

scientifique & technique
note
note scientifique
& technique
scientifique
technique

**Analyse par simulation numérique
de la ventilation des fosses de visite
des centres de contrôle technique
poids lourds**

Analyse par simulation numérique de la ventilation des fosses de visite des centres de contrôle technique poids lourds

Robert Braconnier

Département Ingénierie des procédés

NS 357
février 2018

Résumé

Cet article examine la ventilation des fosses de visite des centres de contrôle technique pour poids lourds à l'aide de la simulation numérique des écoulements. L'étude porte sur un atelier ventilé, au travers des portes d'accès et de départ des véhicules, par une ventilation générale naturelle induite par un vent extérieur. Trois véhicules sont considérés : un poids lourd articulé (échappement latéral), un autobus (échappement arrière) et un camion porteur (échappement central). Les niveaux d'exposition sont très sensibles à l'intensité et à l'orientation du vent. Les valeurs plus élevées sont atteintes en présence d'un échappement central. L'efficacité d'une ventilation locale complémentaire de la fosse, par aspiration ou par soufflage, est également étudiée. Les meilleurs résultats sont obtenus grâce à un soufflage d'air au moyen d'un ventilateur axial placé à l'extrémité de la fosse la plus proche de l'entrée d'air de l'atelier.

Abstract

This article examines ventilation of inspection pits at heavy goods vehicle testing stations by using computational fluid dynamics. The study was conducted in a workshop that was ventilated, through the vehicle entrance and exit doors, by natural general ventilation induced by outside wind. Three vehicles were considered: an articulated lorry (side exhaust), a bus (rear exhaust), and a rigid truck (central exhaust). The exposure levels were very sensitive to the intensity and to the direction of the wind. The highest values were attained with a central exhaust. The effectiveness of an addition local system for ventilating the pit, by suction or by blowing, was also studied. The best results were obtained by blowing air using an axial fan placed at the end of the pit that was closer to the air intake via which air entered the workshop.

Table des matières

1. Introduction	1
2. Matériels et méthodes	1
2.1. Géométrie du local	1
2.2. Géométrie du poids lourd articulé	2
2.3. Géométrie de l'autobus	3
2.4. Géométrie du camion porteur	4
2.5. Obstacle représentant l'opérateur	4
2.6. Source de polluant	5
2.7. Prise d'air moteur	5
2.8. Conditions aérauliques	6
2.9. Simulations numériques	7
2.10. Objectifs	8
3. Résultats pour le poids lourd articulé et discussion	8
4. Résultats pour l'autobus et discussion	9
5. Résultats pour le camion porteur et discussion	11
5.1. Comparaison avec les deux autres véhicules	11
5.2. Vitesse d'air dans l'entrée	12
5.3. Sens du vent extérieur	13
5.4. Ventilation locale par soufflage vs par aspiration	14
5.5. Débit de soufflage par les orifices en paroi de fosse	16
5.6. Diamètre des orifices en paroi de fosse	17
5.7. Lèvre de soufflage longitudinale	18
5.8. Ventilateur axial côté porte de départ des véhicules	19
5.9. Ventilateur axial côté porte d'accès des véhicules	20
6. Conclusion	20
7. Références	22

1. Introduction

Les opérateurs des centres de contrôle technique pour poids lourds sont potentiellement exposés durant certaines phases de travail aux gaz d'échappement émis par les moteurs diesel des véhicules [1-5]. Ce risque est notable en particulier pour la situation suivante :

- l'opérateur se tient dans la fosse de visite, en dessous du véhicule moteur en marche. C'est le cas lors du contrôle des essieux sur les plaques à jeu ;
- et le captage direct des gaz à l'aide d'un cône d'extraction attaché à l'extrémité du conduit d'échappement est techniquement impossible.

Ce document analyse par simulation numérique des écoulements la ventilation des fosses de visite des centres de contrôle technique poids lourds pour diverses situations de travail. Trois exemples de véhicules sont considérés : un poids lourd articulé, formé d'un tracteur routier et d'une semi-remorque, un autobus et un camion porteur type fourgon. Plusieurs possibilités de mise en œuvre d'une ventilation locale de la fosse sont examinées.

2. Matériels et méthodes

2.1. Géométrie du local

Le local de contrôle technique (Figures 1 à 6) possède les dimensions intérieures suivantes : longueur 24 mètres, largeur 7 mètres et hauteur 6 mètres, ce qui représente un volume de 1008 m^3 . Il communique avec l'extérieur par deux portes ouvertes, de largeur 4,2 m et de hauteur 5 m, ménagées dans les petites faces latérales du local, en partie basse et en position médiane.

Afin de faciliter les repérages, l'atelier est muni d'un système d'axes orthonormé direct XYZ, dont l'origine est placée au sol dans un angle du local. L'axe Z est vertical ascendant et les axes X et Y sont tracés au sol respectivement selon la longueur et la largeur du local, de sorte que l'atelier soit compris dans le premier octant (Figures 1 et 4). Par convention, les qualificatifs gauche, droit, avant et arrière sont employés dans la suite par référence à un observateur qui serait tourné en direction des X croissants.

La porte $X = 0$ est utilisée pour l'accès du véhicule à contrôler dans l'atelier et la porte opposée pour son départ. Pendant les contrôles, l'avant du véhicule est donc orienté dans le sens des X croissants.

L'atelier contient une cabine de contrôle de hauteur 2,5 m, de longueur (selon l'axe X) 2 m et de largeur 1 m. Cette cabine a ses bords situés à 3 mètres de la porte de départ du véhicule et à 2 mètres à droite de l'axe de la fosse.

L'atelier possède une ligne de contrôle unique, munie d'une fosse de visite longitudinale centrée sur la longueur et la largeur du local. Cette fosse possède les dimensions suivantes : largeur 0,9 m, profondeur 1,65 m, longueur entre les pieds des escaliers en fond de fosse 18 m, distance séparant le sommet des deux escaliers aux extrémités 21,4 m. Deux dispositions d'escaliers sont considérées. Certains escaliers sont massifs et comprennent

sept contremarches. Par simplification, ils sont modélisés dans les simulations par des plans inclinés (cf. par exemple les Figures 1 à 3). Le volume de la fosse est alors de $29,3 \text{ m}^3$. D'autres escaliers sont réalisés en caillebotis et sans contremarches et sont négligés en tant qu'obstacles aux écoulements (cf. par exemple les Figures 4 à 6), ce qui correspond à des extrémités de fosse verticales. Le volume de la fosse est de $31,8 \text{ m}^3$.

