

5

La ventilation

par L. Lazure¹

Les solvants sont utilisés dans de nombreux secteurs d'activité. Les risques qu'ils représentent sur le plan de la toxicité et de l'inflammabilité doivent être maîtrisés pour préserver la santé et la sécurité des travailleurs, l'intégrité des bâtiments et protéger l'environnement et la santé du public. En milieu industriel, une ventilation mécanique est essentielle pour assurer l'assainissement des zones de travail. Celle-ci a trois fonctions principales :

- assurer la sécurité en limitant les risques d'inflammation et d'explosion des vapeurs, des gaz et des poussières présentes;
- contrôler les risques d'intoxication en réduisant les concentrations ambiantes de polluants;
- assurer des conditions thermiques et hygrométriques acceptables (ce dernier aspect n'étant pas spécifiquement traité dans ce chapitre).

Le système de ventilation dans les ateliers ou les enceintes où existe une évaporation de solvants inflammables (p. ex. postes d'application de peinture, aires de séchage ou de nettoyage, fours) a pour fonction d'introduire, pendant toute la durée d'émissions de vapeurs, un débit d'air suffisant afin d'y maintenir une concentration à la limite inférieure d'inflammabilité (LII). Le débit d'air doit maintenir la concentration ambiante de vapeurs à une valeur inférieure à 25 % voire même 10 % de la LII. À titre d'exemple, la LII de l'acétone est de 2,67 % soit 26 700 ppm. La distribution de l'air dans l'espace doit prévenir toute accumulation localisée de gaz ou de vapeurs, notamment au voisinage des pompes, des réservoirs ouverts, des aires d'entreposage et autres surfaces ouvertes à l'air. La ventilation est aussi un excellent moyen de prévention et de contrôle des risques d'intoxication aux vapeurs de solvants. Le niveau de contrôle souhaité est plus important que dans la protection incendie-explosion, les valeurs limites d'exposition étant généralement bien inférieures aux LII (p. ex. 750 ppm comme valeur limite sur 15 minutes pour l'acétone contre environ 2 700 ppm pour 10 % de sa LII). La ventilation pour raison sanitaire ne protège cependant pas systématiquement du danger d'incendie-explosion, notamment en cas de pics élevés de courte durée ou dans les zones du procédé proches des sources mais hors de la zone respiratoire des travailleurs. Nous ne traitons pas ici spécifiquement de

1. L'auteur adresse ses plus sincères remerciements à Luc Ménard du CSST et Jean-Michel Dessagne de l'INRS pour leur précieuse collaboration.

la ventilation pour raisons de sécurité, l'ensemble des mesures de prévention contre le risque incendie-explosion étant abordé au chapitre 8. Le lecteur trouvera dans la bibliographie [1-8] des informations permettant notamment de calculer le débit d'air de dilution nécessaire pour assurer une atmosphère sécurisée dans les applications industrielles utilisant des solvants inflammables ou combustibles.

D'une usine à l'autre, les systèmes de ventilation à mettre en œuvre sont différents et varient en fonction des procédés et des risques présents. La ventilation par captage à la source est le système le plus utilisé avec, en complément, une ventilation générale permettant d'éliminer les polluants résiduels, de contrôler les émissions provenant de sources fugitives et de renouveler de façon minimale l'air des locaux. Nous abordons ici la ventilation dans sa dimension générale, que celle-ci traite des produits sous forme gazeuse ou sous forme condensée. Rappelons que les solvants peuvent se présenter sous forme de vapeurs ou de brouillards.

L'installation d'un dispositif de ventilation est un investissement important. D'autres mesures de contrôle peuvent s'avérer moins onéreuses ou complémentaires dans l'élimination ou la diminution de l'exposition aux polluants (*cf. chapitres 3, 4 et 6*) ou la suppression du danger d'incendie (*cf. chapitre 8*).

■ Évaluation et aménagement du poste de travail

Pour qu'un système de ventilation soit efficace, une analyse préalable du poste de travail est nécessaire. La conception d'un dispositif de captage efficace doit tenir compte du processus polluant et des valeurs limites d'exposition réglementaires ou recommandées par les organismes de normalisation. Ces valeurs ne pouvant assurer avec certitude l'absence de risque, il est préférable d'utiliser une valeur cible inférieure à la valeur limite d'exposition [9-11]. La valeur cible d'exposition en milieu industriel est souvent fixée à 30 % de la valeur d'exposition admissible.

Plusieurs paramètres ont une influence sur l'exposition du travailleur et doivent être pris en compte lors de la conception d'une installation de ventilation :

- la nature et les caractéristiques physico-chimiques de la source polluante;
- les conditions d'émission;
- l'interaction du travailleur avec la source et le milieu de travail.

Les polluants rencontrés en milieu industriel sont pour la plupart générés par des procédés mécaniques (forage, perçage, ponçage, concassage, etc.) ou chimiques (évaporation naturelle, atomisation, pulvérisation) et se trouvent à l'état solide, gazeux ou de vapeur. Dans le cas particulier des solvants, leur présence dans l'air peut se faire sous forme de vapeur ou d'aérosol liquide. Les vapeurs sont généralement émises par des procédés mettant en cause des réactions de polymérisation, de désolvation et de distillation alors que les procédés de pulvérisation et d'atomisation libèrent des vapeurs et des aérosols liquides. La quantité de vapeurs émises par un liquide volatil est fonction des propriétés thermodynamiques et physiques de l'air et du produit [6]. Plus un solvant a une valeur de tension de vapeur élevée, plus il aura tendance à s'évaporer. Par ailleurs, le débit d'évaporation d'un solvant liquide peut être accentué par l'augmentation de sa température. Cette situation se rencontre notamment lors d'une réaction de polymérisation de nature exothermique comme celle observée lors de la mise en œuvre des polyesters stratifiés ou lors de l'apport d'une source thermique exogène utilisée pour accélérer le séchage ou la cuisson de produits liquides (peinture, vernis).

La concentration de polluant dans la zone de travail est influencée par les conditions d'émission du polluant et par les conditions environnementales observées au poste de travail. La direction et la vitesse d'émission du polluant, la configuration et la proximité du dispositif de captage ainsi que les conditions aérodynamiques autour de l'opérateur peuvent avoir une influence déterminante sur l'efficacité de la ventilation [12-15]. Ainsi, si le travailleur obstrue l'écoulement d'air vers

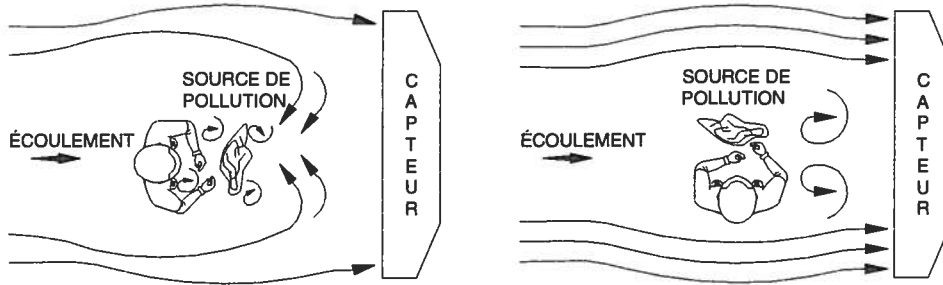


Figure 5.1 - Profil d'écoulement de l'air dans le voisinage de l'opérateur.

le capteur (figure 5.1), un régime aéralucque turbulent peut se produire en aval qui réduit la dispersion des polluants hors de la zone d'émission. L'ascension des polluants vers la zone respiratoire peut être également accentuée par l'effet de convection produit par la chaleur du corps et du procédé. Le positionnement du travailleur parallèlement à l'axe d'écoulement de l'air est généralement recommandé de façon à atténuer la perturbation de l'écoulement vers le capteur et à obtenir une concentration plus basse de polluants en zone respiratoire. Toutefois, la vitesse d'écoulement de l'air et la nature de la source émettrice ont également une influence sur les caractéristiques physiques et la dispersion des polluants. La figure 5.2 montre le brouillard formé par le rebondissement des particules n'ayant pas adhéré à la surface lors de l'application de peinture; celles-ci sont alors entraînées dans la zone respiratoire de l'opérateur par le flux d'air se dirigeant vers le capteur.

L'aménagement d'un poste de travail doit permettre d'optimiser la production et de réduire au maximum l'exposition de l'opérateur aux émanations de produits chimiques. Le poste de travail doit aussi être aménagé pour empêcher la dispersion des polluants dans toute l'usine, la séparation et l'isolement des postes de travail permettant généralement de confiner les émissions dans la zone toute proche, ce qui en facilite l'élimination. Le système de ventilation doit tenir compte des mouvements exécutés par le travailleur et ne pas nuire à sa visibilité ou perturber sa concentration [6, 9].

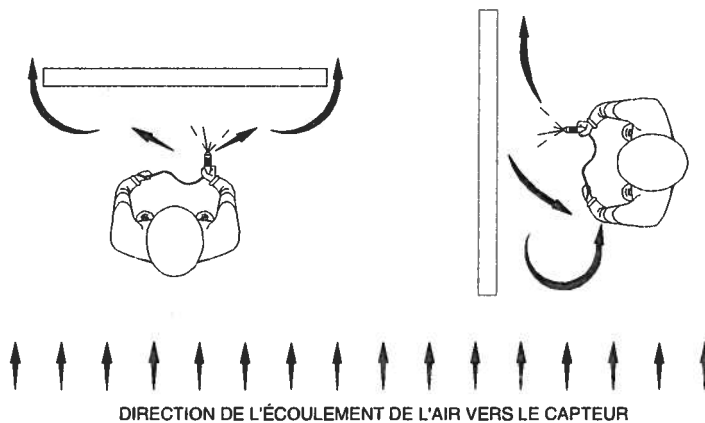


Figure 5.2 - Contamination de la zone respiratoire lors de pulvérisation de peinture.

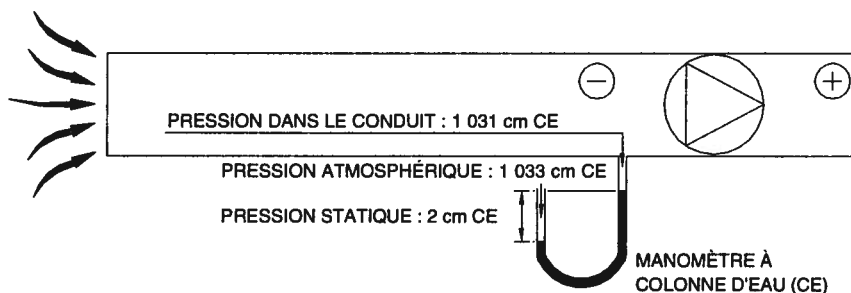
■ Principes d'écoulement de l'air

L'air se déplace dans une canalisation grâce à la différence de pression créée par le ventilateur entre l'extérieur et l'intérieur de la canalisation. La mise en dépression de l'intérieur de la canalisation entraîne, sous l'effet de la pression atmosphérique, l'introduction d'air dans l'orifice (figure 5.3). La pression ainsi créée par le ventilateur s'exerce également dans toutes les directions et est appelée pression statique. Sa mesure s'effectue à l'aide d'un manomètre dont l'un des orifices est placé en affleurement sur la paroi intérieure. L'autre extrémité est ouverte et soumise à la pression exercée par l'atmosphère. La hauteur de liquide observée sur le manomètre représente l'énergie potentielle disponible et nécessaire pour accélérer l'air jusqu'à la vitesse d'écoulement désirée et vaincre la résistance à l'écoulement des composants situés en amont du point de lecture. La pression statique prend une valeur négative en amont du ventilateur et positive en aval.

