

→ J.C. Sériey, P. Cornu,
Département Ingénierie
des procédés, avec la participation
d'un groupe de travail CRAM/INRS
(CRAM de Lille, Nantes, Orléans,
Paris, Rouen, Strasbourg,
Toulouse)

Améliorer le fonctionnement aéraulique d'une aire ventilée avec paroi et compensation mécanique

IMPROVING THE AIR FLOW PERFORMANCE OF A VENTI- LATED AREA WITH WALLS AND MECHANICAL COMPEN- SATION

Ventilated areas are rarely among the solutions recommended in the initial approach to risk prevention problems. Sometimes, however, they are the only way to meet occupational health and safety standards.

A CRAM/INRS working group was set up to review the subject and propose improvements.

The results of a site study and a predictive ventilation optimisation study are presented. The on-site study revealed air flow deficiencies in the ventilated areas. Ventilation modelling helped to validate several hypotheses by varying the following parameters: air flow, exhaust vent size, type of extraction, height and shape of walls, type of mechanical compensation. The result is a proposal for an optimised ventilated area which remains to be tested on site.

● EOL software ● predictive ventilation ● painting area ● parameter optimisation

Les aires ventilées sont des systèmes d'assainissement rarement conseillés lors de la première approche d'un problème de prévention. Il arrive cependant que l'on ne puisse éviter leur emploi afin de respecter les conditions d'hygiène et de sécurité au travail.

Un groupe de travail CRAM/INRS s'est constitué pour faire le point des connaissances sur le sujet et proposer des principes d'amélioration.

Un constat sur site ainsi qu'une étude d'optimisation par ventilation prévisionnelle sont présentés dans cette note. L'étude sur site a mis en évidence les défauts aérauliques de fonctionnement des aires. Quant à l'étude d'optimisation conduite par ventilation prévisionnelle, elle a permis de valider plusieurs hypothèses en faisant varier les paramètres suivants : débit, surface aspirante, type d'extraction, hauteur et forme des parois, type de compensation mécanique. Ce travail aboutit à une proposition d'aire ventilée optimisée qu'il reste à évaluer sur site.

● EOL ● ventilation prévisionnelle ● cabine de peinture ● étude paramétrique

Les aires ventilées sont des systèmes utilisés en dernier recours dans les ateliers industriels pour assainir des zones de finition (peinture, ponçage). En effet, elles présentent souvent deux inconvénients : la vitesse d'air décroît rapidement lorsqu'on s'éloigne du sol et l'aspiration n'est pas toujours homogène sur toute la surface de l'aire ventilée.

Les aires ventilées ont été peu étudiées à l'exception des aires de peinture [1 à 3]. Ces dernières sont définies comme une zone plane située au niveau du sol de l'atelier et reliée à une fosse équipée d'un système d'aspiration mécanique. Dans le cas des aires de peinture, le document intitulé « Guide pratique de ventilation n° 10 » [1] propose deux pistes pour améliorer le captage des polluants : d'une part, l'installation de parois verticales entourant complètement la surface d'aspiration et, d'autre part, l'installation d'un soufflage d'air dirigé de façon à entraîner les polluants vers

l'ouverture aspirante sans les disperser dans tout l'atelier.

Un groupe de travail CRAM/INRS s'est constitué pour faire le point des connaissances sur les aires ventilées et proposer des principes d'amélioration communs à toutes les aires ventilées. Des études de terrain ont alors été engagées sur plusieurs sites. Toutes ont montré les mêmes défauts : une compensation à forte vitesse perturbant le fonctionnement aéraulique et une aspiration au niveau des caillebotis mal répartie. A l'issue de ces campagnes de mesures, une installation de conception récente et néanmoins perfectible a été sélectionnée et a servi de cas de référence pour effectuer une étude d'optimisation.

Cette étude d'optimisation a été réalisée par ventilation prévisionnelle, c'est-à-dire par simulation numérique des écoulements. On a ainsi pu étudier leurs comportements en fonction de différents paramètres tels que le débit, la hauteur des

parois, le type de compensation d'air. Ce travail présente les mesures effectuées sur le site de référence et les résultats de simulation numérique. Il a pour but de proposer une aire optimisée.

1. La situation actuelle : mesures sur site

1.1. Présentation du site

Tous les résultats présentés dans cette étude reposent sur un atelier industriel de conception récente, qui a pour activité la peinture de pièces de grandes dimensions. Celui-ci a fait l'objet d'une campagne de mesures sur site ayant pour but de détailler le fonctionnement aéraulique d'une de ces aires ventilées.

L'aire ventilée retenue est délimitée par trois parois rigides de 6 m de hauteur et par un rideau souple manœuvrable manuellement (*fig. 1*). Sa surface au sol s'étend sur 105 m² (5,5 m x 19 m). Elle comporte deux caillebotis d'extraction au sol : le débit de ventilation annoncé s'élève à 28 000 m³.h⁻¹ (*tableau I*), ce qui correspond à une vitesse moyenne de 7 cm.s⁻¹ rapportée à la surface totale.

Quant à la compensation d'air, elle est constituée d'un caisson de 0,5 x 0,7 m installé à 6 m de hauteur et sur toute la longueur de l'aire le long d'une des parois longitudinales. Le soufflage est de type jet, plan incliné à 45° vers le bas. Ce système de compensation d'air sert également au chauffage du local.

1.2. Mesurage des flux d'air dans la zone de travail

1.2.1. L'anémométrie ultrasonique

Pour diagnostiquer le fonctionnement aéraulique des aires ventilées, on cherche à visualiser l'écoulement d'air créé par la ventilation, à savoir non seulement la vitesse moyenne de l'air mais également sa direction de soufflage.

L'anémométrie ultrasonique [4] a été choisie car elle permet la mesure directe des trois composantes du vecteur vitesse de l'air. Ce principe d'anémométrie est illustré sur la *figure 2*. Une onde ultrasonore n° 1 émise par le transducteur 1 met un temps t_1 pour atteindre le transducteur

Fig. 1. Schéma en perspective de l'aire de peinture sélectionnée avec le repère d'espace utilisé - Perspective diagram of selected painting area showing coordinate system

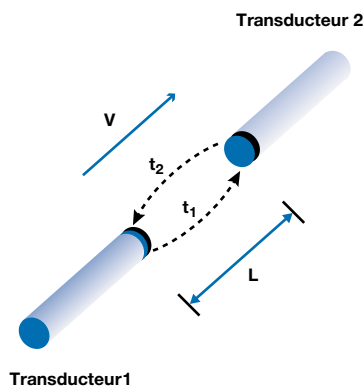
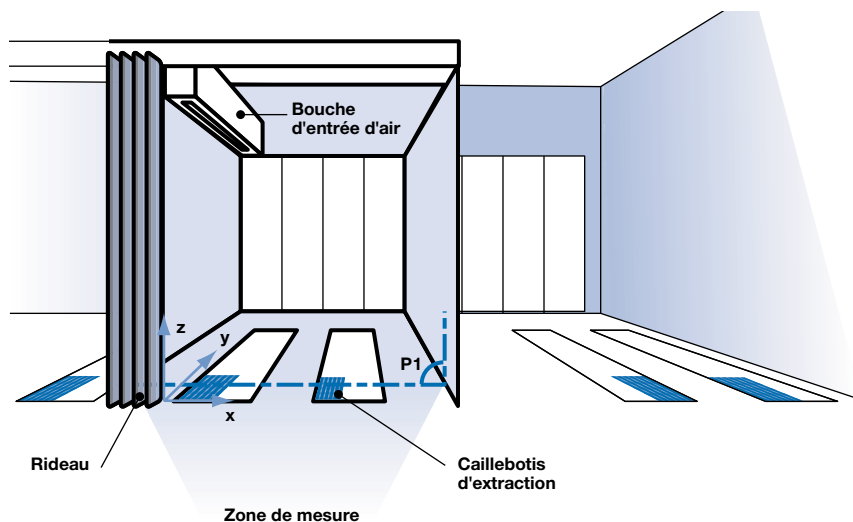


Fig. 2. Principe de l'anémométrie ultrasonique pour la mesure de la composante V de la vitesse de l'air
Ultrasonic anemometry principle for measuring air velocity component V

n° 2. A l'inverse, une onde n° 2 met un temps t_2 pour atteindre le transducteur 1 à partir du transducteur 2.

Soit L la distance entre les deux sondes émettrices et réceptrices, C_s la vitesse du son dans l'air à température ambiante et V la composante moyenne de vitesse de l'air selon l'axe des deux transducteurs, l'équation (1) montre alors le lien direct existant entre les temps de parcours et la composante V :

$$C_s + V = \frac{L}{t_1} \text{ et } C_s - V = \frac{L}{t_2} \Rightarrow \\ \Rightarrow V = \frac{L}{2} \left(\frac{1}{t_1} - \frac{1}{t_2} \right)$$

Un anémomètre comportant trois paires de transducteurs correctement réparties dans l'espace donne donc accès aux trois composantes du vecteur vitesse de l'air moyennée sur un volume de mesure.

La qualité de la mesure du vecteur vitesse dépend de l'évaluation de son angle par rapport à un repère arbitraire et de son module. On considère que l'incertitude sur l'angle est faible, bien qu'elle dépende d'un alignement visuel du capteur par rapport au repère du local. Quant à l'incertitude sur le module, les étalonnages ont montré la bonne performance de ces capteurs (écart maximal relevé entre référence et mesure de 6 % dans une gamme de 0,3 à 10 m.s⁻¹).

Enfin, les écoulements de ventilation réels d'un atelier industriel sont instationnaires à l'échelle de la journée. Ils dépendent en effet de l'ouverture des portes et de l'évolution de la température moyenne.

En dépit de ces contraintes, on constate que les écoulements de ventilation mesurés sont certes complexes mais suffisamment stables pour être interprétés.

TABLEAU I

DONNÉES AÉRAULIQUES SUR L'AIRE VENTILÉE - AIR FLOW DATA FOR VENTILATED AREA

Débit d'extraction (m ³ .h ⁻¹)	28 000
Débit de soufflage (m ³ .h ⁻¹)	28 000
Type de compensation	Fente de soufflage inclinée à 45° vers le bas

TABLEAU II

DESCRIPTION DES CONFIGURATIONS DE MESURE ÉTUDIÉES - DESCRIPTION OF MEASUREMENT CONFIGURATIONS STUDIED

Mode de fonctionnement	Débit d'extraction (m ³ .h ⁻¹)	Débit de soufflage (m ³ .h ⁻¹)	Rideau	Figure
A	28 000	28 000	fermé	3
B	28 000	28 000	ouvert	4
C	28 000	0	ouvert	5
D	28 000	0	fermé	6

1.2.2. Lieu et conditions de mesures

La cartographie des vitesses d'air est obtenue par déplacement d'un mât instrumenté dans la zone de travail des opérateurs (plan vertical P1 situé à deux mètres du rideau, voir fig. 1).

