

→ J.R. Fontaine, R. Rapp,  
Département Ingénierie des procédés,  
Centre de recherche de l'INRS-Lorraine,

avec la participation d'un Groupe de  
Travail CRAM/INRS  
(CRAM de Montpellier, Nancy, Nantes,  
Orléans, Rennes, Rouen)

# Systemes de compensation d'air

## Contribution à leur conception pour les locaux de travail

### AIR COMPENSATIONS SYSTEMS FOR WORK PREMISES A CONTRIBUTION TO SYSTEM DESIGN

Digital simulation of air flows applied to the study of ventilation in several simple premises reveals the influence of air compensation system on general air flow inside the premises, with the corresponding impact on contaminant dispersal or extraction and worker comfort. In all the configurations studied, air compensation systems with input velocities lower than 1 m/s produced the most satisfactory results in terms of employee comfort. In the presence of contaminants, systems with high input velocities, in excess of 10 m/s, are not the best solution for improving air quality in general workplace ventilation situations, or for achieving efficient local extraction performances. Using lower input velocities significantly improves the results obtained, and systems with low input velocities, of the order of 1 m/s, seem to show the most promise, but their use remains to be validated. In local extraction, using scaling laws is a first step towards the assessment of an air compensation system.

• ventilation • digital simulation  
• air compensation • silk screen workshop • painting area  
• painting booth

La simulation numérique des écoulements de l'air, appliquée à l'étude de la ventilation de quelques locaux simples, montre l'influence du système de compensation sur l'écoulement général à l'intérieur d'un local, avec les répercussions qui en résultent sur la dispersion ou le captage d'un polluant, et sur le niveau du confort du personnel.

Pour toutes les configurations étudiées, les systèmes de compensation pour lesquels la vitesse d'introduction reste inférieure à 1 m.s<sup>-1</sup> obtiennent les résultats les plus satisfaisants concernant le critère confort du personnel.

En présence d'une pollution, les systèmes à vitesse d'introduction élevée, supérieure à 10 m.s<sup>-1</sup>, ne constituent pas la solution la mieux adaptée, soit à l'assainissement des locaux de travail, dans le cas d'une ventilation générale, soit à l'obtention d'un captage localisé efficace. L'utilisation de vitesses d'introduction inférieures à cette limite engendre une nette amélioration des résultats, et les systèmes à faible vitesse d'introduction, de l'ordre de 1 m.s<sup>-1</sup>, semblent les plus prometteurs, mais leur utilisation demande à être validée. Dans le cas d'un captage localisé, l'utilisation de lois d'échelle constitue une première approche dans l'évaluation d'un système de compensation.

• ventilation générale • captage localisé • simulation numérique • système de compensation

Les processus industriels sont souvent générateurs de pollution ou de chaleur à l'intérieur des locaux de travail. L'assainissement de l'air des ateliers repose généralement sur un système de ventilation assurant l'extraction des substances dangereuses et l'évacuation de l'excès de calories.

De nombreuses installations sont cependant dépourvues d'un dispositif d'introduction d'air neuf adéquatement conçu pour compenser les débits extraits. Les conséquences de ce défaut sont multiples. L'absence de compensation entraîne une introduction « sauvage » de l'air dans le local, ou bien par le moindre orifice naturel ou ouverture occasionnelle. La perte de charge à vaincre est plus importante, ce qui, pour une même installation, induit une diminution des débits extraits en fonction des caractéristiques débit-pression des ventilateurs utilisés. Lorsque les ouvertures existent, l'air qui pénètre dans l'atelier est à la température extérieure et à vitesse éle-

vée, d'où non seulement un inconfort ressenti par le personnel, mais aussi un risque de dégradation de la qualité des produits.

L'objet de cette étude est de montrer, pour quelques locaux simples, l'influence que peut avoir le système de compensation sur l'écoulement général à l'intérieur du local, avec les répercussions qui en résultent sur la dispersion d'un polluant, sur le captage, et aussi sur le confort du personnel.

Les écoulements d'air sont calculés et reproduits par simulation numérique avec le logiciel de simulation EOL-3D développé à l'INRS [1].

Trois situations différentes sont étudiées :

- un atelier de sérigraphie,
- une aire de peinture,
- un atelier équipé d'un système de captage localisé particulier : une cabine ouverte.

Pour chacune de ces situations, différents systèmes de compensation sont étudiés, et pour chaque simulation l'écoule-

ment calculé est analysé, d'une part, en termes de dispersion d'un polluant ou de perturbation du captage et, d'autre part, en termes de confort pour le personnel. Dans la présente étude, des critères généraux d'évaluation de la qualité des écoulements ont été mis au point. Ils ont été conçus pour être applicables quelles que soient les spécificités propres à chaque système. Pour un système particulier, ils peuvent être différents de ceux contenus dans les documents INRS correspondants (guides pratiques de ventilation) [2 à 4] : c'est par exemple le cas pour les aires de peinture.

## Les méthodes

### 1.1. Simulation numérique

La simulation numérique des écoulements est une approche de plus en plus utilisée pour les études de ventilation ; elle est bien adaptée aux études paramétriques. Le logiciel EOL-3D, développé à l'INRS et spécialement conçu pour l'étude par simulation numérique de locaux industriels, a été utilisé dans cette étude [1]. EOL-3D permet, à partir de la description géométrique d'un local et des caractéristiques aérodynamiques de son système de ventilation, de résoudre numériquement les équations de la mécanique des fluides en un nombre fini, mais néanmoins important, de points du local. Le logiciel permet notamment de prévoir les champs de vitesse et les cartes de concentration d'un polluant gazeux passif. Toutes les simulations sont effectuées en régime permanent avec une précision sur les résultats de calculs numériques inférieure à 5 % pour des conditions aux limites données [1, 5].

### 1.2. Critères

#### 1.2.1. Le confort

La norme ISO-7730 [6] spécifie les conditions d'ambiances thermiques acceptables pour le confort. Sans entrer dans le détail, elle permet de calculer l'indice PMV en fonction des paramètres physiques caractéristiques de l'ambiance, de l'activité de l'opérateur, et de la résistance thermique due à son vêtement.

Pour les besoins de l'étude, nous avons supposé une activité de  $116 \text{ W.m}^{-2}$  (activité moyenne debout), un isolement vestimentaire de  $0,078 \text{ m}^2.\text{°C.W}^{-1}$  (tenue légère : chemise, pantalon), et une température

opérative uniforme de  $20 \text{ °C}$ , bien que celle-ci ne soit pas constante dans bien des cas étudiés. En raison des différences d'un individu à l'autre, il est impossible de prescrire une ambiance qui puisse satisfaire chacun. La norme recommande de respecter un indice PMV compris entre  $-0,5$  et  $+0,5$ , de façon à satisfaire globalement, du point de vue thermique, 90 % des occupants. Dans ces conditions, la vitesse maximale admissible pour rester en situation de confort est de  $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ .

#### Remarque

Les paramètres de la norme ayant une influence sur le confort local ne sont pas pris en compte dans cette étude.

La comparaison des performances, en termes de confort, des différents systèmes de ventilation est effectuée uniquement sur la base des valeurs de vitesse calculées aux points de la zone de travail. Le résultat est exprimé à partir de l'indice de confort IC, représentant la fraction du volume de la zone de travail (ou zone d'évolution des salariés) où les vitesses d'air sont supérieures ou égales à la valeur de confort ( $0,5 \text{ m.s}^{-1}$ ).

#### 1.2.2. La dispersion des polluants

La ventilation générale, de par son principe, ne permet pas de limiter la quantité de polluant libérée dans le local, mais contribue à diminuer les concentrations des substances toxiques par dilution. Idéalement, l'air neuf issu de l'introduction doit parvenir aux voies respiratoires des opérateurs avant de passer à proximité des sources de pollution. Après dilution, l'air pollué est évacué par l'extraction et ce, si possible, sans recirculation dans l'atelier.

Les champs de vitesse nous renseignent sur les écoulements ; les cartes de concentration permettent d'apprécier les zones polluées. Il est alors possible de déterminer analytiquement la répartition des concentrations dans les zones de travail et de calculer la concentration moyenne en polluant dans cette zone.

Pour un local déterminé, la comparaison entre les différentes simulations est effectuée à partir de deux indices : la concentration moyenne en polluant dans la zone de travail, d'une part, et la fraction du flux d'air recirculé issu du volume englobant extractions et sources de polluant, d'autre part.

La concentration moyenne en polluant dans la zone de travail est normalisée à la concentration moyenne calculée aux

extractions. Le résultat représente l'indice de pollution IP. A l'indice IP le plus faible correspond le système de ventilation simulé le plus efficace. La valeur idéale pour cet indice est donc de 0, valeur correspondant à une absence de pollution dans la zone considérée. Cet indice est exprimé suivant la relation suivante :

$$IP = 100 \cdot \frac{C_{mzone}}{C_{ms}}$$

avec :

IP : indice de pollution,

$C_{mzone}$  : concentration moyenne dans la zone de travail,

$C_{ms}$  : concentration moyenne à l'extraction.

IP est l'inverse de l'indice d'efficacité introduit par Sandberg [7].

Pour calculer l'indice de recirculation IQ, on définit un volume de contrôle englobant les sources de pollution et les extractions. Soient :

$Q_1$  : le flux d'air quittant ce volume et Q le débit d'extraction,

IQ est défini par :

$$IQ = \frac{Q_1}{Q}$$

Cet indice caractérise l'importance des recirculations à proximité des sources de pollution, et permet de déterminer le sens global de l'écoulement. A une valeur faible de l'indice IQ, correspond un écoulement optimisé dirigé des voies respiratoires vers les sources de pollution, avec un faible risque de contamination des zones de travail.

A l'inverse, une valeur élevée de IQ sous-entend un écoulement globalement inverse de celui recherché et un risque élevé de pollution des zones de travail. Remarquons enfin que ce dernier indice est purement aérodynamique, c'est-à-dire qu'il permet d'évaluer la ventilation indépendamment de la nature des sources de pollution présentes.

#### 1.2.3. La perturbation du captage

L'apport d'air neuf doit compenser le débit extrait sans perturber le captage localisé. Un fonctionnement correct de celui-ci est obtenu lorsque les vitesses d'air au regard du captage sont dirigées du local vers le captage.

L'indice IQ, calculé pour un choix approprié du volume de contrôle, permet ici de quantifier les recirculations au regard du captage. Dans le cas de la cabine ouverte, le volume de contrôle est la cabine elle-même.

## Un atelier de sérigraphie [2]

### 2.1. Configuration initiale

Le local est représenté sur la *figure 1*. Les dimensions de l'atelier de sérigraphie sont de : 18 m de large x 3 m de haut x 8,1 m de profondeur. Il est équipé de cinq machines à sérigraphie de dimensions : (1,5 x 1,0 x 1,5) m<sup>3</sup>. L'évacuation des polluants émis par les machines est assurée par un système de ventilation générale. La gaine d'introduction placée à hauteur de plafond comprend, dans la configuration initiale, huit bouches rectangulaires de : (0,8 x 0,1) m<sup>2</sup>.

Huit autres bouches de (1,0 x 0,1) m<sup>2</sup>, montées sur une gaine au niveau du sol située à l'arrière des machines, assurent l'extraction. Le débit total mis en jeu est de l'ordre de 7 800 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. A ce débit correspond une vitesse normale d'introduction de 3,4 m.s<sup>-1</sup> et une vitesse d'extraction de 2,7 m.s<sup>-1</sup>. Chaque machine à sérigraphie constitue une source d'émission de polluant.

Ce local, avec les machines à sérigraphie, a ensuite été simulé en remplaçant le système de ventilation par différents systèmes.