La mise en circulation d'un fluide implique un transfert d'énergie potentielle en énergie cinétique. L'énergie cinétique transférée à l'air par le système de ventilation est déterminée en mesurant la pression dynamique du fluide en mouvement. Cette pression peut être convertie en vitesse à l'aide d'une équation mathématique découlant de l'application de la loi de Bernoulli [16]. La pression mesurée en un point de l'air s'écoulant dans un conduit est appelée pression totale et correspond à la somme algébrique des pressions statique et dynamique (figure 5.4). L'air circulant dans le réseau de ventilation subit en cours de route une perte d'énergie occasionnée par la résistance à l'écoulement offerte par les différents éléments du système. La chute de pression totale qui en résulte est appelée perte de charge et représente l'énergie dégagée sous forme de chaleur, de bruit et de vibrations sous l'effet des frottements dus à la viscosité de l'air, des turbulences causées par les divers éléments (embranchements, coudes, raccordements) et des restrictions dues aux équipements (filtre, volet, cheminée).

Le débit volumique de l'air circulant dans une canalisation est déterminé en multipliant la vitesse d'écoulement moyenne (V_m en m/s) du fluide par la surface transversale de la canalisation en m^2 et s'exprime généralement en m^3/h .

La sélection du ventilateur se fait en fonction du débit volumique d'aspiration total d'air requis pour le fonctionnement de l'ensemble des capteurs et du total des pertes de charges générées par les composants.



DÉPRESSION CAUSÉE DANS LE CONDUIT D'ÉVACUATION PAR LA VENTILATION

Figure 5.3 - Mise en dépression et écoulement de l'air dans un conduit de ventilation.

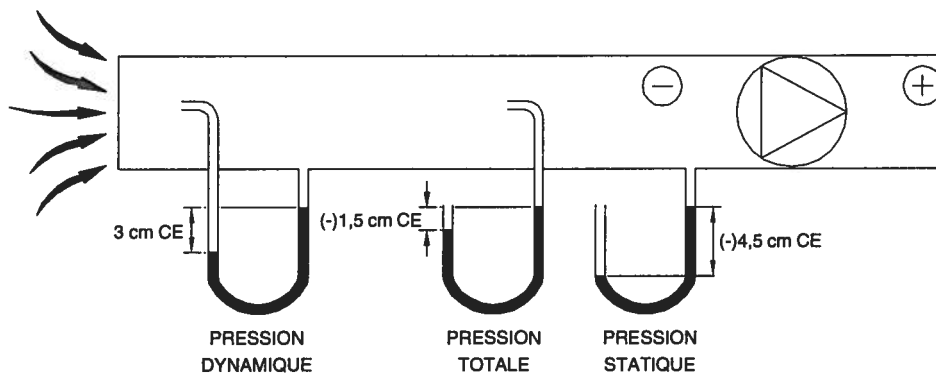


Figure 5.4 - Mesures des pressions totale, statique et dynamique dans une canalisation en dépression.

■ Concepts de ventilation

Dans l'industrie, deux techniques de ventilation sont principalement utilisées pour assainir le milieu de travail; la ventilation locale par captage à la source et la ventilation générale de dilution [6, 17-20]. La ventilation locale (figure 5.5) consiste à placer un capteur près de la source polluante pour empêcher le polluant d'atteindre la zone respiratoire du travailleur et en limiter la dispersion dans l'espace de travail. La ventilation locale par captage à la source est recommandée pour la majorité des applications industrielles, particulièrement pour celles mettant en cause des polluants ayant une valeur limite d'exposition basse ou lorsque les conditions aérauliques offrent un faible potentiel de dilution à proximité du travailleur.

La ventilation locale présente certains avantages [6, 9, 17, 19-21] :

- limitation du nombre de travailleurs exposés aux polluants;
- potentiel élevé d'atteinte des objectifs d'assainissement;
- débit d'air de compensation plus faible et coût de traitement de l'air d'appoint plus bas;
- performance élevée des systèmes d'épuration en raison de la présence d'effluents à plus forte concentration.

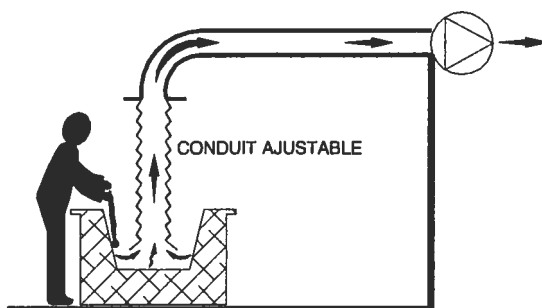


Figure 5.5 - Ventilation locale par captage à la source.

Mais elle comporte aussi certains inconvénients :

- des coûts de conception et d'installation plus élevés comparativement à ceux d'un système de ventilation générale de dilution;
- des lieux de travail plus encombrés par les dispositifs de captage et les canalisations;
- une probabilité plus élevée de déséquilibre des paramètres aérauliques;
- des possibilités réduites de réaménagement des installations de production [22].

La technique de ventilation générale de dilution (figures 5.6 et 5.7) consiste à introduire et à extraire l'air d'un local afin de maintenir la concentration du polluant sous la valeur cible d'exposition. Cette technique permet de contrôler de façon satisfaisante les polluants de faible toxicité ou présents en faibles concentrations [1, 6]. Elle permet aussi, en ambiance chaude, d'éviter d'exposer les travailleurs à la contrainte thermique. Bien que la ventilation locale par captage à la source doive être privilégiée, il peut être justifié, notamment en présence de sources diffuses de polluants, de recourir à la ventilation de dilution. Les critères qui suivent permettent de déterminer si cette technique d'assainissement peut assurer le contrôle des polluants :

- la toxicité des polluants est faible;
- la quantité de polluants émis peut être contrôlée par un débit d'air raisonnable;
- la distance entre la source émettrice et les travailleurs est telle que ces derniers ne sont pas exposés à des concentrations dépassant les normes permises;
- le débit d'émission des polluants est relativement uniforme.

Certaines règles doivent toutefois guider la conception de ce type de système pour en assurer l'efficacité :

- les bouches d'évacuation sont localisées le plus près possible de la source polluante;
- les bouches de soufflage d'air neuf sont réparties de façon à prévenir la formation de poches stagnantes d'air vicié (figure 5.7);
- les bouches de soufflage et d'aspiration sont placées de façon à ce que l'air s'écoule lentement des zones propres vers les zones polluées [9-11].

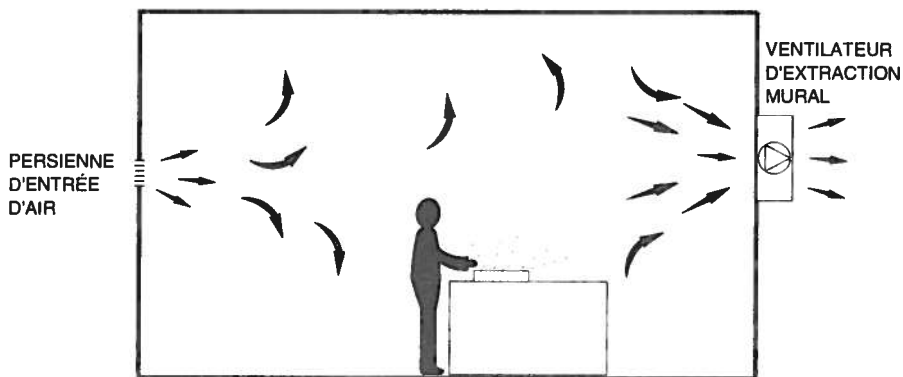


Figure 5.6 - Ventilation générale de dilution.

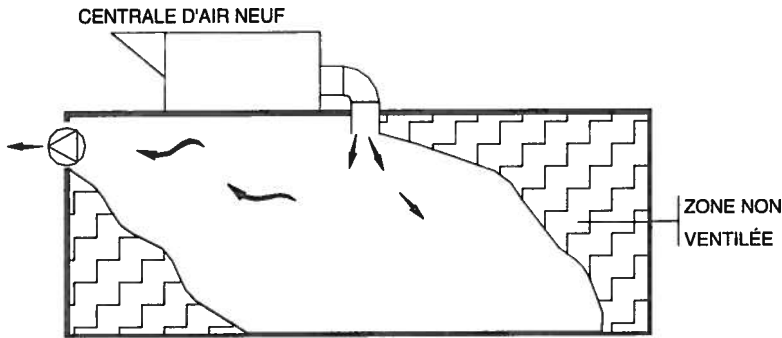


Figure 5.7 - Distribution non homogène de l'air de renouvellement.

Dans certaines situations de travail, on fera appel à une combinaison des techniques décrites précédemment [1, 10, 11, 23-28]. C'est le cas notamment de la ventilation par déplacement dont la technique se caractérise par un écoulement unidirectionnel horizontal ou vertical, de faible vitesse et peu turbulent. L'air est admis par un diffuseur à proximité de la source polluante, balaie lentement la surface de travail pour être ensuite évacué. Cette approche est particulièrement indiquée pour les procédés impliquant des pièces de grandes dimensions, par exemple lors de la fabrication de pièces en fibres de verre en plasturgie (figure 5.8). L'utilisation d'une table ventilée par aspiration combinée à un plafond soufflant (figure 5.9), par exemple lors du moulage de petites pièces en plasturgie, constitue un autre exemple de cette technique.

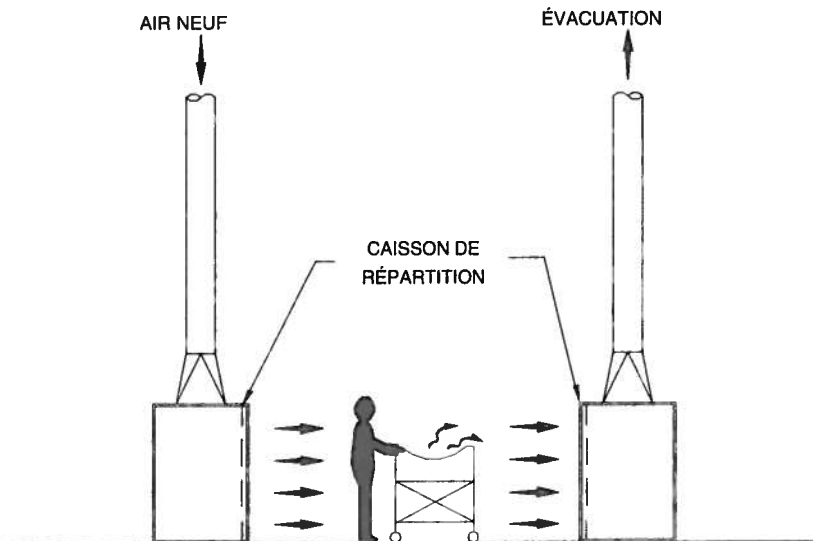


Figure 5.8 - Ventilation par déplacement.

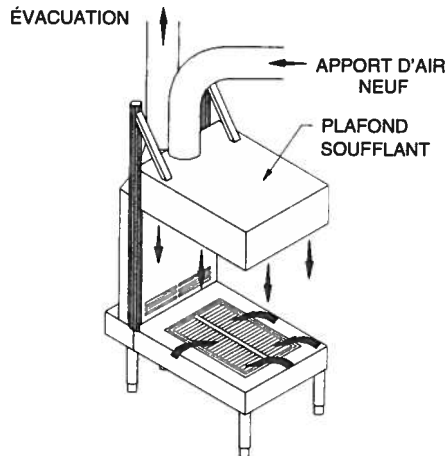


Figure 5.9 - Table aspirante avec plafond soufflant.