Les mesures sont effectuées en l'absence de tout subjectile et moyennées sur trois minutes pour s'affranchir des effets instationnaires des écoulements de ventilation.

1.2.3. Résultats de mesure des flux d'air dans l'aire ventilée

Plusieurs modes de fonctionnement ont été testés (tableau II) suivant l'ouverture ou la fermeture du rideau, ou la mise en route de la compensation mécanique.

Mode A

Les zones d'écoulements descendants sont en bleu et vert (fig. 3). Ce mode de fonctionnement est le plus confiné possible avec une fermeture de l'aire ventilée sur ses quatre cotés. On note une large zone de recirculation ascendante résultant du type de système de réintroduction d'air installé.

En effet, dans ces conditions de confinement dû aux parois, l'air issu de la bouche de soufflage ainsi que l'air entraîné par ce jet ne peuvent être complètement repris par le système d'extraction.

Ainsi, à hauteur des voies respiratoires, seule la zone directement balayée par le jet de soufflage présente un écoulement descendant (partie droite de la figure 3).

Mode B

Ce mode diffère du mode précédent par l'ouverture du rideau. Par comparaison avec la figure 3, la figure 4 montre de meilleurs résultats à hauteur des voies respiratoires. L'écoulement est régulièrement descendant avec des vitesses significatives. Il subsiste néanmoins une zone sous-ventilée à l'aplomb de la bouche de soufflage.

En fait, le confinement incomplet de l'air ventilée se traduit vraisemblablement par une sortie d'air vers le reste de l'atelier.

Mode C

Les mesures sans compensation mécanique d'air neuf se caractérisent par des valeurs très faibles de vitesse (fig. 5). Cela résulte de la bonne étanchéité du bâtiment. Cependant, à hauteur des voies respiratoires, l'écoulement est majoritairement descendant.

Mode D

En présence du rideau, les composantes verticales à hauteur des voies respiratoires (fig. 6) sont plus faibles en valeur absolue que précédemment (cf. fig. 5). Ce point est difficile à justifier seulement à partir de ces mesures : en effet, l'écoulement paraît tridimensionnel (cf. fig. 6) et nécessiterait donc plus d'investigations pour être pleinement élucidé.

1.2.4. Conclusions

Seule l'utilisation de l'aire ventilée avec compensation mécanique en air neuf permet d'obtenir des vitesses d'air importantes à hauteur des voies respiratoires d'un opérateur. A l'inverse, l'arrêt du système de compensation se traduit par des valeurs de vitesses verticales extrêmement faibles.

Fig. 3 à 6. Superposition des champs de mesure des vecteurs vitesses et des composantes verticales de vitesse dans le plan vertical P1 (les figures sont présentées à des échelles différentes, de manière à visualiser correctement les écoulements) - Superimposition of measured velocity vectors and vertical velocity components in vertical plane P1

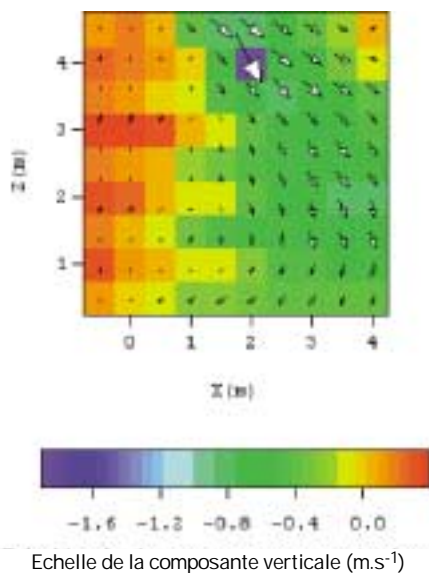


Fig. 3. Mode A

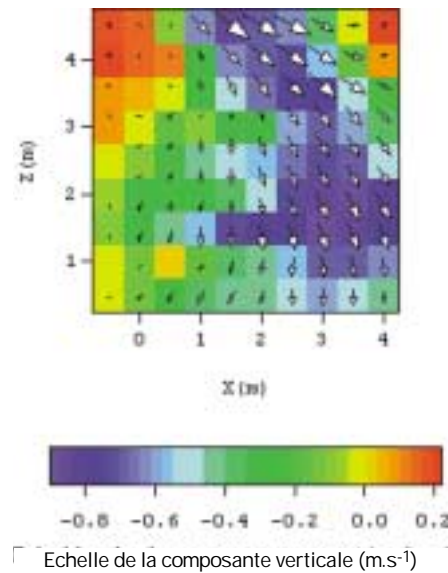


Fig. 4. Mode B

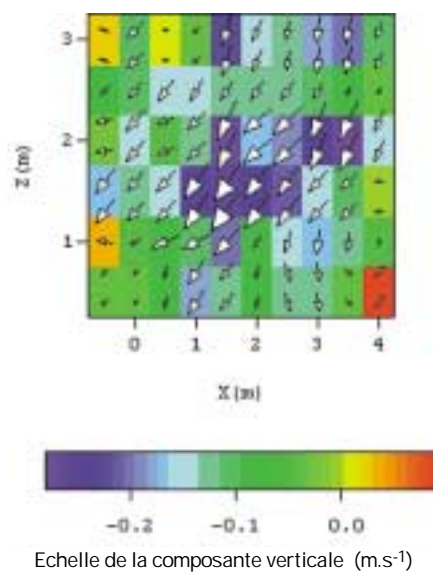


Fig. 5. Mode C

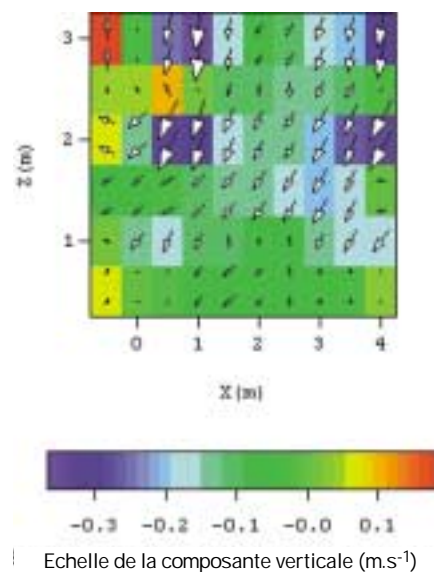


Fig. 6. Mode D

En ce qui concerne la diffusion d'air, l'emploi d'une compensation d'air à haute vitesse de soufflage présente un inconvénient : du fait du débit d'air induit par le jet de soufflage, le confinement de l'aire entraîne des mouvements d'air ascensionnels. Suite à ce constat sur site, on cherche à optimiser cette installation qui va servir de base à notre étude des aires ventilées.

2. Améliorer la situation grâce à la ventilation prévisionnelle

2.1. Principes de l'étude paramétrique

L'optimisation géométrique et aérodynamique de l'aire ventilée va reposer sur l'utilisation d'EOL, logiciel de ventilation prévisionnelle mis au point par l'INRS [5]. L'outil prévisionnel permet de comparer différentes hypothèses de dimensionnement par simulation informatique.

Six principaux paramètres d'influence ont été retenus en tenant compte des recommandations des « Guides pratiques de ventilation » [1, 2] et ont permis l'élaboration d'un protocole d'étude divisé en cinq phases imbriquées. Le cheminement adopté pour l'étude est donc le suivant : la caractéristique dite optimale du paramètre étudié est déterminée à la fin de chaque phase ; la phase suivante démarre alors en bloquant les paramètres précédents. L'étude paramétrique se décompose comme suit :

Phase 1 : Optimisation de la distance au bord (distance entre le caillebotis d'extraction et les parois verticales de l'aire ventilée).

La surface d'extraction couvre successivement 100 %, 76 % et 54 % de la surface au sol de l'aire ventilée (fig. 7), ce qui correspond à une distance du caillebotis aux parois de 0, 0,5 et 1 m.

Conjointement à cette phase, le débit d'extraction initial de 28 000 m³.h⁻¹ (noté Q dans l'étude) a été décliné en deux variantes supplémentaires (2Q et 5Q, soit respectivement 56 000 m³.h⁻¹ et 140 000 m³.h⁻¹).

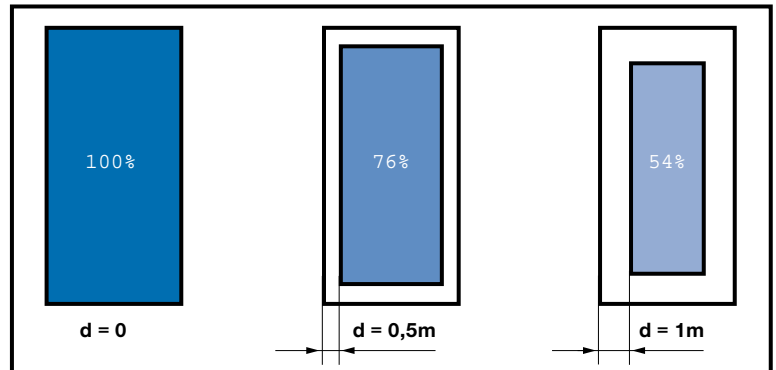
Phase 2 : Influence d'une extraction uniforme

Deux types de répartition du débit d'extraction sont comparés au niveau du caillebotis :

- uniforme,
- linéairement croissante d'une extrémité à l'autre.

L'uniformité de l'extraction étant un paramètre très délicat à maîtriser, il est apparu opportun de simuler une extraction non uniforme suivant une pente croissante se rapprochant des cas rencontrés sur site (fig. 8).

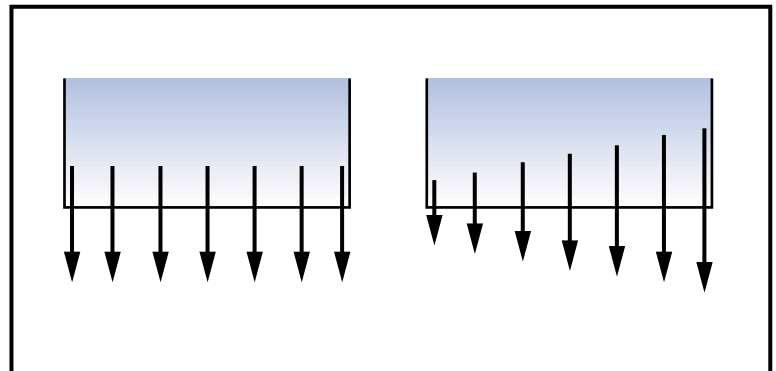
Fig. 7. Vue de dessus des surfaces d'extraction
Bird's-eye view of exhaust surfaces



Pour le débit Q, les vitesses d'extraction au niveau des caillebotis sont les suivantes :

d = 0 m	$V_{\text{extraction}} = 0,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
d = 0,5 m	$V_{\text{extraction}} = 0,11 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$
d = 1 m	$V_{\text{extraction}} = 0,14 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Fig. 8. Répartition du débit d'extraction
Distribution of exhaust rates



Phase 3 : Optimisation de la hauteur des parois

On a fait varier la hauteur des quatre parois verticales de 0 m à 6 m par pas de 1 m. Cette hauteur est liée à l'utilisation de l'aire, et en particulier à la taille des pièces à y traiter.