### 2.2. Simulations

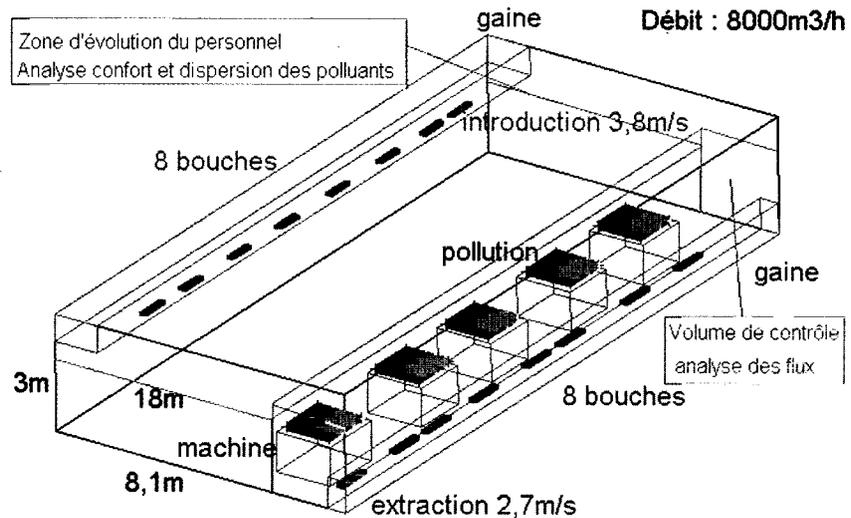
Au total, 21 études différentes ont été réalisées sur cette configuration.

Pour toutes les simulations, les dimensions du local, l'emplacement des machines et donc des sources de pollution, la hauteur de la gaine d'introduction et la position de la gaine d'extraction sont conservés.

Le débit mis en jeu est également conservé, sauf pour une seule simulation. Enfin, pour la plupart des simulations, les bouches d'extraction sont identiques à celles de la configuration initiale. La position de la gaine d'introduction est également conservée sauf pour quelques simulations où elle est avancée respectivement de 2, 4 et 6 m.

Par contre, les éléments suivants sont variables :

- le nombre de bouches : 1, 2, 3 ou 8,
- la vitesse de l'air à l'introduction : 8,8 ; 3,4 ; 1,12 ; 0,45 ; ou 0,1 m.s<sup>-1</sup>,
- l'inclinaison du vecteur vitesse en introduction : normal à la bouche d'introduction ; ou incliné vers le sol, vers le plafond ou vers l'arrière du local, avec un angle d'inclinaison compris entre 40° et 50° par rapport à la normale.



**Fig. 1. Atelier de sérigraphie : configuration**  
- Silkscreen workshop - Layout

De plus, pour certaines simulations, des surfaces à 250 °C sont déclarées sur chaque machine à sérigraphie.

Enfin, quelques situations particulières ont été étudiées : l'introduction naturelle par deux portes du local, et la combinaison de la ventilation générale et d'un captage localisé enveloppant sur chaque machine avec un débit de captage d'environ 40 % du débit total mis en jeu.

Les 21 simulations sont explicitées en *annexe I*

### 2.3. Résultats suivant les critères de confort et de dispersion des polluants

Pour cet atelier de sérigraphie, la zone d'évolution des travailleurs comprend toute la partie avant du local, entre le mur et les machines sur une hauteur de 1,8 m.

Le volume de contrôle des flux d'air est situé en partie arrière du local et englobe sur toute la largeur de l'atelier les machines avec les sources de pollution et les extractions. La hauteur de ce volume est de 1,6 m et sa profondeur de 2,7 m. Ces volumes sont représentés sur la figure 1.

Le *tableau I* présente les résultats suivant les critères confort et dispersion des polluants tels qu'ils sont définis aux § 1.2.1 et 1.2.2.

Pour les configurations étudiées :

- le critère confort vitesse est obtenu pour toutes les simulations à vitesse d'introduction inférieure à 1 m.s<sup>-1</sup>. Ce même classement est également atteint pour la plupart des simulations pour lesquelles la vitesse d'introduction reste très proche de cette valeur (1,12 m.s<sup>-1</sup>) ;

- toutes les simulations, où la vitesse d'introduction entre dans la gamme 1 à 10 m.s<sup>-1</sup>, induisent une dispersion des polluants. L'analyse effectuée sur la comparaison des concentrations moyennes calculées dans la zone de travail montre une amélioration des résultats lorsque le vecteur vitesse à l'introduction est incliné vers le sol, avec toutefois une pollution encore importante ;

- l'introduction d'air non contrôlée (cf. simulation n° 1) ne permet pas d'obtenir un résultat satisfaisant, quel que soit le critère retenu ;

- les systèmes à basse vitesse d'introduction, c'est à dire inférieure à 1 m.s<sup>-1</sup>, permettent sous certaines conditions d'éviter la dispersion des polluants. Ce résultat satisfaisant peut être remis en cause en fonction de la présence ou non de phénomènes thermiques (cf. simulations n°s 16 et 21) ou de leur emplacement (cf. simulations n°s 18, 19 et 20). L'influence de paramètres tels que la présence des opérateurs ou l'existence de courants d'air perturbateurs n'a pas été abordée dans cette étude ;

## TABLEAU

**ATELIER DE SÉRIGRAPHIE - MESURES DE DISPERSION DES POLLUANTS ET CONFORT**  
**SILKSCREEN WORKSHOP - COMFORT AND POLLUTANT DISPERSAL RESULTS**

Simulation n°	Vitesse d'introduction	Description			Confort		Dispersion des polluants	
		Inclinaison	Thermique	Autre	IC	IP	IQ	
1	naturelle	-			20	124	169	
2	8,8 m.s <sup>-1</sup>	I			43	100	567	
3	3,4 m.s <sup>-1</sup>	N			2	135	307	
4	3,4 m.s <sup>-1</sup>	H			1	138	277	
5	3,4 m.s <sup>-1</sup>	I			5	72	131	
6	3,4 m.s <sup>-1</sup>	I	oui		6	103	167	
7	1,12 m.s <sup>-1</sup>	N			0	135	307	
8	1,12 m.s <sup>-1</sup>	I		bouches hautes	1	43	66	
9	1,12 m.s <sup>-1</sup>	I		bouche large	0	214	89	
10	1,12 m.s <sup>-1</sup>	I		extraction large	0	205	90	
11	0,45 m.s <sup>-1</sup>	N		bouche large, haute	0	225	68	
12	0,45 m.s <sup>-1</sup>	N	oui		0	91	84	
13	0,45 m.s <sup>-1</sup>	I			0	114	42	
14	0,45 m.s <sup>-1</sup>	I		bouche horizontale	0	37	75	
15	0,45 m.s <sup>-1</sup>	I	oui	captage localisé	0	0	71	
16	0,1 m.s <sup>-1</sup>	N			0	0	9	
17	0,1 m.s <sup>-1</sup>	N		gaine à 2 m	0	0	5	
18	0,1 m.s <sup>-1</sup>	N		gaine à 4 m	0	0	4	
19	0,1 m.s <sup>-1</sup>	N		gaine à 6 m	0	34	6	
20	0,1 m.s <sup>-1</sup>	I		extraction large	0	0	8	
21	0,1 m.s <sup>-1</sup>	I	oui		0	135	48	

Inclinaison I : vecteur vitesse à l'introduction incliné vers le sol ; inclinaison N : vecteur vitesse à l'introduction normal à la bouche ; inclinaison H : vecteur vitesse à l'introduction incliné vers le plafond.

Thermique (oui) : surface à 250 °C sur chaque machine.

IC : pourcentage du volume d'évolution des travailleurs où l'intensité de la vitesse de l'air est supérieure à 0,5 m.s<sup>-1</sup>.

IP : indice de pollution, rapport concentration moyenne au niveau de la zone d'évolution des travailleurs et de la concentration moyenne à la grille.

IQ : pourcentage du flux inverse issu du volume du contrôle englobant sources de pollution et extractions par rapport au flux sortant aux extractions.

- l'existence de phénomènes thermiques entraîne une dégradation des résultats ;

- la conjugaison ventilation générale / captage localisé permet d'obtenir une situation idéale, et ce même en présence de phénomènes thermiques (cf. simulation n° 15) et reste donc la solution à préconiser en premier lieu lorsque l'assainissement des locaux de travail est recherché. Pour cette configuration, le captage localisé joue parfaitement son rôle, avec une concentration moyenne dans la zone de travail nulle, malgré un écoulement général dans l'atelier présentant des recirculations vers les opérateurs, avec un flux inverse proche du flux d'extraction ;

- une amélioration des résultats exprimés en % du flux inverse par rapport au flux de sortie est obtenue soit par diminution de la gamme des vitesses en introduction, soit par inclinaison des vecteurs aux bouches d'introduction.

## 2.4. Analyses des écoulements

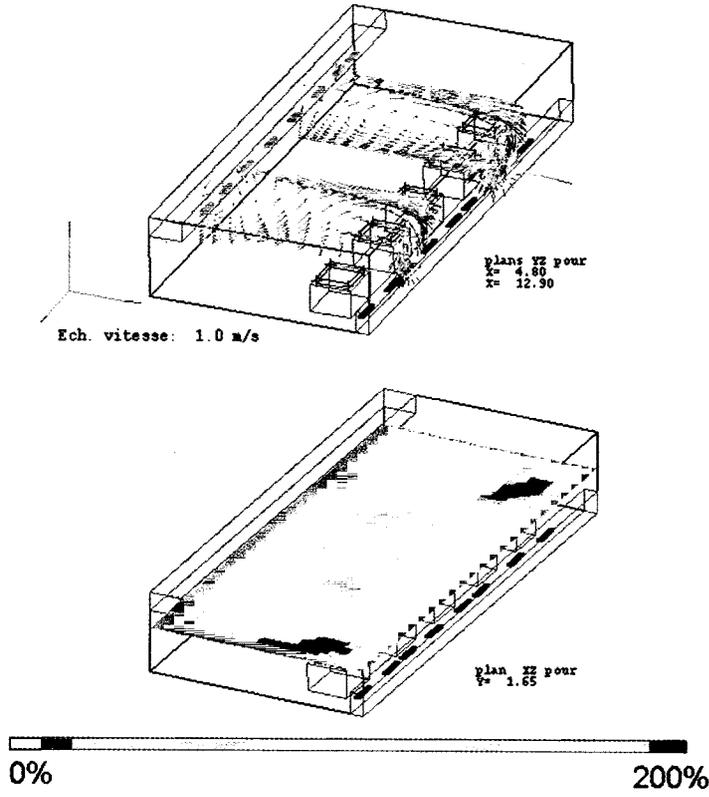
Il n'est pas possible de présenter ici les écoulements calculés pour chacune des simulations. Par contre, les principaux écoulements et les cartes de dispersion des polluants qui en découlent peuvent être caractérisés.