■ Principes de captage

La conception d'un système de ventilation doit tenir compte des caractéristiques de diffusion et de la géométrie de la source [29, 30]. Trois types de sources existent : les sources d'émissions flottantes provenant d'un procédé avec dégagement thermique, les sources d'émissions diffusées caractérisant les projections omnidirectionnelles et les sources dynamiques qui impriment une trajectoire aux polluants. La performance du dispositif de ventilation dépend de la mise en application des principes de captage suivants [1, 9, 10, 17] :

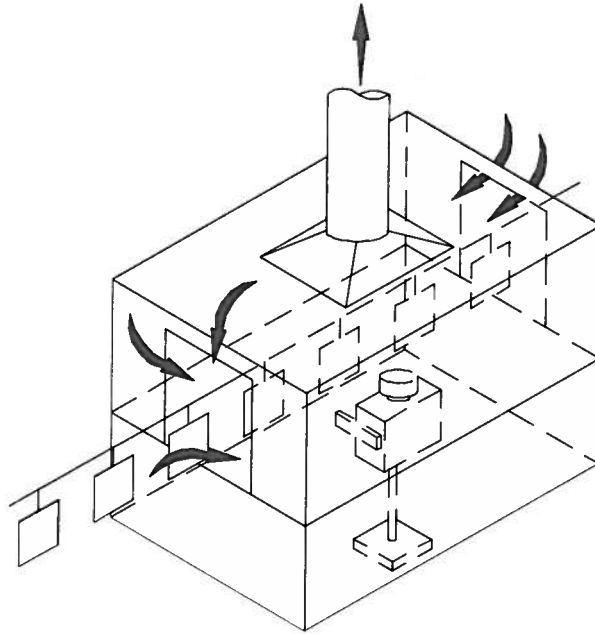
- la source d'émission est enveloppée au maximum à l'aide d'une enceinte, d'une cabine ou de rideaux de façon à réduire la surface d'échappement et induire ainsi une vitesse d'écoulement suffisamment élevée pour empêcher la fuite des polluants (figure 5.10);
- le capteur est installé à proximité de la source d'émission car le débit d'aspiration nécessaire pour générer la vitesse de captage augmente avec le carré de la distance entre le capteur et la source (figure 5.11);
- le capteur est placé de façon à protéger la zone respiratoire de l'opérateur; celui-ci ne doit pas être placé entre la source d'émission et le capteur; l'air propre doit se déplacer dans le sens de l'opérateur vers la source polluante (figure 5.12);
- le capteur est placé en tenant compte des mouvements naturels des polluants : direction de la source émettrice ou force ascensionnelle des gaz chauds;
- les vitesses de captage mises en jeu sont réparties uniformément dans toute la zone de captage de manière à limiter la fuite de polluant et sont suffisamment élevées pour s'opposer aux courants d'air perturbateurs.

■ Identification et rôle des composants

La figure 5.13 montre les principaux composants d'une installation de ventilation rencontrés dans un atelier industriel.

Les composants d'une installation de ventilation locale sont les suivants :

- le capteur;
- les canalisations;



DISPOSITIF DE CAPTAGE ENVELOPPANT

Figure 5.10 - Enceinte de confinement pour l'application de peinture.

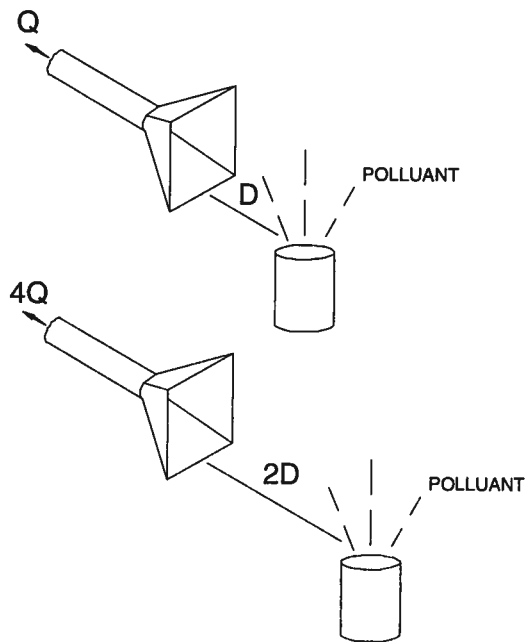


Figure 5.11 - Impact de la distance (D) sur le débit (Q) d'aspiration nécessaire pour maintenir la même efficacité de ventilation.

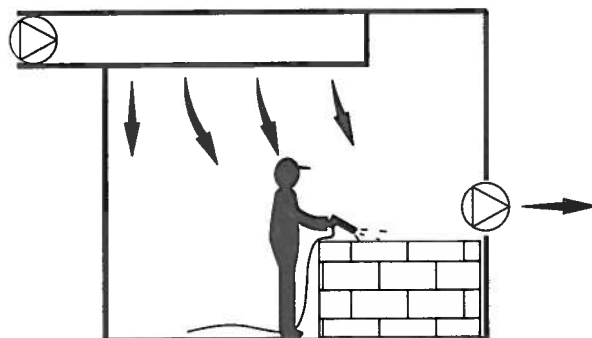


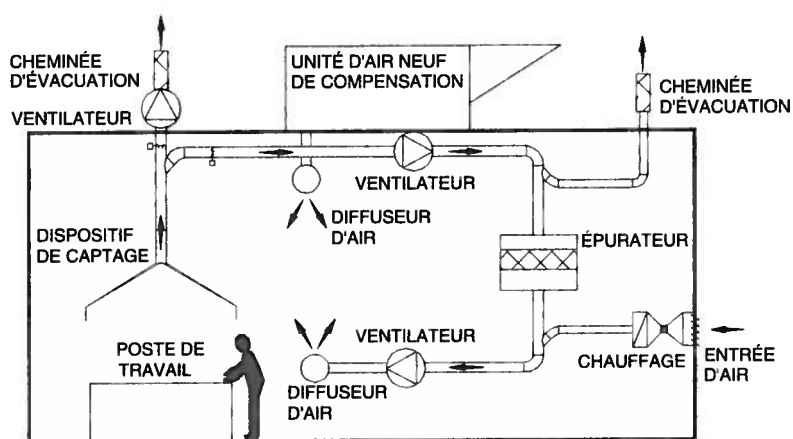
Figure 5.12 - Introduction de l'air de renouvellement.

- le ventilateur;
- l'épurateur;
- la cheminée d'évacuation.

Les caractéristiques de chaque élément doivent être connues afin d'assurer la qualité de l'installation.

● Capteurs

C'est à proximité du capteur que l'air pollué est accéléré, depuis une vitesse presque nulle pour la majorité des situations industrielles, jusqu'à la vitesse d'écoulement requise à l'intérieur des canalisations. La plupart des ouvrages traitant de ventilation industrielle classent les dispositifs de captage en fonction des caractéristiques physiques du capteur [1, 6, 9, 17, 19]. On distingue ainsi trois types de dispositifs de captage : enveloppant, inducteur et récepteur. Le capteur de type enveloppant entoure totalement ou partiellement la source d'émission. Ce type de capteur est indiqué par exemple pour évacuer les émanations des presses flexographiques à séchage par apport



COMPOSANTS D'UN SYSTÈME D'ASPIRATION ET D'APPORT D'AIR NEUF DE COMPENSATION

Figure 5.13 - Principaux éléments d'une installation de ventilation industrielle.

d'air chaud utilisant des encres contenant des solvants très volatils. Dans ce cas, le débit d'évacuation est généralement calculé en fonction du volume d'encre utilisé [31].

Ce type de capteurs comprend également des enceintes fermées, des cabines ouvertes et des cabines fermées qui offrent un degré élevé de confinement. Leur utilisation doit donc être encouragée. L'efficacité de confinement de ces capteurs dépend de la dépression créée à l'intérieur de l'enceinte. La dépression doit être suffisamment élevée pour induire un écoulement d'air de l'extérieur de l'enceinte vers l'intérieur. La vitesse de l'air passant dans les ouvertures doit être de l'ordre de 0,5 m/s à 1 m/s pour empêcher les polluants de s'échapper.

Dans le cas des cabines ouvertes (figure 5.14), utilisées notamment pour la peinture par pulvérisation et la projection d'enduit gélifié (fabrication d'objet en polyester stratifié), l'opérateur est placé en amont de la source d'émission. L'écoulement de l'air doit être aussi uniforme que possible, surtout à proximité de l'opérateur où il existe plus de turbulences.

Les cabines fermées, régulièrement utilisées pour l'application de peinture par pulvérisation, assurent, comparativement aux cabines ouvertes, un meilleur confinement. L'utilisation de ce type de cabine est particulièrement appropriée pour les activités industrielles utilisant des produits chimiques à toxicité élevée et quand la réglementation prévoit une diminution maximale des concentrations ambiantes. La configuration de la cabine ainsi que les dispositifs d'introduction et d'extraction de l'air doivent favoriser un écoulement d'air uniforme (figure 5.15).

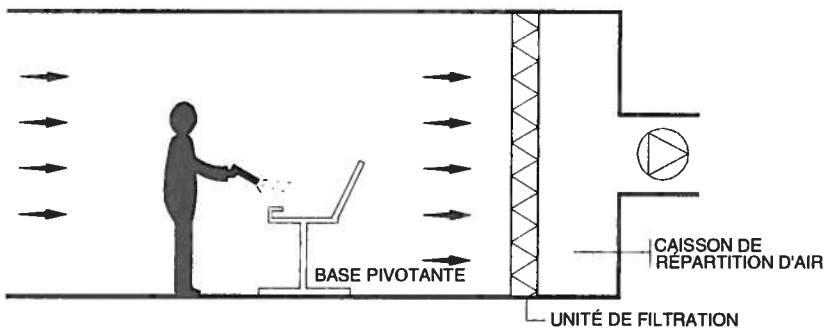


Figure 5.14 – Cabine ouverte de pulvérisation à écoulement horizontal.

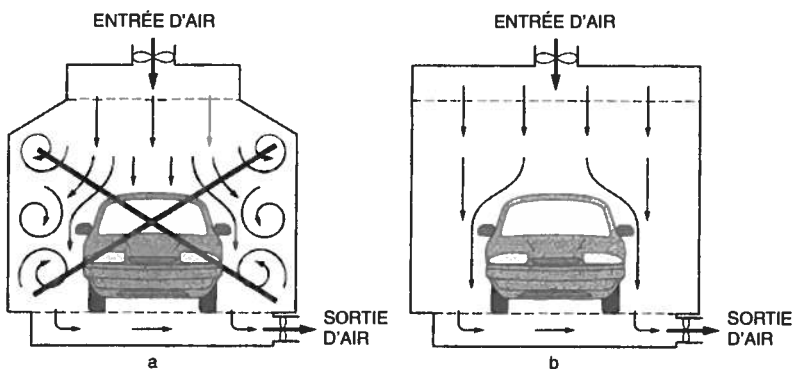


Figure 5.15 - Homogénéité de l'écoulement d'air à l'intérieur d'une cabine de pulvérisation (reproduit avec l'autorisation de l'INRS).

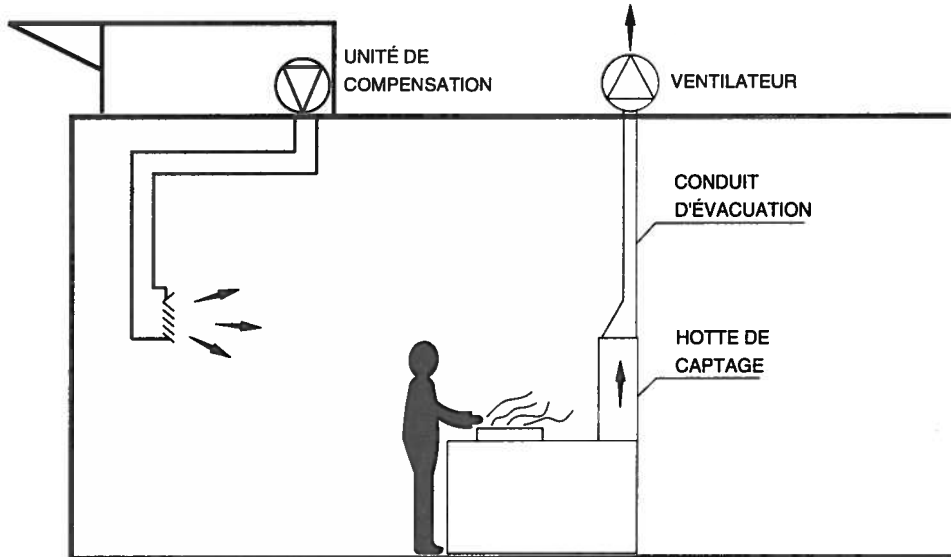


Figure 5.16 - Dispositif de captage inducteur.

