

# SIMULATION NUMÉRIQUE DES ÉCOULEMENTS À L'INTÉRIEUR DE CABINES DE PEINTURE AVEC FOSSE VENTILÉE

- Cabine de peinture
- Pulvérisation
- Fosse
- Ventilation prévisionnelle

► Robert BRACONNIER,  
INRS, Département Ingénierie des procédés

## DIGITAL AIRFLOW SIMULATION IN PAINTING BOOTHS WITH VENTILATED PITS

Painting booths with pits are used to apply paint by spraying onto the undersides of supports, which cannot be mechanically turned over. This study involved applying digital airflow simulation methods using ventilation forecasting software to analyse air movements and pollutant dispersion within a booth, when painting the underside of an HGV trailer chassis. Two support models were considered, namely an open support (without trailer bed) and a closed support (with trailer bed). Performance characteristics of two types of ventilation were compared for each support model: ascending vertical ventilation and descending vertical ventilation. Airflow structure within the paint displacement zone was studied for different booth ventilation operating conditions. Simulations indicate, in particular, that there are testing configurations in which the painter can find himself downstream of the source in certain spraying positions.

- Painting booth
- Spraying
- Pit
- Ventilation forecasting

Les cabines de peinture avec fosse sont utilisées pour l'application de peinture par pulvérisation sur la face inférieure de subjectiles dont le retournement mécanique est impossible. Cette étude a utilisé les techniques de simulation numérique des écoulements à l'aide d'un logiciel de ventilation prévisionnelle pour analyser les mouvements de l'air et la dispersion des polluants dans une cabine lors de la peinture du dessous du châssis d'une remorque de poids lourd. Deux modèles de subjectile ont été considérés : subjectile ajouré (sans plateau) et subjectile plein (avec plateau). Pour chaque modèle, les performances de deux types de ventilation de la fosse ont été comparées : ventilation verticale ascendante et ventilation verticale descendante. La structure des écoulements dans la zone d'évolution du peintre a été étudiée pour différentes conditions de fonctionnement aéraulique de la cabine. Les simulations indiquent en particulier qu'il existe des configurations d'essai dans lesquelles le peintre peut, pour certaines positions de pistelage, se retrouver en aval de la source.

Certaines cabines de peinture comportent une fosse longitudinale qui permet d'accéder à la face inférieure de subjectiles (objets à peindre) dont le retournement mécanique est impossible. Elles peuvent, par exemple, être utilisées pour l'application de peinture par pulvérisation sur le dessous des châssis de poids lourds. Cette fosse doit être ventilée pour éviter l'accumulation des polluants. Le Guide Pratique de Ventilation n° 9.1 [1], document de référence pour la conception et le contrôle des cabines de peinture, recommande que cette ventilation soit dirigée verticalement, mais souligne la nécessité d'améliorer notre compréhension des écoulements dans ce type de cabine par la conduite d'études spécifiques.

L'objectif de cette étude est d'apporter des éléments techniques sur la conception de la ventilation des fosses des

cabines de peinture. Il s'agit en particulier de comparer les performances de deux types de ventilation de la fosse :

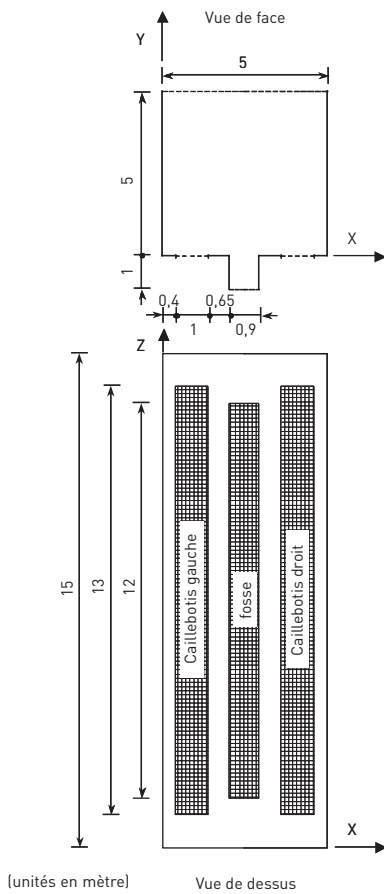
- ventilation verticale ascendante obtenue par introduction d'air neuf au travers d'un caillebotis en fond de fosse ;
- ventilation verticale descendante obtenue par extraction d'air au travers de ce caillebotis.

Il s'agit également d'apporter une aide au choix des vitesses d'air à mettre en œuvre en fond de fosse.

L'analyse des différentes configurations de ventilation a été effectuée par simulation numérique des écoulements à l'aide d'un logiciel de ventilation prévisionnelle. Ce type de logiciel utilise en entrée des données géométriques (positions des parois, obstacles, sources de polluant, etc.) et aérauliques (débits, vitesses dans les ouvertures, etc.).

FIGURE 1

Schéma de la cabine vide  
Diagram of empty booth



Il fournit en sortie les valeurs des composantes de la vitesse d'air et les valeurs de la concentration en polluant en tous les nœuds d'un maillage tridimensionnel. L'évaluation des performances relatives des diverses configurations a été réalisée par comparaison des champs de vitesse et des cartes de répartition du polluant calculés par le logiciel de simulation.

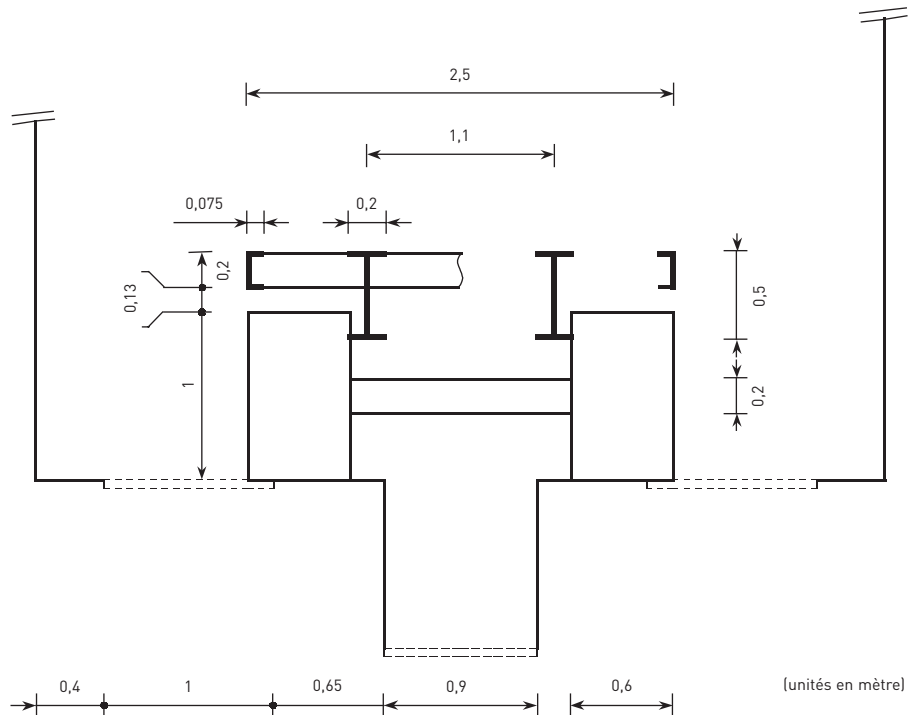
PRÉSENTATION  
DES CONFIGURATIONS  
ÉTUDIÉES

GÉOMÉTRIE DE LA CABINE

La cabine de peinture étudiée (cf. Figure 1) a les dimensions intérieures suivantes : longueur 15 m, largeur 5 m et hauteur 5 m. Elle ne possède pas

FIGURE 2

Vue de face du subjectile : le plateau et les traverses ne sont pas représentés dans la moitié droite  
Front view of support: trailer bed and cross-joists excluded from right half



de pans coupés. Elle est munie en son centre d'une fosse de longueur 12 m, de largeur 0,9 m et de profondeur 1 m. Les marches d'accès à la fosse sont réalisées en caillebotis et ne sont pas retenues en tant qu'obstacles à l'écoulement.

L'air est introduit sur la totalité du plafond de la cabine et est extrait par deux caillebotis au sol de longueur 13 m et de largeur 1 m placés à 0,4 m des parois latérales et à 0,65 m des bords de la fosse (cf. Figures 1 et 2). Un caillebotis occupe également le fond de la fosse. Deux configurations ont été étudiées :

- extraction d'air au travers de ce caillebotis (ventilation de la fosse verticale descendante) ;
- introduction d'air au travers de ce caillebotis (ventilation de la fosse verticale ascendante).

Pour faciliter les repérages dans la cabine, on convient de munir celle-ci d'un système d'axes orthonormé XYZ dont l'origine est placée au sol dans un angle de la cabine. L'axe X est horizontal le long de la largeur de la cabine, l'axe Z est horizontal dans le sens de la longueur et l'axe Y est vertical ascendant (cf. Figure 1).

GÉOMÉTRIE DU SUBJECTILE

La peinture est appliquée sur le dessous du châssis d'une remorque de poids lourd (cf. Figures 2 et 3). Le châssis repose à l'arrière sur huit roues fixées sur deux essieux et à l'avant sur des vérins non modélisés. Il est centré par rapport à la fosse et a, hors tout, une longueur de 11,1 m et une largeur de 2,5 m.

L'ossature du châssis est formée de quatre poutrelles longitudinales de longueur 11,1 m. Les deux poutrelles latérales sont des profilés en U de hauteur 0,2 m et de largeur 0,075 m. Les deux poutrelles internes sont des profilés en I de hauteur d'âme 0,5 m et de largeur d'ails 0,2 m. L'entraxe entre les deux poutrelles internes est égal à 1,1 m. Ces quatre poutrelles longitudinales sont reliées par 23 traverses de longueur 2,5 m, de section droite rectangulaire, ayant une hauteur de 0,2 m et une largeur de 0,1 m. L'espace libre entre deux traverses consécutives est égal à 0,4 m.

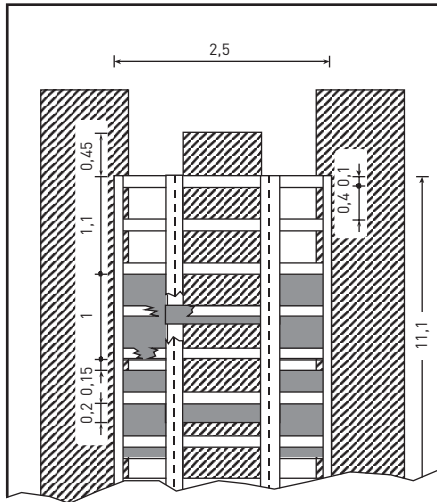
Deux configurations de châssis ont été étudiées :

- châssis sans plateau (subjectile ajouré : 62 % de la surface horizontale

FIGURE 3

Vue de dessus de l'extrémité arrière du subjectile

View from above of support rear end



(unités en mètre)

supérieure est ouverte au passage de l'air) ;

■ châssis avec un plateau de dimensions 11,1 m par 2,5 m (subjectile plein).

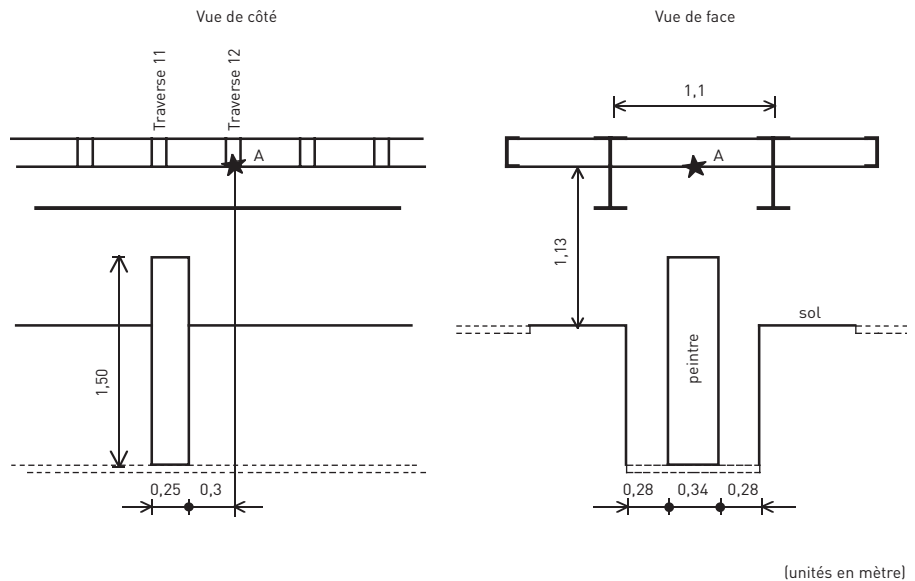
À chaque extrémité de chaque essieu est fixé un ensemble de deux roues. Ces deux roues sont enveloppées dans un emballage de protection et l'obstacle ainsi créé peut être approximé par un parallélépipède rectangle de hauteur 1 m, de largeur 1 m et d'épaisseur (dans la direction de l'essieu) égale à 0,6 m. Le bord externe des roues est aligné verticalement avec le bord du châssis ce qui conduit à un empiètement des roues extérieures sur les caillebotis au sol égal à 0,15 m, soit une demi-épaisseur de roue.

