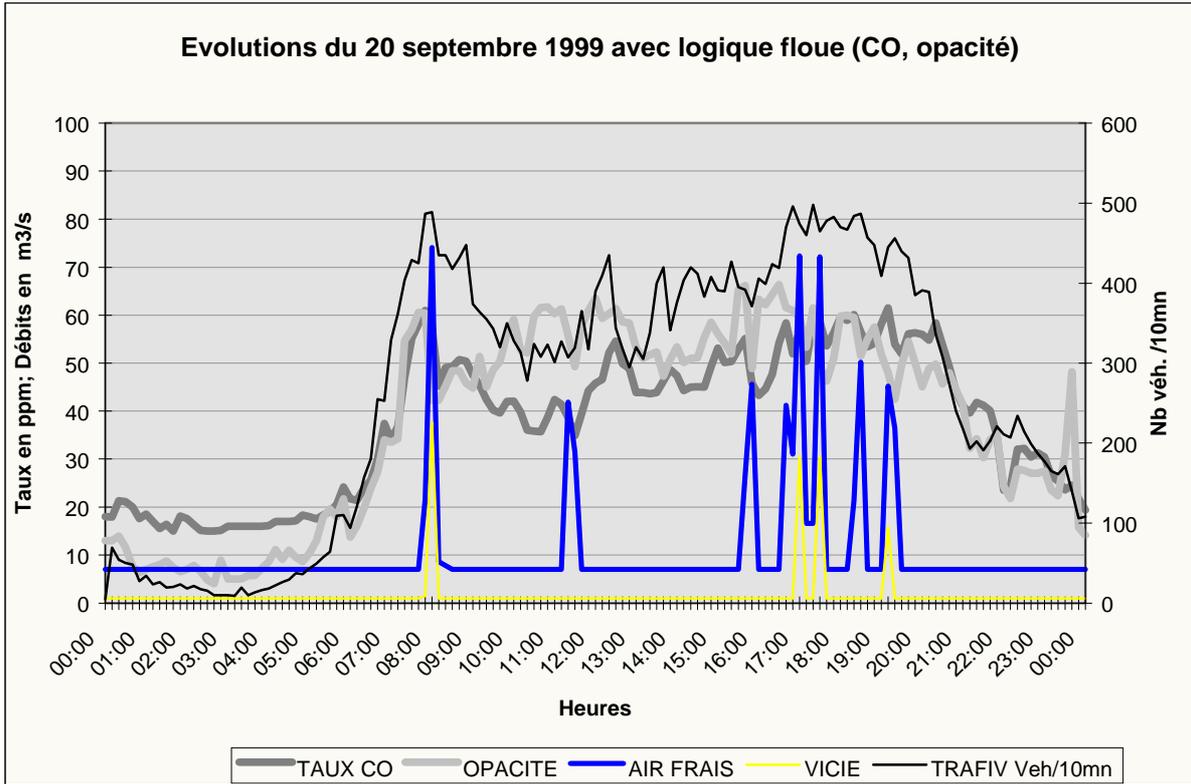
ANNEXE 2



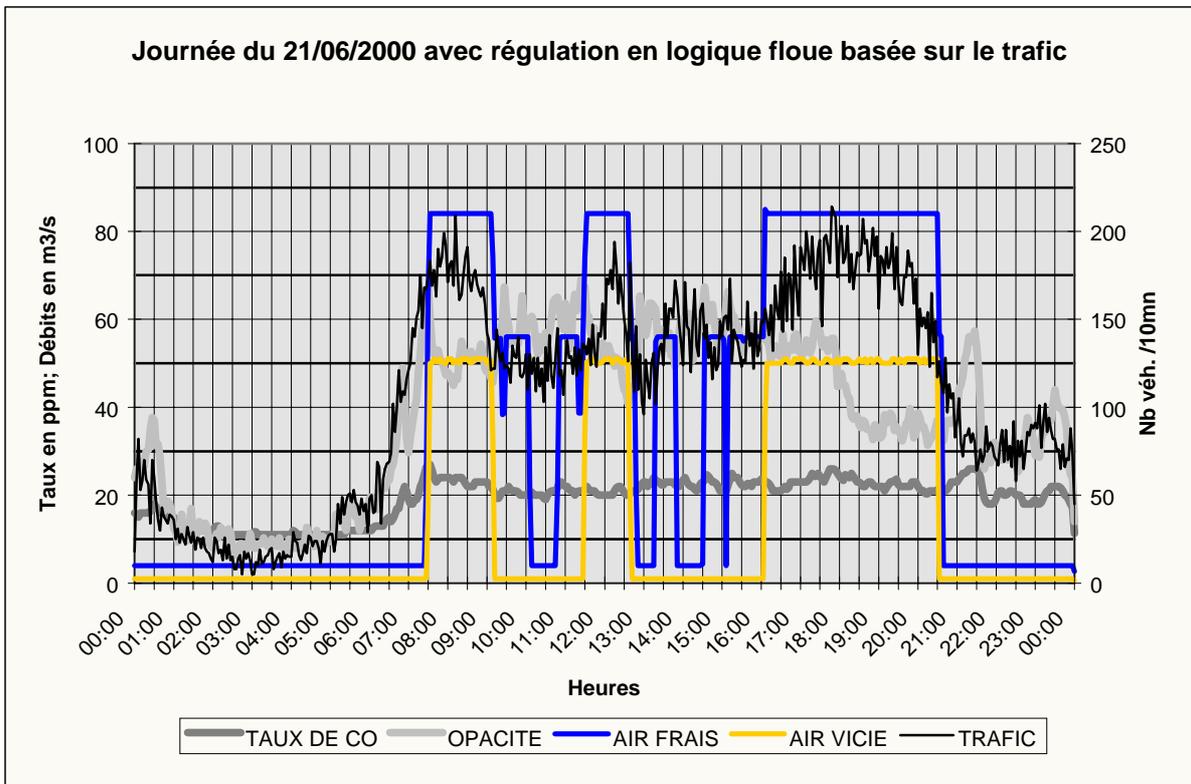
Graphe 1



Graphe 2



Graphe 3



Graphe 4

BIBLIOGRAPHIE

1 - GENERALITES

LEGRAND S., ALLIBE M.

Gestion technico-économique de la ventilation.

Stage ENPC. Décembre 1991.

MARTIN J., LEMAIRE G.

La gestion technico-économique de la ventilation.

Stage ENPC. Juin 1994.

NAKAYUKI T., ASANUMA S., SATO M., KOBAYASHI A., NARITA T., SAKAI K.

A simulation system for various longitudinal ventilation systems.

BHRG, Aoste, 1997.

2 - SEUILS

BOYER A., BROUSSE B.

La commande de la ventilation. Modes de variation du débit de ventilation.

Stage ENPC. Avril-Juin 1994.

DUBOIS M., BERTRAND M.

Règles d'exploitation de la ventilation du tunnel ouest (Neuchâtel)

CEGELEC, septembre 1994.

3 - TRAFIC

ASAGAMI K., NAGATAKI K.

Operation and adequacy of the new ventilation system of the Kan-Etsu road tunnel.

BHRA, Durham, 1988.

JACQUES E.J.

Study of the automatic control of the longitudinal ventilation of a complex road tunnel.

BHRG, Liverpool, 1994.

JACQUES E.J.

Tunnel ventilation controlled by traffic data: density and speed.

BHRG, Aoste, 1997.

4 - LOGIQUE FLOUE

IKEBE K., NAGAI M., UTIDA Y., TAN S., SAWACHI S., INOUE H.,

Verification of saving energy effect by road tunnel ventilation control system based on knowledge engineering and fuzzy logic.

Date ?

YOSHIMUCHI T., WATANABE T., KOYAMA T., YOSHINO N., SHINOHARA M.
A ventilation control system using fuzzy control for two-way traffic tunnel in highway.

BHRG, Liverpool, 1994.

BOUCHON-MEUNIER B.,

La logique floue.

PUF coll. Que sais-je - 1993

HENN V.

Modèle de poursuite utilisant les techniques de la logique floue.

Recherche Transports Sécurité n° 54. Janvier-Mars 1997

DEBAY P., EDEL M., HAYAT S.,

Guidage automatique des bus urbains lors de l'accostage.

Recherche Transports Sécurité n° 54. Janvier-Mars 1997

HENN V.,

Présentation mathématique de la logique floue.

Rapport de stage ENTPE/Ecole Polytechnique de Montréal. Juin -Août 1993