### Simulation n° 3

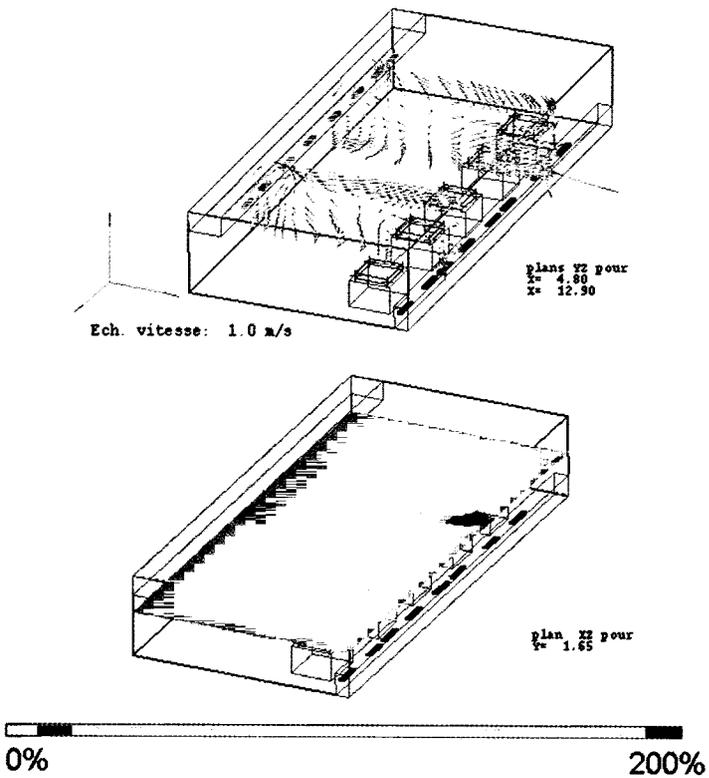
Le jet issu des bouches d'introduction recolle au plafond par effet Coanda [8], puis frappe la paroi arrière du local. Il se crée alors un phénomène de recirculation néfaste pour l'évacuation des polluants, le sens d'écoulement de l'air étant inverse de celui recherché. Il en résulte une dispersion générale de la pollution dans tout l'atelier (fig. 2).

### Simulation n° 5

L'inclinaison du vecteur vitesse à l'introduction a un effet bénéfique sur le sens de l'écoulement, qui est inversé par rapport à la situation précédente. L'air issu des introductions passe par les zones de travail avant d'atteindre les sources de pollution. Il existe néanmoins encore une pollution générale de l'atelier due à des phénomènes de recirculation, localisés notamment sur les côtés de l'atelier (fig. 3).



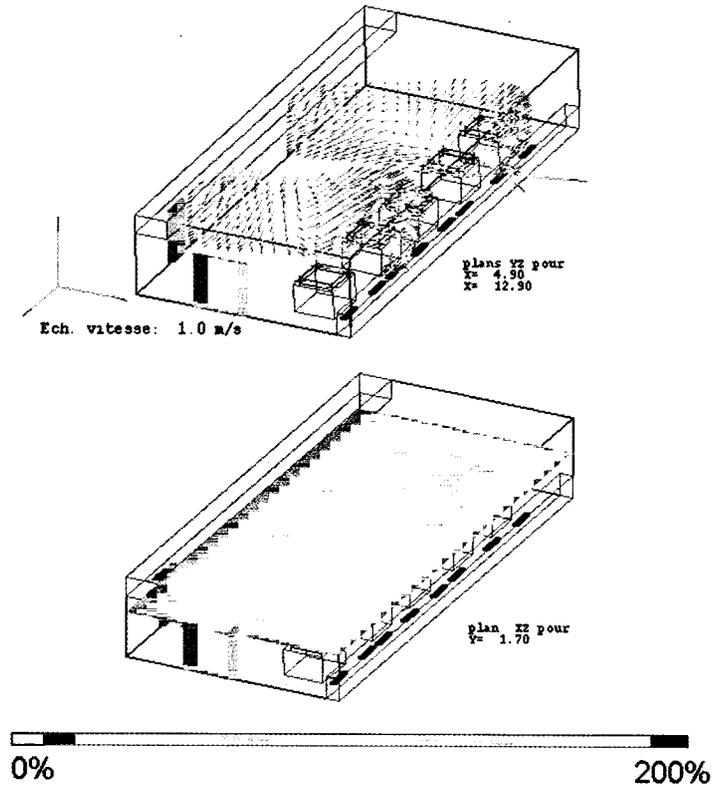
**Fig. 2. Atelier de sérigraphie - simulation n° 3.**  
**Cartes vecteurs vitesse et pollution, exprimées en % de (C locale)/(C moyenne en sortie)**  
- Silkscreen workshop - Simulation 3 - Velocity and pollution vectors expressed as % of (local C) / (mean output C)



**Fig. 3. Atelier de sérigraphie - simulation n° 5.**  
**Cartes vecteurs vitesse et pollution, exprimées en % de (C locale)/(C moyenne en sortie)**  
- Silkscreen workshop - Simulation 5 - Velocity and pollution vectors expressed as % of (local C) / (mean output C)

## Simulation n° 1

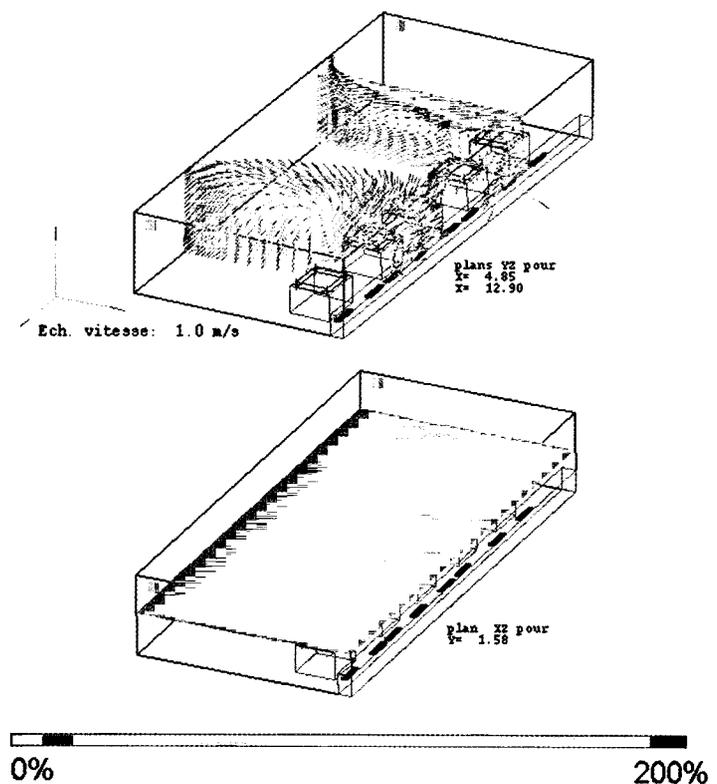
L'introduction d'air naturelle par les deux portes ne permet pas d'obtenir un résultat satisfaisant : l'écoulement obtenu induit un brassage de l'air du local, avec une pollution quasi homogène de l'atelier. L'indice de pollution est légèrement inférieur à celui calculé pour la simulation 3. Ceci s'explique par la différence des flux d'air mis en jeu, une partie de la pollution s'échappant donc ici par les ouvertures naturelles qui jouent un double rôle d'entrée d'air mais également de sortie naturelle (fig. 4).



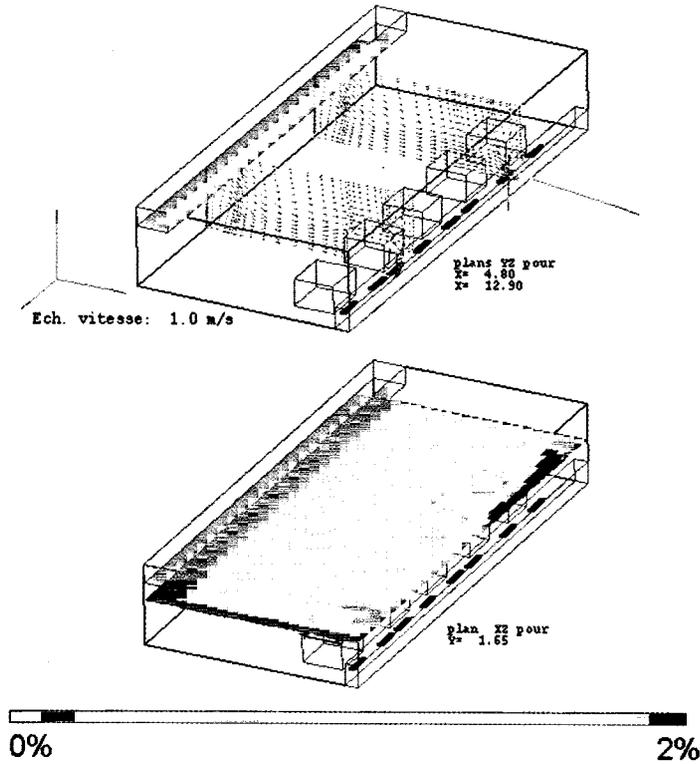
**Fig. 4. Atelier de sérigraphie - simulation n° 1. Cartes vecteurs vitesse et pollution, exprimées en % de  $(C_{\text{locale}})/(C_{\text{moyenne en sortie}})$**   
- Silkscreen workshop - Simulation 1 - Velocity and pollution vectors expressed as % of (local C) / (mean output C)

## Simulation n° 2

L'orientation donnée aux jets d'introduction induit une recirculation située au centre de l'atelier. La carte de pollution obtenue découle de cette recirculation, avec des zones non polluées sur les côtés, donc au voisinage des jets d'introduction de l'air neuf, et une zone fortement polluée au centre du local (fig. 5).



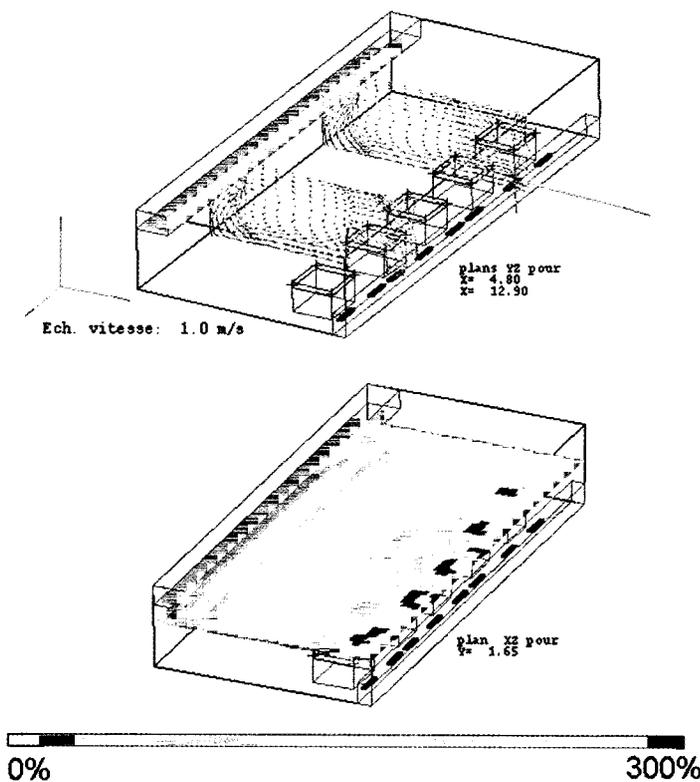
**Fig. 5. Atelier de sérigraphie- simulation n° 2. Cartes vecteurs vitesse et pollution, exprimées en % de  $(C_{\text{locale}})/(C_{\text{moyenne en sortie}})$**   
- Silkscreen workshop - Simulation 2 - Velocity and pollution vectors expressed as % of (local C) / (mean output C)



### Simulation n° 16

L'utilisation d'un système d'introduction à basse vitesse permet d'obtenir un champ des vecteurs vitesse très uniformisé dans tout l'atelier, sans recirculation importante. L'évacuation des polluants, efficace ici, assure un assainissement correct des zones de travail (fig. 6).