Dans le sens longitudinal, le bord arrière des roues du deuxième essieu est placé à 1,1 m de l'extrémité du châssis et l'espace libre entre les bords des roues des deux essieux est fixé à 0,15 m. Les essieux sont approximés par des parallélépipèdes à base carrée d'arête 0,2 m.

La hauteur entre le sommet des roues et la face inférieure des poutrelles latérales ou des traverses est égale à 0,13 m. La hauteur du plateau par rapport au sol est par conséquent égale à 1,33 m.

FIGURE 4

Position de pistelage n° 1  
Spraying position n° 1



(unités en mètre)

Par convention, les traverses seront numérotées dans la suite de 1 à 23 en commençant par l'extrémité du châssis opposée aux roues.

### POSITIONS DE PISTORAGE

Les simulations ont été effectuées pour trois positions de pistorage sur le dessous du subjectile, plein ou ajouré. Par position de pistorage, on entend l'ensemble des données géométriques relatives :

- à la position du point d'application de la peinture ;
- à la position du peintre.

Les positions de pistorage 1 (centrale) et 3 (proche de l'avant du subjectile) sont éloignées des roues et des essieux et correspondent donc à des zones dénuées d'obstacles latéraux aux écoulements d'air. La position de pistorage 2, au contraire, est située entre les deux essieux, donc dans une zone bordée latéralement par les roues. Les positions 2 et 3 sont symétriques par rapport au plan transversal médian de la cabine,  $Z = 7,5$  mètres.

#### Position de pistorage n° 1 (centrale)

Le point d'application n° 1, repéré par la lettre A sur la Figure 4, est placé au milieu de la face inférieure de la traverse

centrale du châssis (traverse n° 12). Il est donc situé au centre de la fosse, à une distance de 7,5 mètres par rapport à la paroi avant de la cabine.

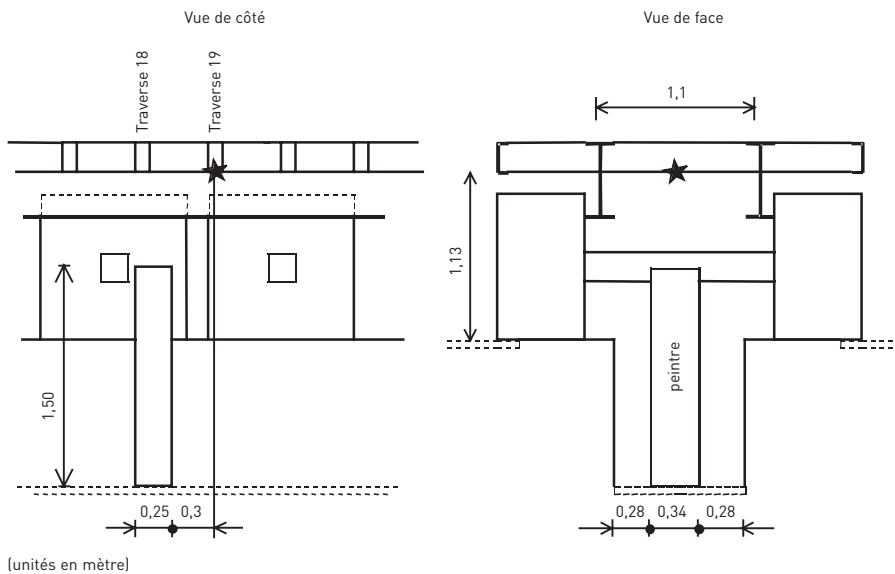
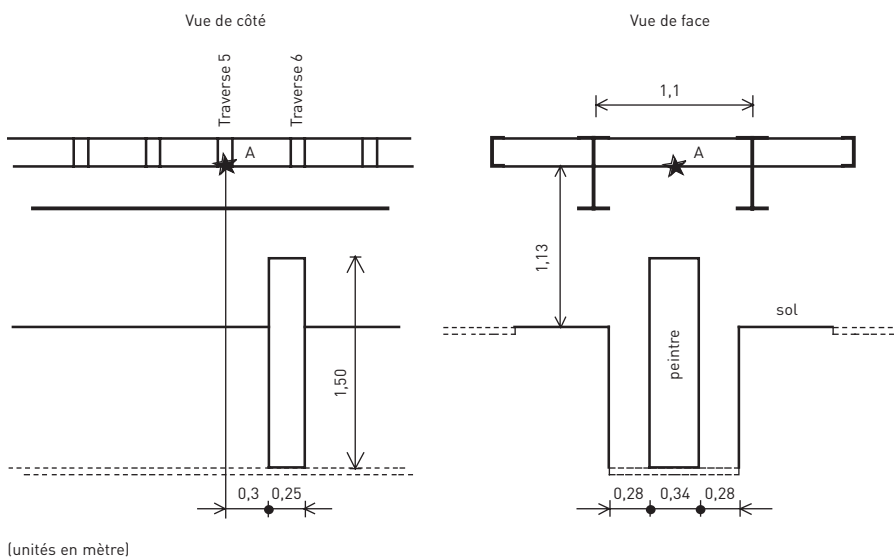
L'influence du peintre sur les écoulements d'air a été prise en compte sous la forme, très simplifiée, d'un obstacle parallélépipédique, sans tête, de hauteur 1,5 mètre, de largeur 0,34 mètre et d'épaisseur 0,25 mètre, reposant sur le fond de la fosse. Ces valeurs correspondent respectivement aux cotes anthropométriques moyennes suivantes (sujets masculins) :

- hauteur à la base du cou ;
- largeur aux hanches ;
- profondeur à hauteur de la poitrine.

Pour la position de pistorage n° 1, le peintre est placé perpendiculairement à l'axe longitudinal de la fosse. Il est centré par rapport à la largeur de la fosse et est tourné vers les roues. Son dos est placé à la verticale de la face avant de la traverse n° 11 (cf. Figure 4).

#### Position de pistorage n° 2 (entre les essieux)

Le point d'application n° 2, repéré par la lettre A sur la Figure 5, est placé au milieu de la face inférieure de la traverse n° 19, située approximativement à mi-distance des deux essieux. Il se trouve à 2,05 mètres de l'extrémité arrière du subjectile.

**FIGURE 5****Position de pistelage n° 2**  
**Spraying position n° 2****FIGURE 6****Position de pistelage n° 3**  
**Spraying position n° 3**

Pour la position de pistelage n° 2, le peintre, schématisé par le même obstacle parallélépipédique que précédemment, est situé entre les deux essieux et est tourné vers l'arrière du subjectile. Il reste placé perpendiculairement à l'axe longitudinal de la fosse et centré par rapport à la largeur de la fosse. Son dos est placé à la verticale de la face avant de la traverse n° 18 (cf. Figure 5).

**Position de pistelage n° 3 (avant)**

Le point d'application n° 3, repéré par la lettre A sur la Figure 6, est placé au milieu de la face inférieure de la traverse n° 5. Il se trouve à 2,05 mètres de l'extrémité avant du subjectile.

Le peintre, schématisé par le même obstacle parallélépipédique que précédemment, est placé perpendiculairement à l'axe longitudinal de la fosse et

est centré par rapport à la largeur de la fosse. Au contraire des deux autres positions, il est tourné vers l'avant du subjectile. Son dos est placé à la verticale de la face arrière de la traverse n° 6 (cf. Figure 6).

**SOURCE DE POLLUANT**

La faisabilité de l'intégration du jet d'air issu du pistolet de pulvérisation dans les simulations d'écoulement a été examinée. Ce jet est émis par des orifices multiples de dimensions très petites par rapport au domaine de calcul constitué par la cabine (de l'ordre du millimètre) et à des vitesses soniques. Aussi, la prise en compte du jet dans les simulations nécessite une modélisation préalable.

La peinture est émise initialement par un orifice situé au centre de la tête de pulvérisation du pistolet sous forme de gouttelettes dont la taille diminue sur le trajet entre le pistolet et le subjectile par évaporation de solvant. La revue bibliographique de CARLTON et FLYNN [2] indique que le diamètre moyen en masse au voisinage des voies respiratoires du peintre,  $d_i$ , varie selon les auteurs et les techniques de mesure entre 3 et 46  $\mu\text{m}$ . Leurs propres expérimentations fournissent pour un pistolet conventionnel un diamètre moyen  $d_i$  compris entre 14 et 19  $\mu\text{m}$ . Les mesures ultérieures de SABTY-DAILY et al [3] donnent un diamètre  $d_i$  variant de 7 à 10  $\mu\text{m}$ . Le diamètre moyen en masse à la sortie du pistolet,  $d_o$ , est estimé par le calcul par CARLTON et FLYNN [2] entre 40 et 65  $\mu\text{m}$ , soit un volume environ 30 fois supérieur. La teneur en produits volatiles dépend de la peinture utilisée : par exemple, pour cinq échantillons de peinture étudiés sur site par TAN et al [4], cette teneur en masse varie entre 11 % et 59 %.

Afin de caractériser l'écoulement d'air devant un pistolet de pulvérisation, des mesures anémométriques ont été effectuées dans le jet d'air issu d'un pistolet pneumatique conventionnel. Elles ont été exécutées le long de l'axe du jet ainsi que dans trois plans orthogonaux encadrant la distance de pistelage. Les résultats sont rapportés à l'Annexe A.

La simulation numérique des écoulements a ensuite été employée pour déterminer, par essais successifs, les caractéristiques initiales d'un jet d'air

utilisable pour modéliser le jet de pisto-  
lage. La recherche a porté sur un jet d'air  
subsonique issu d'un orifice unique,  
plan, de forme simple (rectangulaire) et  
de même débit initial que le jet réel, qui  
posséderait, pour des distances proches  
de la distance de pisto-  
lage, des caracté-  
ristiques voisines de celles du jet expé-  
rimental : vitesse d'air induite et rapport  
d'aspect (propriété définie à l'*Annexe A*).

Le jet de substitution déterminé à  
l'issue de ces essais présente des caracté-  
ristiques initiales défavorables compte  
tenu de la complexité de l'environne-  
ment dans lequel il doit être intégré :  
très grande vitesse initiale, très faible  
largeur de l'orifice et très grand rapport  
d'aspect initial. De plus, il ne modélise  
le jet réel que de manière imparfaite.  
Aussi, a-t-il été décidé d'introduire la  
source de pollution dans les simulations  
sous la forme d'une surface émissive  
passive centrée au point d'impact du jet  
de pisto-  
lage.

La source de polluant est constituée  
d'une surface émissive carrée, d'arête  
0,244 mètre (aire égale à 0,060 m<sup>2</sup>),  
centrée autour du point d'application A  
des *Figures 4 à 6*. Pour les trois positions  
de pisto-  
lage, la source s'étend au-delà du  
subjectile, la largeur d'une traverse étant  
de 0,1 mètre.

Le polluant considéré est gazeux et  
passif (c'est-à-dire sans influence sur  
les propriétés physiques du fluide, en  
particulier, sa masse volumique). Il est  
émis uniformément sur la surface de la  
source et sans vitesse initiale. Son débit  
d'émission est fixé arbitrairement (par  
ajout aux nœuds concernés d'un terme  
source dans l'équation de transport par  
convection-diffusion du polluant, à la  
manière d'un traceur), l'objectif n'étant  
pas de comparer des concentrations  
calculées à des concentrations réelles,  
mais d'étudier la répartition du polluant  
dans l'espace en valeurs relatives pour  
une émission typique constante, de  
manière à évaluer les performances rela-  
tives des diverses configurations de  
ventilation. Une valeur unique du débit  
d'émission a été employée pour toutes  
les simulations. Les concentrations  
calculées sont donc exprimées selon une  
échelle arbitraire, mais identique d'une  
simulation à l'autre.