Dans les dispositifs de type inducteur (figure 5.16), le capteur est conçu de telle façon qu'il imprime à l'air une vitesse d'aspiration suffisamment élevée afin d'empêcher que les polluants n'atteignent la zone respiratoire du travailleur. L'amplitude de cette vitesse, appelée vitesse de captage (V_c), est fonction du polluant et de ses caractéristiques d'émission (vitesse d'émission, présence de courants d'air perturbateurs, mouvements de l'opérateur).

Plusieurs études ont mis en évidence que le champ de vitesses n'est pas uniforme autour du capteur mais qu'il varie en fonction de la géométrie du capteur et du débit d'aspiration [1, 29-30, 32-38]. La présence de turbulences aux extrémités du capteur diminue l'efficacité du captage. L'ajout d'une collerette ou d'un autre type de parois peut diminuer la baisse d'efficacité liée aux turbulences. La figure 5.17 montre qu'en s'éloignant du capteur, la vitesse de l'air décroît rapidement. Ainsi, dans le cas d'un conduit circulaire, à une distance égale à une fois le diamètre de l'orifice du capteur, la vitesse résiduelle disponible pour entraîner les polluants est approximativement égale à 10 % de la valeur mesurée dans l'orifice. Le capteur doit donc être le plus près possible de la source d'émission pour que le captage des polluants soit le plus efficace. En pratique, ce type de dispositif est recommandé quand la distance entre la source et le capteur ne dépasse pas 60 cm ou 1,5 fois le diamètre de l'ouverture [22]. Le débit d'aspiration est estimé à partir de relations empiriques, développées pour différentes configurations de bouches d'aspiration, qui lient la surface de captage, la distance entre le capteur et le point de capture et la vitesse d'air à induire par le dispositif [1, 9, 39]. La figure 5.18 (bouche isolée sans obstacle proche) montre que pour obtenir une vitesse de captage (V_c) de l'ordre de 0,5 m/s, le débit d'aspiration (Q) d'un capteur dont l'aire (A) d'ouverture est de 0,2 m² et placé à une distance (X) de 0,5 m de la source d'émission devra être de 1,35 m³/s. Les dispositifs de captage inducteurs sont très sensibles aux courants d'air engendrés par la circulation des travailleurs, par des pièces en mouvement et par l'ouverture des portes et des fenêtres. L'utilisation d'écran de part et d'autre du capteur permet de réduire l'effet des courants d'air (figure 5.19). Un courant d'air de 0,3 m/s peut être suffisant pour réduire de 50 % l'efficacité du capteur [7, 17, 40, 41].

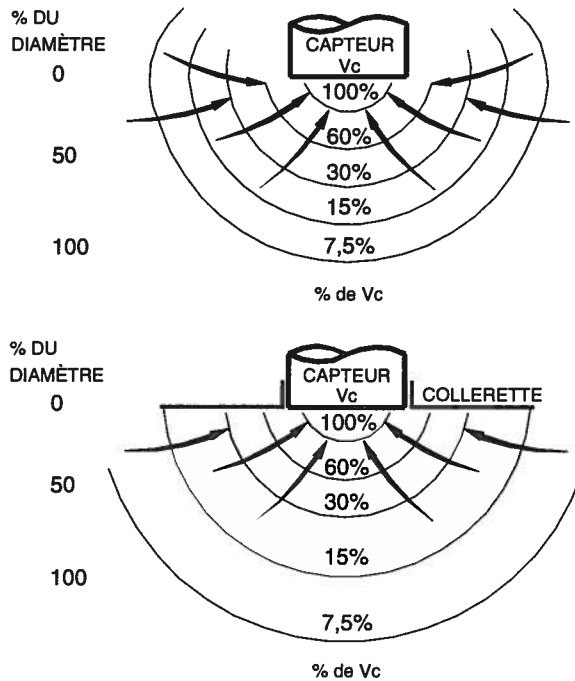


Figure 5.17 - Influence de la géométrie du capteur sur la vitesse de captage.

Lorsque la surface d'émission est importante, comme dans les bassins de dégraissage en phase vapeur, l'utilisation d'un dispositif de captage bilatéral est recommandée (figure 5.20) et le débit d'aspiration total doit être calculé en fonction de la superficie de la surface émettrice [1, 8]. Dans certains cas, l'apport d'un écoulement d'air secondaire peut être utilisé pour favoriser le captage des polluants, réduisant ainsi le débit d'aspiration requis (figure 5.21). La masse d'air transportée par le jet provient principalement de l'air induit par celui-ci, ce qui permet d'entraîner les polluants vers le capteur.

Les capteurs de type récepteur ne sont généralement utilisables que dans le cas où les polluants sont entraînés vers le capteur par le procédé de travail. Contrairement au dispositif inducteur, la performance du dispositif récepteur n'est pas liée à la vitesse de captage. Le principe de captage consiste à intercepter l'air pollué mis en mouvement au niveau du procédé par : convection, induction, la force centrifuge ou des jets d'air [7]. La nature des émissions du procédé à contrôler doit être prise en compte lors de la détermination du débit d'évacuation. Ainsi, un procédé avec dégagement thermique important requiert un débit de captage égal ou supérieur au débit de convection (figure 5.22). Si le débit est inférieur au débit d'émission, une partie des contaminants n'est pas captée et se disperse dans le milieu de travail. En présence d'un procédé froid, le débit d'aspiration est fonction de la vitesse de captage nécessaire pour empêcher la fuite des polluants hors de la zone située entre l'extrémité inférieure du capteur et la surface d'émission.

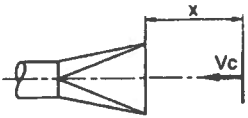
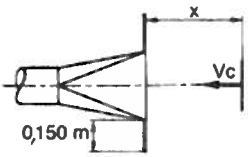
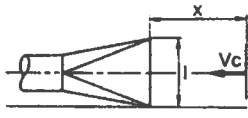
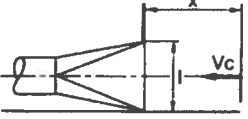

	<p>1. Bouche isolée sans obstacle proche : $Q = (10X^2 + A) V_c$</p>
	<p>2. Bouche isolée munie d'une collerette : $Q = 0,75 (10X^2 + A) V_c$</p>
	<p>3. Bouche reposant sur une surface plane : $Q = (5X^2 + A) V_c$</p>
	<p>4. Bouche avec collerette reposant sur une surface plane : $Q = 0,75 (5X^2 + A) V_c$</p>
	<p>5. Fente reposant sur une surface plane : $Q = 2,8 LXV_c$</p>

Figure 5.18 - Relation entre le débit d'aspiration et la vitesse de l'air devant un dispositif de captage inducteur (reproduit avec l'autorisation de l'INRS).

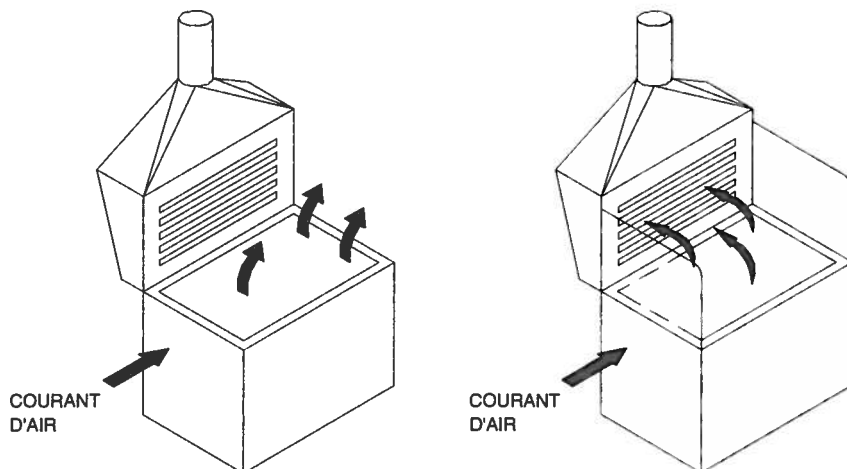


Figure 5.19 - Influence des courants d'air sur l'efficacité du captage.

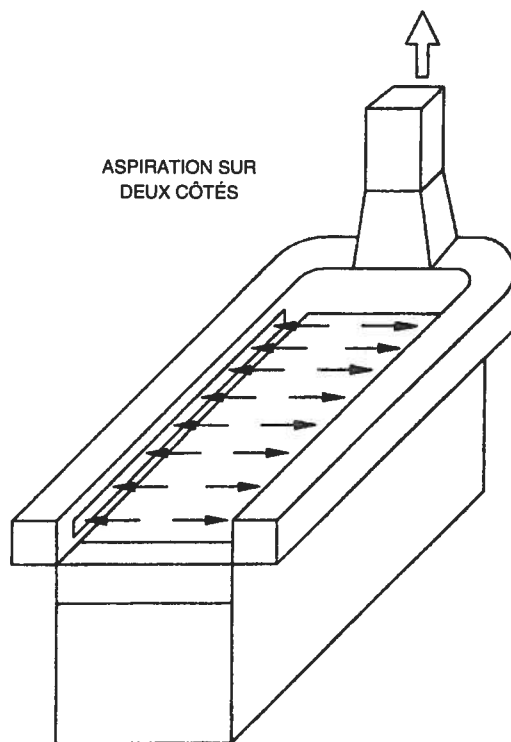


Figure 5.20 - Dispositif de captage bilatéral (reproduit avec l'autorisation de l'INRS).

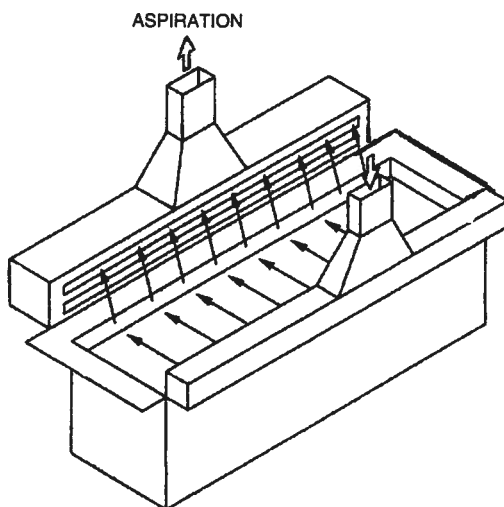


Figure 5.21 - Dispositif de captage par aspiration-soufflage (reproduit avec l'autorisation de l'INRS).

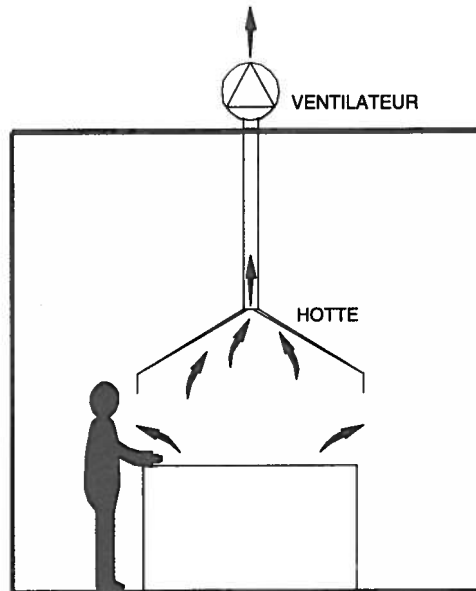


Figure 5.22 - Débordement causé par un débit d'aspiration insuffisant.