Dans certaines simulations, la fosse est munie de trois orifices de ventilation circulaires de diamètre 125 ou 300 mm, ménagés dans sa face verticale longitudinale droite. Ces orifices sont placés en partie basse de la fosse, au tiers de sa hauteur (Figure 5). L'orifice médian est centré par rapport à la longueur de la fosse et les autres orifices sont équidistants de 6 mètres (dans le cas du petit diamètre) ou de 6,078 mètres (dans le cas du grand diamètre). Dans la suite, ces orifices sont numérotés de 1 à 3 dans le sens des X croissants.

La fosse est équipée, dans d'autres simulations, d'une gaine de ventilation longitudinale de diamètre 200 mm, accolée à sa paroi verticale droite et placée à 1,5 m au-dessus du fond de fosse. Cette gaine de longueur 16,5 mètres est centrée par rapport à l'étendue de la fosse. Elle est munie d'une fente de soufflage longitudinale de largeur 20 mm. Pour un observateur tourné en direction des X croissants, cette fente apparaît découpée au milieu du quart de cercle sud-ouest d'une section droite verticale de la gaine (Figure 6).

Dans d'autres simulations, un ventilateur axial est placé sous un des escaliers en caillebotis en bout de fosse (Figure 4). Ce ventilateur est schématisé par un parallélépipède rectangle posé sur le fond de la fosse, de hauteur 510 mm, de largeur (selon Y) 390 mm et d'épaisseur (selon X) 300 mm. Il est centré sur la largeur de la fosse et l'intervalle libre entre le ventilateur et l'extrémité verticale de la fosse est fixé à 300 mm. Les ouïes d'admission et d'éjection de l'air se situent au centre des deux faces normales à X et ont un diamètre de 300 mm.

2.2. Géométrie du poids lourd articulé

Le poids lourd articulé a une longueur totale de 16,5 mètres. Il est formé d'un tracteur et d'une semi-remorque possédant chacun deux essieux. Il est introduit dans les simulations sous une forme schématisée composée des éléments suivants.

Le tracteur (Figures 1 et 2) est formé de six parallélépipèdes rectangles pour modéliser la cabine, le châssis et les quatre portions inférieures saillantes des roues ainsi que d'un prisme à base triangulaire pour le déflecteur de toit. Il est caractérisé par les dimensions suivantes, en mm :

- selon l'axe longitudinal X : porte-à-faux arrière = 1048, empattement = 3610, porte-à-faux avant = 1410, longueur de la cabine = 2452, longueur des portions saillantes des roues = 922 ;
- selon l'axe transversal Y : largeur = 2550, largeur des roues avant = 348, largeur des roues arrière (jumelées) = 700, faces externes des roues dans le prolongement vertical du tracteur ;

- hauteurs au-dessus du sol : moyenne pour la garde au sol = 258, châssis (au niveau de la sellette) = 1140, sommet de la cabine = 2964, sommet du déflecteur = 3544.

La semi-remorque (Figures 1 et 2) est placée au contact du tracteur et est formée de sept parallélépipèdes rectangles qui modélisent la caisse, les quatre roues et les deux essieux ainsi que d'une plaque rectangulaire verticale qui prolonge vers le bas la face arrière de la caisse. Elle est caractérisée par les dimensions suivantes, en mm :

- selon l'axe longitudinal X : longueur de la caisse = 14 048, porte à faux arrière = 3270, entraxe des essieux = 1360, longueur des roues = 1034, épaisseur d'un essieu = 100 ;
- selon l'axe transversal Y : largeur de la caisse et de la plaque arrière = 2550, largeur d'une roue = 408, faces externes des roues dans le prolongement vertical de la caisse ;
- selon l'axe vertical Z : sommet de la caisse = 3940, hauteur d'attelage = 1140, hauteur des roues (avec carénage) = hauteur d'attelage, taille d'un essieu = 150, niveau des essieux = $1034/2 = 517$, niveau du bas de la plaque arrière = niveau des essieux.

Le véhicule est centré par rapport à la fosse, transversalement et longitudinalement. Dans cette position, l'essieu avant du tracteur se situe donc à 2160 mm en retrait de l'extrémité avant du fond de fosse.

Le poids lourd articulé est muni d'un échappement latéral. La sortie du conduit d'échappement est située sur la face verticale gauche du tracteur, en bas et à 1264 mm en arrière de l'essieu avant du véhicule. L'éjection est orientée vers l'arrière du tracteur, avec un angle horizontal de 135° par rapport à l'axe longitudinal du poids lourd et un angle de 10° en dessous de l'horizontale. La sortie du conduit d'échappement est circulaire. Son diamètre intérieur est fixé à 110 mm.

2.3. Géométrie de l'autobus

L'autobus (Figure 3) a une longueur totale de 12 mètres et possède deux essieux. Il est introduit dans les simulations sous une forme schématisée composée d'une caisse et de quatre parallélépipèdes pour modéliser les portions inférieures saillantes des roues. La caisse ne diffère d'un parallélépipède rectangle que par l'inclinaison de ses faces avant et arrière avec des angles d'attaque et de fuite égaux à 7° (par rapport à la verticale). L'autobus est caractérisé par les dimensions suivantes, en mm :

- selon l'axe longitudinal X : porte-à-faux arrière = 3310, empattement = 5990, porte-à-faux avant = 2700, longueur des portions saillantes des roues = 896 ;
- selon l'axe transversal Y : largeur = 2550, largeur des roues avant = 300, largeur des roues arrière (jumelées) = 680, faces externes des roues dans le prolongement vertical de la caisse ;
- hauteurs au-dessus du sol : hauteur libre sous jupe = 300, sommet de la caisse = 3000.

L'autobus est centré par rapport à la largeur de la fosse. Dans le sens longitudinal, son essieu avant est positionné à 2160 mm en retrait de l'extrémité avant du fond de fosse.

La sortie d'échappement de l'autobus est excentrée et placée en bas de la face arrière du véhicule et adjacente à son flanc gauche. En section verticale le conduit d'échappement peut être représenté par un rectangle de largeur 200 mm (selon l'axe Y) et de hauteur 54 mm. L'éjection est orientée parallèlement au plan vertical médian du bus et avec un angle de 10 ° en dessous de l'horizontale.

2.4. Géométrie du camion porteur

Le camion porteur (Figures 4 à 6) possède une longueur totale est de 9,31 mètres. Il est constitué d'un porteur à deux essieux et d'une caisse parallélépipédique. Le porteur est formé de sept parallélépipèdes rectangles pour modéliser la cabine, le châssis jusqu'à l'essieu arrière, la partie arrière du cadre et les quatre portions inférieures saillantes des roues. Il est caractérisé par les dimensions suivantes, en mm :

- selon l'axe longitudinal X : porte-à-faux arrière du cadre = 2885, empattement = 4820, porte-à-faux avant = 1440, longueur de la cabine = 1790, longueur des portions saillantes des roues = 670 ;
- selon l'axe transversal Y : largeur = 2266, largeur des roues avant = 264, largeur des roues arrière (jumelées) = 522, faces externes des roues dans le prolongement vertical du porteur ;
- hauteurs au-dessus du sol : moyenne pour la garde au sol = 182, bas de la partie arrière du cadre = 600, châssis (au niveau de l'entrée de carrosserie) = 910, sommet de la cabine = 2650.

