

Les rideaux d'air pour la séparation et le confinement d'ambiances polluées et d'émissions fugitives

Isolation of contaminated areas and control of fugitive emissions using air curtains

Camille SOLLIEC*, Stéphane MAUREL*, Michel PAVAGEAU*, Pierre LE CLOIREC*

Résumé

De nombreuses activités industrielles ou agricoles produisent des composés organiques tels des solvants ou certains gaz toxiques ou nauséabonds. À cause des effets du vent ou de différences de pression produites par le système de ventilation, ces gaz polluants sont dispersés dans l'environnement extérieur ou de travail, où ils provoquent des nuisances. Afin de réduire le transfert de pollution entre deux zones tout en facilitant le passage des personnes et matériels, les portes solides peuvent être remplacées par des portes virtuelles formées par un rideau d'air.

Ces travaux, réalisés sur un banc d'essai à échelle réduite, montrent les performances de tels systèmes et expliquent comment se produisent les transferts de masse de part et d'autre du rideau. Ils montrent l'intérêt d'utiliser de tels systèmes de confinement pour lutter contre les nuisances olfactives ou les émissions fugitives de composés organiques volatils, d'odeurs ou particules.

Abstract

Many industrial or agricultural activities produce organic compounds such as solvents, toxic species or nauseous gases. Because of the effects of the wind or difference in pressure produced by the system of ventilation, these polluting gases are convected in the external environment or in working areas where they cause harmful effects. In order to reduce the transfer of pollution between two zones while facilitating the passage of people and materials, the solid doors can be replaced by virtual doors formed by an air curtain. This work, completed on a scaled down test bench, shows the performances of such systems and explains how the mass transfers through the air curtain occurs. They show the interest to use such systems of containment to fight against the olfactory harmful effects or the fugitive emissions of volatile organic compounds odorous molecules or particles.

Introduction

De nombreuses activités industrielles, agricoles ou domestiques émettent des composés organiques volatils (COV) ou des molécules odorantes. En raison des conventions internationales et des législations nationales en vigueur ainsi que de la pression environnementale des populations, il est

nécessaire de canaliser et de mettre en œuvre des techniques et des moyens de réduction des émissions gazeuses polluantes. Il est bien évident que si une action préventive est préférable, il est parfois nécessaire d'avoir une action curative sur le système polluant ou nuisant. Cette démarche, bien que moins élégante, est très souvent requise du fait des sites industriels déjà en activité qu'il convient d'équiper.

Ces traitements peuvent être regroupés par grandes familles suivant que les COV ou les molécules odorantes sont détruits ou récupérés. La figure 1, p. 128, présente ces différentes techniques, la destruction thermique ou biologique et les procédés

* École des Mines de Nantes, DSEE, rue Alfred Kastler, BP 20 722, 44307 Nantes Cedex 03.
E-mail : Camille.Sollic@emn.fr

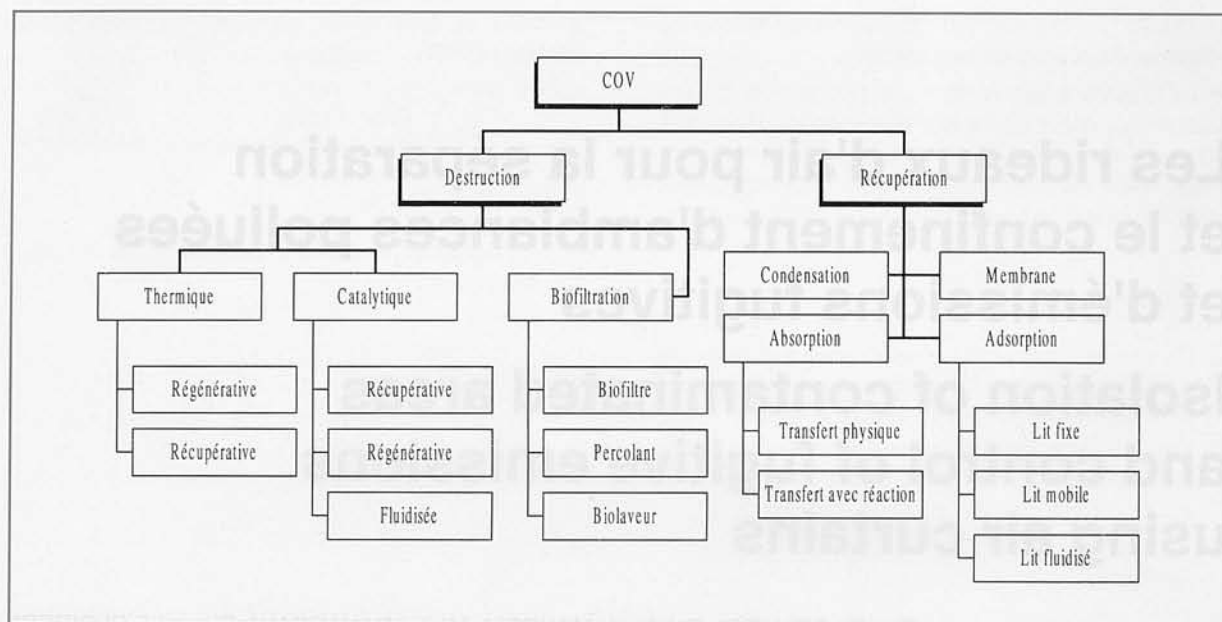


Figure 1.

Organigramme simplifié de différents procédés de traitement et de contrôle des COV présents dans des émissions gazeuses (Le Cloirec P. Les composés organiques volatils (COV) dans l'environnement. Tec & Doc, Lavoisier, Paris 1998 : 16 [1]).

Reproduit avec l'aimable autorisation des Éditions Tec & Doc, Lavoisier.

VOCs control and treatment main processes for gaseous emissions.

Reproduced, with permission, from Tec & Doc Ed, Lavoisier, Paris [1].

de séparation et de transfert avec ou sans réaction chimique [1]. L'ensemble de ces opérations de traitement ne s'entend que pour des émissions captées et canalisées, éventuellement prétraitées, et envoyées sur une unité centralisée sur le site industriel. Or, il apparaît que dans de nombreux cas réels les émissions peuvent être diffuses et posent des problèmes de toxicité ou de nuisances pour les opérateurs sur les lieux de travail.

On peut par exemple citer les stockages de composés fermentescibles ou odorants, les fuites possibles au niveau des pompes ou des raccordements de tuyauteries [2, 3], les ateliers de fabrication, les cuiseurs de l'industrie agroalimentaire. Ces émissions diffuses sont difficiles à capter sans utiliser de gros débits d'extraction plus ou moins efficace qu'il convient ensuite de traiter avec des difficultés inhérentes aux forts volumes et aux faibles concentrations. Ceci implique alors des coûts de fonctionnement énergétiques importants et de forts investissements en raison du dimensionnement du réseau de collecte et de traitement de l'air.

Une alternative possible consiste à confiner l'ambiance diffuse odorante ou chargée en composés organiques volatils dans des limites de concentration acceptables en termes de santé humaine ou de nuisances olfactives. Il est alors possible de traiter in situ cette ambiance. Pour des raisons de rentabilité et de facilité de travail, ce confinement doit permettre la libre circulation des hommes, des matériels, des produits en cours

de fabrication ou des véhicules de transport tout en retenant l'air pollué.