• Canalisations

Les canalisations permettent de répartir le débit d'aspiration requis au niveau de chacun des capteurs et assurent le transport des polluants vers l'extérieur. Elles doivent être conçues dans un matériau incombustible et résistant aux pressions d'opération et aux attaques chimiques des produits transportés. Les matériaux le plus souvent utilisés sont l'acier noir, l'acier galvanisé, l'acier inoxydable et le plastique renforcé. Le dimensionnement des canalisations doit être effectué de façon à ce que la vitesse d'écoulement empêche les polluants de se déposer sur les parois, de les obstruer et, dans certains cas, de créer des risques d'incendie. Pour les particules solides, la vitesse d'écoulement est fonction du potentiel de sédimentation des particules à l'intérieur des canalisations. Plus la masse volumique et la dimension des particules sont grandes, plus la vitesse d'écoulement doit être élevée. La vitesse d'écoulement optimale pour les gaz et les vapeurs est établie en fonction des coûts d'installation et de fonctionnement du système de ventilation; la vitesse optimale se situant généralement entre 10 et 15 m/s. À titre comparatif, pour les aérosols solides, les vitesses varient de 10 m/s pour les poussières très fines et légères à 23 m/s pour les poussières lourdes ou humides [1, 6, 9]. On doit éviter d'utiliser une vitesse trop élevée puisque la perte de charge associée au frottement dans la canalisation augmente proportionnellement au carré de la vitesse d'écoulement alors que la consommation énergétique s'accroît proportionnellement au cube de la vitesse. Ainsi, en doublant la vitesse, la perte de charge augmente de quatre fois sa valeur initiale et engendre une consommation énergétique huit fois supérieure [10]. Les canalisations de forme cylindrique permettent un écoulement plus uniforme, ce qui facilite le transport des particules. Elles présentent une résistance à l'écoulement plus faible et offrent également, pour une même épaisseur, une résistance structurale supérieure aux canalisations rectangulaires. Pour réduire la perte de charge créée par



Figure 5.23 - Géométrie des pièces de raccordement.

le réseau de canalisations, il est important d'optimiser leur longueur et d'utiliser des pièces de raccordement (figure 5.23) ne favorisant pas la formation de turbulences excessives, celles-ci ayant pour effet de réduire la vitesse d'écoulement.

• Ventilateurs

L'écoulement de l'air dans le réseau de canalisations est produit par le ventilateur. En créant une dépression dans la canalisation située en amont du ventilateur, la force exercée par la pression atmosphérique ambiante permet à l'air de s'introduire dans le capteur. Ainsi, le ventilateur permet d'accélérer l'air et de maintenir l'écoulement en combattant la résistance à l'écoulement générée par le réseau. Le moteur du ventilateur est alimenté par une source électrique ou pneumatique. Le ventilateur sera installé à l'extérieur ou le plus près de l'extérieur du bâtiment : la dépression aérodynamique qui existe dans les canalisations situées en aval du ventilateur permet d'éviter la fuite de polluants qui pourrait survenir en cas de percement ou d'autres dommages dans la canalisation. Utilisé en présence d'atmosphères explosives ou inflammables, le ventilateur doit être conçu dans un matériau présentant un faible potentiel de génération d'étincelles ou de surchauffe entre les pièces en mouvement [1-5, 8, 9]. Il existe deux catégories de ventilateurs : centrifuges (figure 5.24) et axiaux (figure 5.25). Dans les ventilateurs centrifuges, l'air est aspiré parallèlement à l'axe de rotation d'une roue à aubes tournant dans une volute et est rejeté à la périphérie par la force centrifuge suivant un plan perpendiculaire à l'axe de rotation [9]. Ces ventilateurs permettent de développer des pressions statiques élevées et sont mieux adaptés aux réseaux qui présentent des fortes pertes de charge causées notamment par les dispositifs de captage, les canalisations et les systèmes d'épuration. Les ventilateurs centrifuges sont classés en fonction de la forme et de l'inclinaison des pales de la roue. Les ventilateurs centrifuges à pales radiales assurent le transport de l'air vicié puisqu'ils offrent une grande résistance mécanique et sont moins sensibles à l'encrassement. Les unités d'admission en air neuf ou de compensation sont généralement équipées d'un ventilateur à pales courbées vers l'arrière.

Dans les ventilateurs axiaux, l'air s'écoule parallèlement à l'axe de rotation de la roue. La présence d'aubes directionnelles empêche les mouvements de giration de

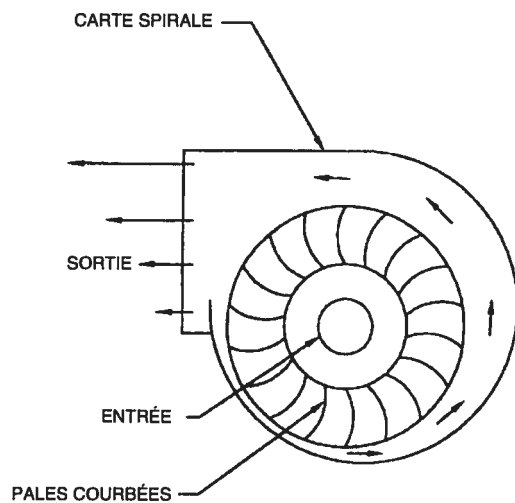


Figure 5.24 - Ventilateur de type centrifuge.

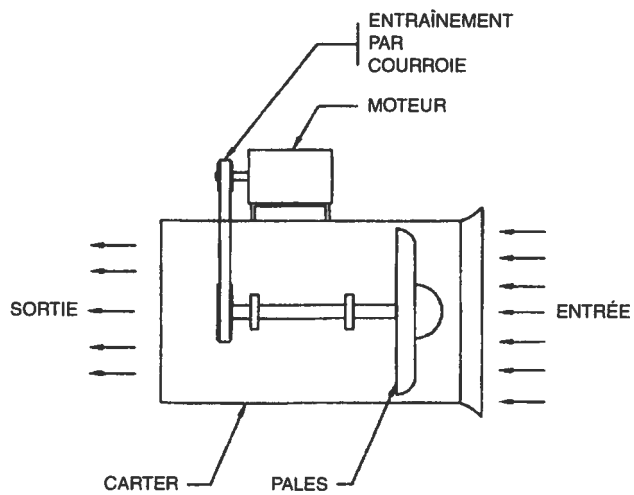


Figure 5.25 - Ventilateur de type axial.

l'air qui réduisent l'efficacité du ventilateur. Ces ventilateurs sont sensibles à l'accroissement de la charge statique et la moindre augmentation de la résistance à l'écoulement fait diminuer le débit de ventilation.

● Épurateurs

Quelle que soit la technique d'épuration de l'air pollué utilisée, il faut vérifier que la concentration des rejets atmosphériques est conforme aux normes environnementales réglementaires. Plusieurs mécanismes existent pour traiter les émissions contenant des composés organiques volatils [21, 42-44] :

- l'oxydation thermique;
- l'oxydation catalytique;
- l'adsorption;
- l'absorption;
- la condensation;
- la biofiltration.

Les épurateurs par oxydation thermique, oxydation catalytique et adsorption sont les plus fréquemment rencontrés.

Les épurateurs par oxydation thermique et catalytique sont utilisés pour l'incinération des émissions contenant des polluants combustibles. La concentration des polluants doit toutefois être plus basse que la limite inférieure d'explosivité. La présence de produits halogénés limite leur utilisation : les sous-produits formés (gaz corrosifs) sont libérés dans l'atmosphère et peuvent occasionner des dommages aux équipements. Le rendement des épurateurs par oxydation thermique dépend principalement de la température, du temps de résidence et de la turbulence dans la chambre de combustion ainsi que de la composition et de la concentration des produits traités. L'efficacité des épurateurs par oxydation catalytique est liée au pourcentage d'oxygène présent lors de la combustion, à la température d'opération, aux caractéristiques du catalyseur et au débit volumique.

L'épuration par adsorption est utilisée pour le traitement des émissions provenant notamment de l'imprimerie, du nettoyage à sec, du dégraissage, de la fabrication d'adhésifs, de l'application de peinture et de la fabrication d'objet en polyester stratifié [44, 45]. Ce procédé consiste à faire circuler l'air pollué dans un lit d'adsorbant (fixe, mobile ou fluidisé). Le charbon activé et les adsorbants synthétiques polymériques sont majoritairement employés. L'adsorption se fait par un mécanisme de condensation qui permet l'attraction et la rétention du gaz ou de la vapeur sur une structure solide poreuse. La quantité de gaz ou de vapeur captée est liée à la facilité de condensation du gaz ou de la vapeur et est directement proportionnelle à l'aire de contact disponible [46]. Lorsque la surface de contact est saturée, l'adsorbant doit être remplacé ou régénéré. La régénération se fait par désorption thermique (vapeur d'eau, air chaud, rayons micro-ondes) du solvant. Dans certaines applications, la désorption s'accompagne d'un procédé de condensation permettant de récupérer le solvant sous forme liquide.

L'air épuré peut être recyclé dans le milieu de travail ce qui permet une récupération énergétique importante, présente un intérêt économique certain, mais comporte également des contraintes et des risques. Le fonctionnement et l'entretien des systèmes d'épuration avec recyclage doivent être rigoureusement surveillés afin d'éviter les défaillances qui pourraient exposer les travailleurs à des polluants à des concentrations dangereuses [1, 10, 18, 47]. La conception et l'utilisation d'un système de recyclage impliquent le respect de certaines règles :

- les contaminants à épurer sont identifiables et leurs concentrations sont inférieures aux valeurs limites d'exposition;
- la toxicité des contaminants à recycler est établie;
- le recyclage d'air épuré est autorisé par la réglementation;

- un apport d'air neuf provenant de l'extérieur est assuré en plus de l'utilisation du système de recyclage;
- une conduite de dérivation vers l'extérieur est prévue en cas de panne du système d'épuration;
- un système de détection permet de relever toute défaillance du dispositif de recyclage;
- un protocole de surveillance et d'entretien périodique est élaboré et appliqué par le personnel.

● Cheminée d'évacuation et prise d'air neuf

La conception d'une cheminée d'évacuation de polluants doit prendre en compte un certain nombre de paramètres. Pour réduire les risques du recyclage, le rejet des polluants doit s'effectuer à une hauteur et une vitesse suffisamment élevées pour éviter tout rabattement du panache au niveau de la prise d'air neuf et toute reprise des polluants à l'intérieur du bâtiment [1, 7]. Le calcul de la distance de sécurité entre la source de rejet atmosphérique et la prise d'air neuf est un exercice complexe prenant en compte plusieurs paramètres : la vitesse et la direction du vent, le degré de stratification de l'atmosphère, le rapport de la vitesse d'évacuation à la vitesse du vent, la hauteur et la géométrie du bâtiment concerné, la formation de zones sous pression positive et négative, les caractéristiques propres aux émissions et la topographie des lieux [48-52].

Des modèles de dispersion atmosphérique permettent d'estimer les concentrations maximales en fonction de la distance sous le vent d'une cheminée ou d'une bouche d'évacuation [53]. Une étude de modélisation en soufflerie peut être également réalisée pour estimer les concentrations maximales à certains emplacements critiques. Cette méthode est généralement préférée lorsque les structures avoisinantes ou la topographie des lieux risquent de perturber les lignes d'écoulement autour du bâtiment.

Un certain nombre de recommandations permettent de réduire les risques de contamination d'une prise d'air par différentes sources polluantes [48-51, 53, 54] :

- éviter les sorties d'évacuation en affleurement de toit ou en façade;
- ne pas placer de prise d'air au niveau du sol ou à proximité de sources polluantes (cheminée, évent sanitaire, tour de refroidissement);
- ne pas placer de prise d'air ni de sortie d'évacuation dans le sillage d'un bâtiment;
- maintenir une vitesse d'évacuation supérieure à 15 m/s à la sortie de la cheminée;
- ne pas utiliser de chapeau de protection contre la pluie à la sortie des cheminées ou tout autre dispositif qui obstrue la libre circulation de l'air;
- éviter la présence d'écran architectural autour des cheminées pouvant perturber la libre circulation de l'air.

■ Air de compensation

En complément à la ventilation locale, un dispositif de compensation remplace de façon contrôlée l'air évacué par les dispositifs de captage. De l'air provenant de l'extérieur est introduit passivement dans le local au moyen de persiennes ou mécaniquement grâce à un système de ventilation. La compensation assure un bon fonctionnement de ces dispositifs en maintenant une pression relativement neutre dans le local. Si l'appel d'air créé par les évacuateurs d'air n'est pas comblé, le débit d'aspiration du dispositif de captage peut diminuer en raison de la forte inertie engendrée par l'étanchéité du bâtiment. La vitesse de captage dans la zone de travail

peut ainsi devenir insuffisante à assurer une bonne protection du travailleur. La compensation évite la surpression d'air sur les portes; difficiles à ouvrir, leur utilisation devient dangereuse [1, 11]. En hiver, la dépression aéraulique créée dans un local peut provoquer un inconfort pour le personnel : des courants d'air froid provenant de l'air pénètrent par les interstices du bâtiment et une réduction de l'effet de cheminée des appareils de chauffage par combustion entraîne une inversion des produits de combustion dans le local.