La caisse est placée au contact du porteur. Elle possède une longueur de 7520 mm, une largeur de 2550 mm et son sommet se situe à 3240 mm au-dessus du sol.

Le camion est centré par rapport à la largeur de la fosse. Dans le sens longitudinal, l'essieu avant du porteur est positionné à 2160 mm en retrait de l'extrémité avant du fond de fosse.

Le porteur est muni d'un échappement central. La sortie du conduit d'échappement est située à mi-largeur de la face inférieure du châssis et à 1264 mm en arrière de l'essieu avant du véhicule. L'éjection est orientée verticalement en direction du fond de fosse. La sortie du conduit d'échappement est circulaire. Son diamètre intérieur est fixé à 80 mm.

2.5. Obstacle représentant l'opérateur

La présence d'un opérateur debout sur le fond de la fosse peut créer un obstacle aux écoulements. L'opérateur prend la forme, très simplifiée, d'un parallélépipède rectangle d'épaisseur 0,25 mètre, de largeur 0,34 mètre et de hauteur 1,5 mètre. Ces dimensions correspondent aux cotes anthropométriques suivantes : épaisseur à hauteur de la poitrine, largeur aux hanches et hauteur à la base du cou.

L'opérateur est appuyé contre la paroi verticale droite de la fosse. Il est tourné vers l'avant du véhicule et son torse vient au contact de l'orifice en paroi de fosse 3. En présence de la gaine de ventilation longitudinale, l'opérateur obstrue une faible part de la fente de soufflage, sur 0,25 m, soit 1,5 % de la longueur totale de la fente.

2.6. Source de polluant

La source de pollution se situe à la sortie du conduit d'échappement et est représentée en rouge sur les Figures 1 à 6. L'émission prend la forme d'un dégagement gazeux, apte à modéliser les gaz produits aussi bien que les particules fines, compte tenu de leur faible diamètre. Le gaz dégagé possède en première approximation la même densité que l'air de l'atelier. La teneur en polluant dans ce gaz est fixée à une valeur arbitraire, mais invariable, ce qui permet d'utiliser les concentrations calculées en régime permanent d'émission pour des comparaisons en valeurs relatives, mais pas pour une appréciation par rapport à une valeur limite d'exposition.

Le débit volumique de gaz d'échappement est donné (VIERLING [1]) par la formule :

$$D = 0.0363 n V \quad (1)$$

avec : D débit d'échappement en m³/h, n régime du moteur en tours/min et V cylindrée du véhicule en litres.

Le débit d'échappement est fixé à 290,4 m³/h pour le poids lourd articulé, à 223,6 m³/h pour l'autobus et à 145,2 m³/h pour le camion porteur. Ces valeurs résultent d'un régime moteur de 800 tours/min pendant le contrôle et de cylindrées respectivement égales à 10, 7,7 et 5 litres. Les vitesses d'éjection des gaz en sortie du conduit d'échappement correspondantes sont de 8,5, 6,0 et 8,0 m/s.

A titre indicatif, si la valeur du débit de gaz d'échappement était introduite dans la fosse sous forme d'air neuf, elle correspondrait à un taux de renouvellement pour la fosse seule (avec extrémités inclinées), en volumes par heure, égal à 9,9 dans le cas du poids lourd articulé, à 7,6 pour l'autobus et à 5 pour le porteur.

2.7. Prise d'air moteur

Le débit d'air nécessaire au fonctionnement du moteur est extrait de l'atmosphère du local au travers de prises d'air ménagées dans la carrosserie du véhicule. La valeur de ce débit est fixée égale à celle du débit de gaz d'échappement. La prise d'air moteur est représentée en bleu sur les Figures 1 à 6.

Dans le cas du poids lourd articulé et du camion porteur, la prise d'air moteur prend la forme d'un rectangle vertical placé sur la face avant du véhicule et centré par rapport à la largeur de ce dernier. Cette prise d'air possède une hauteur de 128 mm, une largeur de 444 mm et son bord inférieur est situé à 664 mm au-dessus du sol. La vitesse d'air au travers de la prise est de 1,4 m/s pour le poids lourd articulé et de 0,7 m/s pour camion porteur.

Dans le cas de l'autobus, la prise d'air moteur est un rectangle vertical de hauteur 244 mm et de longueur 790 mm, placé vers l'arrière de la face latérale gauche du véhicule. Le sommet inférieur arrière de ce rectangle est situé à 1 356 mm au-dessus du sol et horizontalement à 316 mm de l'extrémité arrière de l'autobus. La vitesse d'air au travers de cette prise est de 0,3 m/s.

2.8. Conditions aérauliques

L'assainissement de l'air du local est assuré par une ventilation générale naturelle induite par le vent extérieur. L'air pénètre par une des portes de l'atelier et s'évacue par la porte opposée. Deux situations sont examinées :

- l'air entre par la porte d'accès des véhicules ($X = 0$). La direction générale de circulation de l'air est orientée dans le même sens que le poids lourd ;
- l'air entre par la porte de départ des véhicules. Dans ce cas, l'air neuf balaye en premier l'avant du véhicule.

Deux valeurs de la vitesse d'air dans l'entrée ont été étudiées : 1 m/s et 0,3 m/s. Cette vitesse est uniforme et perpendiculaire au plan de la porte. Le débit de ventilation du local est alors respectivement de 75 600 m³/h et 22 680 m³/h, ce qui correspond à des valeurs (élevées) du taux de renouvellement d'air pour le local de 73 et 22 volumes par heure.

Trois modes d'utilisation des trois orifices de ventilation percés en paroi verticale de fosse ont été simulés :

- aucune ventilation locale de la fosse au travers de ces orifices ;
- extraction d'air par ces orifices ;
- insufflation d'air par ces orifices

Dans les deux dernières situations, deux valeurs du débit global de ventilation sont étudiées : 500 m³/h ou 2000 m³/h. Ce débit est réparti régulièrement sur les trois orifices. Il correspond respectivement à un taux de renouvellement pour la fosse seule (avec extrémités verticales) de 15,7 ou 63 volumes par heure et à une vitesse d'air dans chaque orifice de 3,8 ou 15,1 m/s pour un diamètre d'orifices 125 mm et de 0,7 ou 2,6 m/s pour un diamètre 300 mm.