Ainsi, l'utilisation de séparateurs d'ambiances à jet d'air plan associés à un système de piégeage d'espèces gazeuses polluantes doit permettre de réduire notablement le transfert de la pollution consécutif aux mouvements d'air. En outre, il est possible de fonctionner en circuit fermé avec un recyclage partiel ou total de l'atmosphère à traiter. La figure 2, p. 129, représente ce type de confinement et de traitement d'ambiances par jet d'air plan.

Ce type de dispositif peut assurer une réduction des transferts de masse de la zone polluée vers la zone saine allant dans les meilleurs cas jusqu'à 90 % [4]. Un angle de soufflage, compris entre 0° et 30° par rapport à la verticale, pourra être imposé. La valeur de cet angle est applicable suivant la nature des conditions aérauliques à la frontière de séparation, la configuration du local, du volume à cantonner ou des conditions à la frontière entre les deux volumes.

Pour certaines applications, un filtre constitué de carbone activé ou de toute autre matière adsorbante ou absorbante peut être placé à l'aspiration du rideau d'air pour piéger tout ou partie des molécules odorantes aspirées dans la zone polluée. Simultanément, la dynamique du jet empêche le transfert de masse entre les deux zones. Il y a donc dépollution continue de la zone contaminée et réduction des transferts des espèces chimiques vers la zone devant être protégée de la contamination [5].

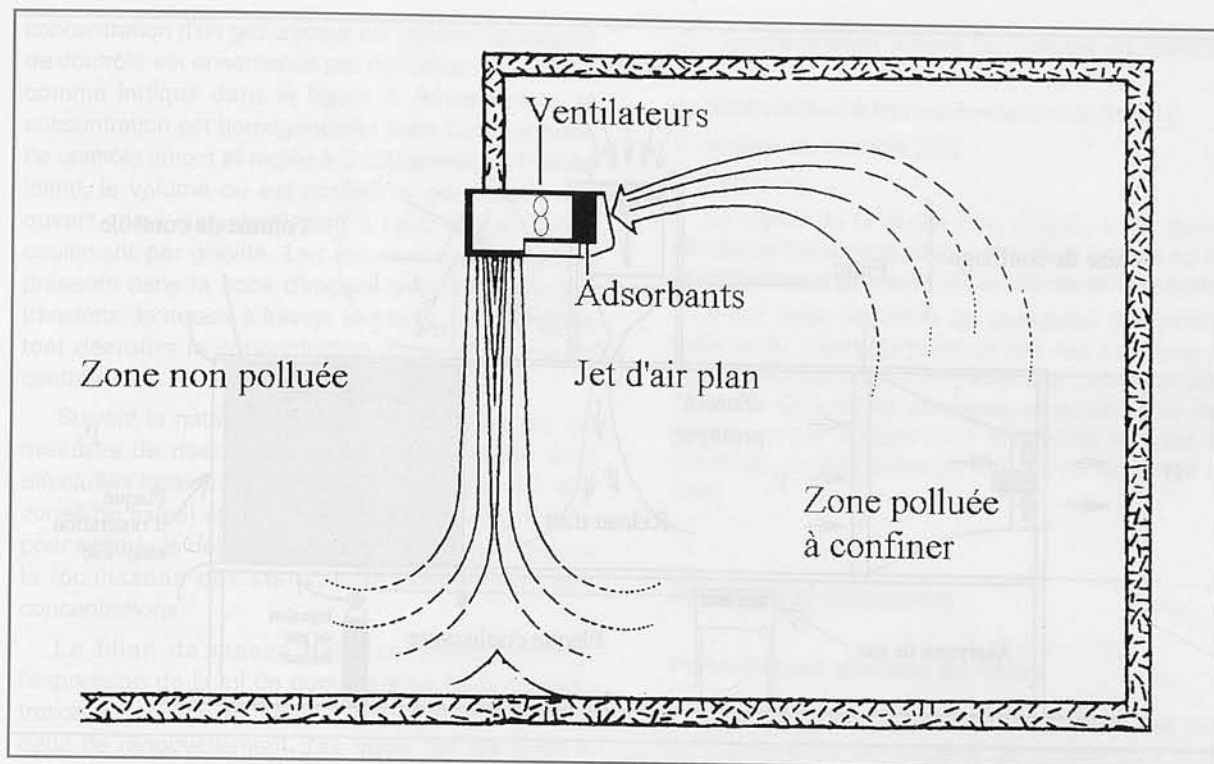


Figure 2.
Schéma de principe du dispositif.
Apparatus working principle.

L'objectif de ce travail est de présenter et d'étudier, dans ce contexte, un dispositif à rideau d'air permettant le confinement et le traitement d'air d'ambiances chargées en COV ou en molécules odorantes. Ces travaux traitent de l'étude des transferts de masse se produisant au sein du rideau d'air. Après identification des différents modes de transfert, des résultats quantitatifs viennent étayer l'analyse qualitative.

Nomenclature et symboles

- C : concentration du gaz traceur [ppm]
- e : épaisseur du jet [m]
- Eu : nombre d'Euler [sans dimension]
- d : densité du gaz traceur [sans dimension]
- H : hauteur de la veine principale [m]
- I : intensité de la turbulence [%]
- P : pression [Pa]
- U : vitesse [m/s]
- V : volume [m³]
- t : temps [s]
- x : distance par rapport à l'orifice de soufflage [m]
- α : angle de soufflage du jet [°]
- Δ : différence

Description de l'installation

L'unité expérimentale

Le banc d'essai est constitué d'une soufflerie de 8 m de long présentant une section utile de 2 m² maximum. Une veine de soufflage permet de simuler le rideau d'air. L'épaisseur e , l'angle de soufflage α , la vitesse débitante U_0 et l'intensité de turbulence I du jet sont réglables. La différence de pression de part et d'autre du rideau ($P_1 - P_2$) est fixée à l'aide d'une rampe de ventilateurs placée à l'extrémité de la veine principale. Une des extrémités de la soufflerie peut être fermée pour simuler un volume clos. La hauteur sous plafond H est réglable de 0,2 à 1,44 m. Le schéma de principe du banc d'essai est présenté dans la figure 3, p. 130.

Les moyens métrologiques

Les moyens d'investigation sont basés sur l'anémométrie à fils chauds et laser, la tomographie laser et l'analyse de gaz par ionisation de flamme.