La compensation contrôlée peut être réalisée grâce à un système de ventilation mécanique (figure 5.13) Celui-ci est constitué d'une prise d'air neuf, d'une unité de traitement pour la filtration, le chauffage et l'humidification de l'air, d'un ventilateur et d'un réseau de canalisations et de diffuseurs qui assurent une bonne distribution de l'air dans l'espace de travail [9-11, 55]. L'emplacement des diffuseurs et les débits d'air introduits sont déterminés précisément : le système de compensation doit être performant sans entraîner d'inconfort pour le personnel. La vitesse d'introduction de l'air doit rester inférieure à 2 m/s et descendre à moins de 1 m/s si l'arrivée d'air est située à proximité des postes de travail. Un logiciel de simulations numériques des écoulements d'air peut faciliter l'évaluation de l'ensemble du système de ventilation (captage et compensation) et la vérification des critères aérauliques liés notamment au confort et à l'efficacité de captage [55, 56]. Les dispositifs de captage de type inducteur étant sensibles aux courants d'air, la vitesse résiduelle d'air induite par le jet provenant du diffuseur d'air de compensation doit rester nettement inférieure à la vitesse de captage requise au poste de travail [55]. Ceci est particulièrement vrai en cas d'utilisation de solvants puisque les vitesses de captage recommandées sont généralement basses. La compensation contrôlée est également utile pour créer la surpression ou la dépression aéraulique d'un local empêchant ainsi la transmission de polluants d'un local à l'autre. L'air introduit par le système de compensation permet aussi de diminuer la concentration de polluants provenant d'émissions fugitives.

■ Mise en service et évaluation périodique

Une évaluation de conformité vérifiera, après la mise en service, que les performances attendues du système de ventilation sont atteintes et que l'installation répond bien aux spécifications du cahier des charges. En France, la réglementation prévoit la constitution d'un dossier d'installation de ventilation comprenant notamment des valeurs de références pour différents paramètres aérauliques [7, 9]. Ces valeurs sont notées et périodiquement contrôlées. En complément, il est recommandé d'effectuer des prélèvements d'air en zone respiratoire afin de vérifier l'exposition du personnel aux polluants.

Les variations des paramètres aérauliques et l'état des composants seront régulièrement contrôlés. Deux techniques permettent d'évaluer une installation : les techniques qualitatives et les techniques quantitatives. Les techniques qualitatives donnent une appréciation générale de la dispersion des polluants et des conditions d'écoulement au voisinage d'un capteur, identifient les problèmes de refoulement ou de fuite dans les canalisations, et contrôlent l'influence des courants d'air ou la présence de turbulences pouvant réduire l'efficacité du captage. La méthodologie consiste à observer le déplacement d'une fumée émise par une source fumigène. Le tube fumigène, le plus souvent utilisé, notamment pour des applications localisées, est un tube en verre d'environ 15 cm de longueur rempli d'une solution d'acide sulfurique gélifiée. L'air est introduit dans le tube à l'aide d'une poire située à l'une des extrémités et mis en contact avec l'acide sulfurique. La réaction entre la vapeur d'eau contenue dans l'air et la matrice à base d'acide sulfurique produit une fumée blanche. Cette fumée est corrosive et des précautions doivent être prises au moment de sa dispersion. Un générateur portable à faible débit dont la fumée est peu inconfortante peut également être utilisé. La fumée blanche provient de la condensation à température ambiante des vapeurs d'alcools chauffés par une source thermique intégrée. Si un volume plus important de fumée est nécessaire, d'autres générateurs

peuvent la produire à partir d'un liquide [57] en utilisant des techniques de vaporisation, de nébulisation et d'atomisation.

Les techniques quantitatives permettent de déterminer certains paramètres aérauliques comme les vitesses de captage aux bouches d'aspiration, les vitesses d'écoulement et les débits d'air dans les canalisations ainsi que certaines pressions relatives entre diverses parties de l'installation. Elles évaluent aussi l'efficacité de captage du dispositif de ventilation. Un anémomètre ou un tube de Pitot mesurent les vitesses à l'intérieur d'un conduit alors que les variations de pression statique sont évaluées par un manomètre ou un tube de Pitot. Cet appareillage doit être vérifié périodiquement (nettoyage, étalonnage) et la méthodologie de prise de mesures doit être conforme aux pratiques établies par les organismes de normalisation [9, 58-60]. La localisation des points de mesures doit être judicieuse, certains éléments du réseau (coudes, tronçons divergents et convergents) pouvant provoquer un écoulement instable ou turbulent (figure 5.26) et entraîner des erreurs de mesure. L'exploration du champ de vitesses est réalisée en plusieurs points de manière à évaluer l'homogénéité de l'écoulement sur toute la surface du conduit. Les cabines ouvertes à ventilation horizontale utilisées pour l'application de peinture ou la mise en œuvre de produits en polyester stratifié seront également vérifiées avec la même technique en testant également les conditions aérauliques dans le plan d'ouverture de la cabine.

La technique de mesure par traçage détermine l'efficacité de captage d'un dispositif de ventilation. Cette efficacité est définie comme le rapport du débit-masse du polluant directement capté au débit-masse du polluant émis dans l'atmosphère [61]. Ce procédé consiste à substituer le polluant réel par un traceur gazeux, ou sous forme d'aérosol, et à simuler le comportement du polluant réel. Pour un polluant gazeux, le traceur sera sélectionné en fonction de sa faible toxicité, de sa facilité de mesure et de sa précision, de sa stabilité chimique et du faible coût d'utilisation du matériel [61, 62]. L'hexafluorure de soufre (SF_6), l'hélium (He), le protoxyde d'azote (N_2O) et le dioxyde de carbone (CO_2) sont les traceurs généralement utilisés. La technique consiste à injecter le traceur directement dans le capteur puis à mesurer en aval de celui-ci la concentration moyenne du mélange air-traceur (pour connaître la capacité de captage maximale). On injecte ensuite le traceur au point d'émission de la source polluante et on mesure la concentration moyenne du mélange au même endroit que précédemment [61, 63, 64]. Le rapport entre les deux concentrations représente l'efficacité de captage. Pour simuler au mieux l'émission réelle du

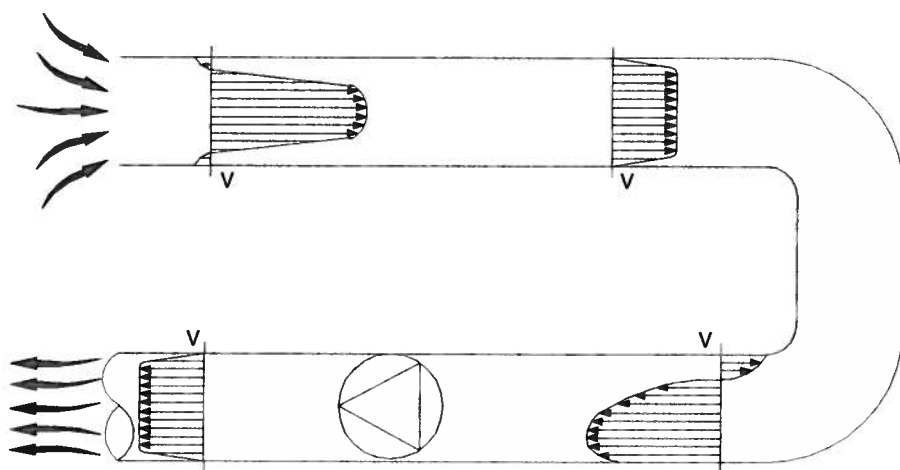


Figure 5.26 - Variation du profil d'écoulement de l'air dans une conduite de ventilation.

polluant, la forme et la disposition de l'émetteur et les caractéristiques d'émission (débit et direction) du traceur doivent se rapprocher de celles de la source réelle. Les prélèvements s'effectuent à une distance assez éloignée du point d'injection afin que le mélange gaz-traceur soit homogène.

Des contrôles périodiques sont prévus par la réglementation qui en spécifie la nature et la fréquence en fonction du type d'installation (avec ou sans recyclage) [7, 9]. Il peut être nécessaire d'effectuer des contrôles supplémentaires en cas de modifications du système (ajout de capteur, augmentation des débits d'aspiration) ou du procédé (nouvelle source polluante, augmentation du débit d'émission).

■ Conclusion

Dans la plupart des procédés industriels utilisant des solvants, la ventilation assure le contrôle de l'exposition des travailleurs et la maîtrise des risques d'incendie. Mais l'abaissement des valeurs limites d'exposition dû à l'amélioration des connaissances relatives à la toxicité des produits chimiques implique le développement de dispositifs de captage encore plus performants. Le concepteur doit donc disposer d'outils lui permettant de mieux caractériser les paramètres liés à l'émission des polluants et d'analyser et de modéliser avec précision les conditions aérauliques dans le voisinage de l'opérateur, particulièrement lorsqu'il évolue dans un environnement mettant en présence des flux d'air d'origines variées.

La simulation numérique des écoulements d'air basée sur la résolution d'équations mathématiques appliquées à la mécanique des fluides offre à cet égard un potentiel intéressant. Elle permet notamment de prédire les caractéristiques aérauliques des flux d'air (direction, vitesses et pressions d'air), de déterminer les concentrations de polluants et les températures ambiantes à différents endroits d'une aire ventilée. Cet outil peut être utilisé dès la phase conceptuelle d'un projet d'installation d'un système de ventilation ou pour mettre en évidence les défaillances d'une installation existante. Cette technique de ventilation prévisionnelle peut également être mise à profit lors de la réalisation d'études au cours desquelles on fait varier les paramètres aérauliques et géométriques (débit, vitesses de captage et de soufflage, direction du flux d'air, dimensions et formes) des composants d'une installation pour en optimiser la performance. Mais ces résultats doivent être validés *in situ* pour en assurer la fiabilité, celle-ci étant largement tributaire de la qualité des données de bases introduites dans le logiciel de simulation.

Par ailleurs, la volonté manifestée par les différents pays de diminuer les émissions de composés organiques volatils (COV) et les engagements formels de réduction pris par ces derniers devraient se traduire par une intensification de la recherche conduisant à la substitution des produits, l'optimisation des procédés de fabrication et l'amélioration de la performance des systèmes d'épuration de rejets atmosphériques.

Bibliographie

1. ACGIH. — *Industrial Ventilation. A Manual of Recommended Practice*. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Cincinnati, 23rd édition, 1998.
2. NFPA. — *NFPA 33, Standard for Spray Application Using Flammable and Combustible Materials*. National Fire Protection Association, Quincy, 2000, 36 p.
3. NFPA. — *NFPA 86, Standard for Ovens and Furnaces*. National Fire Protection Association, Quincy, 1999, 73 p.
4. NFPA. — *NFPA 91, Standard for Exhaust Systems for Air Conveying Vapors, Gases, Mists and Noncombustible Particulate Solids*. National Fire Protection Association, Quincy, 1999, 15 p.