Il nous a donc paru nécessaire de réaliser des simulations en présence d'un subjectile de grandes dimensions (10 m x 2,5 m x 3 m, placé à 1 m de hauteur). Avec un tel subjectile, l'apport bénéfique des parois n'est réel qu'à partir d'une hauteur de 4 m. L'optimisation se fera donc entre 4,5 et 6 m (*fig. 9*).

Phase 4 : Optimisation des pans coupés en haut des parois

Les pans coupés de 0,5 m de longueur varient selon six inclinaisons distinctes par pas de 45° (*fig. 10*).

Phase 5 : Optimisation du type de compensation

Afin de limiter les remontées d'air dans l'aire ventilée, on propose de tester des systèmes de diffusion d'air à basse vitesse. Quatre hypothèses sont envisagées sur la base de conduits cylindriques diffusant radialement (*fig. 11*) :

- une grande gaine diffusant sur toute sa surface,
- deux petites gaines diffusant sur toutes leurs surfaces,
- une grande gaine diffusant uniquement sur la partie inférieure,
- deux petites gaines diffusant uniquement sur leurs parties inférieures.

Toutes les simulations réalisées au cours de cette phase sont faites à débit constant, les grandes gaines ont 1 m de diamètre et les petites 0,5.

2.2. Critères de comparaison

En l'absence de préconisations précises sur la valeur du débit à mettre en œuvre dans une aire ventilée, Il est apparu nécessaire de se rapprocher des différentes recommandations des « Guides pratiques de ventilation » [1, 2]. Ces derniers, relatifs entre autres à l'aéraulique des cabines fermées à ventilation verticale, nous permettent d'émettre une hypothèse de « bonne ventilation ». Ce critère sera retenu tout au long de cette étude :

- vitesse verticale descendante supérieure à 0,4 m.s⁻¹ à hauteur des voies respiratoires (h = 1,6 m), donc de type piston descendant ;
- absence de courant ascendant dans la zone utile de travail ;

Fig. 9.
Variation de la hauteur des parois
Variation of wall height

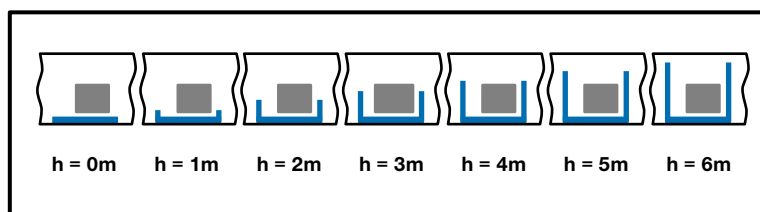
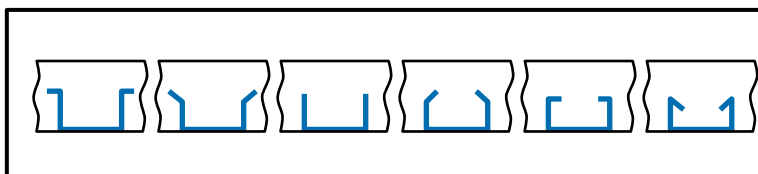


Fig. 10.
Pans coupés
Cant walls



■ la zone utile de travail doit tendre vers la surface totale de l'aire ventilée ;

■ le dimensionnement entrepris doit permettre le pistolage d'un subjectile de grande dimension (hypothèse : volume 10 m x 2,5 m x 3 m, placé à 1 m de haut).

Le synoptique donné *figure 12* présente les principales simulations entreprises lors de cette étude paramétrique.

Les phases 1 et 2 sont traitées avec la version 3D du logiciel EOL. Compte tenu du grand nombre de simulations à entreprendre, la version 2D a été préférée dans les phases 3, 4 et 5 afin de réduire le temps de calcul.

Les phases 1 à 4 sont réalisées en compensation naturelle. Le cheminement bleu foncé représente la synthèse des paramètres optimisés.

2.3. Modélisation de l'aire ventilée sous EOL-3D

Lors de cette phase d'optimisation, l'aire ventilée a été modélisée avec les hypothèses suivantes :

- une surface au sol de 20 m x 5 m = 100 m²,
- des parois de 6 m de hauteur sur les quatre faces, en accord avec le « Guide pratique de ventilation n° 10 » [1],
- un débit Q unitaire d'extraction du caillebotis de 28 000 m³.h⁻¹,
- l'aire ventilée est incluse arbitrairement dans un local parallélépipédique. Un espace de 2,5 m de large est laissé entre

l'aire ventilée et la limite du volume. La distance entre le haut des parois et le plafond est de 2 m.

Le volume total modélisé sous EOL-3D est donc de 25 m x 10 m x 8 m = 2 000 m³.

Le maillage utilisé lors de cette étude est de l'ordre de 90 x 40 x 50 = 180 000 nœuds.

2.4. Choix des conditions limites

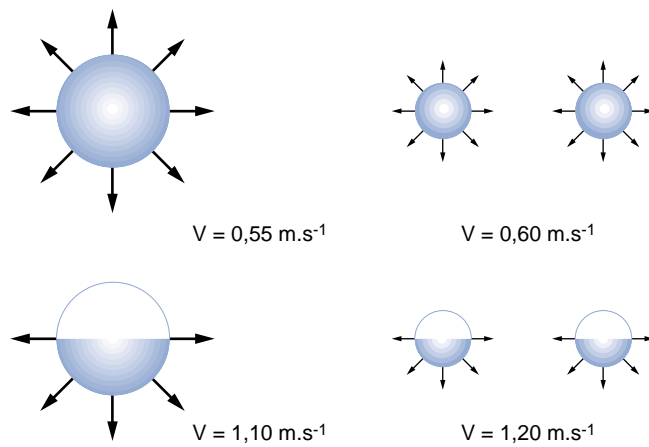
Après avoir défini la géométrie du local (cf. § 2.3), il est nécessaire de spécifier les conditions limites de l'écoulement de ventilation : imposition ou non des vitesses d'entrées ou de sorties d'air et, si nécessaire, valeurs et directions du vecteur vitesse en ces endroits.

Dans cette étude sur les aires ventilées, l'extraction se fait à vitesse imposée. La vitesse verticale retenue correspond, dans le cas d'une extraction uniforme, au ratio entre le débit mis en jeu et la surface du caillebotis.

Quant à la définition des entrées, on impose une vitesse d'entrée horizontale très faible au niveau des quatre parois verticales du local, ce qui permet de modéliser une compensation naturelle en air neuf plus uniforme que si des conditions de pression avaient été imposées.

En conclusion, deux conditions aux limites sont nécessaires pour mener à bien les simulations : d'une part, une vitesse d'extraction au travers du caillebotis et, d'autre part, une vitesse de compensation au niveau des parois du local.

Fig. 11. Diffusion d'air - Air diffusion

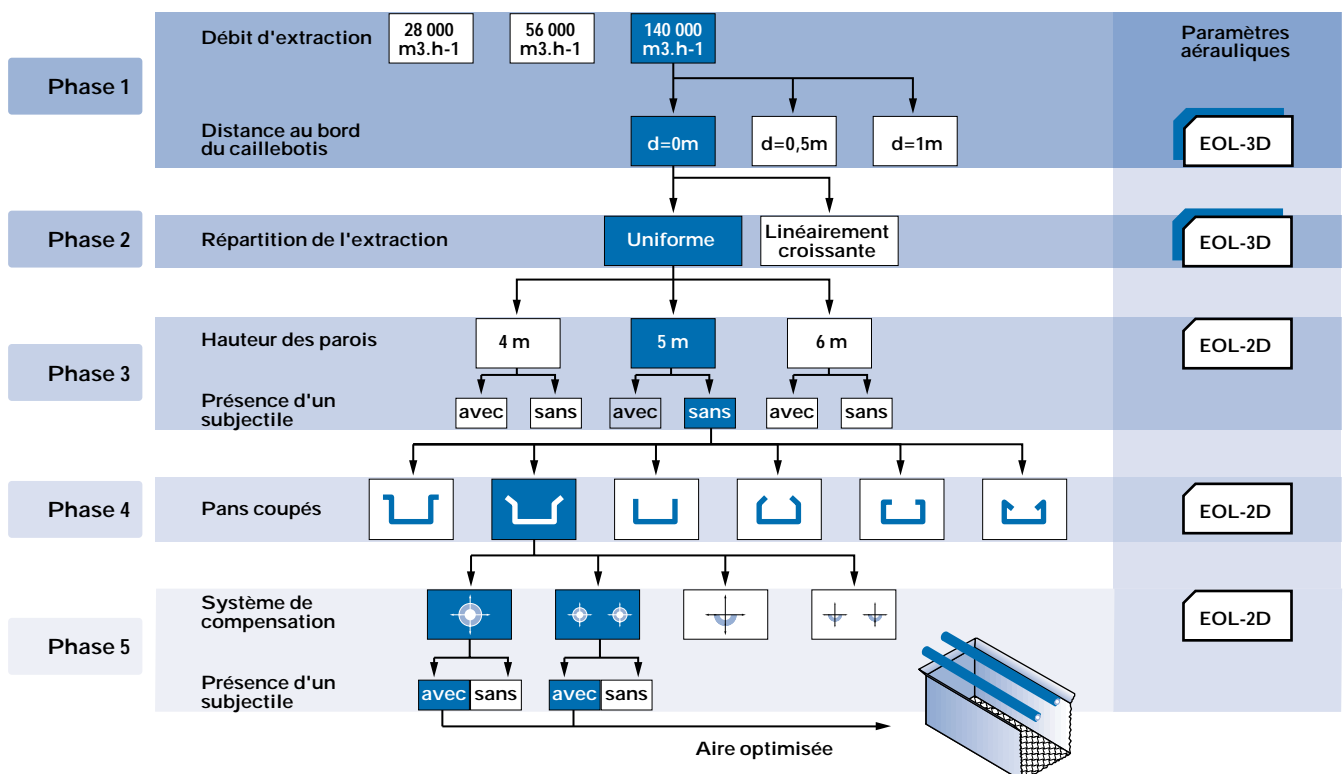


3. Phase 1 : le caillebotis d'extraction doit-il recouvrir toute la surface de l'aire ventilée ?

A partir des données géométriques et aérauliques définies précédemment, on réalise à trois débits différents ($Q = 28\ 000\ \text{m}^3.\text{h}^{-1}$, $2Q$ et $5Q$), trois simulations numériques en faisant varier la distance au bord de 0 m (100 % de la surface), 0,5 m puis 1 m (54 % de la surface totale de l'aire ventilée).