Pour caractériser le rideau et ses performances, il convient de connaître la distribution des vitesses et procéder aux mesures de concentration d'un gaz traceur. Les vitesses locales dans le rideau sont obtenues à l'aide d'un anémomètre à fil chaud ou au moyen d'un anémomètre laser à effet Doppler à deux composantes. On obtient ainsi les composantes longitudinales et transversales dans le jet

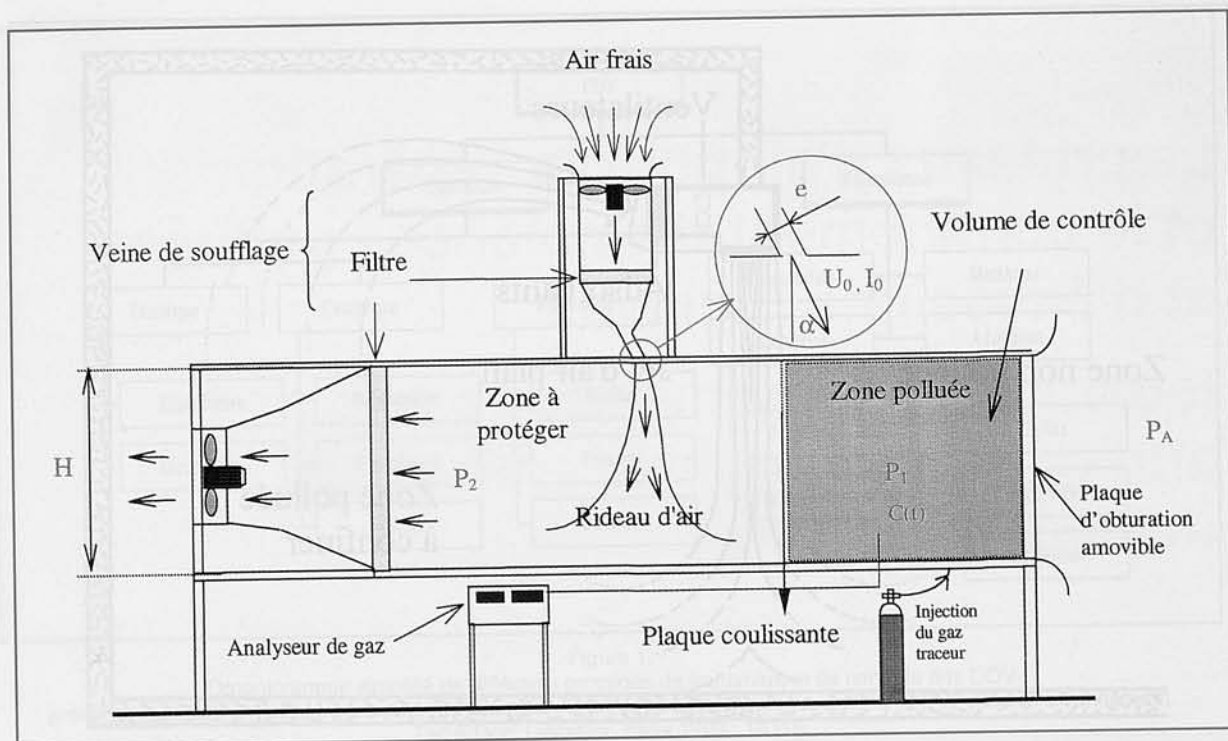


Figure 3.
Schéma du banc d'essai.

Schematic view of the experimental facility.

d'air. Ces mesures nous permettent de localiser le lieu du maximum de vitesse au cours du développement du jet et par la suite de placer un analyseur de gaz destiné à quantifier les transferts de masse locaux à travers le rideau.

Compte tenu de la nature fluctuante de l'écoulement, l'analyseur de gaz doit présenter une bande passante suffisamment large pour détecter les fluctuations de concentration ou les phénomènes transitoires de transfert de masse à travers le jet. L'appareil est basé sur le principe de l'analyse des hydrocarbures totaux par ionisation de flamme (FID). Sa fréquence maximale de coupure est de 40 Hz et sa résolution de quelques mg/m^3 .

Les visualisations de la structure globale du rideau sont faites par tomographie laser. Un faisceau laser de forte puissance (5 W) au passage d'un barreau de verre produit une nappe lumineuse plane. En injectant de minuscules particules dans le jet, on obtient une visualisation de l'écoulement ou de la frontière créée par le jet. Les prises de vue sont faites dans un plan orthogonal au plan laser au moyen d'une caméra rapide. Un traitement des images numériques permet si nécessaire d'améliorer la dynamique des clichés.

Description de la méthode de caractérisation globale des performances du rideau

Il est indispensable de quantifier la différence de pression apparaissant de part et d'autre du jet

lorsque celui-ci souffle vers une cavité fermée ou en travers d'un tunnel présentant une différence de pression motrice à ses deux extrémités. Des essais ont montré que ces deux situations sont équivalentes.

Dans les deux cas, la différence de pression ($P_1 - P_2$) est mesurée à l'aide de prises de pression pariétale placées sur les parois des volumes 1 et 2 (Figure 3). Un système de moyennage pneumatique permet d'obtenir une valeur représentative de la pression statique régnant dans chaque volume. La vitesse débitante du jet est obtenue à l'aide d'un tube de Pitot connecté à un capteur de pression capacitif de forte sensibilité (gamme 0 – 700, sensibilité 2 % PE) placé au centre de la buse de soufflage.

Méthodes de mesure des transferts de masse résiduels

La nature turbulente de l'écoulement engendre des transferts de masse résiduels qui sont à l'image de la qualité du confinement. Ces transferts ont été étudiés de manière qualitative par tomographie laser et de manière quantitative par mesure de la concentration d'un gaz traceur sur l'axe du jet [6-8].

L'identification des zones de fuite à travers le rideau est de première importance pour comprendre les mécanismes de transfert et par la suite optimiser le dispositif.

Pour caractériser ce débit global de fuite, une méthode instationnaire basée sur l'analyse de la

concentration d'un gaz traceur est utilisée. Le volume de contrôle estensemencé par de l'éthane ($d = 0,98$) comme indiqué dans la figure 3. Avant l'essai, la concentration est homogénéisée dans tout le volume de contrôle amont et réglée à 2 000 ppm(v). À l'instant initial, le volume où est confiné le gaz traceur est ouvert quasi instantanément à l'aide d'une plaque coulissant par gravité. Les mouvements turbulents présents dans la zone d'impact induisent alors des transferts de masse à travers le rideau. Ces transferts font décroître la concentration dans le volume de contrôle.

Suivant la nature de l'information recherchée, les mesures de décroissance de concentration sont effectuées localement au niveau du jet (détection des zones de fuites) et globalement dans le volume aval pour estimer le débit total de fuite. La figure 4 montre la localisation des stations de prélèvement des concentrations.

Le bilan de masse dans ce volume donne l'expression de la loi de décroissance de la concentration en fonction du temps. Cette loi fait intervenir le débit de renouvellement d'air induit par les fuites à travers le rideau.

$$C(t) = C_0 e^{-\frac{q}{V}t}$$

$C(t)$: concentration dans le volume de contrôle [ppm(v)].

C_0 : concentration initiale du volume de contrôle [ppm(v)].

q : débit résiduel à travers le rideau d'air [m^3s^{-1}].

V : volume de contrôle [m^3].

T : temps [s].

La pente de la droite $\text{Log } C(t)/C_0 = f(t)$ donne directement le débit résiduel q . Ce débit de fuite (q) est essentiellement gouverné par les transferts turbulents.

Il est ainsi possible de comparer les performances du rideau du point de vue des transferts de masse résiduels pour différentes géométries et pour différents paramètres cinématiques du jet. Ainsi, des essais ont été réalisés pour différentes vitesses de soufflage ou intensités de turbulence en sortie de buse.

Résultats et discussion

Performances globales du rideau

Le point de fonctionnement d'un rideau d'air peut être caractérisé par la perte de charge qu'il induit vis-à-vis d'un écoulement transversal ou de la dépression qu'il est capable de compenser (cas d'un local en dépression ou en surpression, par exemple). Cette perte de charge dépend de l'épaisseur du jet, de sa vitesse initiale, de l'angle de soufflage et de la hauteur de l'ouverture [6, 9, 10].