TABLEAU I

### Conditions de fonctionnement aéraulique de la cabine de peinture Painting booth ventilation operating conditions

|   |                     |                           | A         | B     | C     | F     | D          | E     |
|---|---------------------|---------------------------|-----------|-------|-------|-------|------------|-------|
| Sens de ventilation de la fosse           |                     |                           | Ascendant |       |       |       | Descendant |       |
| Débit introduit total (m <sup>3</sup> /s) |                     |                           | 30        | 30    | 18,81 | 22,05 | 30         | 30    |
| Plafond                                   | 75 m <sup>2</sup>   | Débit (m <sup>3</sup> /s) | 26,76     | 22,44 | 11,25 | 11,25 | 30         | 30    |
|   |                     | Vitesse (m/s)             | 0,36      | 0,30  | 0,15  | 0,15  | 0,4        | 0,4   |
| Fond<br>de fosse                          | 10,8 m <sup>2</sup> | Débit (m <sup>3</sup> /s) | 3,24      | 7,56  | 7,56  | 10,8  | 3,24       | 7,56  |
|   |                     | Vitesse (m/s)             | 0,3       | 0,7   | 0,7   | 1,0   | 0,3        | 0,7   |
| Caillebotis<br>gauche                     | 13 m <sup>2</sup>   | Débit (m <sup>3</sup> /s) | 15        | 15    | 9,40  | 11,02 | 13,38      | 11,22 |
|   |                     | Vitesse (m/s)             | 1,15      | 1,15  | 0,72  | 0,85  | 1,02       | 0,86  |
| Caillebotis<br>droit                      | 13 m <sup>2</sup>   | Débit (m <sup>3</sup> /s) | 15        | 15    | 9,40  | 11,02 | 13,38      | 11,22 |
|   |                     | Vitesse (m/s)             | 1,15      | 1,15  | 0,72  | 0,85  | 1,03       | 0,86  |

TABLEAU II

### Configurations d'essai Testing configurations

| Subjectile   | Position de pisto-<br>lage        | Conditions aérauliques |    |    |    |     |    |
|--------------|-----------------------------------|------------------------|----|----|----|-----|----|
|              |                                   | A                      | B  | C  | F  | D   | E  |
| Ajouré       | Centrale                          | A1                     | B1 | C1 | F1 | D1  | E1 |
| Avec plateau | Centrale                          | A2                     | B2 | C2 | F2 | D2  | E2 |
|              | Entre les essieux<br>Vers l'avant |                        |    |    |    | D22 |    |
|              |                                   |                        |    |    |    | D23 |    |

## CONDITIONS AÉRAULIQUES

Six conditions de fonctionnement  
aéraulique de la cabine ont été utilisées.  
Elles sont repérées dans ce qui suit par  
les lettres A, B, C et F en ventilation  
ascendante de la fosse et D et E en venti-  
lation descendante et sont résumées au  
*Tableau I*. Dans ce tableau, les vitesses  
débitantes indiquées dans les caillebotis  
sont rapportées à l'aire totale de chaque  
caillebotis, avant la prise en compte des  
obstacles posés sur celui-ci : roues ou  
peintre. Les vitesses d'air dans toutes les  
entrées – sorties sont uniformes et  
perpendiculaires aux ouvertures.

Dans les conditions de base (A, B, D  
et E), la cabine est ventilée avec un débit  
total constant de 30 m<sup>3</sup>/s (108 000 m<sup>3</sup>/h),  
ce qui est équivalent à une vitesse de  
0,4 m/s appliquée à la section droite  
horizontale de la cabine vide. Dans les  
variantes C et F, la vitesse de soufflage  
en plafond est réduite à 0,15 m/s. Trois  
vitesses débitantes en fond de fosse sont  
utilisées : 0,3 ; 0,7 et 1,0 m/s. En venti-  
lation de la fosse descendante, le caillebo-  
tis de fond de fosse constitue une sortie

d'air alors qu'en ventilation ascendante,  
il sert à introduire un débit d'air qui est  
prélevé sur celui soufflé en plafond.

## CONFIGURATIONS D'ESSAI

Les écoulements dans la cabine de  
peinture ont été calculés pour les 14  
configurations d'essai résumées au  
*Tableau II*.

Pour chaque condition de fonction-  
nement aéraulique, une simulation a été  
effectuée en position de pisto-  
lage centrale pour le subjectile ajouré (série A1 à F1)  
et pour le subjectile plein (série A2 à F2).  
L'influence de la position du peintre a  
été testée pour le subjectile avec plateau  
et une extraction d'air en fond de fosse  
(variantes D22 et D23 de la configura-  
tion D2).

## MODÉLISATION ET SIMULATION NUMÉRIQUE

Les simulations numériques d'écoulements ont été effectuées à l'aide du logiciel de ventilation prévisionnelle EOL-3d version 3.1 sur des calculateurs SUN et HP. Ce logiciel est décrit en détails à la référence [5]. Il a fait l'objet de plusieurs campagnes de validation expérimentale [6-10]. Les conditions de calcul correspondent à des écoulements stationnaires, incompressibles, isothermes (à 20°C), turbulents et à un polluant gazeux passif. Le modèle de turbulence k- $\epsilon$  standard avec fonctions de paroi a été utilisé. (Ces fonctions de paroi utilisent un profil logarithmique pour les vitesses du fluide et font appel à la relation de von Karman pour la viscosité turbulente. Les valeurs de k et  $\epsilon$  sont fixées en supposant la contrainte de cisaillement constante dans l'épaisseur de la couche limite et un équilibre local entre production et dissipation d'énergie cinétique turbulente [5]).

Dans toutes les configurations d'essai, le problème à traiter possède un plan de symétrie vertical longitudinal (plan X = 2,5 mètres) ce qui permet de limiter le maillage et les calculs à une moitié de la cabine. De plus, pour faciliter le maillage, seules les traverses voisines du point de pistolage sont retenues en tant qu'obstacles : 7 traverses pour la position de pistolage centrale et 9 traverses pour les deux autres positions. De même, les essieux ne sont retenus que lors du pistolage entre les roues arrière. La taille des maillages utilisés s'est élevée à 347 760 nœuds.

La convergence a été atteinte selon la configuration au bout de 470 à 2734 itérations. Par exemple, pour la configuration F2, l'obtention de la convergence a nécessité 1140 itérations et un temps CPU de 45 962 secondes sur un ordinateur SUN E450.

Pour la configuration D2, une simulation supplémentaire a été menée à titre comparatif avec un autre logiciel de mécanique des fluides numérique, FLUENT version 6.1 [11]. Cette comparaison a montré que les champs de vitesse d'air et de concentration en polluant fournis par les deux logiciels étaient très proches (cf. Annexe B).

## RÉSULTATS ET DISCUSSION

Les résultats des simulations d'écoulements sont présentés graphiquement ci-dessous par le tracé dans la demi-cabine limitée par le plan de symétrie longitudinal médian :

- des champs des vecteurs vitesse d'air en projection sur un certain nombre de plans de coupe orthogonaux aux axes de coordonnées ;
- des cartes de concentration en polluant dans le même type de plans.

La zone d'intérêt principale est limitée approximativement par les profilés internes, le dessous des traverses et le sommet de la fosse.

Pour l'analyse, les 14 configurations d'essai sont regroupées en quatre classes selon la nature du subjectile (plein ou ajouré) et le sens de ventilation de la fosse.

### SUBJECTILE AJOURÉ ET VENTILATION DE LA FOSSE DESCENDANTE

Les simulations effectuées pour les configurations avec un subjectile sans plateau et une extraction d'air en fond de fosse (D1 et E1) mettent en évidence un écoulement vertical de l'air qui traverse le subjectile, puis se dirige vers les caillebotis au sol et en fond de fosse. Des sillages localisés apparaissent sous les traverses et les profilés internes. La Figure 7 présente, à titre d'exemple, les vitesses calculées pour la configuration D1 dans le plan de coupe transversal Z = 7,31 mètres, situé entre le peintre et la source de polluant. Les écoulements sont analogues vers l'avant et vers l'arrière du subjectile.

Le peintre est placé dans un écoulement descendant et se trouve sur le trajet du polluant, entre la source et l'extraction. La Figure 8 présente la carte des concentrations en polluant calculées dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres, proche du plan de symétrie de la cabine, pour la configuration D1.

L'augmentation de la vitesse d'extraction en fond de fosse de 0,3 à 0,7 m/s (configuration D1 à configuration E1) se limite à une modification de la répartition du débit total extrait entre la fosse et les caillebotis latéraux (cf. Tableau 1). La forme générale des écoulements dans la zone d'évolution du peintre reste inchangée.

### SUBJECTILE AJOURÉ ET VENTILATION DE LA FOSSE ASCENDANTE

Les Figures 9 à 13 illustrent les champs de vitesse d'air calculés pour les configurations avec un subjectile sans plateau et un soufflage d'air en fond de fosse (A1, B1, C1 et F1). Deux écoulements verticaux antagonistes s'y affrontent : un écoulement descendant issu du plafond et un écoulement ascendant issu de la fosse. A leur point d'arrêt, il se forme un mouvement d'air transversal qui se dirige vers les caillebotis au sol, comme le montrent les Figures 9 à 11, tracées dans le plan de coupe transversal Z = 7,31 mètres, situé entre le peintre et la source de polluant. Le jet ascendant se maintient jusqu'à des hauteurs plus élevées près des extrémités du subjectile (cf. Figures 12 et 13), en particulier au voisinage de l'extrémité arrière grâce à l'effet d'écran latéral apporté par les roues.

La hauteur du point de rencontre entre les deux écoulements verticaux s'accroît avec le rapport vitesse de soufflage en fond de fosse sur vitesse de soufflage au plafond. Aux faibles valeurs (configuration A1), le peintre se trouve dans une région à vitesses descendantes et est placé sur le trajet du polluant, entre la source et le caillebotis d'extraction (cf. Figures 9 et 14). Pour les grands rapports de vitesses de soufflage, l'écoulement ascendant franchit les traverses et évacue le polluant vers le dessus du subjectile, donc à l'opposé du peintre (cf. Figures 11 et 15). Cet écoulement peut alors atteindre certaines parties du plénum, au risque d'entraîner des dépôts sur les filtres.

### SUBJECTILE AVEC PLATEAU ET VENTILATION DE LA FOSSE DESCENDANTE

Dans les configurations avec un subjectile plein et une extraction d'air en fond de fosse (D2, D22, D23 et E2), le plateau obstrue 37 % de l'aire de la section droite horizontale de la cabine. La partie centrale de l'écoulement descendant issu du plafond vient alors impacter sur la face supérieure du subjectile, puis est déviée radialement au-dessus de cette face en direction des bords longitudinaux et transversaux du plateau (cf. Figure 16).

Les simulations révèlent la présence, sous le châssis, de deux écoulements

FIGURE 7

Configuration D1 : projection parallèlement à OZ des vitesses d'air dans le plan transversal Z = 7,31 mètres  
 Configuration D1: air velocity projection parallel to OZ in transverse plane Z = 7.31 m

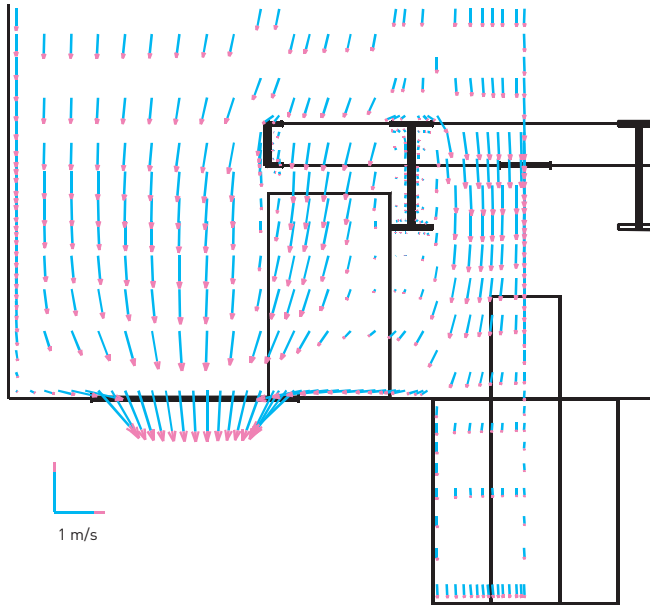


FIGURE 8

Configuration D1 : concentrations en polluant dans le plan longitudinal X=2,48 mètres  
 Configuration D1: pollutant concentrations in longitudinal plane X = 2.48 m