**Fig. 6. Atelier de sérigraphie - simulation n° 16. Cartes vecteurs vitesse et pollution, exprimées en % de (C locale)/(C moyenne en sortie)**  
 - Silkscreen workshop - Simulation 16 - Velocity and pollution vectors expressed as % of (local C) / (mean output C)



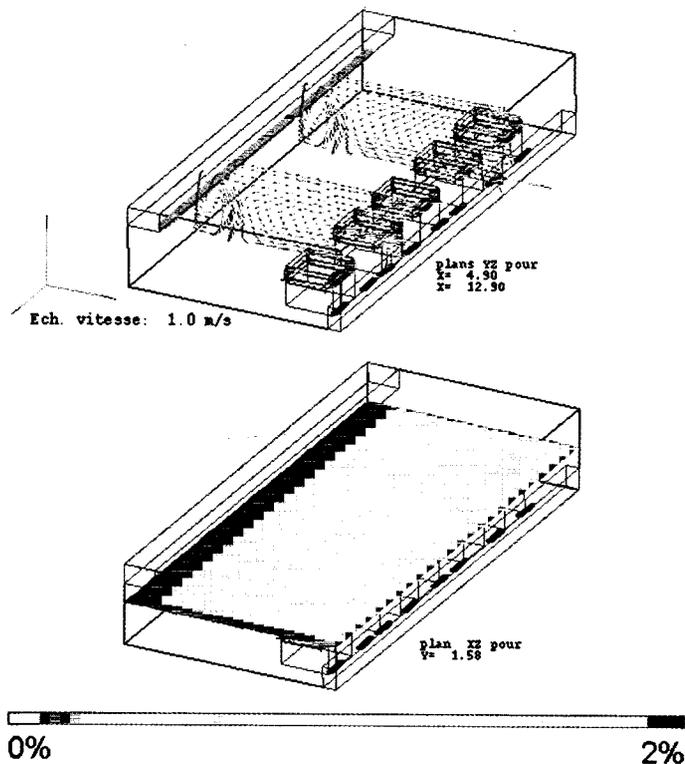
### Simulation n° 21

La présence des phénomènes thermiques a un effet sur l'écoulement, et donc sur la carte de pollution. Cette simulation ne diffère de la simulation 16 que par la présence de surfaces à 250 °C et la comparaison des cartes de pollution montre une nette dégradation des performances du système de ventilation utilisé. Il apparaît une stratification des températures et des polluants (fig. 7).

**Fig. 7. Atelier de sérigraphie - simulation n° 21. Cartes vecteurs vitesse et pollution, exprimées en % de (C locale)/(C moyenne en sortie)**  
 - Silkscreen workshop - Simulation 21 - Velocity and pollution vectors expressed as % of (local C) / (mean output C)

### Simulation n° 15

Le captage enveloppant joue parfaitement son rôle. Il n'existe aucune pollution dans les zones de travail et ce malgré les phénomènes thermiques. L'écoulement n'a pas d'influence sur ce type de captage. La ventilation générale utilisée, en complément des captages localisés, permet d'assurer une évacuation des polluants lors des interventions ponctuelles lorsque le capotage est relevé (fig. 8).



**Fig. 8. Atelier de sérigraphie - simulation n° 15.**  
**Cartes vecteurs vitesse et pollution, exprimées en % de (C locale)/(C moyenne en sortie)**  
 - Silkscreen workshop - Simulation 15 - Velocity and pollution vectors expressed as % of (local C) / (mean output C)

## Une aire de peinture [3, 4]

### 3.1. Configuration initiale

Une partie d'un local industriel comporte des emplacements réservés à la peinture de charpentes métalliques. Une de ces aires de peinture constitue la configuration initiale. Elle est représentée sur la figure 9. Les dimensions de cette zone sont de : 34 m de large x 11 m de haut x 23 m de profondeur. Des écrans permettent d'isoler en partie l'aire de peinture du reste de l'atelier. L'introduction de l'air est assurée par cinq caissons placés à environ 9 m de hauteur, au-dessus d'une grille d'extraction de 15 m de large et 3,5 m de profondeur. Les dimensions d'un caisson sont de 0,90 m de large, 2,50 m de profondeur et environ 1 m de hauteur. Chaque caisson comporte sur sa face inférieure trois zones d'introduction de l'air, de 0,90 m de large et de 0,56 m de profondeur, avec un espacement entre zone de 0,20 m. Deux buses séparées de 0,60 m, centrées sur chaque zone, permettent d'obtenir des vitesses d'injection élevées. Un caisson est représenté sur la figure 9. La distance entre deux caissons

est de 2,35 m. Le débit mis en jeu par ce système de ventilation est de l'ordre de 51 000 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>. A ce débit correspond une vitesse d'introduction uniforme aux caissons de 1,60 m.s<sup>-1</sup>, sauf aux buses où elle est de 15 m.s<sup>-1</sup>, et une vitesse uniforme sur la grille d'extraction de 0,27 m.s<sup>-1</sup>. Une source de pollution (poutrelle peinte) est placée sur toute la largeur de la grille à 1 m de hauteur.

### 3.2. Simulations

Cette configuration est étudiée en faisant varier le débit d'introduction mis en jeu aux caissons, la température à l'introduction, et la vitesse d'injection aux buses.

Pour toutes les simulations, le domaine de calcul est limité en partie basse par le sol, en partie haute par le plafond, en partie avant par une paroi du local, les autres faces étant dites « libres », elles correspondent à la jonction avec le reste de l'atelier. De plus, afin de limiter le nombre de nœuds et les temps de calcul, un plan de symétrie est admis au centre de la troisième batterie (vue de face fig. 9). La largeur de l'aire de peinture étudiée est d'environ 17 m. Pour les simulations à débit d'introduction réduit aux caissons, la différence de débit avec l'extraction est supposée être introduite par ailleurs dans le local, et

provient donc des parties dites libres du domaine de calcul, de façon à obtenir l'équilibre des débits. Au total, huit simulations différentes sont menées sur cette configuration ; la description en est donnée en annexe II.

### 3.3. Résultats selon les critères de confort et de dispersion des polluants

L'indice de confort IC est calculé dans la zone d'évolution des travailleurs. Pour cette aire de peinture, cette zone s'étend sur toute la surface correspondant à la grille d'extraction élargie de 5 m de chaque côté de celle-ci et sur une hauteur de 2,2 m.

L'indice de pollution IP est également calculé dans la zone d'évolution des travailleurs. Mais ici, du fait de la source de pollution placée dans ce volume à 1 m au-dessus de la grille, seule la partie comprise entre 1,3 et 2,2 m de hauteur est considérée pour le calcul de cet indice.

L'indice de recirculation IQ est calculé sur le volume de contrôle délimité par la grille d'extraction et la hauteur de la source de pollution (1,3 m).

Ces volumes sont représentés sur la figure 9.

TABLEAU II

**AIRE DE PEINTURE - MESURES DE DISPERSION DES POLLUANTS ET CONFORT - PAINTING AREA -  
COMFORT AND POLLUTANT DISPERSAL RESULTS**

N	Description			Confort IC	Dispersion des polluants			Critères spécifiques		
	Vi caisson/jets	Q <sub>c</sub> /Q <sub>e</sub>	ΔT		IP	IQ	v <sub>moy</sub> sur S	% S <sub>v</sub> inverse	% S <sub>v</sub> < 0,3	
1	1,6	15	1	0	27	19	299	0,73	11,5	12,5
2	1,6	15	1	35	0	0	1	0,21	0,0	100,0
3	1,6	15	1	10	5	15	47	0,34	19,7	57,9
4	0,34	15	0,33	35	0	0	2	0,22	0,0	99,1
5	0,34	15	0,33	0	23	16	100	0,55	0,9	35,4
6	1,87	1,87	1	0	12	14	183	0,53	0,5	31,3
7	0,62	0,62	0,33	0	1	0	1	0,22	0,0	76,9
8	0,62	0,62	0,33	35	1	12	9	0,25	0,5	77,3

Vi caisson/jets : vitesse d'introduction [m.s<sup>-1</sup>], respectivement au caisson et au jet.  
Q<sub>c</sub>/Q<sub>e</sub> : rapport entre le débit introduit aux caissons et le débit d'extraction.

ΔT : différence de température entre l'air introduit et l'ambiance.

IC : pourcentage du volume d'évolution des travailleurs où l'intensité de la vitesse de l'air est supérieure à 0,5 m.s<sup>-1</sup>.

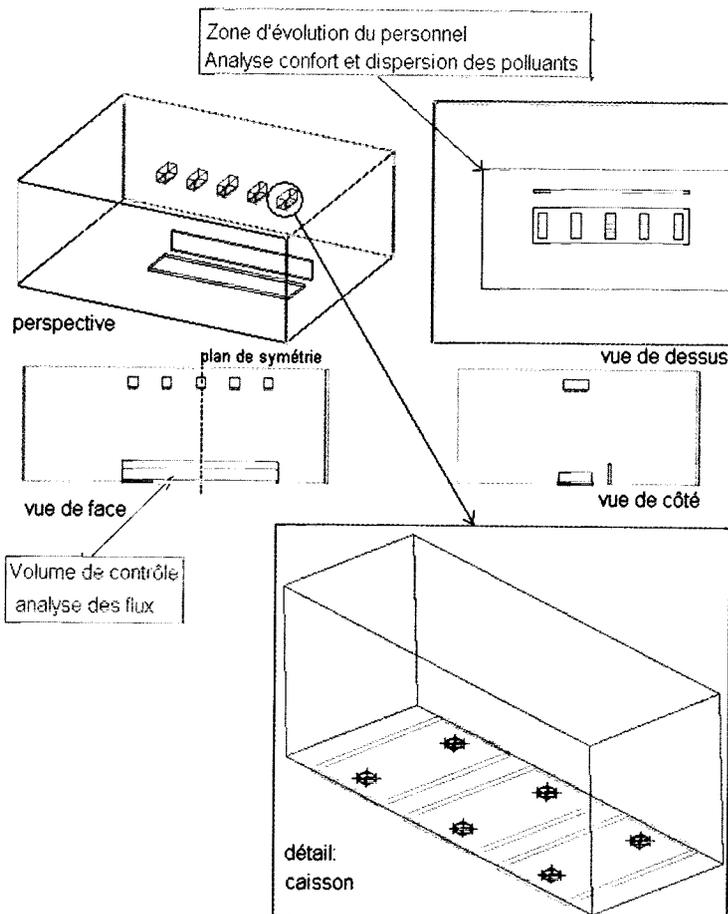
IP : indice de pollution, rapport concentration moyenne au niveau de la zone d'évolution des travailleurs et de la concentration moyenne à la grille d'extraction.

IQ : pourcentage du flux inverse issu du volume du contrôle englobant sources de pollution et extractions par rapport aux flux sortant aux extractions.

v<sub>moy</sub> sur S : vitesse moyenne calculée à 1 m de hauteur au-dessus de la grille d'extraction.

% S<sub>v</sub> inverse : pourcentage de la surface à sens de l'écoulement inversé (surface à 1 m au-dessus de la grille).

% S<sub>v</sub> < 0,3 : pourcentage de la surface où la vitesse est inférieure à 0,3 m.s<sup>-1</sup> (surface à 1 m au-dessus de la grille).



Les critères spécifiques aux aires de peinture ont également été calculés, à savoir la vitesse moyenne de l'air à 1 m au-dessus de la grille de captage, le sens de l'écoulement exprimé ici en % de la surface où le sens est inversé et enfin le % de la surface à vitesse inférieure à 0,3 m.s<sup>-1</sup>. Le tableau II présente le classement obtenu suivant ces différents critères.