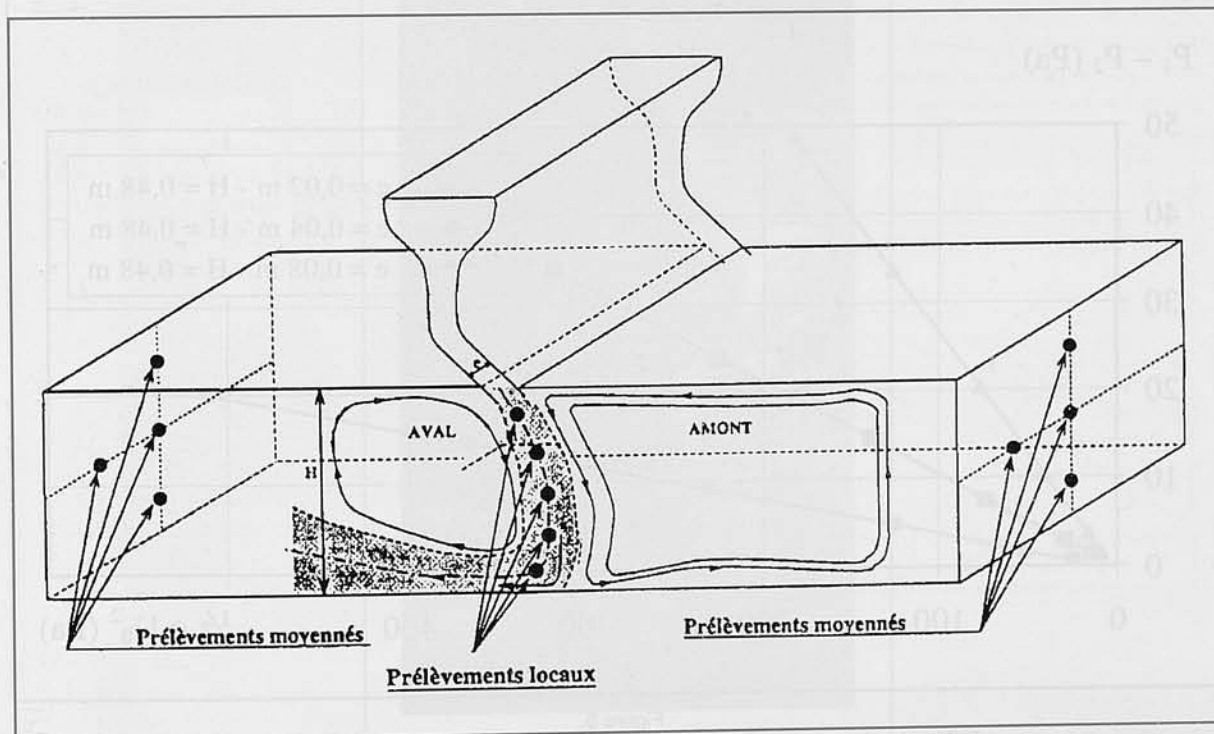


Figure 4.
Localisation des stations de mesures des concentrations.
Sampling point location for concentration measurements.

La loi décrivant le point de fonctionnement du rideau d'air peut s'écrire à l'aide du nombre d'Euler issu de l'analyse dimensionnelle du phénomène. La définition de ce nombre est la suivante :

$$Eu = \frac{\Delta P}{\frac{1}{2} \rho U_0^2}$$

Il représente la pente de la droite

$$\Delta P = F \left(\frac{1}{2} \rho U_0^2 \right)$$

La figure 5 présente l'évolution de la différence de pression induite par le rideau pour trois épaisseurs de jet dans le cas d'un soufflage avec un angle de 30°.

Pour une géométrie donnée, la loi d'évolution est linéaire, sa pente représente le nombre d'Euler. Pour une même vitesse initiale de soufflage, la différence de pression induite augmente très rapidement avec l'épaisseur du jet. Pour une même différence de pression on peut donc utiliser un jet épais soufflant à faible vitesse ou un jet mince soufflant à plus grande vitesse.

À l'orifice de soufflage le jet présente obligatoirement une intensité de turbulence qu'il est difficile de maîtriser dans les installations réelles. Dans la pratique, cette intensité I_0 est de l'ordre de 10 à 20 %. Les essais, présentés dans la figure 6, p. 133, montrent clairement que ce paramètre n'a pas d'influence notable sur les performances globales du rideau.

Transferts locaux de masse

En raison de la nature turbulente du jet, le rideau n'est jamais parfaitement étanche, particulièrement dans la zone d'impact. Il existe toujours un débit résiduel de fuite même au point de fonctionnement. Le perfectionnement du dispositif passe par l'analyse des modes de transferts résiduels à travers le jet. Deux approches permettent de mieux comprendre le phénomène. L'analyse qualitative est basée sur la technique de visualisation par plan lumineux laser. Un exemple de visualisation de la barrière créée par le rideau est présenté dans la figure 7, p. 133.

Les visualisations réalisées par tomographie laser permettent aussi de mieux comprendre le mécanisme de transfert résiduel se produisant à travers le rideau. L'analyse visuelle des séquences vidéo, dont un exemple est présenté sur la figure 8, p. 134, montre que les mécanismes se produisent par éclatements des vortex qui se sont chargés dans la zone de cisaillement du jet par convection. Ce phénomène est schématisé sur les clichés vidéo de la figure 8. Conformément aux visualisations laser, les mesures des concentrations locales sur l'axe du jet confirment (Figure 9, p. 134) que les transferts de masse se font de manière prépondérante dans la zone d'impact. Notons également que la diffusion turbulente au sein même du jet est extrêmement réduite hors de la zone d'impact.