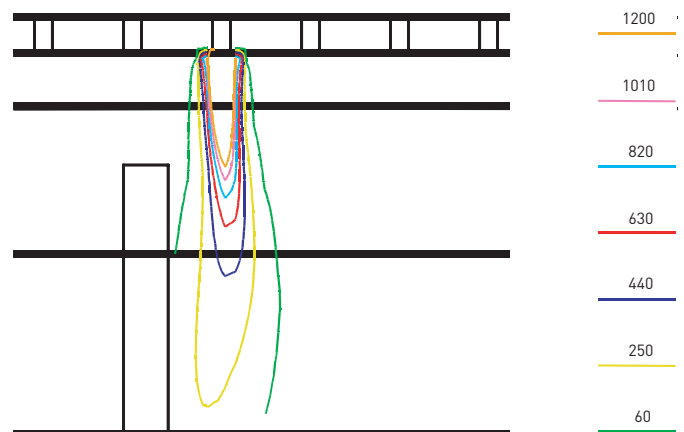


FIGURE 9

Configuration A1 : projection parallèlement à OZ des vitesses d'air dans le plan transversal Z = 7,31 mètres  
 Configuration A1: air velocity projection parallel to OZ in transverse plane Z = 7.31 m

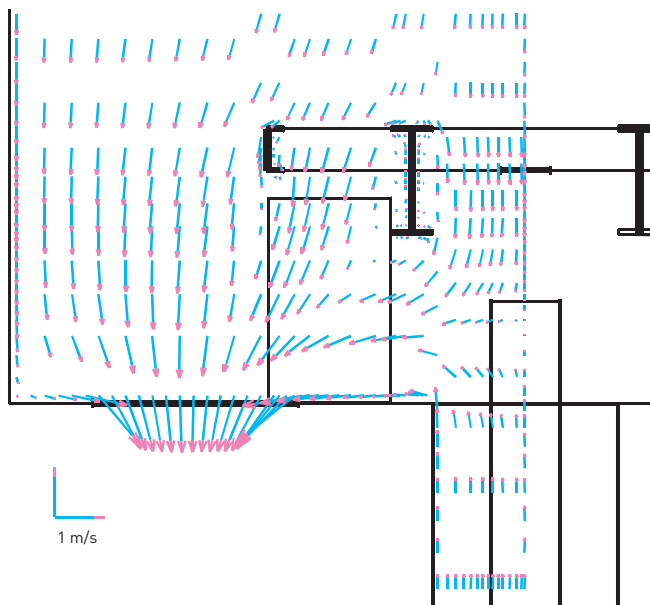
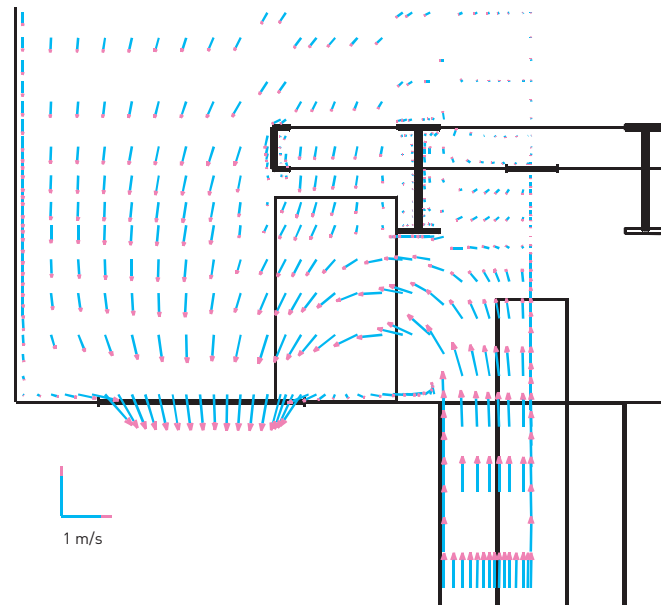


FIGURE 10

Configuration C1 : projection parallèlement à OZ des vitesses d'air dans le plan transversal Z = 7,31 mètres  
 Configuration C1: air velocity projection parallel to OZ in transverse plane Z = 7.31 m



d'air longitudinaux antagonistes issus des extrémités du subjectile et canalisés par les profilés internes. Ces courants horizontaux sont créés par des entrées d'air sous le plateau à l'avant et à l'arrière

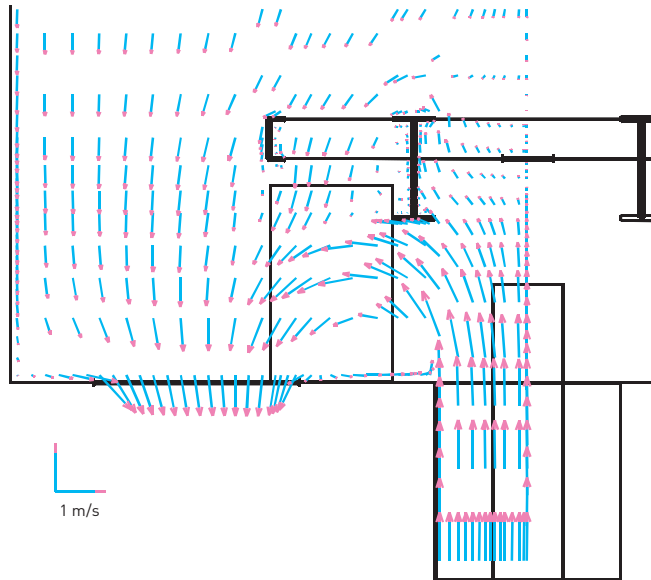
du châssis et se rencontrent au voisinage de la partie médiane du subjectile. Ils se manifestent aussi bien pour une position de pilotage centrale que pour un peintre situé près d'une extrémité, comme

l'illustrent les *Figures 17 à 21* où sont représentées les vitesses calculées dans le plan de coupe longitudinal X = 2,48 mètres, proche du plan de symétrie de la cabine.

**FIGURE 11**

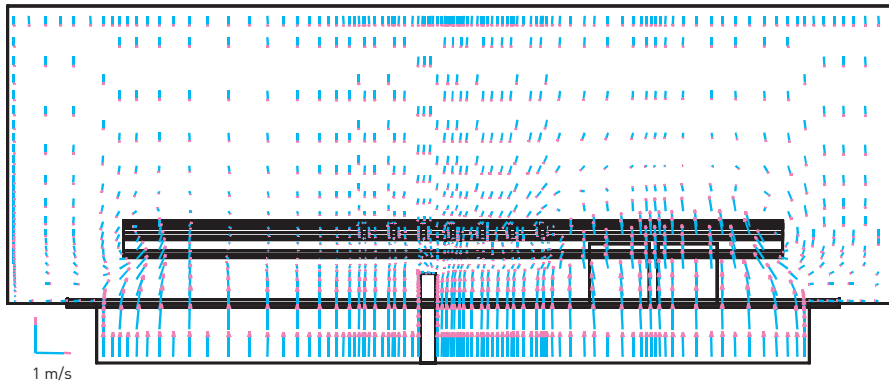
Configuration F1 : projection parallèlement à OZ des vitesses d'air dans le plan transversal Z = 7,31 mètres

Configuration F1: air velocity projection parallel to OZ in transverse plane Z = 7.31 m

**FIGURE 12**

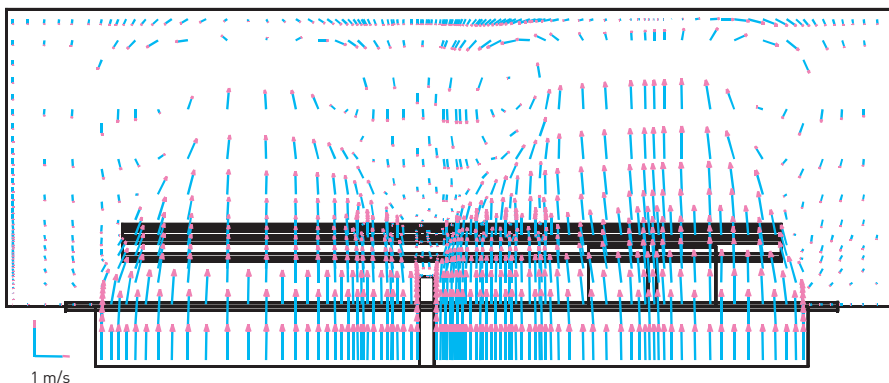
Configuration B1 : projection parallèlement à OX des vitesses d'air dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres

Configuration B1: air velocity projection parallel to OX in longitudinal plane X = 2.48 m

**FIGURE 13**

Configuration F1 : projection parallèlement à OX des vitesses d'air dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres

Configuration F1: air velocity projection parallel to OX in longitudinal plane X = 2.48 m



Pour la configuration D2, il se forme un tourbillon en aval du peintre (cf. Figures 17, 18 et 22). Ce tourbillon n'apparaît plus lorsque la vitesse d'extraction en fond de fosse est augmentée (configuration E2, Figure 21), ou lorsque le pistolage a lieu près des extrémités du châssis (configurations D23 et D22, Figures 19 et 20). Les courants d'air longitudinaux sous le châssis possèdent par ailleurs une composante giratoire secondaire d'axe longitudinal à proximité des extrémités du sujettile (positions de pistolage 2 et 3), composante qui est amortie au voisinage de la partie centrale.

Pour un sujettile plein et une ventilation de la fosse descendante, quelle que soit sa position longitudinale dans la fosse, le peintre peut donc se retrouver, en fonction du sens local du courant d'air horizontal et de la direction dans laquelle il pistole (vers l'avant ou vers l'arrière du châssis), en aval de la source et donc sur le trajet du polluant. Par exemple, pour les simulations effectuées ici, le peintre est placé en amont de la source dans les configurations D2 et E2, et en aval dans les configurations D22 et D23.

### SUBJECTILE AVEC PLATEAU ET VENTILATION DE LA FOSSE ASCENDANTE

Dans les configurations avec un sujettile plein et une introduction verticale d'air en bas de fosse (A2, B2, C2 et F2), l'interposition du plateau sur le trajet de l'écoulement descendant issu du plafond entraîne également un effet d'impact sur la face supérieure du sujettile et la formation au-dessus de cette face de mouvements radiaux en direction des bords du plateau.

Les résultats des simulations (cf. Figures 23 à 26) mettent comme précédemment en évidence la présence sous le châssis de courants d'air longitudinaux canalisés par les profilés internes. Aux faibles valeurs du rapport vitesse de soufflage en fond de fosse sur vitesse de soufflage en plafond (configuration A2, Figures 23 et 26), ces écoulements horizontaux restent dus à des entrées d'air sous les extrémités du plateau. Pour les grandes valeurs de ce rapport (configuration C2 : Figure 25 et configuration F2), l'air en provenance du plafond est repoussé à ces deux extrémités, mais il subsiste des courants longitudinaux



FIGURE 14

Configuration A1 : concentrations en polluant dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres  
 Configuration A1: pollutant concentrations in longitudinal plane X = 2.48 m

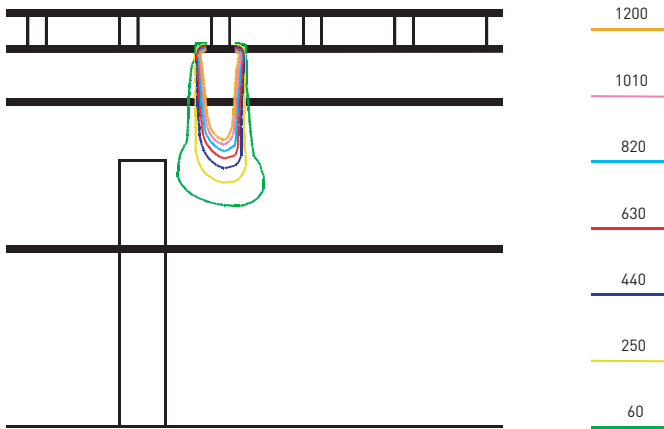
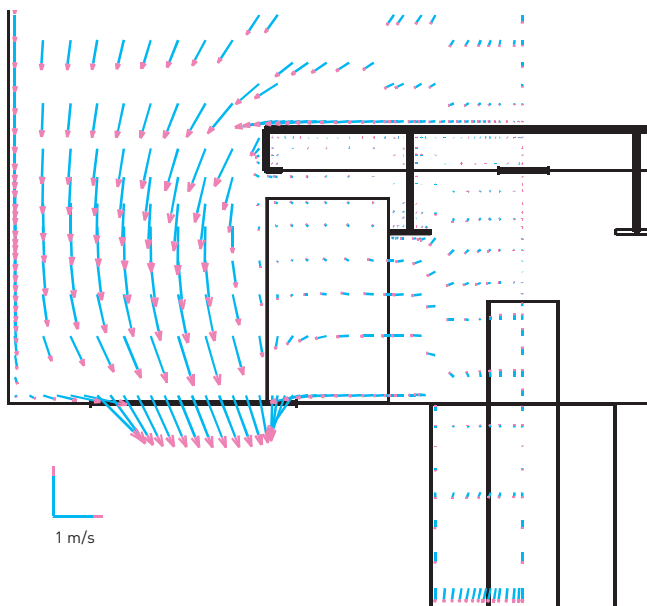


FIGURE 16

Configuration D2 : projection parallèlement à OZ des vitesses d'air dans le plan transversal Z = 7,31 mètres  
 Configuration D2: air velocity projection parallel to OZ in transverse plane Z = 7.31 m



créés par l'impact sur la face inférieure du plateau de la partie de l'écoulement ascendant qui est canalisée latéralement par les roues du subjectile. Aux valeurs intermédiaires du rapport de vitesses (configuration B2 : *Figure 24*), un courant d'air horizontal dû à une introduction d'air sous l'avant du châssis s'oppose à un courant horizontal contraire généré au voisinage des roues arrière.