Les simulations effectuées avec les débits respectifs Q et $2Q$ ne permettent pas de vérifier le critère de bonne ventilation retenu en termes de vitesse de balayage descendante (résultats non présentés dans cette note). Seul un débit d'extraction de $5Q$, à savoir $140\ 000\ \text{m}^3.\text{h}^{-1}$, a permis d'atteindre ce critère (vitesse verticale descendante $\geq 0,4\ \text{m}.\text{s}^{-1}$ à hauteur des voies respiratoires, $h = 1,6\ \text{m}$).

Fig. 12. Cheminement paramétrique de l'étude - Parameter optimisation pathway



Les champs de vitesse simulés avec un débit d'extraction de 5Q montrent que les vitesses verticales se répartissent de façon symétrique par rapport au plan médian de l'aire. La zone bien ventilée se resserre au milieu de l'aire au fur et à mesure que la surface d'extraction diminue (fig. 13 à 15).

En conclusion :

- seule l'utilisation d'un débit de 5Q permet d'obtenir des vitesses verticales de l'ordre de 0,4 m.s⁻¹ au niveau des voies respiratoires. Ce fait est attribuable à la canalisation du débit d'extraction par quatre parois verticales ;
- cette structure du champ de vitesse à hauteur des voies respiratoires est reproduite, quels que soient le débit et la surface d'aspiration ;
- les valeurs des vitesses verticales sont directement proportionnelles aux différentes vitesses d'extraction au niveau du caillebotis. Cette constatation est néanmoins peu surprenante et explicable directement par le confinement de l'aire ventilée : quatre parois verticales de même hauteur, extraction uniforme, compensation naturelle et absence de subjectile.

Fig. 13. Iso-vitesses de la composante verticale de la vitesse au niveau des voies respiratoires (distance au bord = 0 m) - Vertical velocity component isolines at breathing zone level (distance from edge = 0 m)

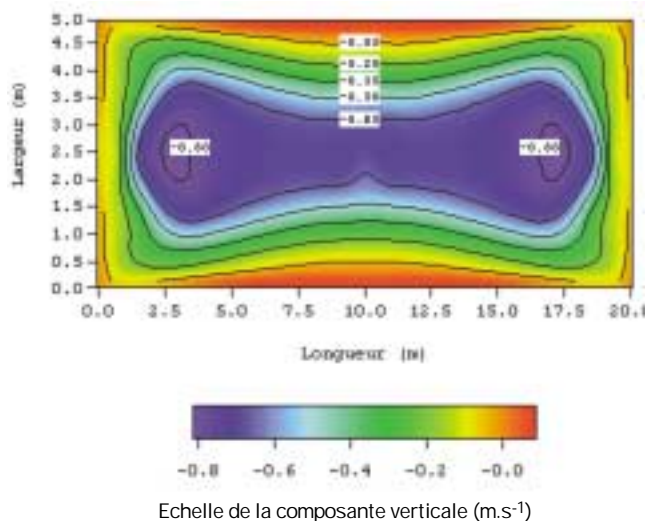


Fig. 14. Iso-vitesses de la composante verticale de la vitesse au niveau des voies respiratoires (distance au bord = 0,5 m) - Vertical velocity component isolines at breathing zone level (distance from edge = 0.5 m)

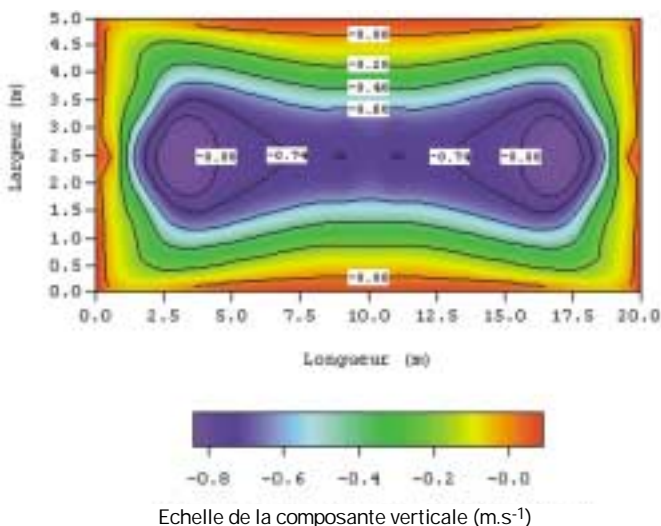
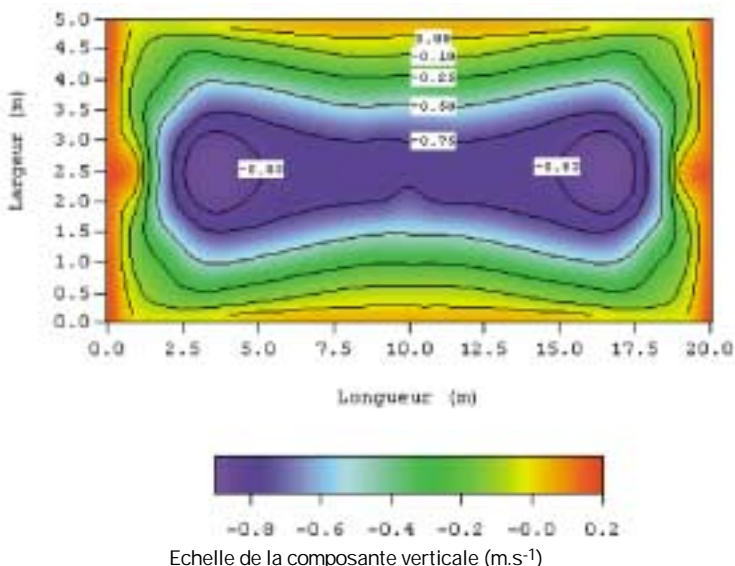


Fig. 15. Iso-vitesses de la composante verticale de la vitesse au niveau des voies respiratoires (distance au bord = 1 m) - Vertical velocity component isolines at breathing zone level (distance from edge = 1 m)



Les zones recirculatoires pariétales pour un débit $5Q$ ont visuellement la même allure, quelle que soit la distance du caillebotis aux parois (fig. 16 à 18). Les légères différences d'écoulement se cantonnent uniquement sur une hauteur de 0 à 1 m.

Un caillebotis couvrant toute la surface de l'aire ventilée a pour avantage d'empêcher le développement de zones recirculatoires jusqu'au sol. Celles-ci se situent à une hauteur supérieure à un mètre.

La principale différence entre les écoulements obtenus n'est détectable que sur une hauteur inférieure à 1 m. Pour la suite des simulations, un caillebotis avec un débit de $140\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ situé à l'aplomb des quatre parois de l'aire ventilée est retenu.

4. Phase 2 : comment répartir le débit sur la surface d'extraction ?

La mauvaise répartition du débit d'extraction constitue souvent un défaut des aires ventilées. Cette phase a pour but de montrer les conséquences réelles d'une telle situation. C'est pourquoi, on a choisi de comparer une extraction uniforme avec le cas extrême de répartition des vitesses représentée figure 19.

Fig. 19. Répartition du débit d'extraction pour un débit de $5Q$
Exhaust flow rate distribution for flow rate $5Q$ (Q = reference exhaust flow rate)

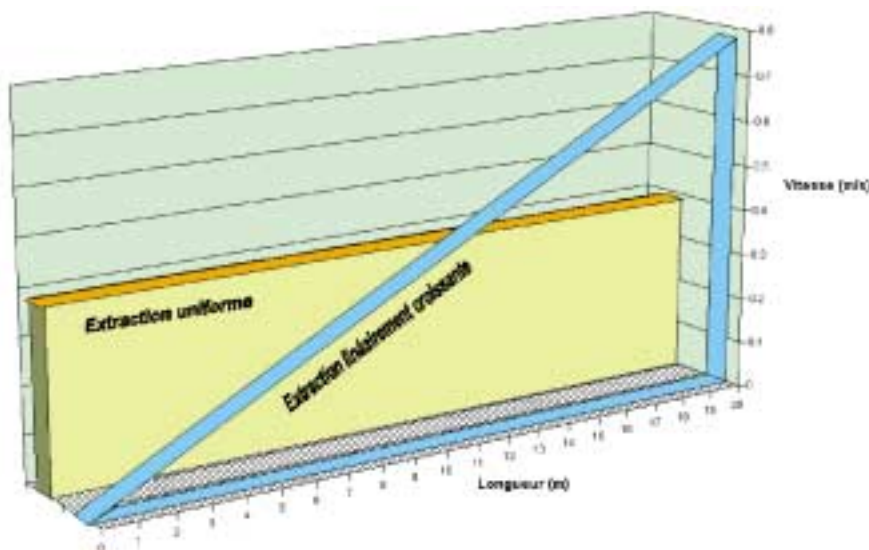


Fig. 16. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale sur le plan médian (distance au bord = 0 m)
Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane (distance from edge = 0 m)

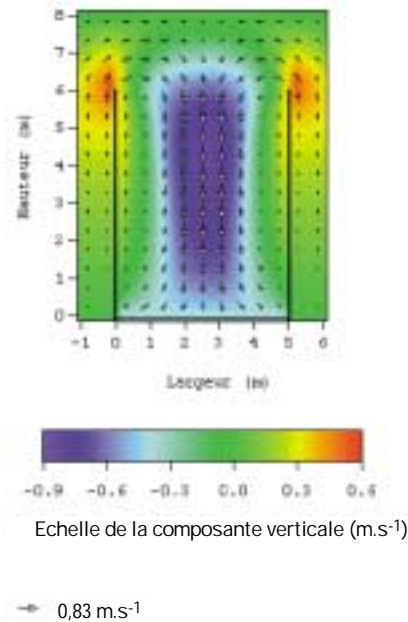


Fig. 17. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale sur le plan médian (distance au bord = 0,5 m)
Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane (distance from edge = 0.5 m)