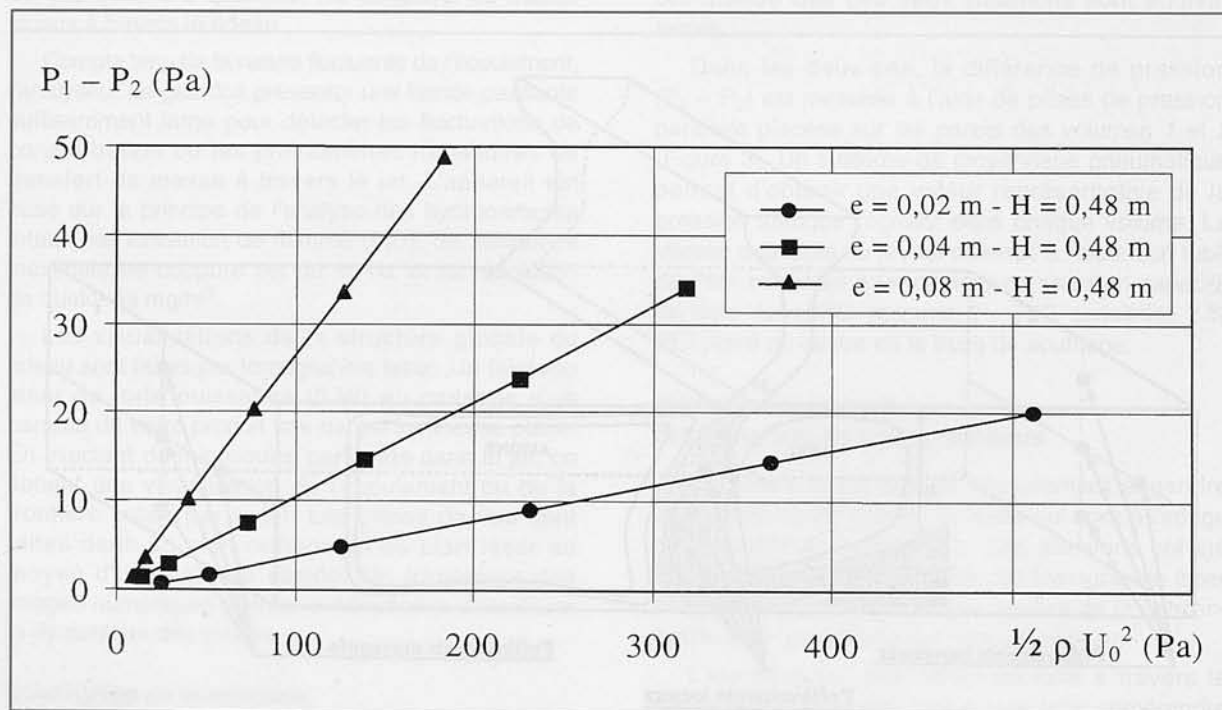


Figure 5.
Différence de pression de part et d'autre du jet en fonction de son épaisseur
($\alpha = 30^\circ$, $H = 0,48$ m, $I = 0,5$ %).

Pressure differential across the jet for various jet thickness
($\alpha = 30^\circ$, $H = 0,48$ m, $I = 0,5$ %).

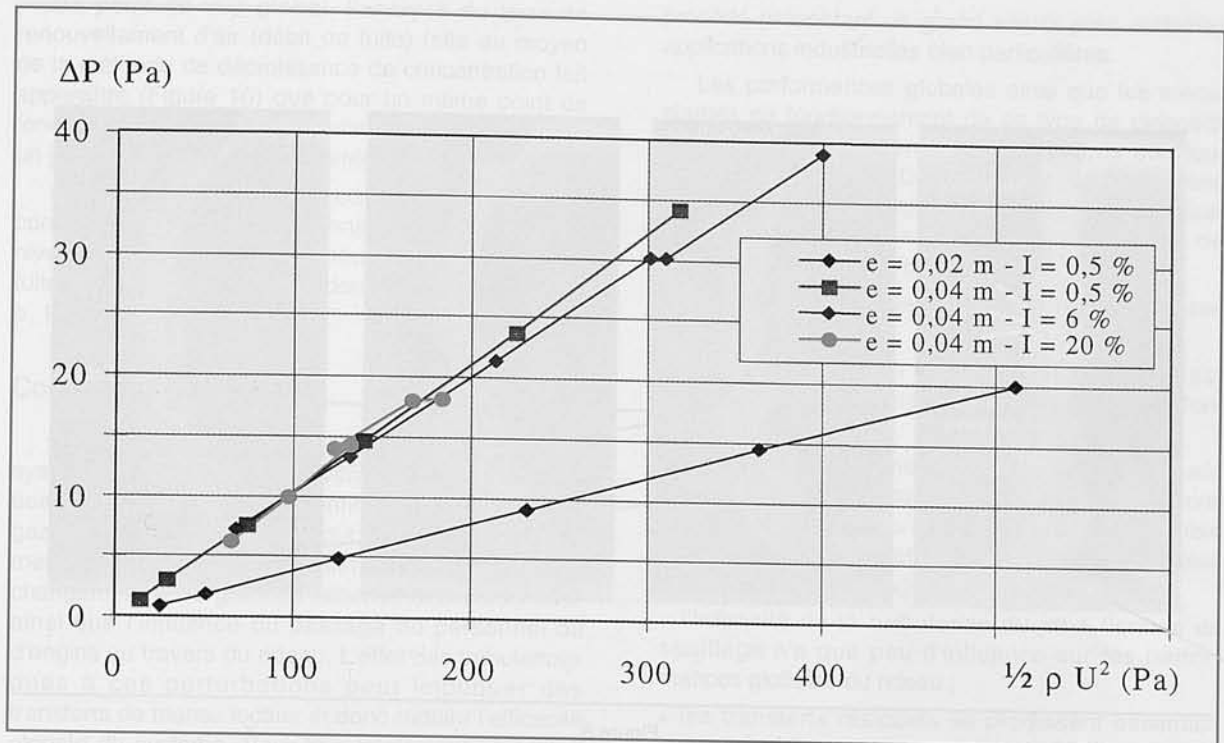


Figure 6.

Différence de pression de part et d'autre du rideau pour différentes intensités de turbulence initiales du jet
 $(\alpha = 30^\circ, H = 0,48 \text{ m})$.

Pressure differential across the jet for various exit turbulence intensities
 $(\alpha = 30^\circ, H = 0,48 \text{ m})$.

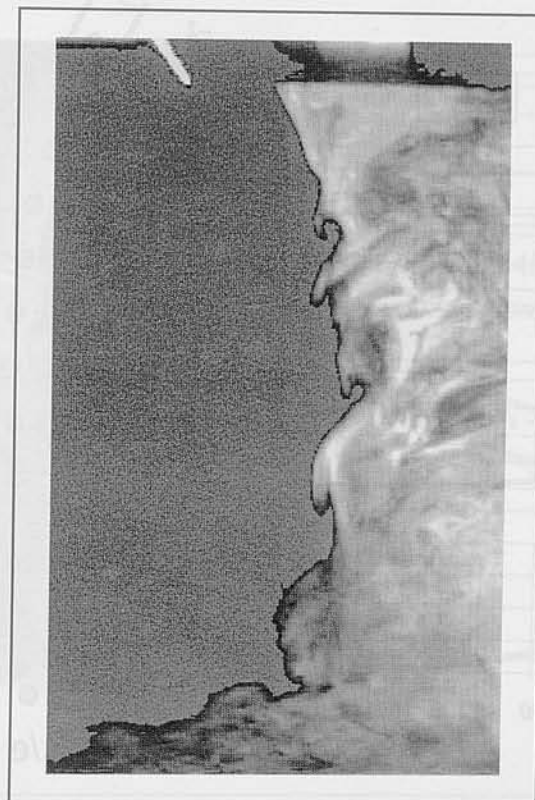


Figure 7.

Tomographie laser de la frontière créée par le jet.
 Flow visualization showing the jet shielding effect.