Pour un subjectile plein et une ventilation de la fosse ascendante, le peintre peut donc se retrouver, en fonction du sens local du courant d'air horizontal et de la direction dans laquelle il pistole, en aval de la source et donc sur le trajet du polluant. C'est le cas pour les quatre exemples simulés dans cette étude (position de pistilage n° 1).

FIGURE 15

Configuration F1 : concentrations en polluant dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres  
 Configuration F1: pollutant concentrations in longitudinal plane X = 2.48 m

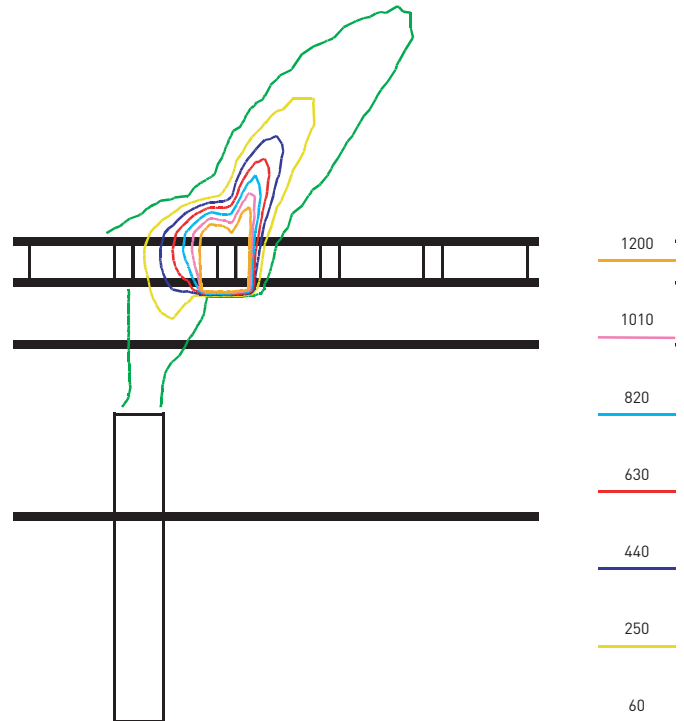


FIGURE 17

Configuration D2 : projection parallèlement à OX des vitesses d'air dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres  
Configuration D2: air velocity projection parallel to OX in longitudinal plane X = 2.48 m

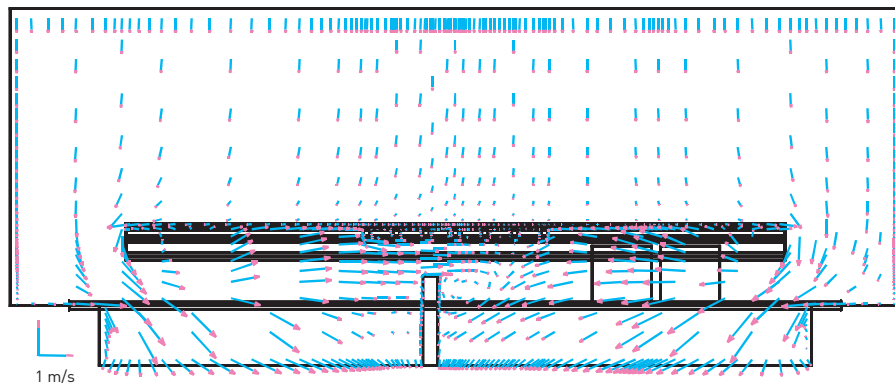
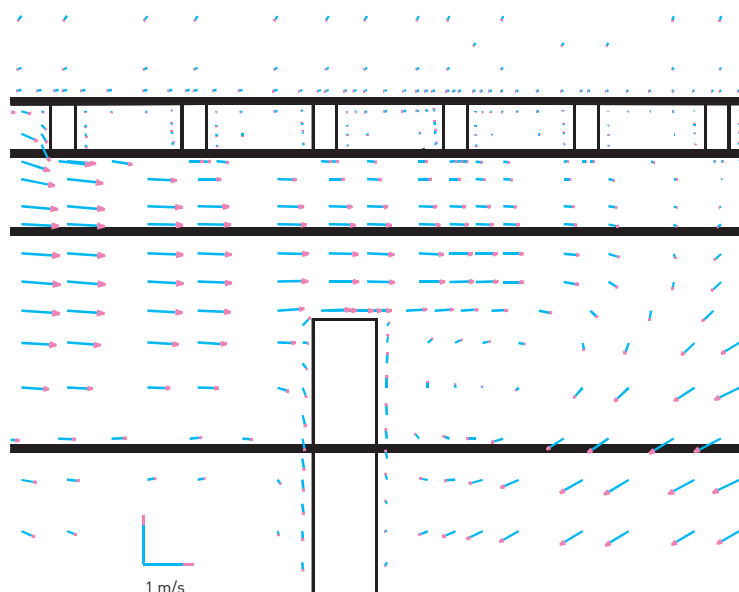


FIGURE 18

Configuration D2 : projection parallèlement à OX des vitesses d'air dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres ; zoom au voisinage du peintre  
Configuration D2: air velocity projection parallel to OX in longitudinal plane X = 2.48 m; zoom near to painter



## CONCLUSION

Les simulations numériques effectuées dans cette étude à l'aide du logiciel EOL-3d ont permis d'illustrer l'apport de la ventilation prévisionnelle pour l'analyse des écoulements d'air dans un système complexe. Les résultats obtenus ont été confirmés sur une configuration grâce à une simulation supplémentaire mettant en œuvre un logiciel différent (FLUENT).

Les calculs ont porté sur des subjectiles de forme volontairement simple : châssis entièrement ajouré, ou entièrement plein. Ils ont permis d'apporter des indications importantes sur la structure des écoulements dans la zone d'évolution du peintre en fonction de la nature du subjectile, du sens de ventilation de la fosse et des conditions de fonctionnement aéraulique de la cabine.

Pour un subjectile ajouré et une ventilation de la fosse descendante, le peintre est placé dans un écoulement descendant et se trouve sur le trajet du polluant, entre la source et l'extraction. Pour un subjectile ajouré et une ventilation de la fosse ascendante, le peintre se trouve dans une région à vitesses descendantes ou ascendantes en fonction du rapport vitesse de soufflage en fond de fosse sur vitesse de soufflage au plafond. Pour un subjectile avec plateau, quelle que soit sa position longitudinale dans la cabine, le peintre peut se retrouver, en fonction du sens local du courant d'air horizontal et de la direction dans laquelle il pistole, en aval de la source et donc sur le trajet du polluant, que la ventilation de la fosse soit descendante ou ascendante. Ces écoulements apparaissent donc notablement différents de ceux des cabines de peinture fermées classiques dont une fonction est de placer le peintre dans un écoulement vertical unidirectionnel.

Reçu le : 18/04/2005  
Révisé le : 06/02/2006  
Accepté le : 10/02/2006

FIGURE 19

Configuration D23 : projection parallèlement à OX des vitesses d'air dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres  
Configuration D23: air velocity projection parallel to OX in longitudinal plane X = 2.48 m

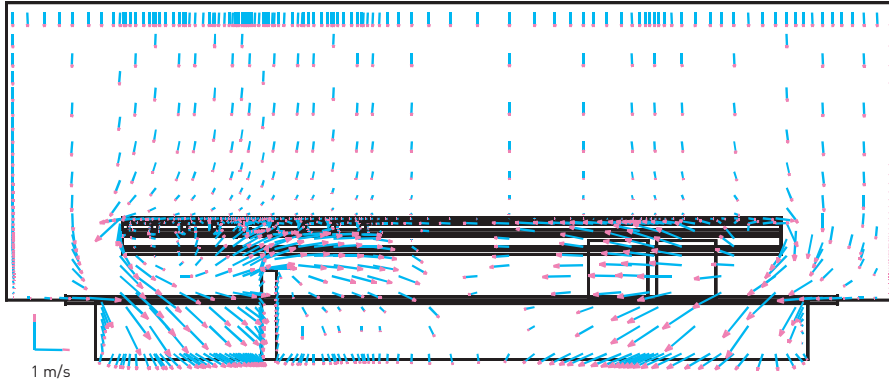


FIGURE 20

Configuration D22 : projection parallèlement à OX des vitesses d'air dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres  
Configuration D22: air velocity projection parallel to OX in longitudinal plane X = 2.48 m

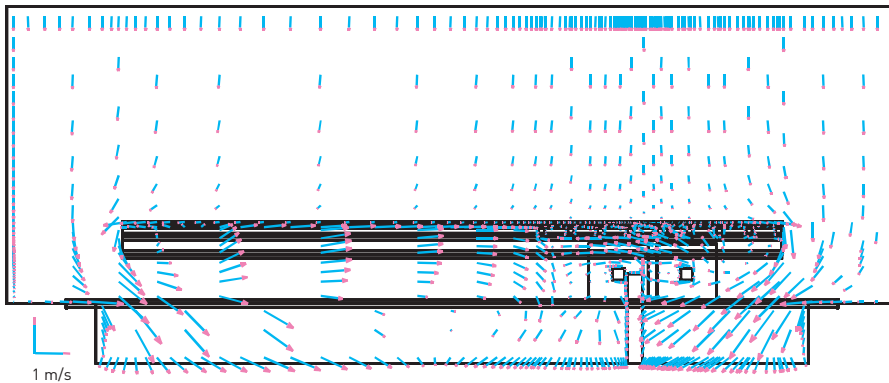


FIGURE 21

Configuration E2 : projection parallèlement à OX des vitesses d'air dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres  
Configuration E2: air velocity projection parallel to OX in longitudinal plane X = 2.48 m

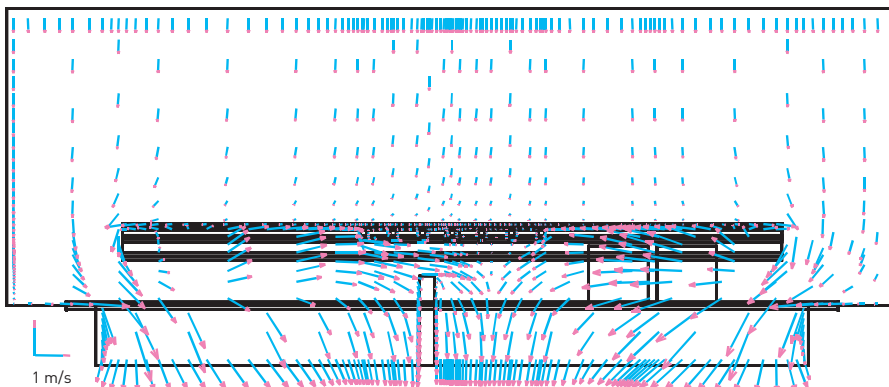


FIGURE 22

Configuration D2 : concentrations en polluant dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres  
Configuration D2: pollutant concentrations in longitudinal plane X = 2.48 m

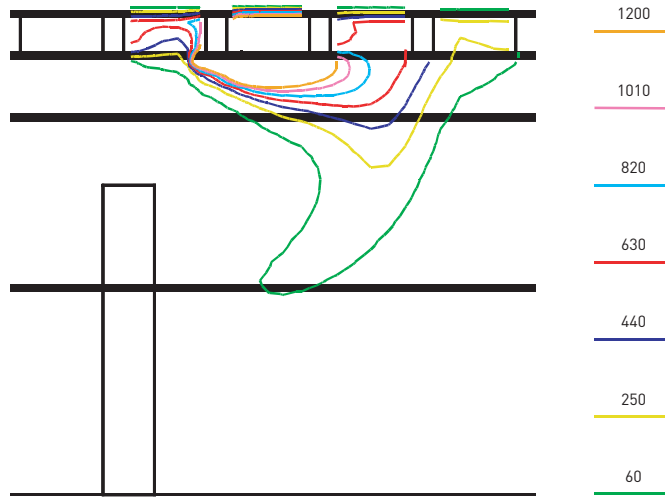


FIGURE 23

Configuration A2 : projection parallèlement à OX des vitesses d'air dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres  
Configuration A2: air velocity projection parallel to OX in longitudinal plane X = 2.48 m