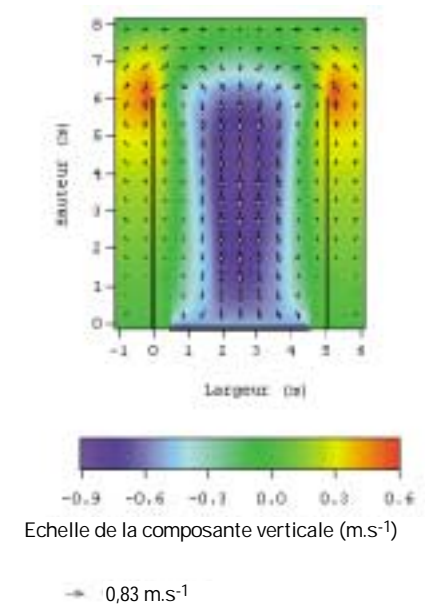
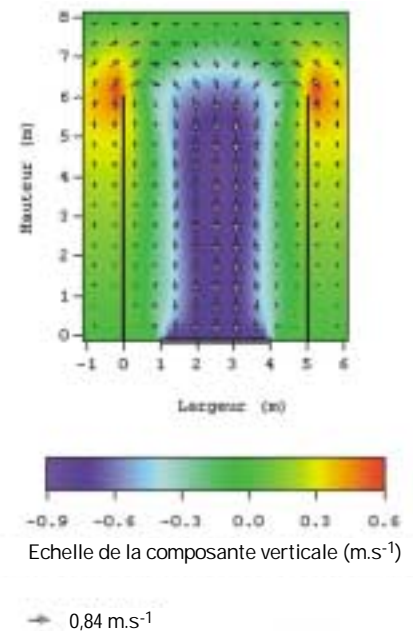


Fig. 18. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale sur le plan médian (distance au bord = 1 m)
Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane (distance from edge = 1 m)



La visualisation des différentes représentations graphiques (fig. 13, 20 et 21) permet de constater que le champ d'isovitesses verticales au niveau des voies respiratoires (cf. fig. 20) présente un déséquilibre des vitesses d'extraction par comparaison avec une vitesse d'extraction uniforme (cf. fig. 13). Ce déséquilibre de vitesse se traduit par une remontée d'air du côté sous-ventilé (partie gauche) au profit d'une zone sur ventilée (- 0,9 m.s⁻¹) en partie droite (cf. fig. 21).

Les simulations entreprises lors de cette seconde phase du protocole de simulation confirment bien l'intérêt d'obtenir un débit d'extraction réparti uniformément au niveau d'un caillebotis situé à l'aplomb des quatre parois verticales de l'aire.

En phase de conception d'une aire ventilée, une attention toute particulière doit donc être portée sur le choix du système de répartition et du média filtrant. La performance du système doit être maintenue de manière à éviter le colmatage partiel des filtres. Il conviendra donc de s'assurer de l'uniformité des vitesses d'aspiration au moment de la réception d'une installation.

Fig. 20. Iso-vitesses de la composante verticale de la vitesse au niveau des voies respiratoires. Extraction suivant une rampe de croissance linéaire -
Vertical velocity component isolines at breathing zone level. Exhaust rate distribution follows a linear increase law

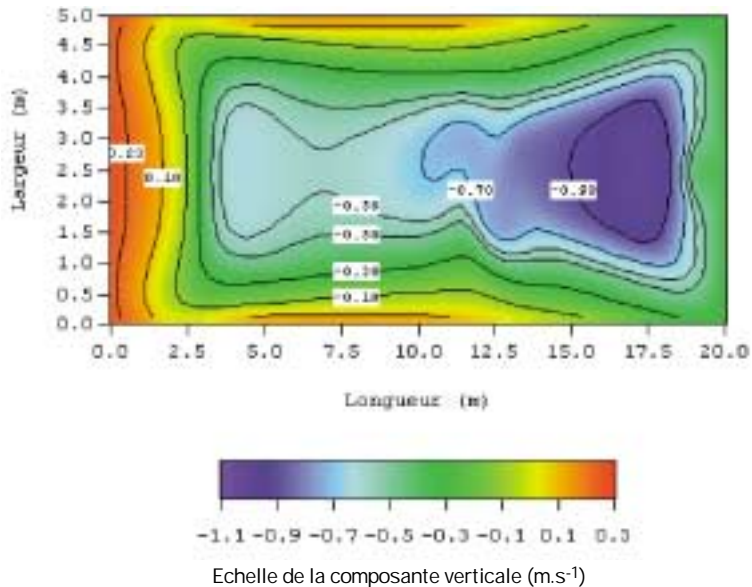
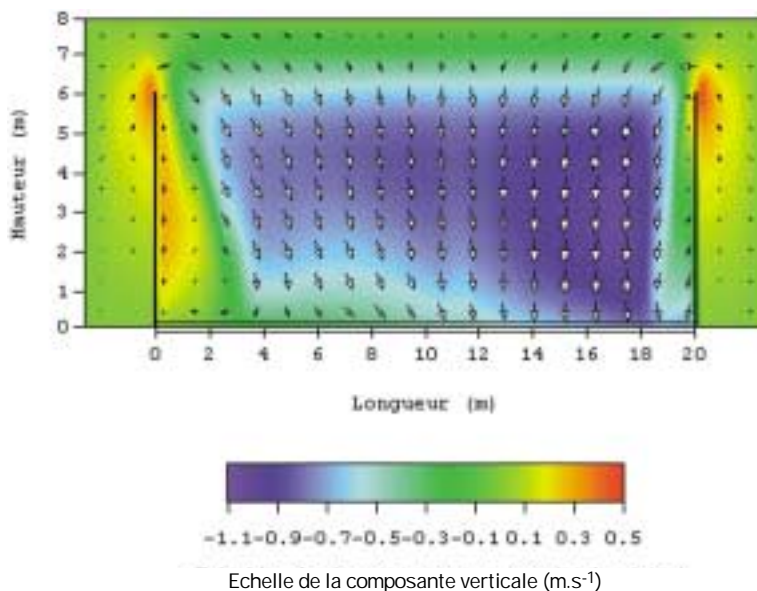


Fig. 21. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale à mi-largeur
Extraction suivant une rampe de croissance linéaire

Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field at mid-width. Exhaust rate distribution follows a linear increase law



→ 1,05 m.s⁻¹

5. Phase 3 : quelle doit être la hauteur des parois ?

L'objectif de cette troisième phase est d'optimiser la hauteur de paroi d'une aire ventilée pouvant contenir des subjectiles d'une hauteur de 4 m.

De ce fait, la comparaison portera sur des hauteurs de paroi de 4, 5 et 6 m en présence d'un subjectile (fig. 22 à 24).

En présence d'un subjectile, on vise une bonne évacuation des polluants émis sur les cotés mais également sur la face supérieure du subjectile afin d'éviter leur dispersion dans tout le local abritant l'aire ventilée.

Pour une hauteur de paroi de 4 m, la ventilation réalise un balayage efficace des parois verticales du subjectile. En revanche, les polluants émis sur la face supérieure ne sont pas bien captés par le dispositif d'extraction. Lorsque l'on augmente la hauteur des parois à 5 m, le captage semble total, y compris sur la face supérieure du subjectile.

Si on porte ensuite la hauteur des parois à 6 m, la performance de l'installation ne s'améliore pas par rapport à des parois de 5 m. Lors du traitement d'une pièce haute, la hauteur des parois doit donc être strictement supérieure à la hauteur de la pièce à traiter.

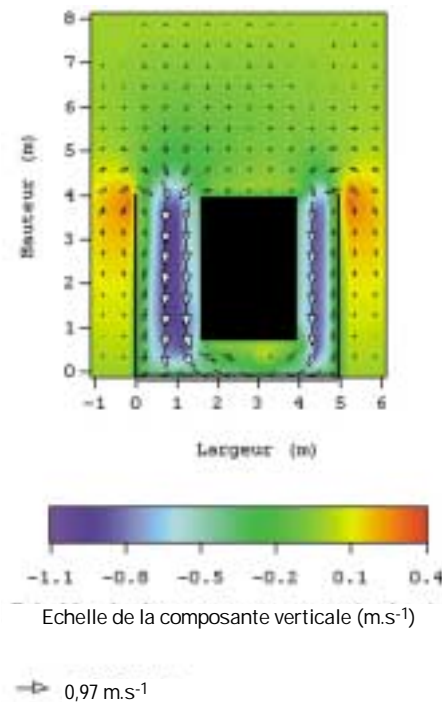


Fig. 22. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale sur le plan médian. Parois de 4 m de hauteur et présence d'un subjectile

Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane. 4m-high wall with substrate

Fig. 23. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale sur le plan médian. Parois de 5 m de hauteur et présence d'un subjectile

Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane. 5m-high wall with substrate

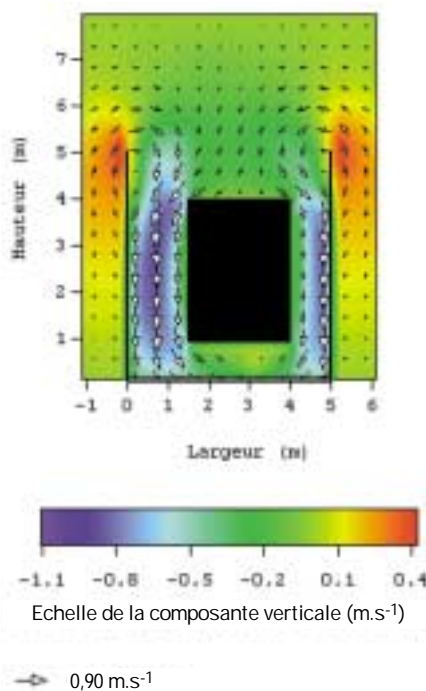
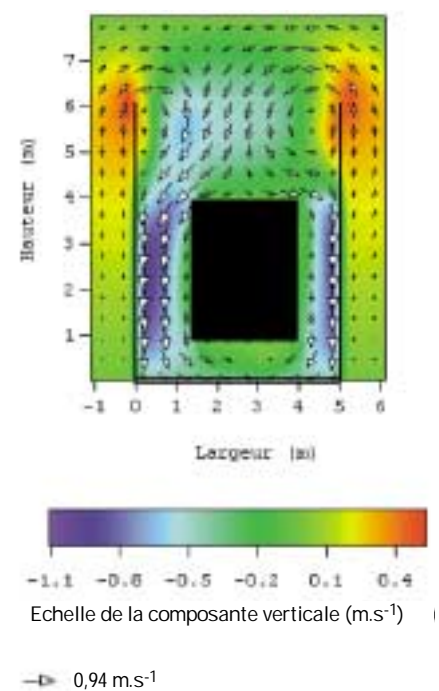


Fig. 24. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale sur le plan médian. Parois de 6 m de hauteur et présence d'un subjectile

Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane. 6m-high wall with substrate