Pour les configurations étudiées en situation isotherme (ΔT = 0) :

■ L'analyse suivant les différents critères intervenant dans la dispersion des polluants montre l'influence des débits sur les résultats :

● pour la simulation n° 1, le débit induit est pratiquement trois fois trop important par rapport au débit d'extraction, ceci entraînant une forte dispersion des polluants avec une inversion de la vitesse sur plus de 10 % de la surface de la grille à 1 m de hauteur ; par contre, la vitesse moyenne à cette hauteur est supérieure à 0,4 m/s, et très peu de points présentent une vitesse inférieure à 0,3 m.s<sup>-1</sup> ;

**Fig. 9. Aire de peinture - Configuration et détail du caisson d'introduction**  
- Painting area - Layout and detail of input plenum

- lorsque les jets sont supprimés, le débit induit est encore de l'ordre de deux fois le débit d'extraction (cf. simulation n° 6) et présente toujours une forte recirculation ; par contre, le sens de l'écoulement est correct à 1 m de hauteur au-dessus de la grille, avec une vitesse moyenne supérieure à 0,4 m.s<sup>-1</sup> ; mais, pour plus de 30 % de cette surface, la vitesse reste inférieure à 0,3 m.s<sup>-1</sup> ;

- si les jets sont conservés mais que le débit aux caissons est divisé par trois, le débit entraîné est proche du débit d'extraction (cf. simulation n° 5) et la dispersion des polluants est toujours maintenue ; les autres résultats sont similaires à la situation précédente ;

- une solution satisfaisante est obtenue avec un débit aux caissons réduit et la suppression des jets (cf. simulation n° 7) ; les phénomènes de recirculation sont inexistantes ; par contre, la vitesse moyenne à 1 m de hauteur reste faible, et inférieure à 4 m.s<sup>-1</sup>, et plus de 3/4 des points la vitesse est inférieure à 0,3 m.s<sup>-1</sup>.

■ Le critère confort vitesse n'est obtenu ici que pour la simulation n° 7 avec suppression des jets et débit réduit, ce qui correspond au système avec vitesse d'introduction inférieure à 1 m.s<sup>-1</sup>.

Pour les configurations étudiées en période de chauffage ( $\Delta T = 10$  ou 35 °C) :

■ L'analyse suivant les critères de dispersion des polluants montre l'influence des écarts de température sur les résultats :

- les résultats les plus satisfaisants sont obtenus avec un écart de température de 35 °C. Les débits entraînés sont inexistantes ainsi que les phénomènes de recirculation. Toutes ces simulations présentent le même profil lorsque le plan à 1 m au-dessus de la grille est analysé, à savoir une vitesse moyenne inférieure à 0,4 m.s<sup>-1</sup>, une absence de remontée, et un pourcentage non négligeable de cette surface à vitesse inférieure à 0,3 m.s<sup>-1</sup> ;

- par contre, une nette modification des résultats est notée lorsque l'écart de température est réduit à 10 °C (cf. simulation n° 3). Le débit entraîné devient plus important, avec une dispersion des polluants plus conséquente, une vitesse moyenne plus élevée, même si elle reste inférieure à 0,4 m.s<sup>-1</sup>, et des variations normales en ce qui concerne les résultats sur les pourcentages des surfaces (écoulement inversé et vitesse inférieure à 0,3 m.s<sup>-1</sup>) ;

■ Une analyse similaire est obtenue pour le critère confort :

- le pourcentage de points ne respectant pas ce critère est très faible pour les simulations avec un écart de température de 35 °C (0 ou 1 %) ;

- lorsque cette différence de température est réduite à 10 °C, un accroissement du résultat est noté, avec 5 % du volume ne satisfaisant pas à ce critère.

#### Remarques

- Les simulations effectuées avec un écart conséquent des températures ne sont pas représentatives de situations normales de fonctionnement, mais sont plutôt des situations de début de chauffage, en début de poste.

- La résolution et les résultats de ces simulations découlent de conditions aux limites du domaine de calcul bien particulières ; l'air chaud s'échappe en partie haute du local par les entrées dites libres, et l'air, réintroduit en partie basse de ces entrées, reste à température faible. En situation réelle, le local s'échaufferait, la différence de température aurait tendance à décroître, et le local finalement se comporterait comme les simulations décrites avec un écart de température très faible ( $\Delta T = 0$ ).

- Les simulations effectuées dans ce travail n'ont pas pour but de résoudre le problème de la ventilation des aires de peinture ; elles permettent simplement de juger de la pertinence d'utiliser des systèmes à vitesse d'introduction élevée comme système de compensation. Si l'on s'en tient aux deux critères confort vitesse et dispersion des polluants, en situation normale d'utilisation, ce type de système de compensation est à éviter. Par contre, si l'assainissement des lieux de travail n'est pas le critère prépondérant, et que seul le chauffage de l'atelier est recherché, ce type de système semble alors tout à fait adapté.

### 3.4. Analyses des écoulements

*Une étude spécifique aux aires de peinture a été réalisée à l'INRS ; elle a permis de suggérer d'autres systèmes de compensation que ceux considérés dans ce § [16].*

Des simulations effectuées ici, il est possible de distinguer deux types de comportement des dispositifs de compensation :

- d'une part, ceux qui induisent un fort brassage des zones de peinture, avec de nombreux phénomènes de recirculation et donc une très forte pollution dans tout l'atelier, et

- d'autre part, ceux pour lesquels les vitesses mises en jeu à la source de pollution sont insuffisantes pour entraîner des recirculations, ce qui induit une pollution moindre de l'atelier.

Typiquement, les figures 10 et 11 présentent une carte de vitesse et de pollution pour chacune de ces deux situations.

Les simulations nos 1, 3, 5 et 6 relèvent de la première catégorie. Les vitesses à l'introduction sont suffisamment élevées, notamment pour les simulations avec 15 m.s<sup>-1</sup> aux buses, et la différence de température entre l'introduction et l'ambiance est faible (0 °C pour les trois premières, et 10 °C pour la simulation n° 6).

Les autres simulations peuvent être rangées dans la seconde catégorie. Les vitesses à l'introduction sont relativement faibles et induisent peu de recirculation dans l'aire de peinture (cf. simulation n° 7), ou les effets thermiques sont prépondérants avec une différence de température de 35 °C entre l'air soufflé et l'ambiance. Dans cette situation, l'écoulement issu des caissons est entraîné par les jets, ne descend que sur environ une demi-hauteur. Les forces d'Archimède résultant de la différence de température l'emportent ensuite et provoquent une remontée des flux d'air. Une zone de séparation apparaît dans l'écoulement entre l'air issu des caissons et l'air de l'atelier entraîné par l'extraction au niveau du sol. La pollution est donc canalisée vers l'extraction par un écoulement à basse vitesse, et aucune remontée importante de pollution n'est observable. Aucun échauffement conséquent de l'atelier n'est observé dans ces simulations car il est supposé que l'air chaud suit le plafond, s'échappe du domaine de calcul et que l'air à la limite du domaine de calcul reste à la température de 15 °C. En toute logique, si la température du local venait à croître, pour finalement atteindre par exemple une différence de 10 °C, ou moins, l'écoulement basculerait vers celui décrit ci-dessus, simulation n° 3 par exemple, et le facteur important à prendre en compte serait alors le niveau de la vitesse en introduction.

## 4. Une cabine ouverte [3]

### 4.1. Configuration initiale

Une cabine ouverte cubique de 2 m de côté est placée dans un coin d'un local de volume ( $L = 15 \text{ m} \times w = 6 \text{ m} \times h = 5 \text{ m}$ ). Elle comprend trois fentes d'aspiration de surface ( $2 \times 0,05 \text{ m}^2$ ), placées respectivement à une hauteur de 0,4 m, 1,0 m et 1,6 m. La vitesse d'extraction est normale et uniforme sur chacune des fentes ; elle est de  $7,41 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , soit un débit total d'extraction d'environ  $8\,000 \text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ , et une vitesse moyenne à l'entrée de la cabine de  $0,56 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

La compensation de l'air est assurée par des bouches d'introduction d'air placées sur la face du local opposée à la cabine, à une hauteur de 4 m. Leur nombre (de 1 à 4) et leurs dimensions sont variables. La position du système d'introduction est repérée par la position de la bouche la plus proche de la cabine ; elle pourra se situer aux points P1, P2, ou P3 (cf. fig. 12). Lorsque le système d'introduction comporte plusieurs bouches, elles sont réparties de manière uniforme entre cette position et l'extrémité du mur opposée à la cabine.

La configuration adoptée est présentée sur la figure 12 (page suivante). Elle comprend : le local, la cabine avec trois fentes d'aspiration, et le système de compensation.

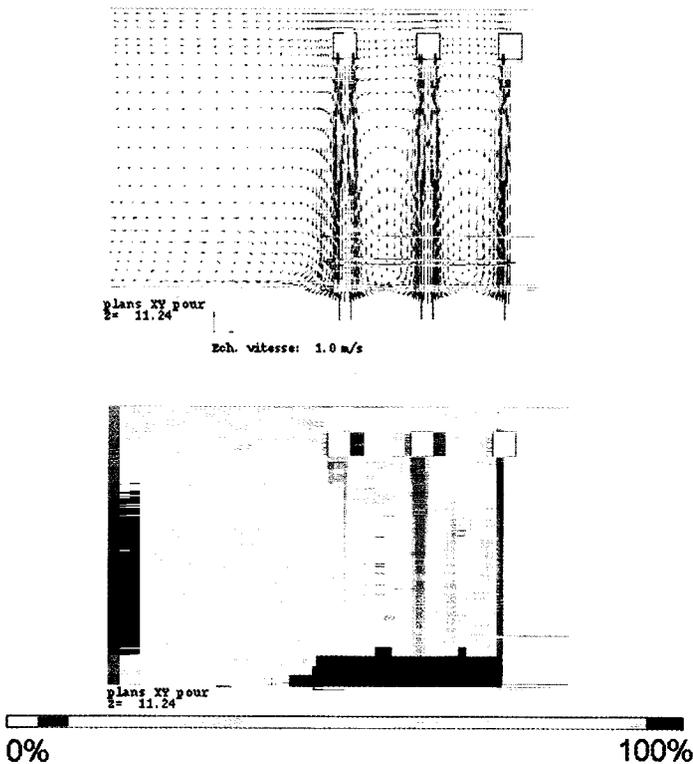
### 4.2. Simulations

L'étude paramétrique porte sur 25 simulations différentes. Les éléments suivants sont conservés :

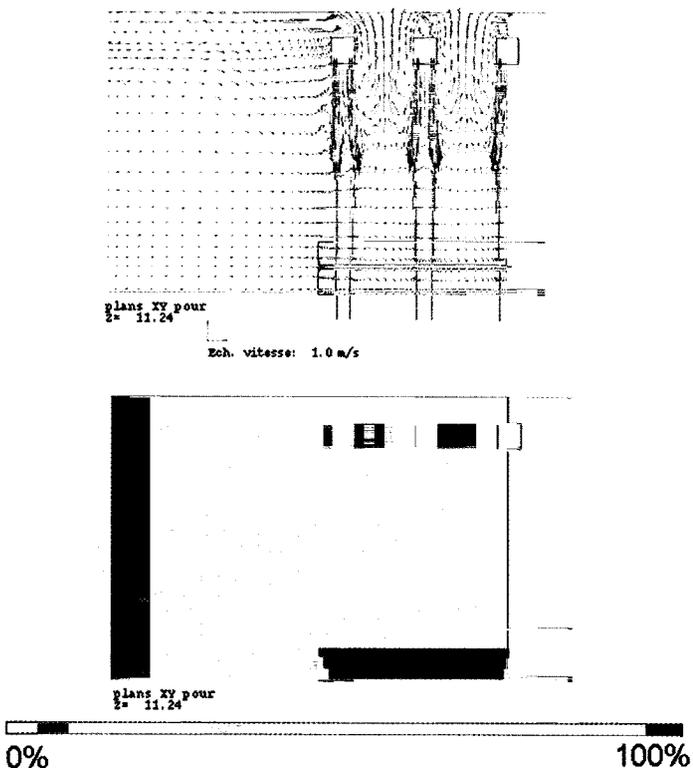
- la géométrie et les caractéristiques aérauliques de la cabine,
- la largeur (15 m) et la hauteur (5 m) du local,
- la hauteur du système d'introduction : 4 m.