5. NFPA. — *NFPA 34, Standard for Dipping and Coating Processes Using Flammable and Combustible Materials*. National Fire Protection Association, Quincy, 2000, 23 p.
6. Heinsohn R.J. — *Industrial Ventilation. Engineering Principles*. John Wiley & Sons, New York, 1991, 699 p.
7. INRS. — *Guide pratique de ventilation n° 9.1. Cabines d'application par pulvérisation de produits liquides*. Institut national de recherche et de sécurité, Paris, 2000, ED 839, 22 p.
8. ANSI/AIHA. — *Spray Finishing Operations. Safety Code for Design, Construction and Ventilation*. American Industrial Hygiene Association, Fairfax, 1995, Z9.3-1994, 26 p.
9. INRS. — *Guide pratique de ventilation n° 0. Principes généraux de ventilation*. Institut national de recherche et de sécurité, Paris, 1996, ED 695, 36 p.
10. Beaudet M., Lazure L., Ménard L. — *Qualité de l'air en milieu industriel. Guide de ventilation*. CSST/IRSST/AQME/Beaulieu, Montréal, 1998.
11. ASHRAE. — Ventilation of the Industrial Environment. In : *HVAC Applications*. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers Inc. Atlanta, 1999, 28.1-28.24.
12. Andersson I.M., Marttinen K., Niemelä R., Roséen G., Räisänen J., Welling I. — Contaminant Dispersion Near a Worker in a Uniform Velocity Field. In : H. Goodfellow, E. Tähti editors, *Proceedings of the Ventilation 1997, 5th International Symposium on Ventilation for Contaminant Control*. The Canadian Environment Industry Association, 1997.
13. Kulmala I., Säämänen A., Enbom S. — The Effect of Contaminant Source Location on Worker Exposure in the Near-Wake Region. *Ann. Occup. Hyg.*, 1996, 40, 5, 511-523.
14. Flynn M.R., Ljungqvist B. — A Review of Wake Effects on Worker Exposure. *Ann. Occup. Hyg.*, 1995, 39, 2, 211-221.
15. Säämänen A., Kulmala I., Enbom S. — Control of Exposure Caused by a Source in the Near Wake Region. *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, 1998, 13, 10, 719-725.
16. Streeter V.L., Wylie E.B. — *Fluid Mechanics*. McGraw-Hill, New York, 1979, 562 p.
17. McDermott H.J. — *Handbook of Ventilation for Contaminant Control*. Butterworth-Heinemann, Boston, 1985, 402 p.
18. INRS. — *Guide pratique de ventilation n° 1. L'assainissement de l'air des locaux de travail*. Institut national de recherche et de sécurité, Paris, 1989, ED 657, 197-215.
19. Goodfellow H.D. — *Advanced Design of Ventilation Systems for Contaminant Control*. Elsevier Science Publishers, New York, 1985, 745 p.
20. Burgess W., Ellenbecker M.J., Treitman R.D. — *Ventilation for Control of the Work Environment*. John Wiley & Sons, New York, 1989, 476 p.
21. Bahner M., Kong E., Turner S., Kaplan N. — *An Assessment of Styrene Emission Control Technologies for the FRP and Boat Building Industries*. Research Triangle Institute, Research Triangle Park, NC, USA, 1996, 14 p.
22. Lazure L., Goyer N. — *Contrôle des expositions. Manuel de formation*. Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail, Montréal, 1999, 118 p.
23. Zhivov A.M., Nielsen P.V., Riskowski G., Shilkrot E. — *Displacement Ventilation for Industrial Applications*. HPAC Engineering, 2000, 41-50.
24. Zhivov A.M., Shilkrot E.O., Nielsen P.V., Riskoski G.L. — Displacement Ventilation Design. In : H. Goodfellow, E. Tähti editors, *Proceedings of the Ventilation 97. 5th International Symposium on Ventilation for Contaminant Control*. The Canadian Environment Industry Association, 1997.
25. Säämänen A., Andersson I.M., Niemelä R., Roséen G. — Evaluation of a Horizontal Displacement Ventilation System for Styrene Exposure Control. In : R.T. Hughes, H.D. Goodfellow, G.S. Rajhans editors, *Proceedings of the Ventilation 91. 3rd International Symposium on Ventilation for Contaminant Control*. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Inc., Cincinnati, 1993, 167-169.
26. Lazure L.P. — Evaluation of a Local Exhaust System Used in the Manufacture of Small Parts Made of Reinforced Plastic. *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, 2000, 15, 9, 681-685.
27. INRS. — *Guide pratique de ventilation n° 3. Mise en œuvre manuelle des polyesters stratifiés*. Institut national de recherche et de sécurité, Paris, 1994, ED 665, 24 p.
28. GPRMC et CEFIC. — *Résines et polyesters insaturés. Guide d'utilisation*. Groupement européen des plastiques renforcés. Matériaux composites et groupe sectoriel des polyesters insaturés du Conseil européen de l'industrie chimique, Bruxelles, 1993, 31 p.

29. ASHRAE. — Industrial Local Exhaust Systems. In : 1999 HVAC Applications. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 1999, 29.1-29.21.
30. Posokhin V.N., Zhivov A.M. — Principles of Local Exhaust Design. In : H. Goodfellow, E. Tähti editors, *Proceedings of the Ventilation 97. 5th International Symposium on Ventilation for Contaminant Control*. The Canadian Environment Industry Association, 1997.
31. HSE. — Engineering Control for Printing. Control Guidance Sheet for Printers P200. In : *Control of Chemicals in Printing: COSHH Essentials for Printers*. Health and Safety Executive, Suffolk, 2000.
32. Esmen N.A., Weyel D.A., McGuigan F.D. — Aerodynamic Properties of Exhaust Hoods. *Am. Ind. Assoc. J.*, 1986, 47, 8, 448-454.
33. Conroy L.M., Ellenbecker M.J., Flynn M.R. — Prediction and Measurement of Velocity into Flanged Hoods. *Am. Ind. Assoc. J.*, 1988, 49, 5, 226-234.
34. Flynn M.R., Ellenbecker M.J. — Capture Efficiency of Flanged Circular Local Exhaust Hoods. *Ann. Occup. Hyg.*, 1986, 30, 4, 497-513.
35. Saunders C.J., Fletcher B. — Jet Enhanced Local Exhaust Ventilation. *Ann. Occup. Hyg.*, 1993, 37, 1, 15-24.
36. Fletcher B., Johnson A.E. — The Capture Efficiency of Local Exhaust Ventilation Hoods and the Role of Capture Velocity. In : H. Goodfellow editor, *Proceedings of the Ventilation'85. 1st International Symposium on Ventilation for Contaminant Control*. Chemical Engineering Monographs 24, Elsevier Science Publishers, Toronto, 1986, 369-390.
37. Kulmala I. — Air Flow Field Near a Welding Exhaust Hood. *Appl. Occup. Environ. Hyg.*, 1997, 12, 2, 101-104.
38. Waltz A. — Capture Efficiency of Industrial Local Extract Systems. Measurement, Modelling and Results. In : R. Niemelä, J. Railio, E. Sundquist, E. Tähti editors, *Proceedings of the Ventilation 2000. 6th International Symposium on Ventilation for Contaminant Control*, 2000, 142-146.
39. Vali Y. — A New Empirical Capture Velocity Formulae for the Design and the Assessment of Local Exhaust Ventilation System. In : R. Niemelä, J. Railio, E. Sundquist, E. Tähti editors, *Proceedings of the Ventilation 2000. 6th International Symposium on Ventilation for Contaminant Control*, 2000, 151-152.
40. Conroy L.M., Iyiegbuniwe E.A. — Characterization of Industrial Crossdrafts and Their Effect on Hood Capture Efficiency. In : R. Niemelä, J. Railio, E. Sundquist, E. Tähti editors, *Proceedings of the Ventilation 2000. 6th International Symposium on Ventilation for Contaminant Control*, 2000, 139-141.
41. Chen Y.K., Huang R.F., Chen C.W. — Capture Envelope of an Exhausted Opening Under Cross Draft. A Numerical Approach. In : R. Niemelä, J. Railio, E. Sundquist, E. Tähti editors, *Proceedings of the Ventilation 2000. 6th International Symposium on Ventilation for Contaminant Control*, 2000, 147-149.
42. ESIG. — *ESIG and Industry*. European Solvent Industry Group, www.esig.org, 2001.
43. Carver M., Hutchinson E. — VOC Emissions and Control : A UK Perspective. *Pharmaceutical Engineering*, november/december 1995, 65-71.
44. EPA. — *Air Pollution Fact Sheets*. United States Environmental Protection Agency, www.epa.gov, 2001.
45. ASHRAE. — Industrial Gas Cleaning and Air Pollution Control. In : 2000 HVAC Systems and Equipment. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., Atlanta, 2000, 25.1-25.31.
46. Peavy H.S., Rowe D.R., Tchobanoglous G. — Environmental Engineering. McGraw-Hill Company, New York, 1985, 677 p.
47. ANSI/AIHA. — *American National Standard for Recirculation of Air from Industrial Process Exhaust Systems*. ANSI/AIHA Z9.7-1998, American Industrial Hygiene Association, Fairfax, 1998, 6 p.
48. ASHRAE. — Airflow Around Buildings. In : 2001 Fundamentals. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers inc. Atlanta, 2001, 16.1-16.12.
49. Stathopoulos T., Lazure L., Saathoff P. — *Tracer Gas Investigation of Building Exhaust in an Urban Environment*. Rapport de recherche R-213, Institut de recherche Robert-Sauvé en santé et sécurité du travail, Montréal, 1999, 98 p.

50. Rock B.A., Moylan K.A. — Placement of Ventilation Air Intakes for Improved IAQ. *ASHRAE Transactions*, 1999, 105, 1.
51. Petersen R.L. — Stack Heights, Air Intake Locations, and Indoor Air Quality. In : R.T. Hughes, H.D. Goodfellow, G.S. Rajhans editors, *Proceedings of the Ventilation 91. 3rd International Symposium on Ventilation for Contaminant Control*. American Conference of Governmental Industrial Hygienists, Inc., Cincinnati, 1993, 333-341.
- 52] Wilson D.J., Fabris I., Ackerman M.Y. — Measuring Building Effects on Laboratory Exhaust Stack Design. *ASHRAE Transactions*, 1998, 104, 2.
53. ASHRAE. — Building Air Intake and Exhaust Design. In : *1999 HVAC Applications*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers inc. Atlanta, 1999, 43, 1-43.10.
54. Petersen R.L., Carter J.J., Rattcliff M.A. — Influence of Architectural Screens on Rooftop Concentrations Due to Effluent from Short Stacks. *ASHRAE Transactions*, 1999, 105, 2.
55. INRS. — *Fiche pratique de sécurité. La compensation contrôlée d'une installation de ventilation*. Institut national de recherche et de sécurité, Paris, 2000, ED86, 4 p.
56. Fontaine J.R., Rapp R. — *Systèmes de compensation d'air*. Institut national de recherche et de sécurité. *Cahiers de Notes Documentaires. Hygiène et sécurité du travail*, Paris, 1999, 31-47.
57. Maynard A., Thompson J., Cain J.R., Rajan B. — Air Movement Visualization in the Workplace. Current Methods and New Approaches. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 2000, 61, 51-55.
58. AFNOR. — *NF X 10-112. Mesure du débit des fluides dans les conduites fermées, méthode d'exploration du champ des vitesses pour des écoulements réguliers au moyen de tubes de Pitot doubles*. Association française de normalisation, Paris, 1977, 47 p.
59. ASHRAE. — *ANSI/ASHRAE 111-1988. Practices for Measurement, Testing, and Balancing of Heating, Ventilation, Air-Conditioning, and Refrigeration Systems*. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers Inc., Atlanta, 1988.
60. AMCA. — *AMCA Fan Application Manual, Part 3. A Guide to the Measurement of Fan System Performance in the Field*. Air Movement and Control Association Inc. Arlington Heights, 1976.
61. AFNOR. — *NF X 43-260. Mesure de l'efficacité de captage et contrôle différentiel d'un système d'assainissement*. Association française de normalisation, Paris, 1987, 47 p.
62. Niemelä R., Lefevre A., Muller J.P., Aubertin G. — Comparison of Three Tracer Gases for Determining Ventilation Effectiveness and Capture Efficiency. *Ann. Occup. Hyg.*, 1991, 35, 4, 405-417.
63. Bémer D., Dessagne J.M., Aubertin G. — *Traçage à l'hélium. Mise au point d'une méthode de mesure du débit d'émission d'une source gazeuse*. Institut national de recherche et de sécurité, *Cahiers de Notes Documentaires. Hygiène et Sécurité du Travail*, Paris, 1995, 509-518.
64. Hampl V., Niemelä R., Shulman S., Bartley D.L. — Use of Tracer Gas Technique for Industrial Exhaust Hood Efficiency Evaluation. Where to sample?. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1986, 47, 5, 281-287.