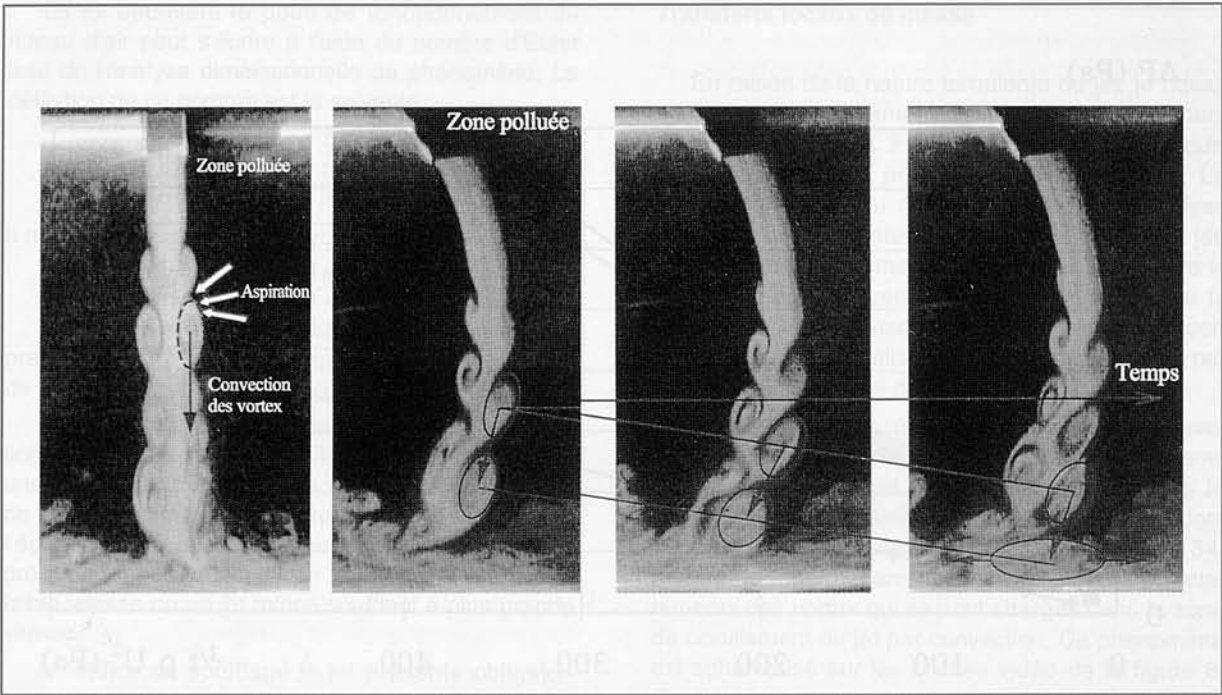


Figure 8.
Visualisation du jet ($\Delta P = 0$), du rideau et des mécanismes de transfert de masse à travers le rideau.
Flow visualization ($\Delta P = 0$) showing transfer mechanisms.

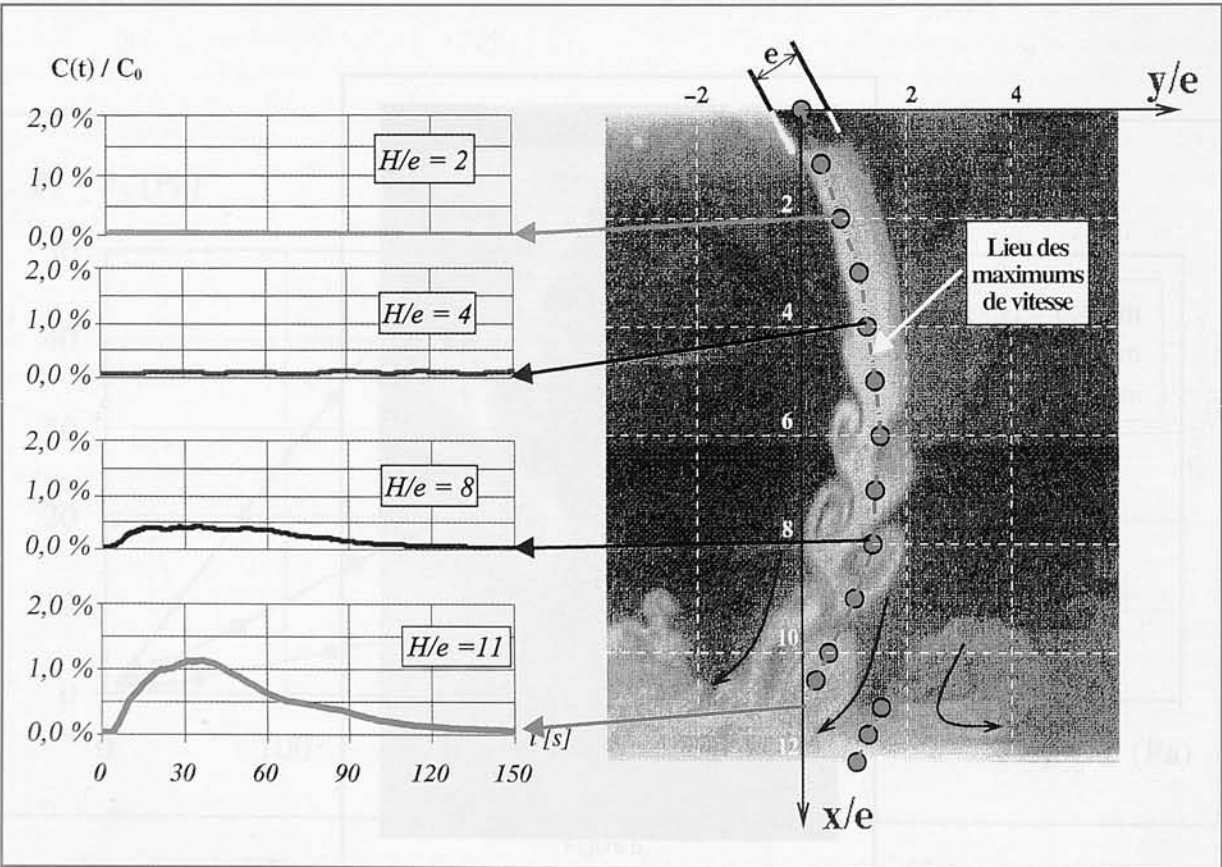


Figure 9.
Décroissance de la concentration gazeuse sur l'axe du jet.
Concentration decay along the jet centerline.

Du point de vue global, l'analyse du taux de renouvellement d'air (débit de fuite) faite au moyen de la méthode de décroissance de concentration fait apparaître (Figure 10) que pour un même point de fonctionnement le débit de fuite est plus faible pour un jet épais soufflant à plus faible vitesse.

Des essais du même type confirment la conclusion concernant l'influence de l'intensité de turbulence. Le niveau de celle-ci est sans influence sur le débit de fuite comme le montrent les données de la figure 11, p. 136.

Conclusion

Ces travaux ont permis de montrer que les systèmes à rideaux d'air peuvent constituer une solution intéressante pour le confinement d'ambiances gazeuses polluées. Malgré tout, des études complémentaires sont nécessaires afin d'intégrer à la fois le changement à de grandes échelles dimensionnelles ainsi que l'influence du passage du personnel ou d'engins au travers du rideau. L'effet des turbulences dues à ces perturbations peut impliquer des transferts de masse locaux et donc réduire l'efficacité globale du système. Pour être totalement objectif, il convient aussi de signaler un éventuel inconfort ponctuel lors de la traversée du jet. Cependant, le système à rideau pour la séparation d'ambiances permettant la réduction des transferts, la réduction des poussières, d'espèces toxiques, de composés organiques volatils et de molécules odorantes est un

procédé présentant un grand intérêt pour certaines applications industrielles bien particulières.

Les performances globales ainsi que les mécanismes de fonctionnement de ce type de dispositif ont été mis en évidence pour quelques configurations géométriques. De cette étude, on peut retenir les points suivants qui permettent de mieux maîtriser les systèmes et aider au dimensionnement de certaines applications futures :

- les transferts résiduels sont plus faibles à basse vitesse de soufflage ;
- la perte de charge produite par le rideau est proportionnelle à la pression dynamique du jet à l'orifice de soufflage ;
- au point de fonctionnement, les transferts résiduels décroissent avec la vitesse initiale du jet. Il est donc préférable d'utiliser un jet épais soufflant à faible vitesse plutôt qu'un jet mince présentant une plus forte vitesse de soufflage ;
- l'intensité de la turbulence du jet à l'orifice de soufflage n'a que peu d'influence sur les performances globales du rideau ;
- les transferts résiduels se produisent essentiellement dans la zone d'impact du jet.