Par contre, sont variables :

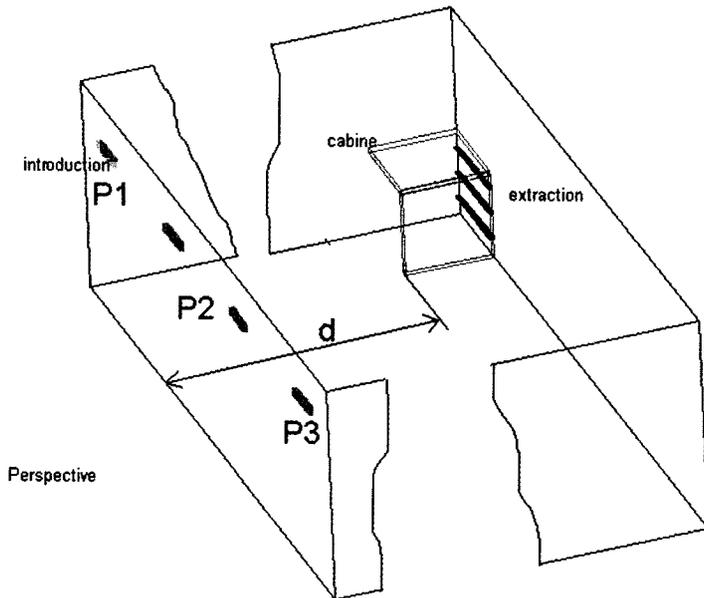
- le nombre (de 1 à 4) et les dimensions des bouches d'introduction d'air,
- les vitesses d'introduction ( $0,85 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ;  $2,8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ;  $5,6 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  ;  $11,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ),
- l'angle du vecteur vitesse en introduction (perpendiculaire à la bouche, ou incliné de 45 degrés vers le sol),
- la distance repérée « d » sur la figure 12 entre la position de l'introduction et l'entrée de la cabine ; les distances adoptées sont respectivement 4 m, 8 m et 16 m ;



**Fig. 10. Aire de peinture - Simulation n° 1. Cartes vecteurs vitesse et pollution, exprimées en % de (C locale)/(C moyenne en sortie)**  
- Painting area - Simulation 1 - Velocity and pollution vectors expressed as % of (local C) / (mean output C)



**Fig. 11. Aire de peinture - Simulation n° 2. Cartes vecteurs vitesse et pollution, exprimées en % de (C locale)/(C moyenne en sortie)**  
- Painting area - Simulation 2 - Velocity and pollution vectors expressed as % of (local C) / (mean output C)



**Fig. 12. Cabine ouverte - configuration**  
- Open booth - Layout

- la position du système d'introduction : en face de la cabine, décalé, ou placé à l'autre extrémité du local (respectivement positions P1, P2, ou P3 sur la figure 12),

- les conditions thermiques du local : la plupart des simulations sont effectuées sans conditions particulières du point de vue thermique, mais deux cas sont traités en situation hivernale avec des déperditions de l'ordre de 11 ou 14 kW et chauffage du local. La température de soufflage est alors de 24 °C.

### 4.3. Résultats suivant les critères de confort et de perturbation du captage localisé

#### 4.3.1. Le confort

L'analyse du critère confort est effectuée en prenant en compte tout le volume du local, hors la cabine ouverte et sur une hauteur de 1,80 m. Le *tableau III* présente pour chaque simulation la fraction, exprimée en % des points de la zone d'occupation dont la vitesse d'air est supérieure à 0,5 m.s<sup>-1</sup> (indice IC). Une observation du confort dans l'atelier nous permet de montrer les phénomènes suivants :

- le niveau confort est fortement dépendant de la vitesse d'introduction. Le pourcentage du volume à vitesse > 0,5 m.s<sup>-1</sup> est le plus élevé pour les vitesses d'introduction les plus importantes ;

- le niveau confort est fonction des dimensions de l'atelier : pour une même vitesse d'introduction, la fraction de points à vitesse supérieure à 0,5 m.s<sup>-1</sup> est d'autant plus faible que les dimensions de l'atelier sont importantes ;

- l'inclinaison du jet à l'introduction n'a pas d'effet conséquent sur le niveau global de confort.

#### 4.3.2. La perturbation du captage localisé

Le *tableau IV* synthétise les résultats des calculs pour les 25 simulations, exprimés en termes de perturbation à l'entrée de la cabine (indice IQ).

Une observation des valeurs de la perturbation de la distribution de vitesses d'air à l'entrée de la cabine ouverte nous permet de montrer les phénomènes suivants :

- une vitesse de soufflage trop importante entraîne les perturbations les plus élevées à l'entrée de la cabine. Ce paramètre est alors prépondérant sur tous les autres (inclinaison ou distance) ;

- pour les vitesses d'introduction modérées, une inclinaison vers le bas de la direction du soufflage, un décalage ou un éloignement des bouches par rapport à la cabine entraînent une amélioration des résultats (voir § « structure de l'écoulement ») ;

- lorsque la vitesse d'introduction est faible, la distribution des vitesses à l'entrée de la cabine est satisfaisante, quelles que soient les valeurs des autres paramètres ;

**CABINE OUVERTE - INDICES DE CONFORT IC - COMFORT INDEX IC**

V <sub>i</sub> (m.s <sup>-1</sup> ) Position Orientation Chauffage	11,1 P1		P1		5,6 P2		P3	2,8 P1			0,85 P1		
	N	I	N	I	N	I	N	N	N	I	N	I	I
									Oui				Oui
Distance d = 4 m	39,6	41,2	38,8	41,1	50,1	44,4	48,6	17,0	-	27,3	2,9	2,4	2,7
Distance d = 8 m	66,6	33,6	32,9	26,2	-	-	-	5,3	1,8	10,1	2,1	1,8	-
Distance d = 16 m	59,1	41,0	14,1	15,0	-	-	-	-	-	-	-	-	-

V<sub>i</sub> : vitesse d'introduction.

Position : P1 = au moins une bouche d'introduction face au captage ; P2 = bouche d'introduction décalée vers le centre ; P3 = bouche d'introduction à l'autre extrémité du local par rapport au captage.

Orientation : N = vecteur vitesse normal à la bouche ; I = vecteur vitesse incliné de 45° vers le sol.

Chauffage : simulation effectuée en situation hivernale..

TABLEAU IV

## PERTURBATIONS À L'ENTRÉE DE LA CABINE (INDICE IQ) - DISTURBANCE AT BOOTH ENTRANCE (INDEX IQ)

$V_i$ (m.s <sup>-1</sup> ) Position Orientation Chauffage	11,1 P1		P1		5,6 P2		P3	N	2,8 P1 Oui		0,85 P1		
	N	I	N	I	N	I	N		I	N	I	Oui	
Distance d = 4 m	4,27	17,98	6,04	0,03	6,14	0,00	0,63	3,47	-	0,00	0,39	0,16	0,1
Distance d = 8 m	4,90	30,43	1,84	0,11	-	-	-	0,00	0,00	0,00	0,13	0,02	-
Distance d = 16 m	11,37	11,50	2,07	0,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-

$V_i$  : vitesse d'introduction.

Position : P1 = au moins une bouche d'introduction face au captage ; P2 = bouche d'introduction décalée vers le centre ; P3 = bouche d'introduction à l'autre extrémité du local par rapport au captage.

Orientation : N = vecteur vitesse normal à la bouche ; I = vecteur vitesse incliné de 45° vers le sol.

Chauffage : simulation effectuée en situation hivernale.

• enfin, pour les cas étudiés, il ne semble pas que le chauffage produise une modification des résultats.

#### 4.4. Application de la théorie des jets [9 à 13]

En absence d'informations précises (mesures, simulations, expériences, etc.) sur l'écoulement généré par une installation avec captage localisé, une première estimation consiste à utiliser les lois d'échelle pour évaluer la vitesse engendrée par le système de compensation au regard du captage localisé. Cette vitesse doit rester inférieure à la vitesse théorique du captage de façon à éviter une dégradation de l'efficacité de la ventilation locale.

Il existe de nombreuses références concernant la décroissance des jets :

■ Pour un *jet axisymétrique*, Baturin [10] propose :

$$\frac{V_x}{V_0} = \frac{0,48}{0,145 + (ax/d)}$$

avec  $V_x$  : vitesse maximale à la distance  $x$  de l'origine du jet ;

$V_0$  : vitesse maximale au point d'origine ;

$x$  : distance ;

$d$  : diamètre de la bouche ;

$a$  : coefficient déterminé expérimentalement en fonction de la bouche, variant entre 0,07 et 0,27.

Rajaratnam [9] retient :

$$\frac{V_x}{V_0} = 6,3 / (x/d)$$

■ Pour un *jet plan*, ces mêmes auteurs proposent respectivement :

$$\frac{V_x}{V_0} = \frac{1,2}{(0,41 + ax/b)^{1/2}}$$

$$\frac{V_x}{V_0} = \frac{3,5}{(x/b)^{1/2}}$$

avec  $V_x$  : vitesse maximale à la distance  $x$  de l'origine du jet ;

$V_0$  : vitesse maximale au point d'origine ;

$x$  : distance ;

$b$  : 1/2-hauteur de la bouche ;

$a$  : coefficient déterminé expérimentalement en fonction de la bouche, variant entre 0,09 et 0,18 ; une valeur de 0,10 peut être retenue.

Dans le cas plus complexe du jet tridimensionnel, les études différencient au moins trois zones d'évolution des vitesses :

• le cône de potentiel où la vitesse est constante ;

• la zone caractéristique où la vitesse centrale décroît avec la distance suivant une loi semblable à celle des jets plans bidimensionnels ;

• et enfin, la zone de similitude où le comportement du jet tend vers celui d'un jet axisymétrique.

■ Pour un *jet issu d'une bouche rectangulaire*, on peut retenir un rapport  $V_d/V_0$  de 0,75 à 4 m, 0,39 à 8 m et 0,20 à 16 m, avec  $V_0$  : vitesse à l'origine et  $V_d$  : la vitesse obtenue à la distance  $d$ . Ces valeurs ont été obtenues expérimentalement pour un jet rectangulaire de rapport 4,93. Elles sont issues des travaux de Yevdjevich (1996) et présentées dans [8].

Le tableau V précise donc la vitesse  $V_d$  pour un couple ( $V_0$ ,  $d$ ).