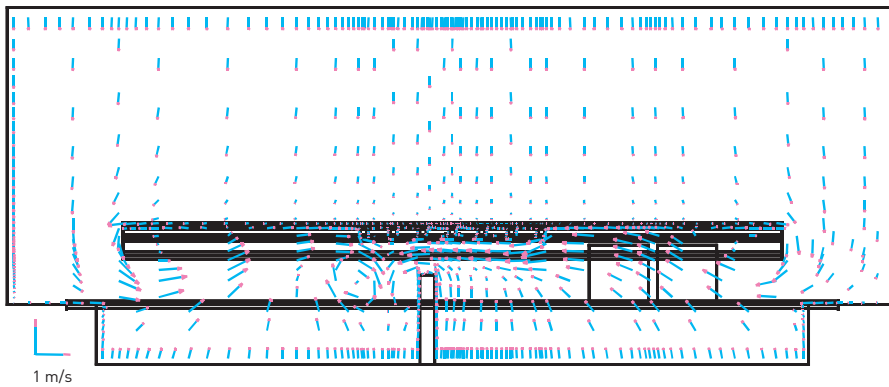


FIGURE 24

Configuration B2 : projection parallèlement à OX des vitesses d'air dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres  
Configuration B2: air velocity projection parallel to OX in longitudinal plane X = 2.48 m

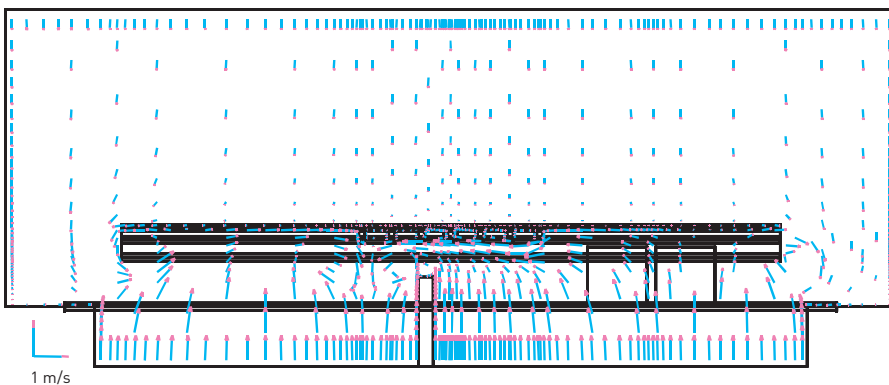


FIGURE 25

Configuration C2 : projection parallèlement à OX des vitesses d'air dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres  
 Configuration C2: air velocity projection parallel to OX in longitudinal plane X = 2.48 m

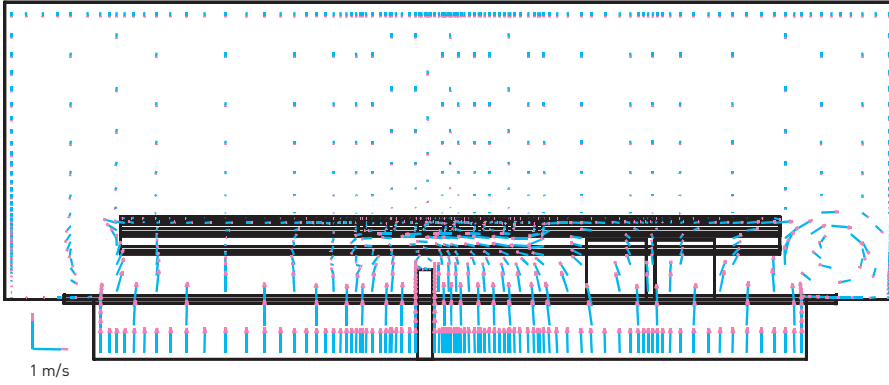


FIGURE 26

Configuration A2 : concentrations en polluant dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres  
 Configuration A2: pollutant concentrations in longitudinal plane X = 2.48 m

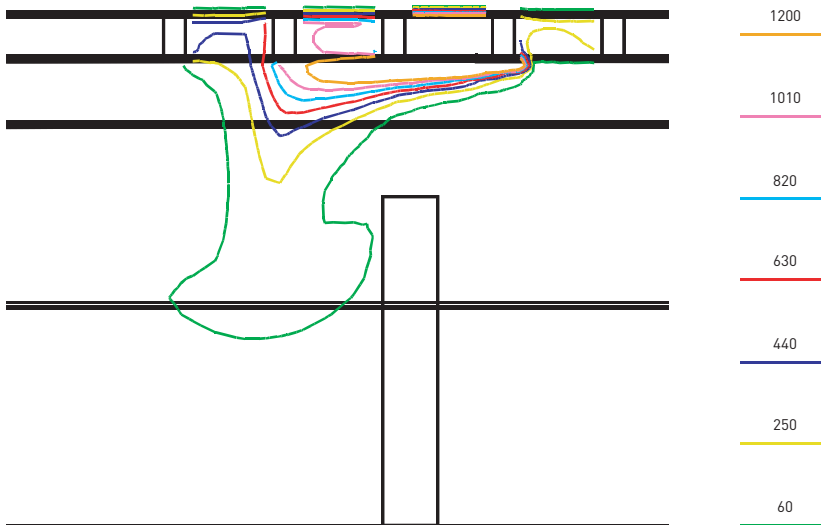
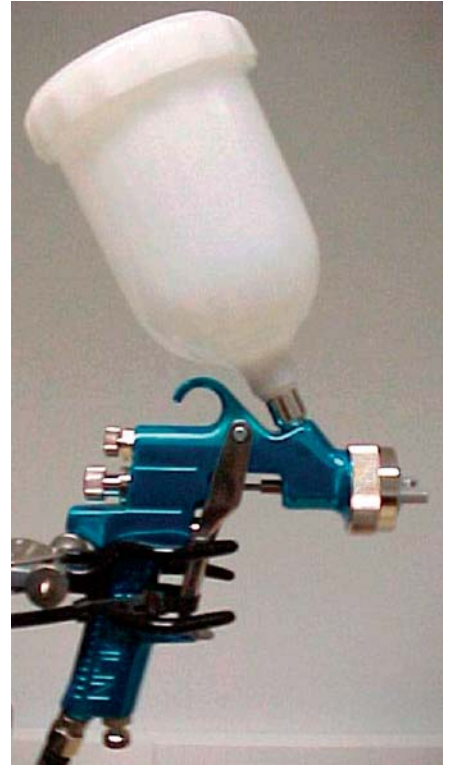


FIGURE 27

Pistolet de peinture étudié  
 Paint spray gun studied



## ANNEXE A

### MESURES ANÉMOMÉTRIQUES DANS LE JET D'AIR ISSU D'UN PISTOLET PNEUMATIQUE DE PEINTURE PAR PULVÉRISATION

#### PISTOLET ÉTUDIÉ ET CONDITIONS D'ESSAIS

Les mesures ont été effectuées sur un pistolet de peinture par pulvérisation conventionnel (haute pression) à alimentation par godet gravité (cf. Figure 27). Ce godet, de capacité 0,6 litre, a été obturé pour les mesures et les vitesses d'air ont été déterminées dans le jet d'air issu du pistolet en l'absence de peinture.

La tête de pulvérisation du pistolet est représentée sous forme schématique à la Figure 28. La buse située au centre est destinée à l'émission de la peinture. Le soufflage de l'air s'effectue par un anneau central entourant cette buse (« air au centre »), ainsi que par plusieurs orifices latéraux et par deux événements ménagés dans chacune des deux oreilles de la tête (« air des événements »). Un bouton de réglage à l'arrière du pistolet permet de faire varier la répartition du débit d'air consommé entre l'air au centre et l'air aux événements, ce qui modifie la géométrie du jet de pistolement. L'aire totale des 13 orifices de passage de l'air est équivalente à celle d'un orifice circulaire unique de diamètre 3,2 mm.

Pour les mesures, le pistolet a été dirigé de façon à créer un jet d'air horizontal et la tête de pulvérisation a été orientée pour que l'axe de symétrie joignant les orifices ménagés dans les deux oreilles soit également horizontal.

La Figure 29 présente de façon schématique le dispositif expérimental utilisé. Il comprend en particulier un diaphragme à prises de pression dans les angles pour la mesure du débit massique d'air comprimé consommé par le pistolet. Les mesures de vitesse d'air ont été réalisées à l'aide d'un tube de Pitot double fin dont le diamètre de l'orifice de mesure de la pression d'arrêt est de 0,5 mm. Ce tube de Pitot est relié à un micromanomètre et est fixé sur un système de déplacement par translation tridimensionnel, l'antenne du Pitot étant alignée avec un axe de translation horizontal.

FIGURE 28

Représentation schématique (hors échelle) de la tête de pulvérisation du pistolet de peinture  
Diagrammatic representation (not to scale) of a paint spray gun head

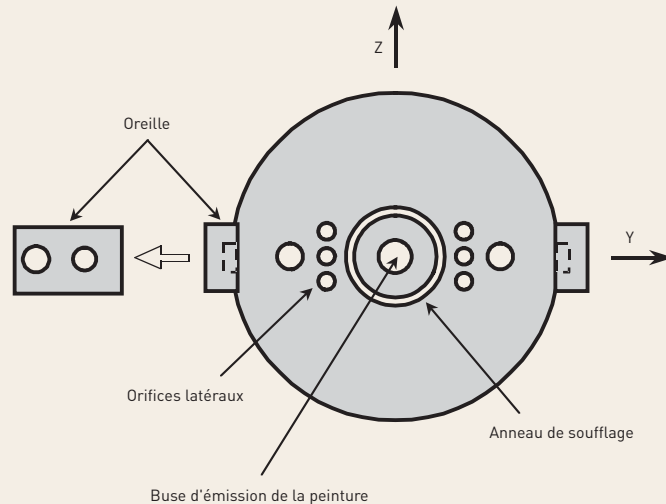
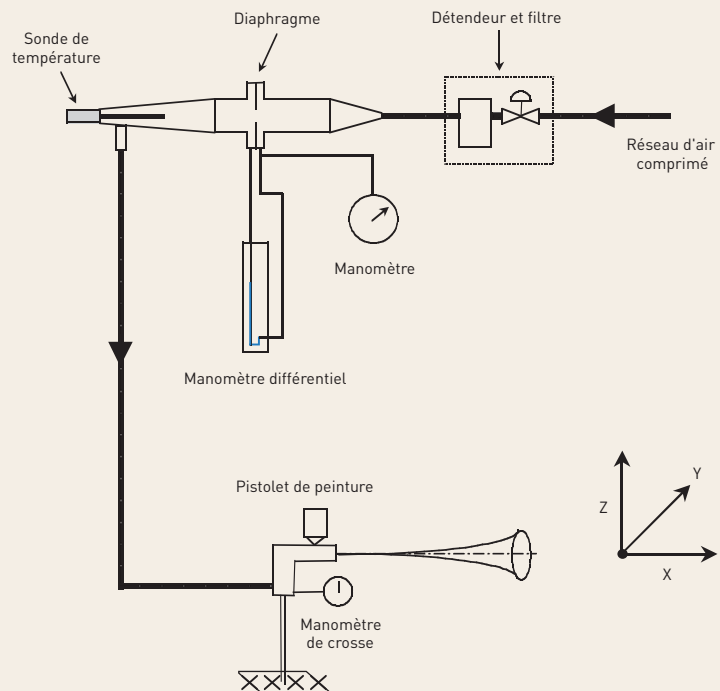


FIGURE 29

Représentation schématique du dispositif expérimental  
Diagrammatic representation of experimental apparatus



Le pistolet de pulvérisation est maintenu sur un support orientable en site et en azimut. Avant la réalisation des mesures, l'orientation du pistolet est réglée, par approximations successives, de façon à aligner l'axe du jet avec l'antenne du tube de Pitot, l'axe du jet

étant déterminé expérimentalement par recherche pour différentes distances à la buse de pulvérisation de l'emplacement du maximum local de vitesse de l'air.

Les mesures effectuées se limitent donc à la composante de vitesse parallèle

à l'axe du jet. Elles ont été exécutées le long de l'axe du jet ainsi que dans trois plans orthogonaux à cet axe et situés à 100, 200 et 300 mm du pistolet, qui encadrent la distance de pistolage (voisine de 250 mm). Le nombre de valeurs mesurables obtenues par plan est en moyenne de 142 mesures.

Les mesures ont été effectuées pour un pistolage en jet plat et le débit d'air comprimé a été réglé à une valeur proche du milieu de la gamme habituellement utilisée pour ce type de pistolet pneumatique (15 à 20 m<sup>3</sup>/h). Dans les conditions de mesure, le débit d'air consommé, exprimé à 20 °C et 1 atm, était de 17,48 m<sup>3</sup>/h et la pression relative à la crosse de 4,4 bars.