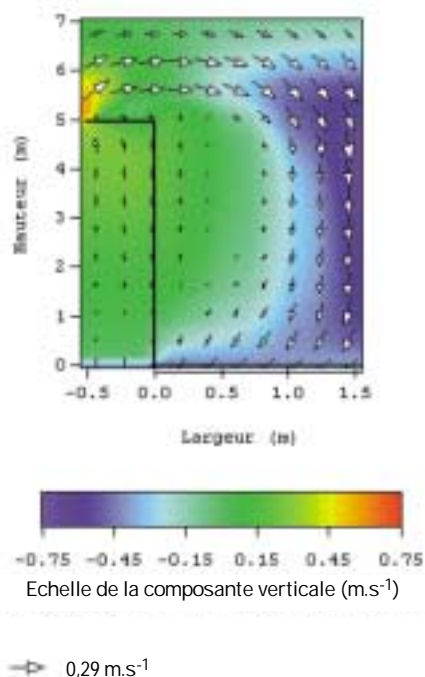


Fig. 25. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale sur le plan médian. Pans coupés inclinés à 90° vers l'extérieur de l'aire ventilée

Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane. Cant walls sloping at an angle of 90° towards outside of ventilated area

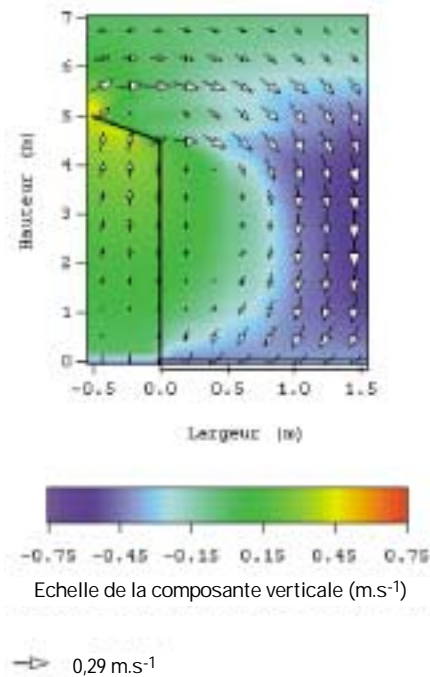
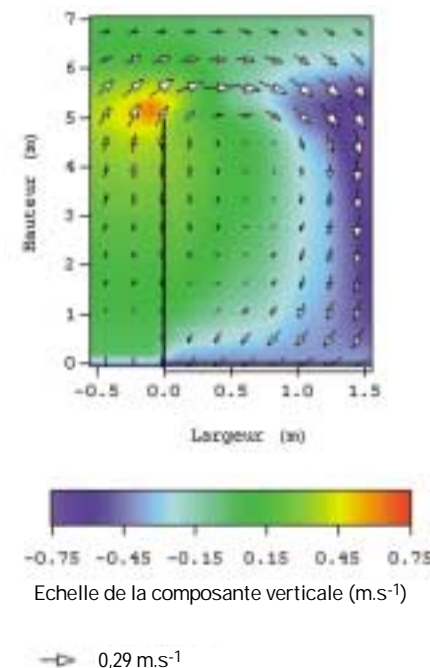


Fig. 26. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale sur le plan médian. Pans coupés inclinés à 45° vers l'extérieur de l'aire ventilée

Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane. Cant walls sloping at an angle of 45° towards outside of ventilated area

Fig. 27. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale sur le plan médian. Parois droites

Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane. Straight walls



6. Phase 4 : faut-il des pans coupés et de quelle forme ?

Le défaut majeur constaté précédemment est l'existence d'une recirculation le long des parois verticales. Pour limiter leur développement, une solution technique consiste à ajouter des pans coupés en haut des parois.

Dans cette phase, cinq hypothèses d'inclinaison de pans coupés sont comparées à une paroi droite (cf. fig. 10).

Les figures utilisées ci-dessous correspondent à un agrandissement près des parois verticales. Seul l'axe des abscisses a été dilaté, ce qui déforme la représentation graphique des parois à pans coupés obliques.

D'un point de vue qualitatif, les figures 25 à 30 montrent l'influence des pans coupés sur la largeur de la zone de recirculation.

Du point de vue quantitatif, l'inclinaison des pans coupés à 45° vers l'extérieur (courbe avec petits triangles de la figure 31) permet d'élargir la zone utile de travail de 20 % par rapport à une paroi droite (courbe de couleur bleue).

Les autres hypothèses d'inclinaison se révèlent toutes meilleures qu'une paroi droite, mais néanmoins moins bonne que celle inclinée de 45° vers l'extérieur.

En conséquence, avec des pans coupés inclinés de 45° vers l'extérieur, la largeur des remontées d'air le long des parois est fortement diminuée (resserrement de cette zone de 20 à 40 cm).

En conclusion, en l'absence de subjectile, des pans coupés inclinés à 45° et tournés vers l'extérieur de l'aire ventilée améliorent sensiblement le fonctionnement aérodynamique de l'aire ventilée : la largeur de la surface utile de travail est augmentée de 20 % et la largeur des zones de remontées d'air est divisée par deux.

Pour la suite de l'étude paramétrique et hormis pour la situation existante, toutes les parois sont équipées de pans coupés inclinés à 45° vers l'extérieur de l'aire ventilée.

Les résultats obtenus ne peuvent en aucun cas être rapprochés des préconisations concernant l'inclinaison des pans coupés utilisés dans les cabines ventilées [2]. Dans ces dernières, la nécessité de réduire la surface du plénum a conduit à la généralisation des pans coupés tournés vers l'intérieur et utilisés entre autre pour l'éclairage.

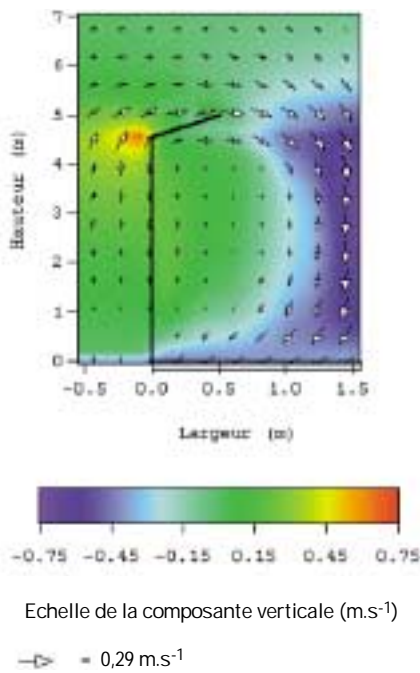


Fig. 28. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale sur le plan médian. Pans coupés inclinés à 45° vers l'intérieur de l'aire ventilée
 Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane. Cant walls sloping at an angle of 45° towards inside of ventilated area

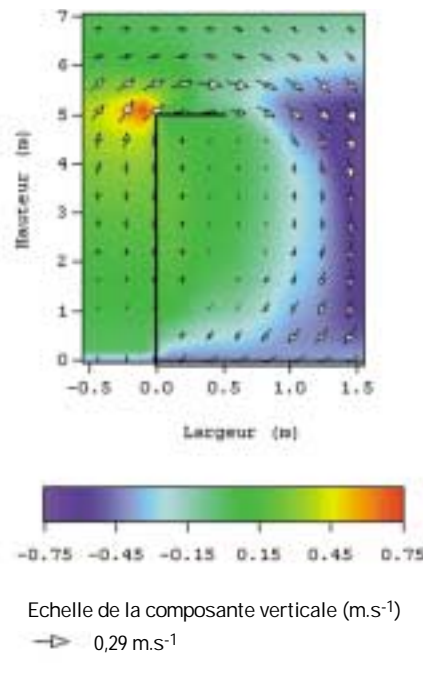


Fig. 29. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale sur le plan médian. Pans coupés inclinés à 90° vers l'intérieur de l'aire ventilée
 Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane. Cant walls sloping at an angle of 90° towards inside of ventilated area

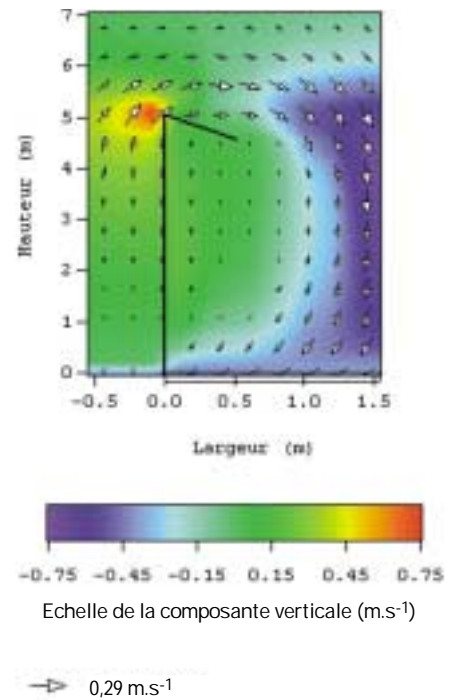
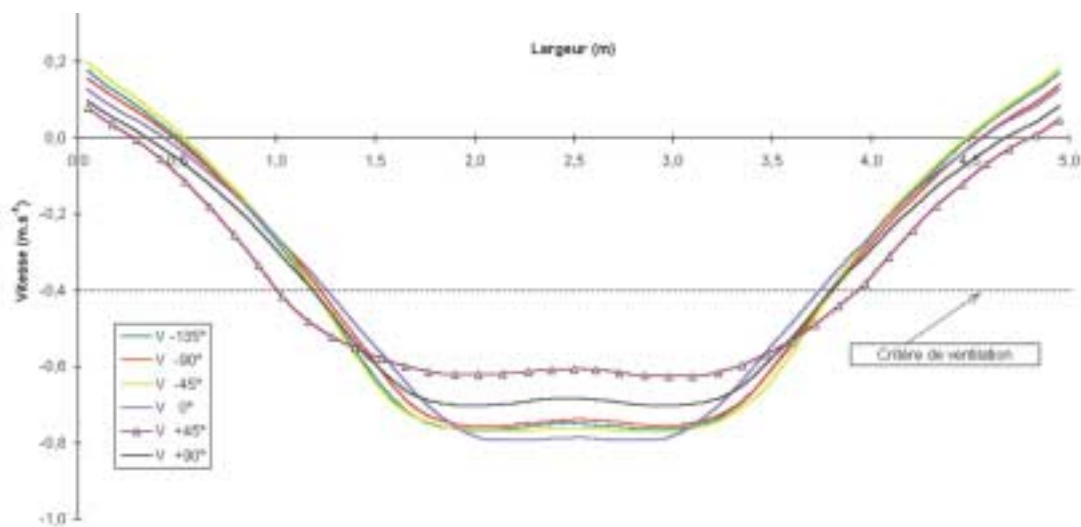


Fig. 30. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale sur le plan médian. Pans coupés inclinés à 135° vers l'intérieur de l'aire ventilée
 Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane. Cant walls sloping at an angle of 135° towards inside of ventilated area

Fig. 31. Vitesses verticales au niveau des voies respiratoires calculées dans le plan médian en fonction de l'inclinaison des pans coupés
 Vertical velocities at breathing zone level computed in the median plane as a function of cant wall slope



7. Phase 5 : quelle compensation d'air recommander ?

Jusqu'à présent, on s'est attaché à optimiser la géométrie de l'aire ventilée en travaillant en compensation naturelle à basse vitesse. La compensation naturelle utilisée dans la simulation est idéale : vitesse horizontale de faible intensité au niveau des quatre parois du local. En situation industrielle, l'alimentation en air neuf est rarement uniforme et à basse vitesse, c'est pourquoi il est impératif d'utiliser une compensation mécanique.