En cas de ventilation locale à l'aide de la lèvre longitudinale, un apport d'air neuf extérieur de 2000 m³/h est insufflé dans la fosse. La vitesse de soufflage est répartie uniformément sur la longueur de la lèvre et est orientée en direction de la paroi longitudinale de fosse opposée, avec un angle de 45 degrés en dessous de l'horizontale. Le débit insufflé correspond à un taux de renouvellement pour la fosse seule (avec extrémités verticales) de 63 volumes par heure, à une vitesse d'air au travers de la lèvre de 1,7 m/s et à une vitesse débitante dans la gaine de 17,7 m/s.

Dans les simulations utilisant un ventilateur axial, ce dernier est systématiquement placé au voisinage de l'extrémité de la fosse la plus proche de l'entrée d'air. Un débit d'air de brassage de 2000 m³/h est alors éjecté longitudinalement dans la fosse, dans le même sens que l'air entrant. Cette valeur équivaut à une vitesse débitante de 0,37 m/s répartie sur une

section droite transversale de la fosse. Le débit éjecté est pris dans la fosse immédiatement en amont du ventilateur et ne constitue donc pas un apport d'air externe pour l'atmosphère de la fosse. La vitesse d'air au travers des ouïes d'admission et d'éjection est de 7,9 m/s.

2.9. Simulations numériques

La simulation numérique des écoulements repose sur l'utilisation d'un logiciel permettant de résoudre les équations de conservation de la mécanique des fluides (masse, quantité de mouvement, polluant, etc.). Cette résolution est obtenue après décomposition du domaine de calcul en une multitude de petits éléments jointifs qui forment un maillage spatial. La simulation permet de calculer les champs des vitesses d'air ou des concentrations en polluants à partir des données géométriques, des conditions aérodynamiques dans les entrées et sorties et des caractéristiques des sources. Les simulations numériques ont été réalisées ici à l'aide du logiciel généraliste de mécanique numérique des fluides FLUENT [6]. Les conditions de calcul utilisées correspondent à des écoulements tridimensionnels, monophasiques, incompressibles, isothermes et stationnaires. La turbulence a été simulée à l'aide du modèle k-epsilon réalisable.

Le Tableau 1 résume les conditions des simulations effectuées. Les résultats sont présentés dans la suite sous la forme :

- de tracés de vecteurs figurant les champs de vitesses d'air dans différents plans. Les échelles de vitesse utilisées pour ces figures sont représentées dans l'Encadré 1 ;
- de calcul des débits qui traversent les limites du volume de la fosse (Tableau 2) ;
- de cartes de concentration en polluant. Les échelles de concentration utilisées pour ces figures sont représentées dans l'Encadré 2 ;
- de moyennes volumiques à l'intérieur de la fosse du module de vitesse d'air et de la concentration en polluant (Tableau 3) ;
- de moyennes surfaciques de concentration en polluant dans le plan horizontal à hauteur des voies respiratoires dans la fosse (Tableau 4) ;
- de profils de l'évolution longitudinale du module moyen de vitesse d'air dans la fosse (moyenne surfacique calculée, pour chaque abscisse, à l'intérieur de la section droite verticale de la fosse correspondante) ;
- de profils de l'évolution longitudinale du débit de balayage de la fosse. Ce débit mesure le flux d'air net qui s'écoule, pour chaque abscisse, au travers de la section droite verticale de la fosse correspondante. Il est compté positivement, par convention, s'il est orienté en direction de la sortie d'air de l'atelier. Une valeur locale négative du débit de balayage indique donc une section de la fosse dans laquelle l'écoulement d'air net s'effectue en sens inverse de la ventilation générale ;
- de profils de l'évolution longitudinale de la concentration moyenne en polluant dans la fosse à hauteur des voies respiratoires (moyenne linéique calculée, pour chaque abscisse, à la hauteur spécifiée et le long du segment de droite transversal correspondant). Pour faciliter les repérages de long des différents profils, ceux-ci ont

été munis en partie supérieure de marques alphabétiques qui sont explicitées dans l'Encadré 3.

2.10. Objectifs

Les objectifs des simulations peuvent être résumés comme suit :

- examiner la répartition des vitesses d'air à l'intérieur de la fosse de visite ;
- analyser la distribution spatiale des concentrations en polluant dans la fosse, en particulier à hauteur des voies respiratoires de l'opérateur ;
- examiner l'influence de la force du vent extérieur, par l'intermédiaire de l'intensité de la vitesse d'air dans l'entrée ;
- comparer le contrôle de trois types de véhicules : un poids lourd articulé doté d'un échappement latéral, un autobus avec un échappement arrière et un camion porteur muni d'un échappement central ;
- étudier l'influence d'une ventilation locale de la fosse et son interaction avec la ventilation générale induite par le vent extérieur ;
- comparer différents modes de ventilation locale de la fosse : extraction ou insufflation d'air par des orifices en paroi verticale (deux diamètres : 125 et 300 mm), soufflage par une lèvre longitudinale, brassage à l'aide d'un ventilateur axial ;
- examiner l'influence du débit de ventilation locale sur l'assainissement de l'air de la fosse.

3. Résultats pour le poids lourd articulé et discussion

Les Figures 7 et 8 présentent les vitesses d'air dans le plan horizontal à mi-hauteur du tracteur et dans le plan vertical longitudinal médian pour la configuration A (poids lourd articulé, sans jet d'échappement). L'air issu de l'entrée impacte l'avant du véhicule puis contourne cet obstacle à la fois par les côtés gauche et droit et par le dessus et le dessous. Il se forme plusieurs zones de recirculation horizontales et verticales : de chaque côté de l'entrée, en aval de la cabine de contrôle, le long du flanc gauche du tracteur, derrière la remorque, sous le nez du tracteur, sous la remorque en aval de la face arrière du tracteur, etc. L'air pénètre dans la fosse par l'avant, dans l'espace longitudinal libre entre le devant du tracteur et l'extrémité de la fosse, puis engendre un écoulement unidirectionnel qui la balaye sur toute sa longueur.

L'ajout du jet d'échappement latéral dans la configuration B (moteur en marche) n'altère pas la structure générale des écoulements. Ce jet engendre toutefois quelques modifications locales, visibles en particulier à la Figure 9, tracée près du sol de l'atelier dans le plan horizontal à mi-garde au sol du tracteur, et à la Figure 10, tracée dans un plan vertical proche de la paroi gauche de l'atelier. Le jet de gaz issu de l'extrémité du conduit d'échappement vient frapper obliquement le sol puis le bas de la paroi gauche de l'atelier. Il est ensuite entraîné vers la porte de sortie par l'écoulement général, tout en se propageant

vers le haut le long de cette paroi gauche (Figure 10b). Il n'apparaît pas de pénétration directe du jet d'échappement à l'intérieur de la fosse.