Pour faciliter la présentation des résultats, on convient de munir le pistolet de pulvérisation d'un repère ortho-normé OXYZ défini comme suit (cf. également les figures 28 et 29) :

- l'origine O est placée au centre de la buse de sortie de la peinture ;
- l'axe OX est dirigé vers l'extérieur du pistolet et est aligné avec l'axe du jet ;
- le plan XOY passe par le centre des orifices ménagés dans les oreilles de la tête de pulvérisation ;
- l'axe vertical OZ complète les deux précédents pour former un trièdre direct.

On notera  $u(X, Y, Z)$  la valeur de la composante de vitesse parallèle à l'axe du jet mesurée en un point quelconque, et  $V(X) = u(X, 0, 0)$  la vitesse le long de l'axe OX du jet.

### PROFIL DE VITESSE AXIALE

Les vitesses d'air relevées le long de l'axe du jet sont présentées au **Tableau III**. Au voisinage de la distance de pistolage (0,25 m) la valeur mesurée est de 16,2 m/s. Les vitesses atteignent des valeurs très élevées à proximité de l'orifice de pulvérisation : près de 100 m/s pour une distance de 25 mm, et décroissent lentement aux grandes distances. On relève encore 7,6 m/s sur l'axe à 0,6 mètre du pistolet.

Les dix points de mesure de la vitesse axiale sont représentés à la **Figure 30**. On a également tracé la courbe de régression des vitesses selon une fonction puissante de la distance. L'ajustement est très satisfaisant et peut se mettre

sous la forme dimensionnelle suivante, avec  $V$  en m/s et  $X$  en m :

$$\begin{aligned} \text{Formule 1} \\ V(X) &= 5,876 / X^{0,77} \\ 0,025 \text{ m} &\leq X \leq 0,60 \text{ m} \end{aligned}$$

L'exposant de  $X$  dans cette formule, 0,77, a une valeur intermédiaire entre les exposants couramment retenus dans la littérature [12] pour les jets turbulents subsoniques de forme simple : 0,5 pour les jets bidimensionnels et 1,0 pour les jets axisymétriques.

### VITESSES MESURÉES DANS TROIS PLANS ORTHOGONAUX À L'AXE DU JET

Les **Figures 31 et 32** présentent, sous forme de courbes de niveau, les résultats des mesures de la composante de vitesse  $u(X, Y, Z)$  effectuées dans les trois plans orthogonaux à l'axe du jet suivants :  $X = 0,1$  ;  $0,2$  et  $0,3$  m. À la **Figure 31**, sont tracés les contours 4, 12, 20 et 28 m/s. La **Figure 32** présente les valeurs mesurées sous forme adimensionnelle : dans chacun des trois plans, les vitesses sont exprimées en fraction de la vitesse axiale locale.

Ces figures montrent qu'aux distances explorées, le jet possède une forme ovoïde étirée selon l'axe  $Z$ , c'est-à-dire selon la direction perpendiculaire à l'insufflation d'air par les deux oreilles de la tête de pulvérisation.

Lorsque l'on s'éloigne du pistolet, la taille du jet augmente fortement. De plus, aux distances explorées, l'épanouissement du jet est plus rapide selon l'axe  $Y$  que selon l'axe  $Z$ , et par conséquent la forme du jet tend à s'arrondir avec la distance au pistolet. Par exemple, à la **Figure 31**, lorsque l'on passe de la distance au pistolet  $X = 0,1$  m à la distance  $X = 0,3$  m, la largeur du contour d'égale vitesse 4 m/s augmente de 134 % alors que sa hauteur n'augmente que de 57 %.

L'évolution générale des vitesses d'air devant le pistolet, lorsque l'on s'éloigne de la tête de pulvérisation, est illustrée par les modifications du contour 12 m/s de la **Figure 31**. L'aire délimitée par ce contour augmente dans une première phase, puis se contracte ensuite pour disparaître ultérieurement. Cette évolution résulte des effets de deux phénomènes concurrents : l'épa-

TABLEAU III

Vitesses d'air mesurées le long de l'axe du jet  
Air velocities measured along jet axis

| Distance à l'orifice X (m) | Vitesse d'air axiale V(X) (m/s) |
|----------------------------|---------------------------------|
| 0,025                      | 98,4                            |
| 0,05                       | 63,8                            |
| 0,10                       | 34,8                            |
| 0,15                       | 24,7                            |
| 0,20                       | 19,4                            |
| 0,25                       | 16,2                            |
| 0,30                       | 14,1                            |
| 0,40                       | 11,4                            |
| 0,50                       | 8,8                             |
| 0,60                       | 7,6                             |

nouissement du jet et la décroissance des vitesses avec la distance. Lorsque les vitesses sont représentées sous la forme de fractions de la vitesse axiale locale, comme à la **Figure 32**, seul l'épanouissement du jet est apparent.

### PROFILS DE VITESSE LATÉRAUX

Ce paragraphe examine les profils de la composante de vitesse  $u$  selon les axes latéraux  $Y$  et  $Z$  dans les trois plans de mesure orthogonaux à l'axe du jet précédents :  $X_1 = 0,1$  m ;  $X_2 = 0,2$  m et  $X_3 = 0,3$  m. Les valeurs mesurées sont représentées par des croix sur les **Figures 33 à 35** dans lesquelles les différents axes utilisent des échelles adaptées à l'épanouissement du jet.

Dans tous les cas, les profils obtenus affectent une forme en cloche ce qui suggère d'ajuster les vitesses mesurées dans chaque plan  $X_i$  à des gaussiennes selon les formules :

$$\begin{aligned} \text{Formule 2} \\ u(X_i, Y, 0) &= u(X_i, 0, 0) \exp \left[ -\lambda(Y/b_i)^2 \right] \\ \text{Formule 3} \\ u(X_i, 0, Z) &= u(X_i, 0, 0) \exp \left[ -\lambda(Z/c_i)^2 \right] \\ \text{Formule 4} \\ \lambda &= \ln(2) \end{aligned}$$

Les courbes obtenues par la méthode des moindres carrés ont été superposées aux mesures sur les **Figures 33 à 35**. L'accord avec les valeurs expérimentales est satisfaisant.

FIGURE 30

Vitesses d'air mesurées le long de l'axe du jet et courbe de régression  
Air velocities measured along jet axis and regression curve

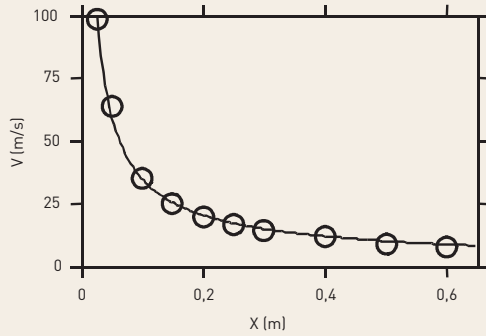


FIGURE 32

Contours d'égal composante de vitesse  $u$  (fractions 0,2 ; 0,4 ; 0,6 et 0,8 de la vitesse axiale locale)  
dans trois plans orthogonaux à l'axe du jet  
Contours of equal velocity component  $u$  (0.2, 0.4, 0.6 and 0.8 fractions of local axial velocity) in three planes orthogonal to jet axis

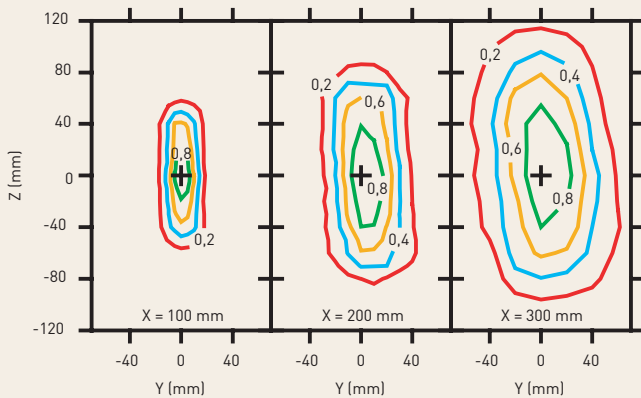


FIGURE 34

Profils latéraux de la composante de vitesse  $u$  dans le plan orthogonal à l'axe  $X_2 = 0,2$  m : mesures (+) et courbes de régression  
Lateral profiles of velocity component  $u$  in plane  $X_2 = 0.2$  m orthogonal to jet axis: measurements (+) and regression curves

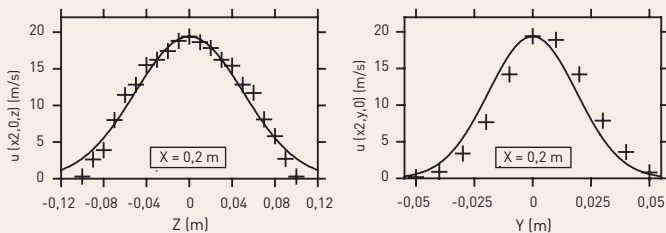


FIGURE 31

Contours d'égal composante de vitesse  $u$  (4, 12, 20 et 28 m/s) dans trois plans orthogonaux à l'axe du jet  
Contours of equal velocity component  $u$  (4, 12, 20 and 28 m/s) in three planes orthogonal to jet axis

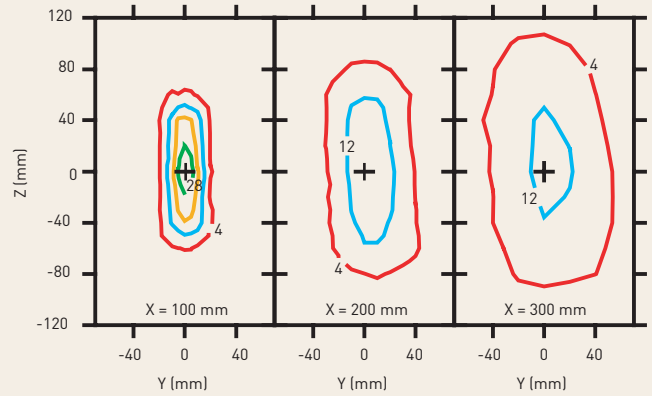


FIGURE 33

Profils latéraux de la composante de vitesse  $u$  dans le plan orthogonal à l'axe  $X_1 = 0,1$  m : mesures (+) et courbes de régression  
Lateral profiles of velocity component  $u$  in plane  $X_1 = 0.1$  m orthogonal to jet axis: measurements (+) and regression curves

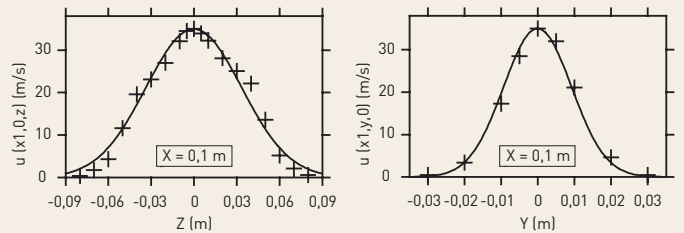


FIGURE 35

Profils latéraux de la composante de vitesse  $u$  dans le plan orthogonal à l'axe  $X_3 = 0,3$  m : mesures (+) et courbes de régression  
Lateral profiles of velocity component  $u$  in plane  $X_3 = 0.3$  m orthogonal to jet axis: measurements (+) and regression curves

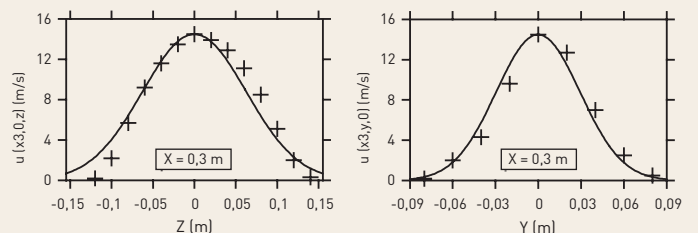


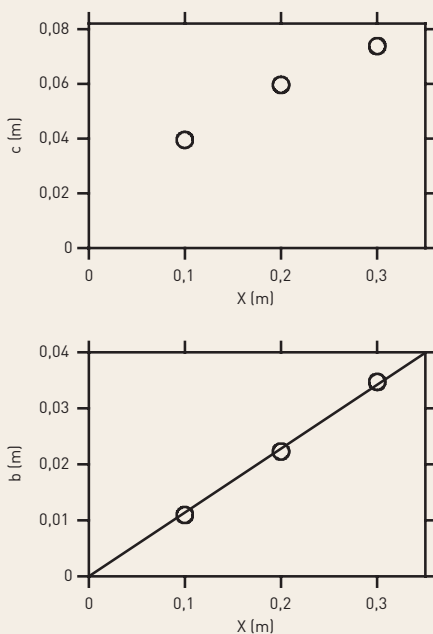


TABLEAU IV

**Demi-rayons et rapport d'aspect du jet d'air pour trois distances au pistolet**  
**Half-radii and air jet aspect for three distances to spray gun**

| Distance au pistolet<br>$X$ (mm) | Demi-rayon selon $Y$<br>$b$ (mm) | Demi-rayon selon $Z$<br>$c$ (mm) | Rapport d'aspect<br>$r = c/b$ |
|----------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 100                              | 10,9                             | 39,5                             | 3,61                          |
| 200                              | 22,3                             | 59,7                             | 2,68                          |
| 300                              | 34,7                             | 73,8                             | 2,13                          |