La vitesse moyenne à l'entrée de la cabine est de 0,56 m.s<sup>-1</sup>. Dans le tableau V, cette vitesse n'est pas atteinte pour une vitesse d'injection de 0,9 m.s<sup>-1</sup> et une dis-

tance de 8 ou 16 m. Elle est voisine pour deux autres couples : vitesse d'injection de 0,9 m.s<sup>-1</sup> et distance de 4 m, ou vitesse d'injection de 2,8 m.s<sup>-1</sup> et distance de 16 m. Un système de compensation avec vitesse d'injection de 0,9 m.s<sup>-1</sup> peut être utilisé pour des distances supérieures à 4 m. Dans le cas d'une vitesse d'injection de 2,8 m.s<sup>-1</sup>, la distance ne devrait pas être inférieure à 16 m. Ces limites peuvent être comparées à celles plus précises issues des simulations données au tableau IV dans lequel, pour une vitesse de 0,9 m.s<sup>-1</sup>, la perturbation calculée à 4 m reste dans tous les cas inférieure à 0,4 %, et pour une vitesse d'injection de 2,8 m.s<sup>-1</sup>, aucune perturbation n'est observable à partir d'une distance de 8 m. Par contre, pour la plupart des simulations à vitesses plus élevées, 5,6 ou 11,1 m.s<sup>-1</sup>, la perturbation calculée est importante et l'application de la théorie des jets donne un résultat allant dans le même sens.

#### 4.5. Analyses des écoulements

Les écoulements issus des simulations peuvent être typés en trois groupes. Les simulations pour lesquelles la vitesse d'introduction est supérieure à 10 m.s<sup>-1</sup> révèlent des écoulements complexes et

TABLEAU V

#### VITESSE D'UN JET EN FONCTION DE LA DISTANCE ET DE LA VITESSE D'INJECTION - JET VELOCITY AS A FUNCTION OF DISTANCE AND INPUT VELOCITY [9]

$V_0$ (m.s <sup>-1</sup> )	$d = 4$ m	$d = 8$ m	$d = 16$ m
0,9	0,7	0,3	0,2
2,8	2,1	1,1	0,6
5,6	4,2	2,2	1,1
11,1	8,3	4,3	2,2

variables d'une simulation à l'autre, mais présentent généralement un vortex horizontal visible sur une vue de dessus de la configuration (fig. 13). Pour les autres simulations, il existe également un vortex, mais dans un plan perpendiculaire à l'axe des x, donc observable sur une vue de côté. Pour une vitesse d'introduction horizontale, la rotation du vortex se fait dans le sens du soufflage (fig. 14). Ce tourbillon provoque une dépression au niveau du plafond de la cabine, ce qui entraîne une inversion du flux à l'entrée de celle-ci. Pour un soufflage à 45°, le sens de rotation du vortex est inversé et la dépression au niveau du plafond de la cabine disparaît (fig. 15).

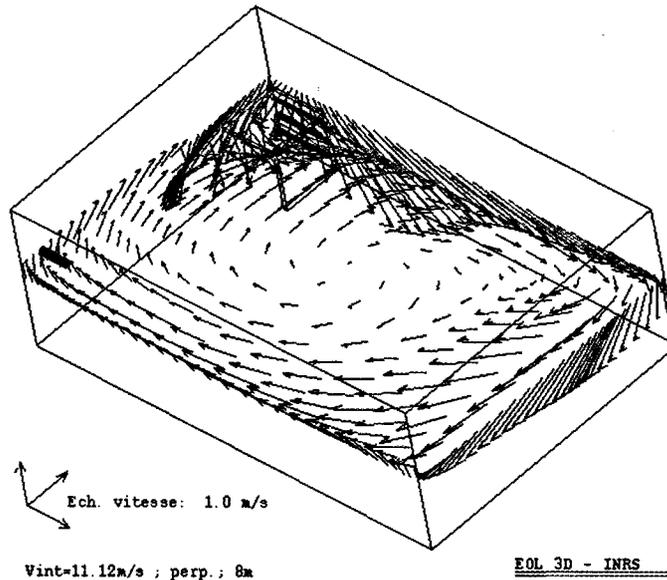
## Discussion - Conclusion

Les guides pratiques de ventilation édités par l'INRS [14, 15] mentionnent généralement l'importance du système de compensation sur la performance globale d'une installation de ventilation, mais ne donnent aucun critère d'évaluation de la compensation, ni aucune règle de conception. Ce travail a posé les premiers jalons de la conception de systèmes d'introduction d'air de compensation dans les ateliers.

Des critères opérationnels pour l'évaluation de ces systèmes en termes de confort au poste de travail et d'évacuation des polluants ont été établis. Ainsi, la fraction de débit d'air recirculé dans le local est un indice pertinent puisque c'est une fonction pratiquement monotone décroissante de la variable vitesse de soufflage. Ces indices pourront être utilisés au cours d'études paramétriques futures pour déceler les solutions optimales.

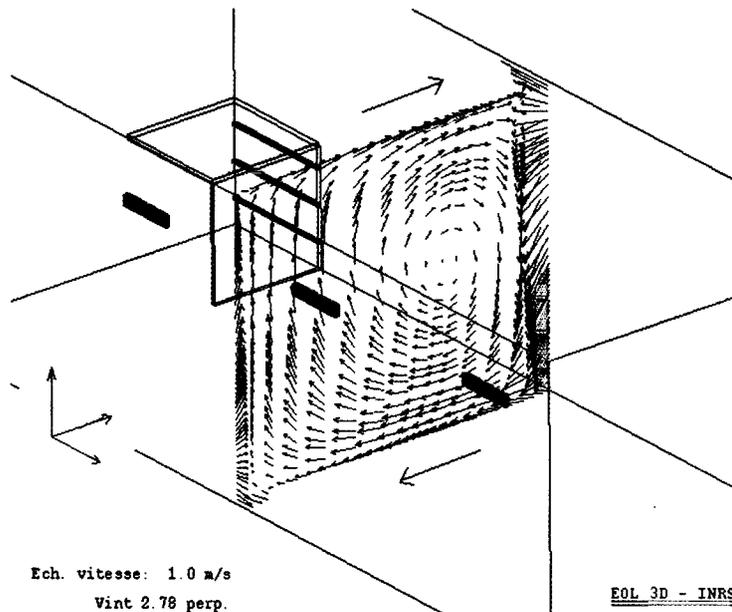
Cette étude a permis d'identifier ou confirmer quelques règles générales permettant d'éviter des erreurs de conception.

En ce qui concerne le confort du personnel, les dimensions de l'atelier et la vitesse d'introduction constituent les deux facteurs prépondérants à retenir. Il est bien évident que la température, supposée constante et uniforme à 20 °C dans la plupart des simulations, joue également un rôle primordial. Pour toutes les configurations étudiées, les résultats les plus satisfaisants concernant ce critère confort du personnel sont obtenus avec des systèmes de compensation pour lesquels la vitesse d'introduction reste inférieure à 1 m.s<sup>-1</sup>.



**Fig. 13. Cabine ouverte - Ecoulement (vue de dessus) - Plan XZ pour Y = 2,47. Système d'introduction à vitesse supérieure à 10 m.s<sup>-1</sup>**

- Open booth - Top view of air flow. Plane XZ for Y = 2.47 - Input velocity greater than 10 m/s



**Fig. 14. Cabine ouverte - Ecoulement (vue de côté) - Plan YZ pour X = 7,50. Vitesse d'introduction normale, inférieure à 10 m.s<sup>-1</sup>**

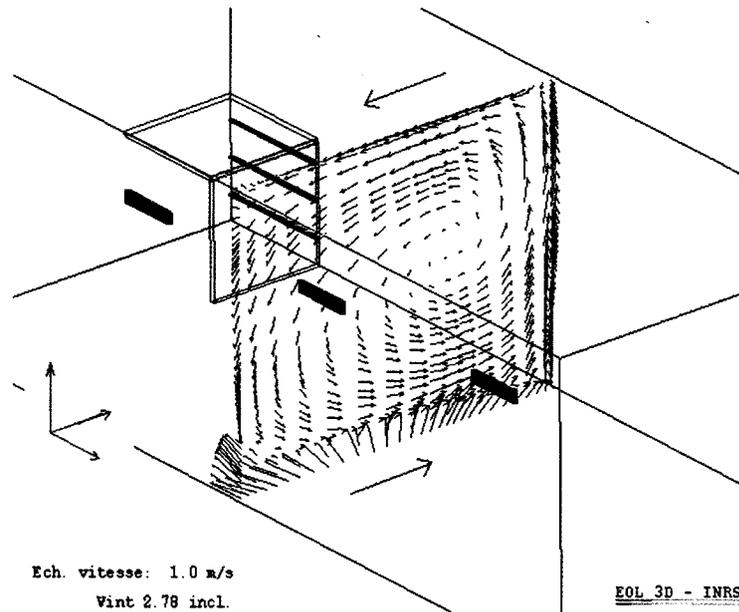
- Open booth - Side view of air flow. Plane YZ for X = 7.50 - Normal input, velocity less than 10 m/s

Dans le cas de la ventilation générale, les simulations montrent que les systèmes utilisant des vitesses élevées en introduction sont mal adaptés à l'assainissement des locaux de travail. Pour des vitesses d'introduction plus faibles, entre 1 et 10 m.s<sup>-1</sup>, le réglage de l'installation influe énormément sur l'écoulement, et donc sur les performances de la ventilation. L'effet Coanda (recollement à la paroi du jet d'introduction) conduit à un résultat parfois contraire à celui escompté. Les systèmes à basse vitesse, inférieure à 1 m.s<sup>-1</sup>, présentent les meilleurs résultats, mais leurs performances sont modifiées par les phénomènes thermiques. La présence d'opérateurs ou de courants d'air indésirables n'ont pas été pris en compte. Enfin, cette étude a révélé les mauvaises performances d'une extraction compensée uniquement par des ouvertures naturelles. Elle a confirmé la supériorité du captage localisé par rapport à une ventilation générale même bien conçue.

En présence d'un captage localisé, les systèmes d'introduction d'air à haute vitesse sont à éviter car, contrairement aux autres systèmes, aucune variation de leurs caractéristiques géométriques ne permet d'en améliorer les performances. Les systèmes à basse vitesse donnent généralement satisfaction. Pour les autres systèmes, une augmentation de la distance bouche / ouverture de la cabine est bénéfique au captage.

Une première approche dans l'évaluation d'un système de compensation en présence d'un captage localisé consiste à utiliser les lois de décroissance de vitesse des jets : lorsque la vitesse déterminée au point de captage, en fonction de la vitesse d'introduction et de la distance introduction/captage, est supérieure à la vitesse théorique de captage, il existe un risque important de détérioration de l'efficacité de la ventilation locale.

Pour trouver des règles plus fines, il faut restreindre le champ d'application et considérer un secteur particulier, comme par exemples, les ateliers de traitement de surface, les laboratoires équipés de sorbonnes, les postes de travail en industrie agro-alimentaire, etc. Dans ce cas, il serait possible de proposer une stratégie d'implantation des machines avec le système de compensation adéquat. Dans l'attente d'une telle méthodologie, seule la simulation numérique permet d'obtenir réellement des installations optimisées.