En présence du poids lourd articulé et pour une vitesse dans l'entrée de 1 m/s, le module de vitesse d'air moyen dans le volume de la fosse de visite est de 0,47 à 0,50 m/s (Tableau 3). Ce module décroît légèrement depuis l'avant de la fosse jusqu'à l'arrière (Figure 11), avec des oscillations initiales dues à la zone de recirculation sous le nez du tracteur. Le débit d'air qui pénètre, moteur à l'arrêt, dans la fosse au travers de sa limite horizontale supérieure (au niveau du sol de l'atelier) est de 3 863 m³/h (Tableau 2). Ce débit équivaut à un taux de renouvellement pour la fosse seule égal à 132 volumes par heure. Il varie peu sous l'influence du jet d'échappement et atteint 3 950 m³/h pour la configuration B.

Les concentrations en polluant sont représentées pour la configuration B aux Figures 12 et 13, au niveau du sol de l'atelier et sur la paroi gauche. L'air pollué s'écoule vers la sortie d'air, tout en se diluant, le long du dièdre formé par ces deux plans, sans retour notable en direction de la fosse de visite.

4. Résultats pour l'autobus et discussion

Les vitesses d'air calculées en présence de l'autobus sont présentées dans les quatre plans suivants : plan horizontal voisin de la mi-hauteur de la caisse (Figure 14), plan vertical à mi-largeur de l'extrémité du conduit d'échappement (Figure 15), plan horizontal à mi-hauteur sous jupe (Figure 16) et plan vertical longitudinal médian (Figure 17). Les vitesses sont tracées dans chacune de ces figures pour les deux orientations de l'écoulement général dans l'atelier étudiées : dans le même sens que la direction initiale du jet d'échappement (configuration G) et dans le sens opposé (configuration H).

Comme dans le cas du poids lourd articulé, l'air issu de l'entrée impacte l'extrémité du véhicule, avec formation de plusieurs zones de recirculation (Figures 14 et 17) : de chaque côté de l'entrée, en aval de la cabine de contrôle, le long des flancs de l'obstacle, au-dessus du toit, en aval du véhicule, sous le nez du bus en configuration G (Figure 17a), etc. L'étendue latérale des recirculations horizontales le long des flancs du bus diminue nettement lorsque la position du véhicule se trouve plus éloignée de l'entrée d'air (Figure 14). Par ailleurs, la sortie d'échappement de l'autobus, située en bas de sa face arrière et adjacente à son flanc gauche, exerce une influence importante sur les écoulements avoisinants.

Dans le cas de la configuration G, l'air neuf pénètre dans la fosse par l'avant, dans l'espace libre entre l'avant du bus et l'extrémité de la fosse (Figure 17a), puis amorce une traversée longitudinale qui ne s'étend toutefois pas à toute la longueur de la fosse. En effet, à l'arrière du bus, le comblement du sillage en aval du véhicule entraîne une remontée de l'air circulant dans la fosse de visite. Il en résulte une rupture du balayage longitudinal de la fosse et la formation d'un tourbillon vertical antihoraire à l'intérieur de la fosse, vers son extrémité arrière. Dans la même zone à l'arrière du bus, l'émission de gaz d'échappement provoque une forte accélération locale de l'écoulement dirigée vers la sortie d'air (Figures 15a et 16a). Le jet ainsi créé se développe en captant une partie de l'écoulement général adjacent.

Dans la configuration H, l'inversion du sens de la ventilation générale de l'atelier multiplie par un facteur 7,1 la distance entre l'extrémité de la fosse côté entrée d'air et le bord d'attaque du véhicule. Cette distance accrue permet, sous l'effet de marche descendante pour l'écoulement créé par la présence de la fosse, l'établissement entre l'entrée d'air et l'arrière du bus de vastes zones tourbillonnaires verticales et horizontales (Figures 16b et 17b). Ces tourbillons entraînent une nette diminution des entrées longitudinales d'air neuf sous le véhicule, ce qui réduit l'intensité des vitesses d'air dans la zone de travail. De plus, la pénétration directe de l'air neuf à l'intérieur de la fosse est affectée par le jet d'échappement qui s'oppose à la partie basse l'écoulement issu de la porte d'accès (Figures 15b et 16b). Ce jet finit par être refoulé et alimente les deux tourbillons horizontaux et le tourbillon vertical horaire dont l'influence s'étend latéralement jusqu'à l'intérieur de l'extrémité arrière de la fosse (Figure 17b). La fosse est ensuite approvisionnée en air à partir d'écoulements qui pénètrent latéralement sous le bus entre les deux essieux (Figure 16b), mais un écoulement de balayage longitudinal ne commence à s'établir qu'au voisinage de l'extrémité avant.

En présence de l'autobus et pour une vitesse dans l'entrée de 1 m/s, le module de vitesse d'air moyen dans le volume de la fosse de visite est de 0,25 m/s pour la configuration H (Tableau 3). Il est un peu plus élevé en configuration G (0,36 m/s), du fait des vitesses plus importantes atteintes vers l'avant de la fosse dans la zone de la pénétration directe de l'air neuf (Figure 17a). Le débit de balayage de la fosse pour la Configuration G (Figure 18) décroît continuellement de l'avant vers l'arrière de la fosse et est faiblement rétrograde à l'intérieur du tourbillon vertical à l'extrémité arrière. En cas d'écoulement général inversé (configuration H), le débit de balayage est rétrograde dans toute la partie de fosse à l'arrière du bus. De plus, les valeurs atteintes par ce débit dans la partie où il demeure positif restent largement inférieures à celles de la Configuration G. Les débits échangés entre le volume de la fosse et le reste de l'atelier sont supérieurs à ceux calculés précédemment pour le poids lourd articulé : 4863 m³/h pour G et 4135 m³/h pour H. Ces débits incluent toutefois de l'air en recirculation à l'intérieur des tourbillons verticaux observés.

Les concentrations en polluant sont représentées à la Figure 19 au niveau du sol de l'atelier, à la Figure 20 dans un plan vertical longitudinal proche du flanc gauche du bus et à la Figure 21 dans le plan horizontal à hauteur des voies respiratoires dans la fosse. Dans la configuration G, le jet d'air pollué vient frapper le sol puis est évacué par la sortie d'air. Au cours de sa progression, il s'élargit verticalement et latéralement jusqu'à l'aplomb de la fosse (Figure 19a). Une fraction du polluant pénètre alors dans la fosse vers son extrémité arrière (Figure 21a) grâce au tourbillon vertical observé dans cette zone. Dans la configuration H, le jet d'échappement s'écoule initialement vers la porte d'accès des véhicules. Il est ensuite repoussé par l'écoulement général et se dirige vers la porte opposée en se diluant et en s'élargissant verticalement et latéralement (Figures 19b et 20b). Une fraction du polluant pénètre alors dans la fosse au voisinage de l'arrière du bus et entre les essieux (Figure 21b).