Dans le but de proposer un système d'assainissement global comprenant une compensation mécanique, il a été décidé de comparer les résultats obtenus entre une compensation mécanique à base de jets hautes vitesses (situation actuelle) à une compensation mécanique à base de gaines cylindriques diffusants radialement à basses vitesses. Le mode de diffusion basse vitesse a été retenu pour se rapprocher d'une compensation mécanique de type cabine fermée.

7.1. Modélisation de la compensation actuellement employée

Afin de vérifier et d'apprécier l'amélioration aéraulique d'une compensation mécanique à base de gaines diffusantes, on est amené à simuler le système de compensation mécanique actuellement employé. Ce dernier est formé d'un caisson de 0,5 m x 0,7 m installé sur toute la longueur de l'aire ventilée en haut d'une des parois verticales longitudinales. Le soufflage est de type jet plan incliné à 45° vers le bas par rapport à l'horizontale (fig. 32).

Du fait du débit d'air additionnel induit par le jet de soufflage, le confinement de l'aire ventilée implique des mouvements d'air ascensionnels sur la demi-largeur de l'aire (partie gauche de la figure 32).

Le jet oblique se plaque le long de la paroi verticale opposée, longe celle-ci de haut en bas puis le caillebotis ; il remonte le long de l'autre paroi jusqu'au caisson de soufflage créant ainsi une vaste recirculation sur toute la largeur et la hauteur de l'aire ventilée. Nous sommes alors en présence d'une ventilation par mélange

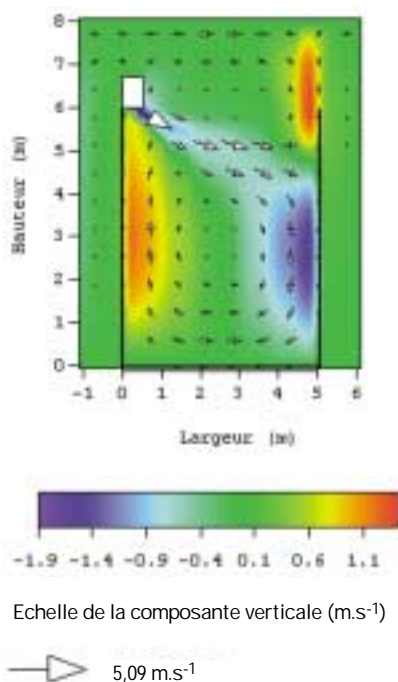


Fig. 32. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale sur le plan médian. Compensation mécanique actuellement utilisée
Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane. Mechanical compensation currently used

7.2. Compensation basse vitesse

Quatre hypothèses de diffusion basse vitesse sont testées (cf. fig. 11). Toutes les simulations sont réalisées à débit constant (5Q). Le rapport des diamètres entre les grandes gaines et les petites gaines est de 2, de manière à conserver des vitesses de soufflage constantes par type de gaine totalement ou partiellement diffusante.

Pour la simulation géométrique, la gaine circulaire est représentée par un carré. Les profils de vitesse de soufflage sont choisis de telle sorte que l'on se rapproche d'une diffusion radiale (cf. fig. 11).

7.2.1. Etude des champs de vitesse

Dans le cas des gaines totalement diffusantes, les figures 33 et 34 montrent une distribution de vitesse verticale quasiment homogène sur toute la largeur de l'aire ventilée. On est parvenu à recréer artificiellement une structure d'écoulement proche de celle obtenue en compensation naturelle tout en évitant les zones recirculatoires pariétales.

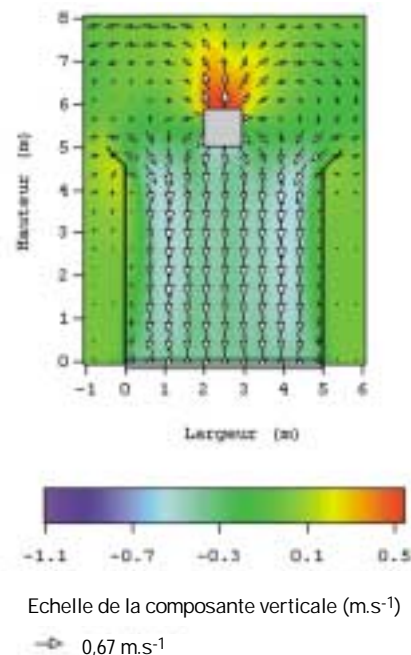
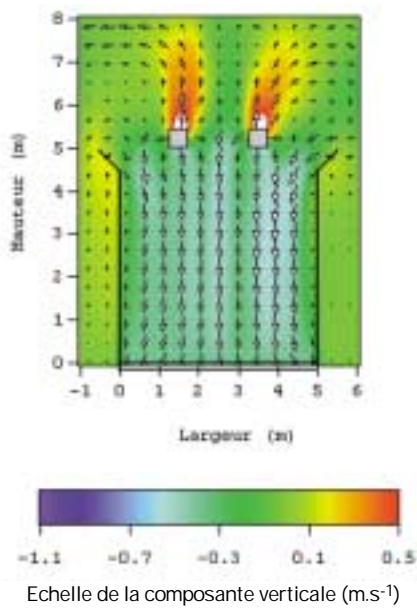


Fig. 33. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale sur le plan médian. Compensation mécanique basse vitesse par une gaine diffusante
Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane. Low velocity mechanical compensation through diffusion duct

Dans le cas des demi gaines, les figures 35 et 36 montrent une distribution non uniforme des vitesses verticales car ces demi gaines créent un écoulement de type jet situé sous les diffuseurs (la vitesse de soufflage étant de l'ordre du mètre par seconde). L'apparition de nombreuses zones à vitesses très faibles peut être imputée à un effet de maillage. Ces simulations peuvent en effet souffrir d'une mauvaise modélisation des demi gaines.

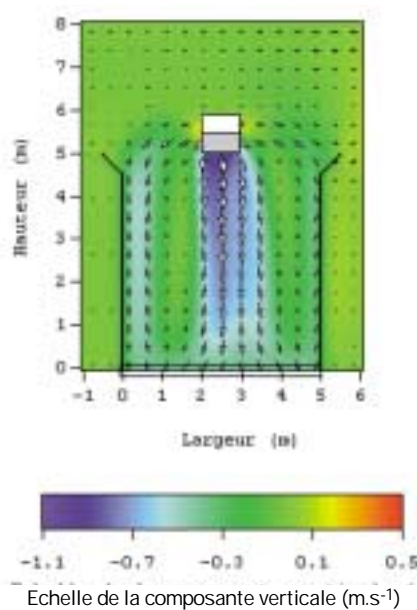
En résumé, en conditions isothermes, il semble que l'emploi de gaines totalement diffusantes soit à privilégier. L'étude ne permet pas de se prononcer sur le nombre de gaines à utiliser. Ce choix dépend aussi de facteurs non aérauliques. On privilégiera par exemple l'utilisation de plusieurs gaines en présence d'un pont roulant.



→ 0,86 m.s⁻¹

Fig. 34. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale sur le plan médian. Compensation mécanique basse vitesse par deux gaines diffusantes

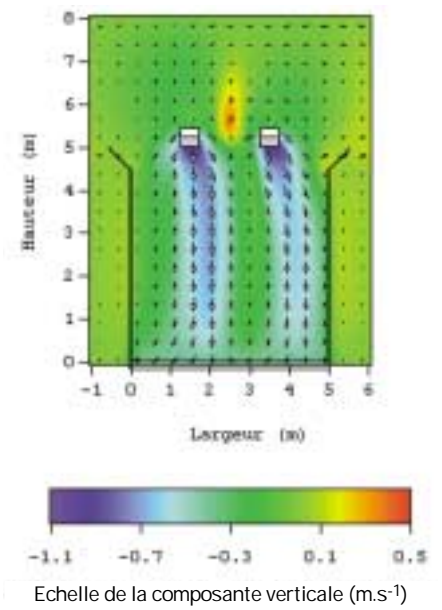
Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane. Low velocity mechanical compensation through two diffusion ducts



→ 1,21 m.s⁻¹

Fig. 35. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale sur le plan médian. Compensation mécanique basse vitesse par une demi gaine diffusante

Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane. Low velocity mechanical compensation through one half diffusion duct



→ 1,73 m.s⁻¹

Fig. 36. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec le champ de vitesse verticale sur le plan médian. Compensation mécanique basse vitesse par deux demi gaines diffusantes

Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane. Low velocity mechanical compensation through two half diffusion ducts

7.2.2. Etude des profils de vitesse

De manière quantitative, l'étude des profils de vitesse verticale au niveau des voies respiratoires sur le plan médian et pour un débit de 5Q (fig. 37) permet de comparer la performance des quatre hypothèses de compensation d'air.

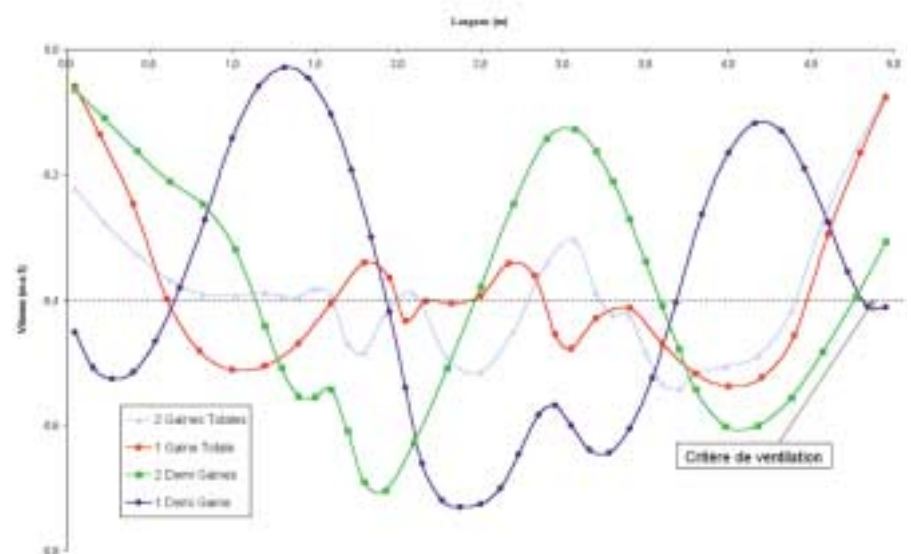
Dans le cas des gaines totalement diffusantes, les profils de vitesse restent très proches de notre critère de bonne ventilation.