**Fig. 15. Cabine ouverte - Ecoulement (vue de côté) - Plan YZ pour X = 7,50. Vitesse d'introduction normale, inférieure à 10 m.s<sup>-1</sup>**  
- Open booth - Side view of air flow. Plane YZ for X = 7.50 - Oblique input, velocity less than 10 m/s

## BIBLIOGRAPHIE

1. FONTAINE J.R., RAPP R., BRACONNIER R. - EOL-3D, logiciel de ventilation prévisionnelle. Manuel. Vandœuvre, INRS, 1991, 125 p.
2. Guide pratique de ventilation n° 11 - Sérigraphie. Paris, INRS, 1988, ED 711.
3. Guide pratique de ventilation n° 9 - Cabines et postes de peinture. Paris, INRS, 1991, ED 663 (remplacé par le Guide pratique de ventilation n° 9.1 - Ventilation des cabines d'application par pulvérisation de produits liquides. Paris, INRS, 1999, ED 839, publié dans ce numéro).
4. Guide pratique de ventilation n° 10 - Peinture des matériels de grandes dimensions. Paris, INRS, 1988, ED 713.
5. FONTAINE J.R., BRACONNIER R., RAPP R., AUBERTIN G. - EOL : un logiciel de ventilation prévisionnelle applicable à l'assainissement de l'air des locaux de travail. Cahiers de notes documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail, 1996, 165, ND 2029, pp. 409-424.
6. ISO 7730 - Ambiances thermiques modérées - Détermination des indices PMV et PPD et spécification des conditions de confort thermique. Genève, ISO, 1994.
7. SANDBERG M. - What is ventilation efficiency? Building and Environment, 1981, 16, 2, pp. 123-135.
8. CURD E.F. - Possible applications of wall jets in controlling air contaminants. Annals of Occupational Hygiene, 1981, 24, 1, pp. 133-146.
9. RAJARATNAM N. - Turbulent Jets (Developments in Water Science 5). Amsterdam, Elsevier Scientific Publishing, 1976, 304 p.
10. BATURIN V.V. - Fundamentals of Industrial Ventilation. New York, Pergamon Press, 1972, 486 p.
11. Temperatures in a heated air jet discharged downward. Journal of Heat and Mass Transfer, 1978, 21, pp. 1453-1458.
12. PALENZUELA D., HOFFMANN J.B. - Diffusion de l'air en climatisation individuelle : guide pratique. SEDIT, 1995.
13. VIALLE P. - Etude expérimentale de jets verticaux tridimensionnels en présence de forces de gravité. Thèse. Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique et Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées, Université de Poitiers, 13 décembre 1996.
14. Guide Pratique de Ventilation n° 0 - Principes généraux de ventilation. Paris, INRS, 1989, ED 695.
15. Guide Pratique de Ventilation n° 1 - Assainissement de l'air des locaux de travail. Paris, INRS, 1989, ED 657.
16. SERIEYS J.C., CORNU P. et coll. - Améliorer le fonctionnement aéraulique d'une aire ventilée avec paroi et compensation mécanique. Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail, 1999, 176, ND 2111, pp. 17-33.

## DESCRIPTIFS DES SIMULATIONS - ATELIER DE SÉRIGRAPHIE

- 1/ L'introduction de l'air de compensation se fait non pas mécaniquement, mais naturellement par deux ouvertures (portes) proches l'une de l'autre. La première est située sur le côté droit du local, et la seconde sur la face avant. Leur surface respective est de  $2 \times 2 \text{ m}^2$  et  $1 \times 2 \text{ m}^2$ .
- 2/ La gaine d'introduction est remplacée par deux aérothermes, un de chaque côté du local. La vitesse d'introduction est de  $8,8 \text{ m.s}^{-1}$ , avec une orientation du vecteur vitesse vers le sol, et vers les machines.
- 3/ Le vecteur vitesse à l'introduction est perpendiculaire à la bouche.
- 4/ Le vecteur vitesse à l'introduction est incliné vers le plafond (simulation identique à la simulation n° 3, sauf inclinaison). A cette simulation correspond la configuration initiale.
- 5/ Le vecteur vitesse à l'introduction est incliné vers le sol (simulation identique à la simulation n° 3, sauf inclinaison).
- 6/ Le vecteur vitesse à l'introduction est incliné vers le sol. La température de la face supérieure de chaque machine à sérigraphie est fixée à  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  (simulation identique à la simulation n° 5, sauf température).
- 7/ Le débit total mis en jeu est ici divisé par 3. Les vitesses sont de  $1,12 \text{ m.s}^{-1}$  en introduction, et de  $0,9 \text{ m.s}^{-1}$  à l'extraction.
- 8/ La hauteur des huit bouches d'introduction est multipliée par trois. La vitesse à l'introduction est donc de  $1,13 \text{ m.s}^{-1}$ , avec une orientation du vecteur vers le sol (simulation identique à la simulation n° 5, sauf vitesse).
- 9/ Les huit bouches d'introduction sont remplacées par une bouche unique de  $16 \text{ m} \times 0,12 \text{ m}$ . La vitesse d'introduction est de  $1,12 \text{ m.s}^{-1}$ . Le vecteur vitesse est orienté vers le sol.
- 10/ Les bouches d'introduction, mais aussi d'extraction, sont remplacées par une bouche unique de dimensions respectives  $16 \text{ m} \times 0,12 \text{ m}$  et  $16 \text{ m} \times 0,10 \text{ m}$ , avec des vitesses de  $1,12 \text{ m.s}^{-1}$  et  $1,35 \text{ m.s}^{-1}$ , le vecteur vitesse étant orienté vers le sol à l'introduction (simulation identique à la simulation n° 9, sauf l'extraction).
- 11/ L'introduction est assurée par une bouche large verticale de  $16 \text{ m} \times 0,30 \text{ m}$ . La vitesse d'introduction est de  $0,45 \text{ m.s}^{-1}$ , normale à la bouche.
- 12/ L'introduction est assurée par une bouche large verticale de  $16 \text{ m} \times 0,30 \text{ m}$ . La vitesse d'introduction est de  $0,45 \text{ m.s}^{-1}$ , normale à la bouche. La température de la face supérieure de chaque machine à sérigraphie est fixée à  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  (simulation identique à la simulation n° 11, sauf température).
- 13/ L'introduction est assurée par une bouche large verticale de  $16 \text{ m} \times 0,30 \text{ m}$ . La vitesse d'introduction est de  $0,45 \text{ m.s}^{-1}$ , avec orientation du vecteur vers le sol (simulation identique à la simulation n° 11, sauf inclinaison).
- 14/ L'introduction est assurée par une bouche large de  $16 \text{ m} \times 0,30 \text{ m}$ , placée sur la face inférieure de la gaine. La vitesse d'introduction est de  $0,45 \text{ m.s}^{-1}$ , avec orientation du vecteur vers le sol (simulation identique à la simulation n° 13, sauf emplacement de la bouche).
- 15/ L'introduction est assurée par une bouche large de  $16 \text{ m} \times 0,30 \text{ m}$ , placée sur la face inférieure de la gaine. La vitesse d'introduction est de  $0,45 \text{ m.s}^{-1}$ , avec orientation du vecteur vers le sol. La température de la face supérieure de chaque machine à sérigraphie est fixée à  $250 \text{ }^\circ\text{C}$ . L'extraction s'effectue, en partie par les huit bouches d'extraction, et par un captage localisé sur chaque machine ; celui-ci est constitué d'un capot enveloppant de  $0,40 \text{ m}$  de haut, ouvert sur l'avant, avec aspiration à l'arrière de la machine. La vitesse de captage est  $1,55 \text{ m.s}^{-1}$  aux bouches, et de  $0,30 \text{ m.s}^{-1}$  au captage localisé, ce qui correspond respectivement aux débits d'extraction de  $4\,550 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$  et  $3\,326 \text{ m}^3.\text{h}^{-1}$ .
- 16/ L'introduction est assurée par deux bouches larges de  $16 \text{ m} \times 0,50 \text{ m}$  et  $16 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ . La première est placée sur la face verticale de la gaine, la seconde sur la face inférieure. La vitesse d'introduction est de  $0,09 \text{ m.s}^{-1}$ , avec une inclinaison du vecteur vers le sol.
- 17/ La gaine d'introduction est de section carrée de  $0,5 \text{ m}$ . Elle est déplacée par rapport à sa position d'origine, et se trouve à  $2 \text{ m}$  de la face avant du local. Trois bouches de dimensions  $16 \text{ m} \times 0,50 \text{ m}$  assurent l'introduction. La vitesse est de  $0,09 \text{ m.s}^{-1}$ , normale aux bouches.
- 18/ La gaine d'introduction est de section carrée de  $0,5 \text{ m}$ . Elle est déplacée par rapport à sa position d'origine, et se trouve à  $4 \text{ m}$  de la face avant du local. Trois bouches de dimensions  $16 \text{ m} \times 0,50 \text{ m}$  assurent l'introduction. La vitesse est de  $0,09 \text{ m.s}^{-1}$ , normale aux bouches (simulation identique à la simulation n° 17, sauf emplacement).
- 19/ La gaine d'introduction est de section carrée de  $0,5 \text{ m}$ . Elle est déplacée par rapport à sa position d'origine, et se trouve à  $6 \text{ m}$  de la face avant du local. Trois bouches de dimensions  $16 \text{ m} \times 0,50 \text{ m}$  assurent l'introduction. La vitesse est de  $0,09 \text{ m.s}^{-1}$ , normale aux bouches (simulation identique à la simulation n° 17, sauf emplacement).
- 20/ L'introduction est assurée par deux bouches larges de  $16 \text{ m} \times 0,50 \text{ m}$  et  $16 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ . La première est placée sur la face verticale de la gaine, la seconde sur la face inférieure. La vitesse d'introduction est de  $0,09 \text{ m.s}^{-1}$ , avec une inclinaison du vecteur vers le sol. L'extraction se fait par une bouche unique de  $16 \text{ m} \times 0,1 \text{ m}$ , avec une vitesse de  $1,35 \text{ m.s}^{-1}$  (simulation identique à la simulation n° 11, sauf extraction).
- 21/ L'introduction est assurée par deux bouches larges de  $16 \text{ m} \times 0,50 \text{ m}$  et  $16 \text{ m} \times 1 \text{ m}$ . La première est placée sur la face verticale de la gaine, la seconde sur la face inférieure. La vitesse d'introduction est de  $0,09 \text{ m.s}^{-1}$ , avec une inclinaison du vecteur vers le sol. La température de la face supérieure de chaque machine à sérigraphie est fixée à  $250 \text{ }^\circ\text{C}$  (simulation identique à la simulation n° 16, sauf température).

## ANNEXE

**DESCRIPTIFS DES SIMULATIONS - AIRE DE PEINTURE**

1/ Cette simulation correspond à la configuration initiale avec équilibre entre les débits d'introduction et d'extraction, vitesse d'injection aux buses de  $15 \text{ m.s}^{-1}$ , et température à l'introduction égale à celle de l'ambiance.

2/ Les débits d'introduction et d'extraction sont égaux, avec une vitesse d'injection aux buses de  $15 \text{ m.s}^{-1}$ , et une différence de  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  entre la température à l'introduction et la température du local.

3/ Les débits d'introduction et d'extraction sont égaux avec une vitesse d'injection aux buses de  $15 \text{ m.s}^{-1}$ , et une différence de  $10 \text{ }^\circ\text{C}$  entre la température à l'introduction et la température du local.

4/ Le débit d'introduction aux caissons est divisé par trois avec une vitesse d'introduction aux caissons de  $0,34 \text{ m.s}^{-1}$ , mais conservation de la vitesse de  $15 \text{ m.s}^{-1}$  aux buses, et une différence de  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  entre la température à l'introduction et la température du local.

5/ Le débit d'introduction aux caissons est divisé par trois avec une vitesse d'introduction aux caissons de  $0,34 \text{ m.s}^{-1}$ , mais conservation de la vitesse de  $15 \text{ m.s}^{-1}$  aux buses.

6/ La vitesse à l'introduction est homogène, y compris aux buses, avec donc une valeur de  $1,87 \text{ m.s}^{-1}$  pour conserver l'équilibre des débits, les autres conditions étant identiques à la simulation n° 1.

7/ Le débit d'introduction aux caissons est divisé par trois avec vitesse homogène en introduction de  $0,62 \text{ m.s}^{-1}$ , y compris aux buses.

8/ Le débit d'introduction aux caissons est divisé par trois avec vitesse homogène en introduction de  $0,62 \text{ m.s}^{-1}$ , y compris aux buses, et une différence de  $35 \text{ }^\circ\text{C}$  entre la température à l'introduction et la température du local.