Les concentrations moyennes en polluant dans la fosse (Tableaux 3 et 4) lors du contrôle de l'autobus (avec échappement arrière) sont plus élevées que celles calculées pour le poids lourd avec échappement latéral, mais elles restent très nettement inférieures aux valeurs obtenues en présence du camion porteur (discutées plus loin). Pour l'autobus, ces concentrations moyennes dans la fosse sont plus faibles lorsque la direction du vent externe oriente la ventilation générale de l'atelier de l'avant du véhicule vers son arrière

(configuration G). De plus, pour cette orientation, la pollution au niveau des voies respiratoires affecte uniquement l'extrémité arrière de la fosse et n'est pas notable dans la zone de travail à l'aplomb du véhicule, comme le montrent le Tableau 4 et le profil longitudinal de concentration tracé à la Figure 22. En présence d'un écoulement général en sens inverse (configuration H), la concentration à hauteur des voies respiratoires est répartie plus uniformément le long de la fosse, avec une légère décroissance de l'arrière vers l'avant de la fosse (Figure 22).

5. Résultats pour le camion porteur et discussion

5.1. Comparaison avec les deux autres véhicules

Les Figures 23 et 24 présentent les vitesses d'air dans le plan horizontal à mi-hauteur du camion et dans le plan vertical longitudinal médian pour la configuration C (camion porteur, vitesse d'air dans l'entrée égale à 1 m/s). Elles permettent d'observer, comme pour les véhicules précédents, l'impact de l'air entrant sur l'avant du poids lourd et la présence de divers vortex dans l'atelier. Dans la fosse, l'air neuf pénètre par l'avant en créant un tourbillon sous le nez du véhicule, puis entre en interaction avec le jet vertical issu du conduit d'échappement (Figure 25). Le jet d'échappement est alors dévié vers l'arrière avant d'avoir pu impacter directement le fond de la fosse et une zone de recirculation se crée en partie supérieure de la fosse immédiatement en aval de l'échappement. Un écoulement unidirectionnel dans la fosse et sous le véhicule se rétablit assez rapidement un peu plus en aval (Figures 24 et 26) et balaye la fosse jusqu'à son extrémité arrière. En arrière du camion, cet écoulement intègre une composante ascensionnelle induite par le comblement du sillage créé en aval du véhicule par l'écoulement général.

En présence du camion porteur et pour une vitesse dans l'entrée de 1 m/s, le module de vitesse d'air moyen dans le volume de la fosse de visite est de 0,37 m/s (Tableau 3), valeur analogue à celle calculée dans le cas de l'autobus pour la même orientation du vent (configuration G). Cette moyenne volumique inclut les vitesses générées par le jet issu de l'échappement. De l'avant vers l'arrière de la fosse, le débit de balayage de la fosse (Figure 27) augmente initialement lors de l'établissement de l'écoulement longitudinal. Il décroît ensuite sous l'effet des sorties d'air latérales du dessous du camion vers l'atelier puis des mouvements ascendants en arrière du véhicule. Le débit de balayage reste cependant partout dirigé vers la sortie d'air. Une remontée locale se produit au moment de l'adjonction du débit d'échappement à l'écoulement longitudinal (marque "e" en haut de la figure). Le débit d'air échangé entre le volume de la fosse et le reste de l'atelier est de 3 890 m³/h (Tableau 2), valeur analogue à celles calculées précédemment pour le poids lourd articulé.

La Figure 28 présente les concentrations en polluant dans le plan vertical médian. L'air pollué pénètre dans la fosse sous l'aspect d'une langue issue du conduit d'échappement, puis occupe la fosse en aval sous la forme de strates horizontales dans lesquelles la concentration croît verticalement du haut de la fosse vers le fond. L'écoulement de l'air, orienté vers l'arrière de la fosse, s'accompagne ensuite d'une ascension des niveaux de concentration élevés en direction du haut de la fosse. Une partie de l'air pollué pénètre également dans l'atelier : dans le sillage présent en aval du véhicule (Figure 28) et le long des bords longitudinaux de la fosse (Figure 29). L'air neuf en provenance de l'entrée occupe

l'avant de la fosse qui est peu pollué. Dans le plan horizontal à hauteur des voies respiratoires dans la fosse (profil longitudinal de la Figure 30), la concentration est faible en partie avant, présente un pic à proximité de l'échappement, puis augmente progressivement en direction de l'arrière de la fosse.

Les concentrations moyennes en polluant dans la fosse (Tableaux 3 et 4) lors du contrôle du camion porteur (avec échappement central) s'avèrent beaucoup plus élevées que celles calculées pour les deux poids lourds précédents. Ainsi par rapport à l'autobus, pour un vent externe identique en intensité et en direction et un débit d'échappement réduit de 35 %, la concentration obtenue pour le porteur est supérieure d'un facteur 10 à hauteur des voies respiratoires et d'un facteur 14 pour tout le volume de la fosse.

5.2. Vitesse d'air dans l'entrée

La simulation D, conduite avec le camion porteur, ne diffère de la simulation C que par la présence lors du contrôle d'une intensité de vent externe plus faible qui abaisse la vitesse d'air dans l'entrée de 1 m/s à 0,3 m/s. Le débit de gaz d'échappement du véhicule reste toutefois inchangé.

La Figure 31a présente les vitesses d'air dans le plan vertical longitudinal médian. Une comparaison avec la Figure 24 (tracée avec une échelle de vitesse différente) montre que dans ce plan les modifications à la structure des écoulements se limitent principalement à la zone voisine de la sortie d'échappement. Grâce à sa force relative accrue, le jet d'échappement est en état d'impacter directement le fond de la fosse (Figure 32a) au lieu d'être dévié sur son trajet par l'écoulement d'air neuf en provenance de l'avant de la fosse (Figure 25). A mi-garde au sol du véhicule, un tourbillon horizontal horaire situé en avant du second essieu (Figure 33a) retarde le rétablissement de l'écoulement de balayage longitudinal qui avait été observé pour la configuration C à la Figure 26.

En présence du camion porteur et pour une vitesse dans l'entrée de 0,3 m/s, le module de vitesse d'air moyen dans le volume de la fosse de visite est de 0,14 m/s (Tableau 3). Ce module est abaissé d'un facteur 2,6 par rapport à la configuration C, pour un coefficient de réduction de la vitesse dans l'entrée égal à 3,3, l'écart pouvant s'expliquer par la valeur inchangée du débit de gaz d'échappement. Le profil longitudinal du débit de balayage de la fosse (Figure 27) conserve son allure générale, avec des valeurs partout amoindries. Sur ce profil, la force relative accrue du jet d'échappement accentue la remontée locale au moment de l'adjonction du débit d'échappement à l'écoulement longitudinal. Le débit d'air échangé entre le volume de la fosse et le reste de l'atelier est de 1092 m³/h (Tableau 2), valeur réduite d'un facteur 3,6 par rapport à C.