L'adjonction d'un système de purification in situ, lié aux rideaux d'air et aux renouvellements d'ambiance, peut être intéressante [5]. En se reportant à la figure 1, p. 128, présentant les différentes techniques de traitement d'air, il est possible de choisir le procédé à mettre en œuvre. Les critères de choix doivent

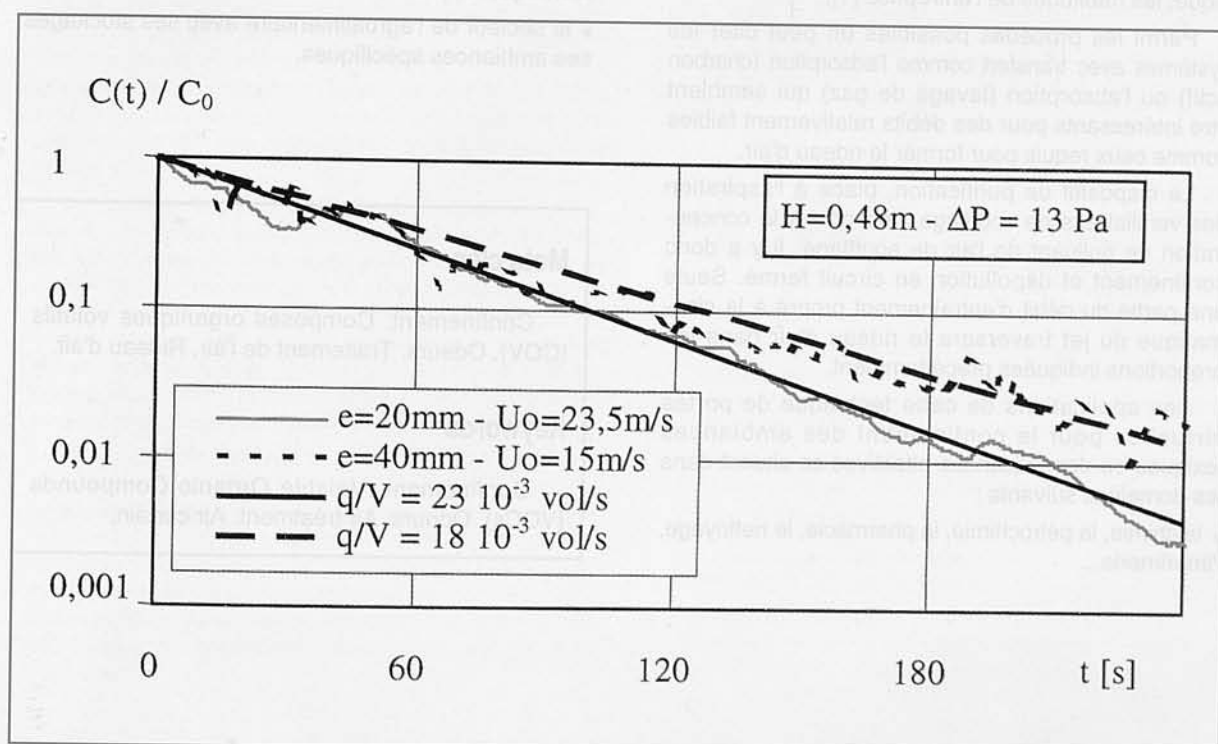


Figure 10.

Décroissance de la concentration au cours du temps pour deux rideaux d'épaisseurs différentes à nombre d'Euler constant.

Concentration time decay for two different jet thicknesses ($Eu = Cst$).

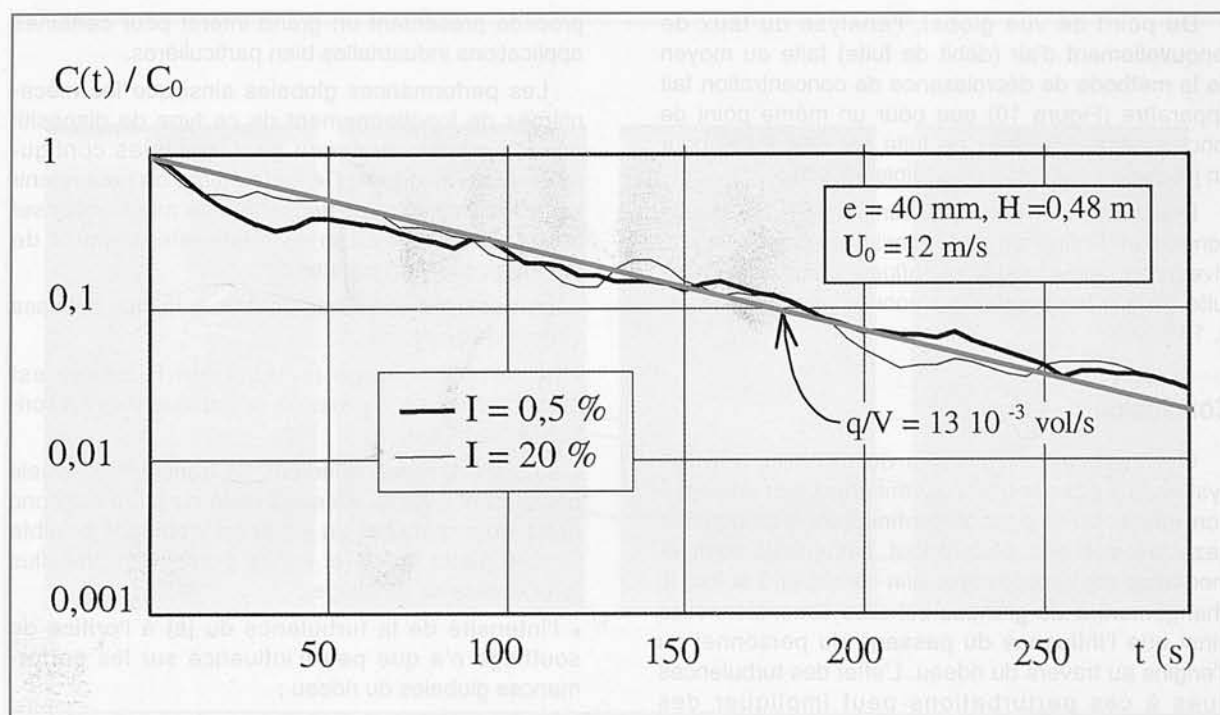


Figure 11.

Influence de l'intensité de turbulence sur les transferts de masse résiduels à nombre d'Euler constant.

Turbulence intensity effects on residual mass transfers at a given Euler number.

prendre en compte des critères objectifs (quantité, concentration, débit) et des critères plus subjectifs telles la place disponible, la sophistication de la technique, les habitudes de l'entreprise [1].

Parmi les procédés possibles on peut citer les systèmes avec transfert comme l'adsorption (charbon actif) ou l'absorption (lavage de gaz) qui semblent être intéressants pour des débits relativement faibles comme ceux requis pour former le rideau d'air.

Le dispositif de purification, placé à l'aspiration des ventilateurs de soufflage, fera chuter la concentration de polluant de l'air de soufflage. Il y a donc confinement et dépollution en circuit fermé. Seule une partie du débit d'entraînement propre à la cinématique du jet traversera le rideau d'air dans les proportions indiquées précédemment.