FIGURE 36

**Demi-rayons de jet pour trois distances au pistolet :  $c$  selon l'axe  $Z$  et  $b$  selon l'axe  $Y$** 
**Jet half-radii for three distances to spray gun:  $c$  along  $Z$ -axis and  $b$  along  $Y$ -axis**


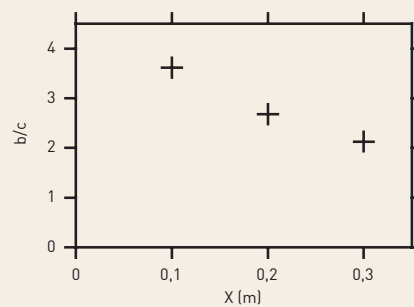
Dans chaque plan  $X_i$  orthogonal à l'axe,  $b_i$  représente la distance le long de l'axe  $Y$  pour laquelle la composante de vitesse  $u$  atteint la moitié de sa valeur axiale. La distance  $c_i$  joue un rôle analogue le long de l'axe  $Z$  :

$$\text{Formule 5} \\ u(X_i, b_i, 0) = u(X_i, 0, c_i) = \frac{1}{2} u(X_i, 0, 0)$$

Par convention, on désignera dans la suite les distances  $b_i$  et  $c_i$  sous les noms de demi-rayons du jet selon les axes  $Y$  et  $Z$ .

Les valeurs des demi-rayons du jet calculées suivant cette méthode sont présentées au *Tableau IV* et à la *Figure 36*. Dans la région explorée,  $b$  varie de 10,9 à

FIGURE 37

**Rapport d'aspect du jet d'air pour trois distances au pistolet**
**Air jet aspect ratio for three distances to spray gun**


34,7 mm et  $c$  de 39,5 à 73,8 mm. Le demi-rayon  $c$  reste constamment supérieur à  $b$  mais augmente moins rapidement avec la distance au pistolet, ce qui confirme les évolutions mises en évidence aux *Figures 31* et *32* : le jet est étiré selon l'axe  $Z$  et tend à s'arrondir en s'éloignant du pistolet.

La *Figure 36* montre que les trois valeurs du demi-rayon  $b$  obtenues s'alignent très bien sur une droite passant par l'origine, c'est-à-dire que  $b$  est proportionnel à la distance  $X$  au pistolet. L'équation de la droite de régression obtenue est la suivante :

$$\text{Formule 6} \\ b = 0,114 X$$

Le coefficient de proportionnalité calculé (0,114) est proche des valeurs de la littérature sur les jets rectangulaires : 0,097 à 0,114 pour Rajaratnam [12], 0,104 à 0,115 pour Sfeir [13], 0,109 pour Krothapalli et al [14] et 0,107 pour Lozanova et Stankov [15]. Cet alignement n'est pas observé pour les trois valeurs du demi-rayon  $c$ .

Le rapport des deux demi-rayons,  $r = c/b$ , peut être utilisé pour quantifier le rapport d'aspect du jet dans les trois plans de mesure. Ses valeurs sont présentées au *Tableau IV* et à la *Figure 37*. Dans toute la zone explorée, le rapport d'aspect du jet reste largement supérieur à la valeur 1 associée au jet rond. Il diminue lentement avec la distance au pistolet : sa décroissance est de 41 % lorsque la distance au pistolet est multipliée par 3. Au voisinage de la distance de pistolet ( $X = 0,25$  mètre), le rapport d'aspect du jet est proche de 2,4.

## CONCLUSION

Les mesures anémométriques effectuées devant un pistolet de peinture par pulvérisation conventionnel ont permis de caractériser les propriétés du jet d'air issu du pistolet pour un fonctionnement en jet plat. Elles apportent des informations importantes sur les valeurs des vitesses d'air obtenues, sur la forme du jet et sur ses dimensions. Les détails de l'écoulement restent bien entendu fonction de paramètres comme le débit d'air consommé, le réglage de l'air aux événements, les caractéristiques de la tête de pulvérisation et du pistolet.

## Remerciements :

L'auteur remercie Monsieur Guérel pour la réalisation des mesures anémométriques.

## ANNEXE B

### SIMULATION EFFECTUÉE AVEC FLUENT

À titre comparatif, une simulation complémentaire a été effectuée à l'aide du logiciel de mécanique des fluides numérique FLUENT Version 6.1 [11]. La géométrie et les conditions aux limites étaient identiques à celles de la configuration D2. Le modèle de turbulence k- $\epsilon$  standard avec fonctions de paroi a été utilisé. Le maillage était formé de 421 297 cellules.

La comparaison des résultats montre que les champs de vitesse d'air et de concentration en polluant fournis par les deux logiciels sont très proches. À titre d'exemple, ces champs sont tracés aux Figures 38 à 40 dans le plan de coupe longitudinal X = 2,48 mètres, proche du plan de symétrie de la cabine. Ces figures peuvent être rapprochées des Figures 17, 18 et 22 obtenues avec EOL-3d.

FIGURE 38

Configuration D2 simulation avec Fluent : projection parallèlement à OX des vitesses d'air dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres  
FLUENT simulation for configuration D2: air velocity projection parallel to OX in longitudinal plane X = 2.48 m

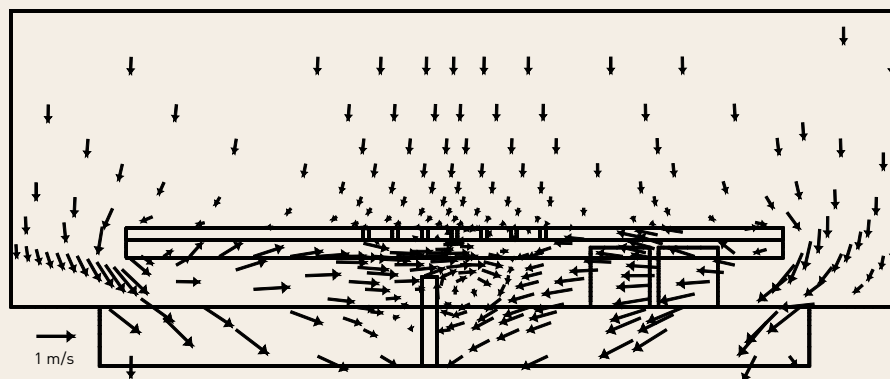


FIGURE 39

Configuration D2 simulation avec Fluent : projection parallèlement à OX des vitesses d'air dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres ; zoom au voisinage du peintre  
FLUENT simulation for configuration D2: air velocity projection parallel to OX in longitudinal plane X = 2.48 m; zoom near painter

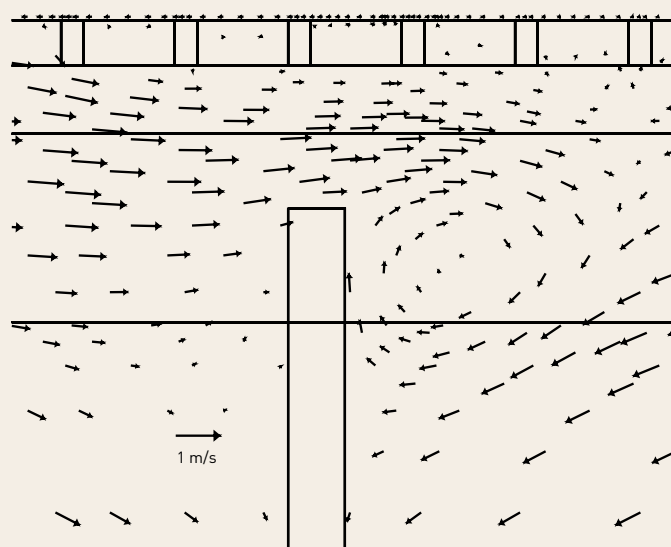
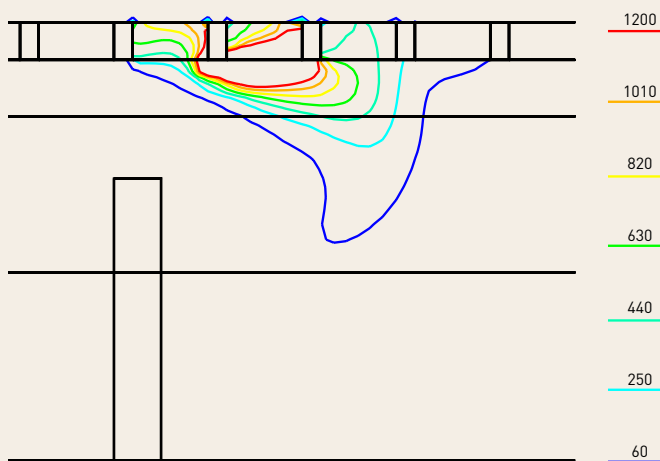


FIGURE 40

Configuration D2 simulation avec Fluent : concentrations en polluant dans le plan longitudinal X = 2,48 mètres  
FLUENT simulation for configuration D2: pollutant concentrations in longitudinal plane X = 2.48 m



## BIBLIOGRAPHIE

- [1] Groupe de Travail Ventilation n° 9.1 - Ventilation des cabines d'application par pulvérisation de produits liquides. INRS, ED 839, 1<sup>ère</sup> édition, 2000.
- [2] CARLTON G.N., FLYNN M.R. - Influence of spray painting parameters on breathing zone particle size distributions. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 1997, 12, 11, pp. 744-750.
- [3] SABTY-DAILY R.A., HINDS W.C., FROINES J.R. - Size distribution of chromate paint aerosol generated in a bench-scale spray booth. *Annals of Occupational Hygiene*, 2005, 49, 1, pp. 33-45.
- [4] TAN Y.M., FLYNN M.R., BULLER T.S. - A field evaluation of the impact of transfer efficiency on worker exposure during spray painting. *Annals of Occupational Hygiene*, 2002, 46, 1, pp. 103-112.
- [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*, 1996, 165, pp. 409-424.
- [6] BRACONNIER R., REGNIER R., BONTHOUX F. - Efficacité d'une fente d'aspiration sur une cuve de traitement de surface - Mesures en laboratoire et simulation numérique bidimensionnelle. *Cahiers de Notes Documentaires*, 1991, 144, ND 1841, pp. 463-478.
- [7] FONTAINE J.R., RAPP R., SERIEYS J.C., AUBERTIN G. - Aerosol transport in room turbulent air flows - Experimental and numerical results. In : Roomvent'94, Gliwice, Poland, Silesian Technical University, 1994, vol. 2, pp. 147-165
- [8] BRACONNIER R. - Simulations numériques d'un écoulement bidimensionnel dans un local chauffé par le sol. *Revue Générale de Thermique*, 1994, 385, pp. 12-20.
- [9] FONTAINE J.R., BIOLLEY F., RAPP R., SERIEYS J.C., CUNIN J.C. - Analysis of a three-dimensional ventilation flow: experimental validation on a water scale model of numerical simulations. *Numerical Heat Transfer, Part A*, 1994, 26, pp. 431-451.
- [10] COLLINEAU S., FONTAINE J.R., SERIEYS J.C., AUBERTIN G., CUNIN J.C. - Validation expérimentale du logiciel de ventilation prévisionnelle EOL-3D en conditions isothermes. *Cahiers de Notes Documentaires*, 1997, 166, ND 2040, pp. 43-57.
- [11] FLUENT INC. - FLUENT 6.1 User's Guide. Lebanon (NH), Fluent Inc., 2003.
- [12] RAJARATNAM N. - Turbulent jets. Amsterdam, Elsevier, 1976, 304 p.
- [13] SFEIR A.A. - Investigation of three-dimensional turbulent rectangular jets. *AIAA Journal*, 1979, 17, 10, pp. 1055-1060.
- [14] KROTHAPALLI A., BAGANOFF D., KARAMCHETI K. - On the mixing of a rectangular jet. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 107, pp. 201-220.
- [15] LOZANOVA M., STANKOV P. - Experimental investigation on the similarity of a 3D rectangular turbulent jet. *Experiments in Fluids*, 1998, 24, pp. 470-478.