Les concentrations en polluant calculées pour la configuration D sont présentées aux Figure 34a et 35a, avec une échelle de couleurs modifiée par rapport aux cas précédents pour tenir compte d'une augmentation générale des niveaux de pollution. Le polluant occupe comme précédemment le volume de la fosse en aval de l'échappement ainsi que le sillage en arrière du véhicule, sous la forme de strates horizontales, mais la force relative accrue du jet d'échappement lui permet de contaminer aussi la partie avant sous le véhicule. L'extension transversale de la zone polluée en partie basse de l'atelier est également élargie

(Figure 35a), en particulier sous l'influence du tourbillon horizontal sous le camion signalé à la Figure 33a. Ce tourbillon entraîne également une entrée latérale d'air peu pollué sous le véhicule, immédiatement en avant des roues du second essieu. Le profil longitudinal de concentration à hauteur des voies respiratoires dans la fosse (Figure 30) montre des niveaux de contamination nettement accrus, une extension du polluant vers l'avant du véhicule, un élargissement du pic de pollution à proximité l'échappement, suivi d'un creux correspondant à l'entrée latérale d'air sous le véhicule en limite des roues arrière, et toujours une augmentation progressive en direction de l'arrière de la fosse.

La diminution du débit de ventilation qui pénètre dans l'atelier par l'entrée, lors du passage de la configuration C à la configuration D, entraîne un fort accroissement des concentrations en polluant dans la fosse. La concentration moyenne sur l'ensemble du volume de la fosse (Tableau 3) est ainsi multipliée par 3,4, ce qui correspond approximativement au taux de réduction du débit de ventilation, égal à 3,3. Sous l'effet des modifications locales apportées aux écoulements à proximité du jet d'échappement, les facteurs d'augmentation pour les concentrations moyennes à hauteur des voies respiratoires sont plus élevés (Tableau 4) : ils atteignent 4,6 pour la moyenne sur toute la longueur de la fosse et 5,9 pour la moyenne limitée à la portion longitudinale de la fosse correspondant au véhicule.

5.3. Sens du vent extérieur

Dans la Simulation N, la valeur de la vitesse d'air dans la porte d'entrée (0,3 m/s) et l'absence de ventilation locale de la fosse de la Simulation D sont conservées, mais en raison d'une orientation du vent extérieur différente, le sens de la ventilation générale de l'atelier est inversé. La distance entre l'extrémité de la fosse côté entrée d'air et le bord d'attaque du véhicule est alors multipliée par un facteur 4. Cette distance accrue permet, sous l'effet de marche descendante pour l'écoulement créé par la présence de la fosse, l'établissement entre l'entrée d'air et le camion de vastes zones tourbillonnaires verticales et horizontales (Figures 36a et 37a). Ces tourbillons entraînent une nette diminution des entrées longitudinales d'air neuf sous le véhicule, ce qui réduit l'intensité des vitesses d'air dans la zone de travail. En particulier le jet issu de l'échappement n'est pas dévié et parvient à impacter directement le fond de la fosse (Figure 38a).

De la Simulation D à la Simulation N, le débit d'air pénétrant dans la fosse au travers du plan supérieur augmente grâce au mouvement de recirculation en partie arrière de l'atelier (Tableau 2), mais la vitesse d'air moyenne dans le volume de la fosse diminue (Tableau 3). Le débit de balayage de la fosse pour la Configuration N est rétrograde sur de larges parties de son profil longitudinal (Figure 39) : dans la zone de recirculation vers l'arrière de la fosse, mais également sous le véhicule en arrière de l'échappement. De plus, les valeurs atteintes par ce débit de balayage dans les portions où il demeure positif restent largement inférieures à celles de la Configuration D.

Les cartes de concentration en polluant montrent que l'inversion du sens de la ventilation générale accroît nettement l'étendue de la zone la plus polluée, à la fois dans le plan vertical médian et à mi-garde au sol du porteur (Figures 40a et 41a, à comparer aux Figures 34a et 35a). Les valeurs de la concentration à hauteur des voies respiratoires sont fortement

majorées en dessous du véhicule (Figure 42). En conséquence, la concentration moyenne dans la zone de travail est en forte hausse de 68 % (Tableau 4).

Les simulations montrent donc que les performances d'un assainissement de l'air de la fosse à l'aide de la ventilation naturelle seule dépendent fortement du sens de la ventilation générale de l'atelier, sens qui est déterminé par l'orientation du vent extérieur. Dans le cas du camion porteur, la situation la plus favorable est celle où l'air neuf pénètre dans l'atelier par la porte la plus proche du véhicule. Un résultat analogue a été obtenu précédemment pour le contrôle d'un autobus.

5.4. Ventilation locale par soufflage vs par aspiration

L'influence d'une ventilation locale de la fosse au travers de trois orifices ménagés dans sa paroi verticale droite a été examinée lors du contrôle du camion porteur (échappement central) et en présence de la vitesse d'air réduite dans la porte d'entrée (0,3 m/s). Les orifices en paroi de ventilation locale sont utilisés pour une extraction d'air dans la simulation E et pour une insufflation dans simulation F. Ces deux simulations sont à comparer avec la simulation D, réalisée dans les mêmes conditions, mais sans ventilation locale (Tableau 1). Le débit de ventilation locale est fixé à 500 m³/h, pour un débit initial du jet d'échappement de 145 m³/h. La distance entre la sortie d'échappement et l'orifice le plus proche (orifice 3, d'un débit égal à 167 m³/h) est de 1,4 m.

La Figure 31 présente les vitesses d'air dans le plan vertical longitudinal médian. La mise en œuvre de l'extraction d'air altère ponctuellement l'orientation ou l'intensité des vitesses dans la fosse, mais ne change pas l'allure générale des écoulements par rapport à la configuration sans ventilation locale. En revanche, le soufflage d'air détruit tout mouvement de balayage longitudinal dans la fosse, génère plusieurs zones tourbillonnaires contenant des vitesses d'air élevées, crée un écoulement sortant à l'extrémité avant de la fosse et perturbe le sillage en arrière du camion. De même, dans le plan horizontal à mi-garde au sol du véhicule (Figure 33), les écoulements sont moins modifiés par une extraction d'air locale que par une insufflation. L'utilisation d'un soufflage augmente les vitesses dans de nombreuses zones, renforce le tourbillon entre les essieux et désorganise le flux d'entrée d'air neuf sous l'avant du poids lourd.