Les applications de cette technique de portes virtuelles pour le confinement des ambiances toxiques ou des nuisances olfactives se situent dans les domaines suivants :

- la chimie, la pétrochimie, la pharmacie, le nettoyage, l'imprimerie...

- l'industrie du déchet (stockage, équarrissage, stations d'épuration d'eau, traitement des boues, traitements des ordures ménagères, centres d'enfouissement technique...);

- le secteur de l'agroalimentaire avec ses stockages, ses ambiances spécifiques.

Mots clés

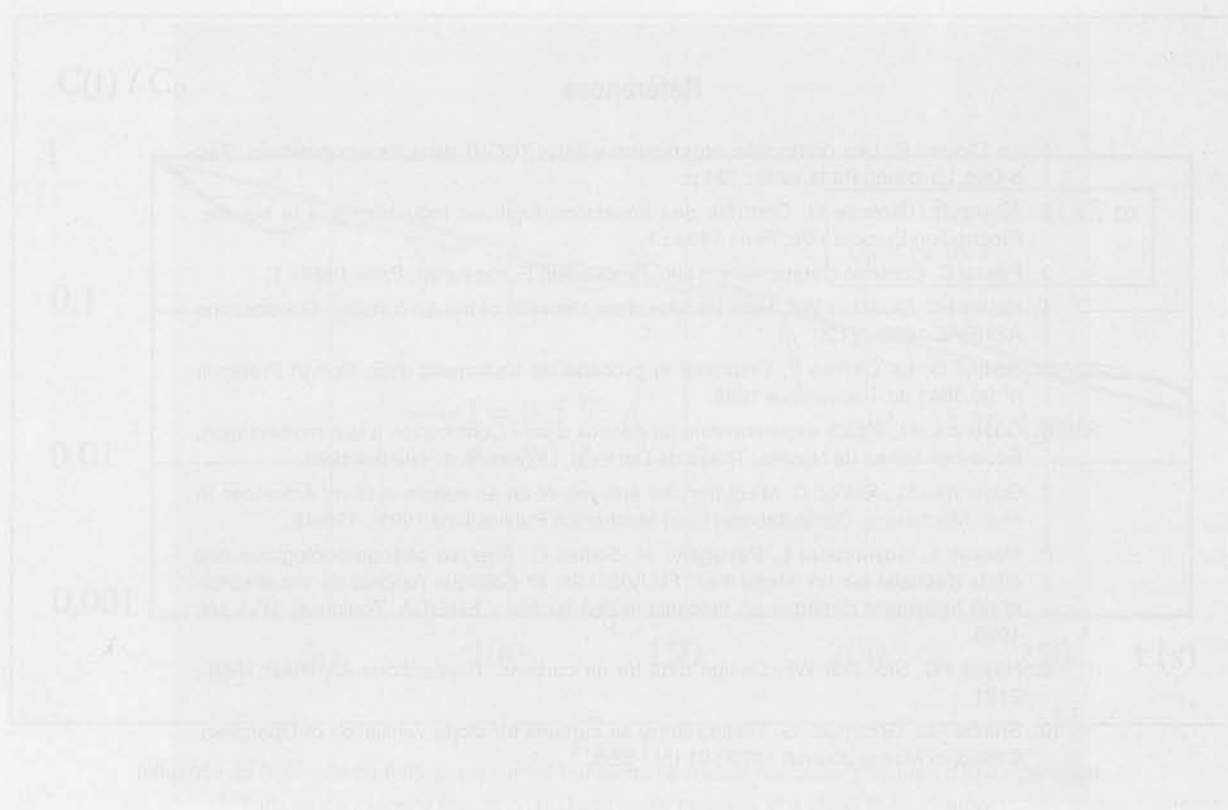
Confinement. Composés organiques volatils (COV). Odeurs. Traitement de l'air. Rideau d'air.

Keywords

Confinement. Volatile Organic Compounds (VOCs). Odours. Air treatment. Air curtain.

Références

1. Le Cloirec P. Les composés organiques volatils (COV) dans l'environnement. Tec & Doc, Lavoisier, Paris 1998 : 734 p.
2. Allard JL, Jérémie G. Contrôle des émissions fugitives industrielles à la source. Proceeding Eurodeur'99, Paris 1999 ; 1.
3. Pierrot C. Contrôle d'étanchéité in situ, Proceeding Eurodeur'99, Paris 1999 ; 1.
4. Hayes FC, Stoecker WF. Heat transfer characteristics of the air curtains. Transactions ASHRAE 1969 ; 2120.
5. Sollic C, Le Cloirec P. Dispositif et procédé de traitement d'air, Brevet Français n° 98.3843 du 4 novembre 1998.
6. Guyonnaud L. Étude expérimentale de rideaux d'air – Contribution à leur modélisation, École des Mines de Nantes, Thèse de Doctorat, Université de Nantes 1998.
7. Guyonnaud L, Sollic C. Mass transfer analysis of an air curtain system. Advances In Fluid Mechanics. Computational Fluid Mechanics Publications 1998 : 139-48.
8. Maurel S, Guyonnaud L, Pavageau M, Sollic C. Analyse phénoménologique des effets d'échelle sur un rideau d'air. FLUVISU 99, 8^e Colloque national de visualisation et de traitement d'images en mécanique des fluides – ENSICA, Toulouse, 1^{er}-4 juin 1999.
9. Hayes FC, Stoecker WF. Design data for air curtains. Transactions ASHRAE 1969 ; 2121.
10. Sheick AM, Grasmuck G. Testing Berry air curtains for stope ventilation of Opemiska. Canadian Mining Journal 1970 ; 91 (5) : 52-5.



prendre en compte des effets tels que la dégradation chimique des polluants, les phénomènes de diffusion, la présence de sites adsorbants, etc. (1).

Parmi les procédés possibles, on peut citer les adsorbants, les membranes, les procédés de séparation, etc. (2). Les adsorbants sont les plus utilisés, car ils sont simples à mettre en œuvre et permettent de traiter de grandes quantités de pollution.

La colonne de purification, placée à l'entrée des ventilateurs de soufflage, sert à éliminer la pollution de l'air de l'habitat. Elle est constituée d'un matériau adsorbant, tel que le charbon actif, la zeolite, la silice, etc. (3). La pollution est adsorbée par le matériau, ce qui permet de purifier l'air.

Les adsorbants sont des matériaux qui ont la capacité d'adsorber des polluants. Ils sont utilisés pour purifier l'air, l'eau, les gaz, etc. (4). Les adsorbants sont classés en deux catégories : les adsorbants physiques et les adsorbants chimiques.

La pollution de l'air est un problème de santé publique. Elle est causée par les émissions de polluants par les véhicules, les industries, les centrales électriques, etc. (5).

Les polluants de l'air sont des substances chimiques ou physiques qui sont présentes dans l'air. Ils peuvent être nocifs pour la santé humaine et l'environnement. Les polluants de l'air sont classés en deux catégories : les polluants primaires et les polluants secondaires.

Les polluants primaires sont des substances qui sont émises directement dans l'air. Les polluants secondaires sont des substances qui sont formées à partir de polluants primaires.

Mots clés

Confinement, Composés organiques volatils (COV), Qualité, Traitement de l'air, Risque d'air.

Keywords

Confinement, Volatile Organic Compounds (VOCs), Quality, Air treatment, Air risk.