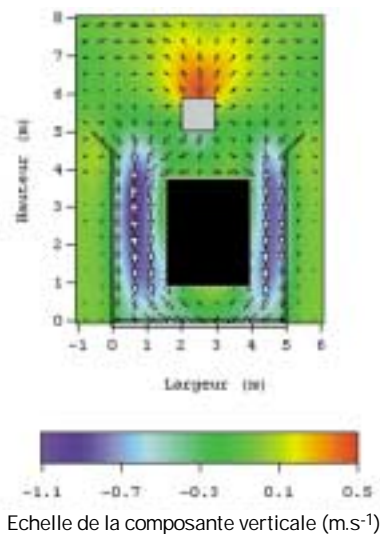
Les distributions de vitesse dans le cas des demi gaines permettent de vérifier que les vitesses verticales situées sous le diffuseur sont importantes, tandis qu'apparaissent des zones quasiment mortes. Ceci est dû aux vitesses de soufflage relativement élevées.

En conclusion, l'emploi de gaines totalement diffusantes permet de recréer un écoulement de type piston descendant.

Fig. 37. Vitesses verticales au niveau des voies respiratoires évaluées dans le plan médian en fonction du mode de compensation basse vitesse

Vertical velocities at breathing zone level computed in the median plane as a function of low velocity compensation method





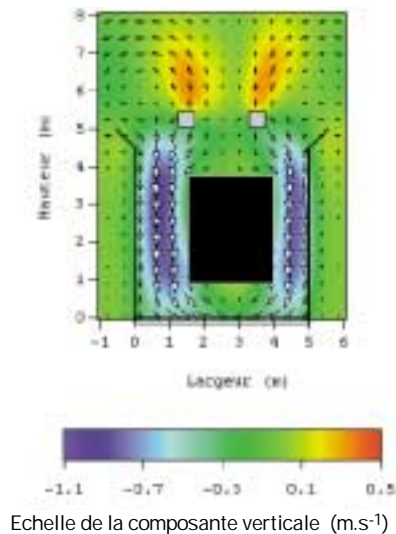
→ 1,09 m.s⁻¹

Fig. 38. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse sur le plan médian. Compensation mécanique basse vitesse par une gaine diffusante et présence d'un subjectile

Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane. Low velocity mechanical compensation through diffusion duct with substrate

Fig. 40. Iso-surfaces de température sur le plan médian. Compensation mécanique basse vitesse par deux gaines diffusantes

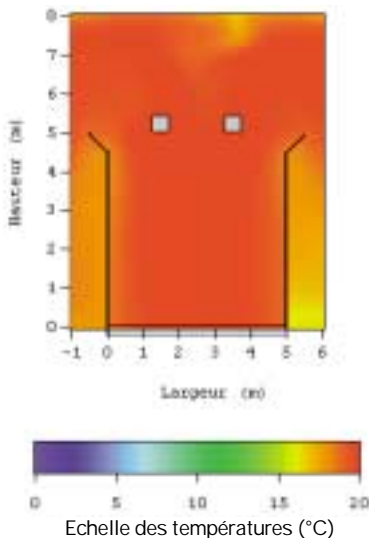
Iso-temperature plots in the median plane. Low velocity mechanical compensation through two diffusion ducts



→ 1,09 m.s⁻¹

Fig. 39. Superposition d'iso-surfaces de la composante verticale de la vitesse avec la champ de vitesse verticale sur la plan médian. Compensation mécanique basse vitesse par deux gaines diffusantes et présence d'un subjectile

Superimposition of vertical velocity component plots with vertical velocity field in the median plane. Low velocity mechanical compensation through two diffusion ducts with substrate



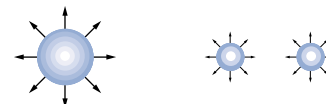
8. Validation de la configuration optimisée en présence d'un subjectile

Suite aux phases d'optimisation 1 à 5, les paramètres de dimensionnement suivants ont été retenus :

- débit 140 000 m³.h⁻¹ (conséquence de notre hypothèse de bonne ventilation),
- caillebotis couvrant complètement la surface au sol (100 %),
- débit d'extraction réparti uniformément sous le caillebotis (uniforme),
- hauteur des parois de 5 mètres (h = 5 m),
- parois équipées de pans coupés à 45° vers l'extérieur :



- compensation basse vitesse à conduit totalement diffusant :



Les deux dernières phases 4 et 5 n'ont pas pris en compte la présence du subjectile à traiter. Les paramètres de dimensionnement énumérés ci-dessus doivent donc maintenant être en présence d'un subjectile. Le subjectile modélisé est le même que celui utilisé en phase 3 lors de l'optimisation des parois (10 x 2,5 x 3 m placé à 1 m de hauteur). De plus, il se trouve légèrement décalé par rapport au milieu de l'aire afin d'éviter une géométrie trop symétrique. Les figures 38 et 39 sont les analogues des figures 33 et 34 présentées précédemment avec l'ajout d'un subjectile. La présence du subjectile, compte tenu qu'il n'est pas perméable à l'air, non seulement ne remet pas en question la performance du système mais a tendance à nettement l'améliorer : les vitesses descendantes le long des parois verticales sont plus élevées avec l'obstacle.

9. Chauffage

Les simulations ont été réalisées en régime établi. Un seul mode de chauffage a été étudié. Les conditions limites de calcul retenues sont les suivantes :

- débit 5Q,
- température de soufflage 20 °C au niveau de deux gaines diffusantes cylindriques,
- coefficients de déperditions thermiques du local :
 - parois verticales : 25 W.m²,
 - plafond : 50 W.m².

La figure 40 présente le champ de température calculé. Celui-ci permet de constater l'uniformité de la répartition des températures dans l'ensemble du local.

Les bonnes performances du système de chauffage observées dans cette étude ne sont pas transposables dans le cas d'un atelier dont les hauteurs et volumes seraient grands par rapport à ceux de l'aire. En effet, dans ce dernier cas, la compensation en air chaud à basse vitesse n'est pas recommandée puisqu'un tel système réchaufferait surtout le volume situé au-dessus de la zone de travail. Le système de chauffage adapté à de tels ateliers n'a pas été envisagé dans le cadre de cette étude.

Conclusion

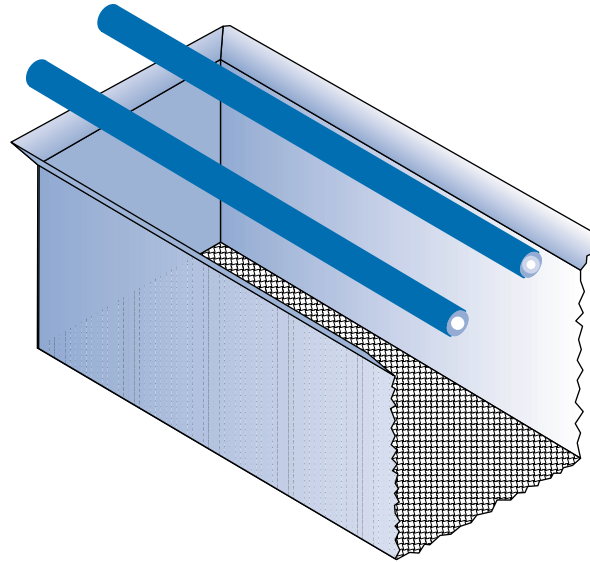
Les aires ventilées sont des systèmes d'assainissement rarement conseillés lors de la première approche d'un problème de prévention. Il arrive pourtant que l'on ne puisse éviter leur emploi afin de respecter les conditions d'hygiène et de sécurité. Dans ces situations et par analogie, on a cherché à rapprocher les performances des aires ventilées de celles des cabines à ventilation verticale. La figure 41 illustre les différentes conclusions de l'étude paramétrique.

La configuration optimisée a les caractéristiques suivantes :

- débit 140 000 m³.h⁻¹ (0,4 m.s⁻¹ à hauteur des voies respiratoires),
- caillebotis couvrant complètement la surface au sol,
 - débit d'extraction réparti uniformément sous le caillebotis,
 - hauteur des parois de 5 mètres (hauteur supérieure à la hauteur du subjectile),
 - parois équipées de pans coupés à 45° vers l'extérieur,
- compensation basse vitesse à conduit totalement débitant.

Par sa souplesse d'utilisation, la ventilation prévisionnelle a permis de tester plusieurs hypothèses de dimensionnement. Certaines phases ont permis de vérifier des propositions intuitives comme par exemple l'uniformité de l'extraction. A l'inverse, d'autres phases demandaient à être validées comme celles concernant les pans coupés, ce qui montre l'apport original de la ventilation prévisionnelle. Une validation de terrain des résultats serait souhaitable.

Fig. 41. Aire optimisée par simulations numérique -
Optimised area obtained by numerical simulation



BIBLIOGRAPHIE

1. Guide Pratique de Ventilation n° 10 - Peinture des matériels de grandes dimensions. INRS, 1989, ED 713, 17 p.
2. Guide Pratique de Ventilation n° 9 - Ventilation des cabines et postes de peinture. INRS, 1992, ED 663, 19 p.
3. COLLINEAU S., SÉRIEYS J.C., FONTAINE J.R., AUBERTIN G. - Experimental and numerical simulations of ventilation in a painting area. 5th International Conference on « Air Distribution in Rooms ». Yokohama (Japon), 17/19 juillet 1996. In : *Proceedings of Roomvent'96*, 2, 1996, pp. 241-48.
4. KOSKELA H., NIEMELÄ R., HAUTALAMPI T., Heikkinen J., Collineau S. - Use of ultrasonic anemometer for characterising room air flows. *Proceedings of « Indoor Air 96 »*. Nagoya, juillet 1996, pp. 21-24.
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 Documentaire - Hygiène et Sécurité du Travail*, 1996, 165, ND 2029, pp. 409-424.

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE ET DE SÉCURITÉ - 30, rue Olivier-Noyer, 75680 Paris cedex 14

Tiré à part des Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail, 3^e trimestre 1999, n° 176 - ND 2111 - 1 200 ex.
N° CPPAP 804/AD/PC/DC du 14-03-85. Directeur de la publication : J.-L. MARIÉ. ISSN 0007-9952 - ISBN 2-7389-0832-2