Annexe

Annexe

Réglementation sur la ventilation industrielle

■ Au Québec

Au Québec, le Règlement sur la santé et la sécurité du travail traite de certains aspects de la ventilation industrielle¹. Ces aspects concernent le captage à la source d'émissions ponctuelles, les niveaux de ventilation naturelle ou mécanique requis dans un établissement selon sa classification, les contraintes relatives à la recirculation de certains contaminants après filtration et les limites de concentration de contaminants chimiques permises.

Le Code national du bâtiment (1995) aborde quelques notions générales de ventilation industrielle et notamment l'obligation d'éviter la contamination des aires de travail proches des bâtiments industriels².

Le Règlement sur la santé et la sécurité du travail spécifie aussi que tout poste de travail doit être ventilé par des moyens mécaniques ou naturels afin de respecter les valeurs de concentration des contaminants chimiques mentionnés à l'annexe I du règlement. Il oblige également à capter à la source toutes les émissions provenant d'une source ponctuelle de contaminants à un poste de travail fixe.

L'annexe III de ce règlement précise aussi le niveau minimal de ventilation recommandé (nombre de changements d'air frais par heure) selon la classification et l'occupation de l'établissement, ou d'une de ses parties, et rappelle que les systèmes doivent être en parfait état de fonctionnement. Le règlement souligne la nécessité de ventiler par des moyens mécaniques ou naturels et fixe les caractéristiques des systèmes de ventilation mécanique. Ces systèmes doivent répondre aux normes suivantes :

- être conçus selon les règles de l'art;
- avoir des conduits servant uniquement au transport de l'air contaminé;
- l'emplacement des prises d'air doit éviter la réintroduction des contaminants;

1. Gouvernement du Québec. *Règlement sur la santé et la sécurité au travail*, décret 885-2001, Éditeur officiel du Québec, 2001.

2. CNRC-NRC. *Code national du bâtiment*. Conseil national de recherches du Canada, Ottawa, 1995.

- être pourvus de systèmes d'arrêt reliés au système d'alarme;
- être munis d'interrupteurs;
- être inspectés et réglés au moins une fois par an.

Dans le cas d'un poste de travail fixe, s'il existe une source d'émission ponctuelle de contaminant, une ventilation d'extraction locale doit être installée au niveau de la source.

Le Code national du bâtiment exige que les contaminants soient captés à la source et que leur concentration n'atteigne jamais des valeurs supérieures aux valeurs spécifiées dans l'*Industrial Ventilation Manual* publié par l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists. Il spécifie également que les installations de ventilation ne doivent en aucun cas contaminer les locaux contigus et il énumère certaines règles de conception et d'installation des systèmes.

La recirculation totale ou partielle de l'air évacué et filtré est interdite lorsque le contaminant en cause est noté à l'annexe I du Règlement sur la santé et la sécurité du travail ou lorsque qu'il existe une valeur plafond. Par mesure de sécurité, en raison des graves conséquences qu'entraîne la présence de substances cancérogènes dans le milieu de travail, leur recirculation est interdite. Les substances à valeur plafond ont, elles, un effet aigu d'irritation ou de sensibilisation. Un contrôle continu est nécessaire pour s'assurer que cette valeur n'est jamais dépassée.

L'air vicié doit être remplacé par de l'air neuf non contaminé.

Un travailleur ne doit jamais être exposé à un poste de travail à des concentrations de contaminants dépassant les valeurs limites d'exposition moyenne pondérée (VEMP) pour des périodes de 8 heures ou les valeurs limites d'exposition de courte durée (VECD) pour des périodes de 15 minutes. Lorsque ces normes ne sont pas respectées, des modifications doivent être apportées au système de captage et une protection individuelle du travailleur doit être instaurée. Le non-respect de ces normes nécessite des modifications au système de captage et, en dernier recours, la protection individuelle des travailleurs.

■ En France¹

● Réglementation aération-assainissement applicable dans les locaux de travail

La qualité de l'air dans les locaux de travail est une préoccupation des industriels, des pouvoirs publics chargés de faire appliquer la réglementation en la matière, du Code du travail et de l'Institution prévention qui par son rôle d'assureur apporte conseil et assistance aux entreprises.

Les entreprises spécialisées dans les systèmes de ventilation sont également parties prenante dans l'atteinte des objectifs d'assainissement de l'air en milieu de travail et cela à tous les stades (fabrication du matériel, conception, installation, mise en service, exploitation et contrôle).

La réglementation fixe les principes d'aération et d'assainissement des locaux fermés et de tous les lieux présentant un risque lié à l'atmosphère où le personnel peut intervenir : l'air respiré aux postes de travail ne doit pas entraîner, à court ou à long terme, de troubles ou d'atteintes pathologiques, ni d'élévations exagérées de la température, d'odeurs désagréables et de condensations.

Deux décrets publiés en 1984, deux arrêtés de 1987 et une circulaire de 1985 constituent les textes de base de cette réglementation. Les décrets ont été intégrés

1. Texte préparé par J.-M. Dessagne, département Ingénierie des procédés, INRS, Vandoeuvre.

depuis au Code du travail (articles R. 232-5 à R. 232-5-14 et R. 235-2-4 à R. 235-2-8). Leur champ d'application concerne tous les établissements assujettis à ce code, et notamment les établissements industriels, commerciaux et agricoles.

Cette réglementation repose sur cinq principes fondamentaux :

- la fixation d'objectifs quant au niveau de salubrité de l'air;
- la définition d'obligations minimales destinées à assurer ces objectifs : volumes d'air ou débits d'air neuf minimaux, captage à la source, limitation et contrôle du recyclage, etc.;
- l'intégration de ces objectifs et de ces obligations dès la conception des nouvelles constructions (principe de prévention intégrée);
- l'obligation d'informer l'ensemble des partenaires intéressés des caractéristiques de l'installation sous la forme d'un dossier à jour accessible;
- la mise en place de contrôles : autocontrôle concernant le chef d'entreprise et contrôles à la demande de l'inspecteur du travail.

Le respect de concentrations limites en polluants est implicite pour les locaux dans lesquels la pollution est liée à la seule présence humaine (1 000 ppm CO₂). Il est explicite pour les autres locaux. Des valeurs limites indicatives existent pour de très nombreuses substances, une dizaine étant réglementaire. Ces valeurs s'expriment en terme de concentrations dans l'atmosphère, la seule voie de pénétration des substances dangereuses envisagée étant la voie respiratoire. Deux types de valeurs ont été retenus :

- des valeurs limites d'exposition à court terme (VLE) dont le respect permet d'éviter le risque d'effets toxiques immédiats ou à court terme; la VLE est une valeur plafond mesurée sur une durée maximale de 15 minutes;
- des valeurs limites de moyenne d'exposition (VME) destinées à protéger les travailleurs des effets à terme et mesurées ou estimées sur une durée de 8 heures.

Pour les gaz et les vapeurs, elles sont exprimées en millièmes en volume (ppm) et en mg · m⁻³. Pour le toluène par exemple, les valeurs (réglementaires) sont respectivement de 100 et 375 pour la VME.

En présence d'une source polluante, l'article R. 232-5-7 précise les objectifs à atteindre par ordre de priorité :

- suppression des émissions de substances insalubres, gênantes ou dangereuses par l'utilisation de nouvelles techniques de production;
- captage au plus près des sources d'émission et le plus efficacement possible;
- dilution et évacuation des polluants résiduels par la ventilation générale.

Les débits sont déterminés en fonction de la nature et de la quantité de polluant émis de façon à respecter les objectifs de concentrations. On doit également tenir compte des limites inférieures d'explosivité des substances inflammables.

Le système d'entrée d'air qui va compenser l'air extrait par les dispositifs de captage ou par l'installation de ventilation générale ne doit pas diminuer les performances de captage ni occasionner de gêne due aux courants d'air pour les occupants. L'air neuf doit provenir de l'extérieur, hors des sources de pollution.

Enfin, le recyclage de l'air d'un local pollué vers un autre local où la pollution est de même nature doit répondre à des conditions restrictives : identification de tous les polluants émis et connaissance de leurs caractéristiques, épuration efficace, mise en place de dispositifs de détection de dysfonctionnement des épurateurs et arrêt possible du recyclage en dehors des périodes de chauffage ou de climatisation.

Dans ces textes, le législateur fait apparaître deux niveaux de responsabilité :

- celle du maître d'ouvrage qui a construit ou aménagé le bâtiment : il doit mettre à la disposition de l'utilisateur ultérieur des locaux les moyens techniques nécessaires et lui fournir une notice d'instruction avec un descriptif de l'installation et des informations en permettant le contrôle et l'entretien;

- celle du chef d'entreprise : il doit respecter les règles destinées à assurer des conditions d'hygiène et de sécurité satisfaisantes pour le personnel, vérifier que les caractéristiques de l'installation de ventilation sont adaptées à l'activité du local, maintenir l'installation en bon état de fonctionnement et en assurer régulièrement le contrôle; il doit établir, puis tenir à jour le dossier d'installation comprenant, d'une part, des valeurs de référence caractérisant l'installation par ses paramètres initiaux, réputés satisfaisants et, d'autre part, les consignes d'utilisation qui sont un guide de maintenance et un recueil des résultats de contrôles périodiques.

● Réglementation COV vis-à-vis de l'environnement

La réduction des émissions de composés organiques volatils (COV) dans l'industrie est un sujet d'actualité en raison de la parution de l'arrêté du 29 mai 2000, modifiant l'arrêté du 2 février 1998, fixant de nouvelles valeurs limites d'émissions (VLE)¹ canalisées et diffuses pour les sources fixes. La date de mise en conformité est fixée au 30 octobre 2005.

La France s'est engagée, à travers le protocole de Göteborg signé en 1999, à réduire ses émissions de COV non méthanique de 2 300 kt en 1998 à 1 100 kt en 2010 (tous secteurs confondus : industrie, transports, agriculture...). C'est pourquoi des efforts importants doivent être faits dans les différents secteurs émetteurs.

En France, les émissions de COV dans le secteur de l'industrie représentent environ 25 % des émissions totales, la source principale de pollution étant les transports (44 %). La part des émissions liées aux sources fixes étant importante, il faudra les réduire significativement pour atteindre l'objectif fixé à l'horizon 2010.

Le 11 mars 1999 est parue la directive européenne 1999/13/CE, relative à la réduction des émissions de COV dues à l'utilisation de solvants organiques dans certaines activités et installations industrielles. Cette directive fixe des seuils d'émissions canalisées et diffuses pour vingt secteurs d'activités utilisant des solvants (imprimerie, revêtement de surface, imprégnation du bois, nettoyage de surface...). Elle doit permettre une réduction de 57 %, en France, des émissions des sources fixes entre 1997 et 2010.

Cette directive a été transcrite en droit français par l'arrêté du 29 mai 2000, paru au Journal officiel le 13 août 2000 et modifiant l'arrêté du 2 février 1998, relatif aux prélèvements et à la consommation d'eau ainsi qu'aux émissions de toute nature des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) soumises à autorisation. Dorénavant, quand on parle de l'arrêté du 2 février 1998, il faut comprendre l'arrêté du 2 février 1998 modifié.

S'il existait dans l'ancien arrêté une valeur globale de VLE canalisée à respecter (150 mg/Nm³ équivalent méthane), ce n'est plus le cas actuellement et suivant les secteurs et les seuils de consommation de solvants, les industriels doivent s'engager avant le 30 octobre 2005 à respecter des VLE canalisées et diffuses.

Si les petites entreprises et les petites installations n'étaient jusqu'à présent pas concernées par cet arrêté, ce n'est plus le cas aujourd'hui. Et les techniques permettant de traiter les effluents des grandes installations chargés en COV ne sont pas obligatoirement transposables à de petites installations ou à des coûts non négligeables.

1. Bien que le sigle soit identique, le E concerne ici l'émission et non l'exposition.