La mise en œuvre d'une extraction d'air diminue légèrement le module de vitesse moyen dans le volume de la fosse de visite, de 0,14 à 0,12 m/s (Tableau 3). A contrario, la présence de jets de soufflage dans la fosse provoque une forte augmentation de ce module (plus 43 %, à 0,2 m/s). L'application d'une ventilation locale accroît le débit d'air entrant dans le volume de la fosse (Tableau 2). Cet accroissement est faible dans le cas d'une extraction d'air (plus 8 %) et très important dans le cas d'un soufflage (plus 117 %).

Les profils longitudinaux de débit de balayage (Figure 43) pour les configurations D et E sont proches dans toute la moitié avant de la fosse, à l'exception de la chute de débit brutale sur le profil E provoquée par l'extraction d'air au travers de l'orifice 3. Les débits aspirés par les orifices 2 puis 1 au détriment de l'écoulement de balayage longitudinal dans la fosse occasionnent ensuite dans la moitié arrière les deux décrochements supplémentaires

visibles sur le profil du cas E. Vers l'extrémité arrière de la fosse, le débit de balayage se trouve alors divisé pour ce cas par un facteur 1,7 à 2,5.

Dans le cas de la configuration avec soufflage (F), l'apport d'air propre vient renforcer le débit de balayage en aval (c'est-à-dire en arrière) des trois orifices (Figure 43). A l'inverse, à l'avant de chacun de ces orifices, le soufflage perturbe l'écoulement dans la fosse et provoque une dépression sur le profil du débit de balayage. Ces dépressions restent limitées à l'avant des orifices 1 et 2 et le balayage demeure orienté vers la sortie d'air de l'atelier. Au contraire, à l'avant de l'orifice 3 et à l'extrémité avant de la fosse, le débit de balayage devient négatif et l'écoulement net rétrograde.

Les concentrations en polluant dans le plan vertical médian sont présentées pour les configurations avec ventilation locale de la fosse à la Figure 34. L'aspect de la carte calculée en présence d'une aspiration est voisin de celui obtenu sans ventilation locale. Cette carte révèle toutefois, à l'arrière du second essieu, un abaissement des niveaux de concentration sous le véhicule et en partie supérieure de la fosse. La mise en œuvre d'un soufflage localisé détruit la stratification horizontale des concentrations dans la fosse en arrière de l'échappement, occasionne une sortie d'air pollué hors de la fosse vers l'avant et accroît la hauteur de la zone polluée dans le sillage du camion.

Dans le plan horizontal à mi-garde au sol du porteur (Figure 35), l'aspiration localisée diminue légèrement l'extension transversale de la zone polluée en partie basse de l'atelier, accentue un peu l'entrée latérale d'air propre sous le véhicule et abaisse significativement les concentrations dans toute la partie arrière de la fosse. Le soufflage localisé augmente l'extension transversale de la zone polluée, accentue nettement l'entrée latérale sous le véhicule et abaisse également les concentrations dans la partie arrière de la fosse. Les concentrations dans le plan horizontal à hauteur des voies respiratoires dans la fosse sont présentées à la Figure 44. Les profils longitudinaux de concentration pour les configurations sans ventilation locale et avec aspiration ne diffèrent notablement que dans la partie de la fosse la plus en arrière, où l'aspiration permet un abaissement significatif des niveaux de pollution. Des réductions plus faibles sont également visibles au voisinage de l'aplomb des orifices 2 et 3. Les niveaux de concentration pour la configuration avec soufflage localisé se situent en dessous des deux profils précédents, sauf à l'avant de la fosse qui subit une augmentation notable de la pollution. Le soufflage accentue fortement le creux de concentration en limite des roues arrière et permet un abaissement des concentrations dans la partie arrière de la fosse plus marqué que l'aspiration.

La moyenne volumique de la concentration en polluant dans la fosse est abaissée de 19 % par la mise en œuvre d'une insufflation d'air locale (Tableau 3), mais n'est pas réduite par une extraction d'air (hausse de 1,6 %). A hauteur des voies respiratoires, une ventilation locale de la fosse permet de diminuer les concentrations moyennes (Tableau 4). Les diminutions atteintes à l'aide d'un soufflage sont légèrement plus élevées que celles obtenues à l'aide d'une aspiration. La concentration moyenne dans la zone de travail sous le véhicule est toutefois beaucoup moins réduite (de 7,7 à 10 %) que la concentration moyenne sur toute la longueur de la fosse (19 à 20 %). Ce résultat confirme les observations faites à la Figure 44 : c'est en partie arrière de la fosse que les effets de la ventilation locale sont les plus marqués.

Les concentrations dans les différentes sorties d'air et les efficacités de captage du polluant émis correspondantes sont reportées au Tableau 5 pour la simulation E (avec aspiration localisée dans la fosse). Les concentrations dans l'air extrait par les deux orifices les plus en arrière (n° 2 et 3) sont voisines (109 à 112) et sont supérieures à la valeur moyenne (84) dans le volume de la fosse (Tableau 3), ce qui est compatible avec la présence de strates de pollution horizontales présentées à la Figure 34b. L'orifice avant (n° 3), bien que situé plus près de l'échappement, aspire un air beaucoup moins pollué, sous l'effet de son placement en amont de l'échappement par rapport au sens général de l'écoulement, effet peut-être renforcé par la présence à proximité du corps de l'opérateur. Le débit aspiré par l'orifice 3 est en grande partie formé d'air propre en provenance de la porte d'entrée, air propre qui est donc perdu pour un balayage ultérieur de la fosse de visite. Les orifices 1 et 2 extraient chacun environ 25 % du gaz d'échappement émis, contre 2,7 % seulement pour l'orifice avant. Le reste du débit de polluant émis, soit un peu moins de la moitié, s'échappe par la porte d'accès des véhicules (Tableau 5).

5.5. Débit de soufflage par les orifices en paroi de fosse

La Figure 45a présente les vitesses d'air dans le plan vertical médian pour la Simulation I (soufflage d'air au travers des trois orifices en paroi). Par rapport à la Simulation F (Figure 31c), l'augmentation du débit de ventilation locale de 500 à 2000 m³/h renforce nettement les zones tourbillonnaires situées en face des orifices, à la fois en intensité des vitesses d'air et en étendue : les tourbillons débordent par exemple largement au-dessus du niveau de la fosse. L'intensification des échanges entre la fosse et l'atelier entraîne une forte hausse (plus 221 %) du débit d'air pénétrant dans la fosse au travers du plan horizontal supérieur (Tableau 2). De plus, comme le montre la Figure 46a tracée dans le plan horizontal à mi-garde au sol du porteur, à fort débit l'air insufflé dans la fosse parvient à dévier localement au voisinage du sol l'écoulement général dans l'atelier et à diminuer les entrées latérales d'air neuf sous le véhicule entre les essieux.

L'augmentation du débit de soufflage entraîne un accroissement du module de vitesse moyen dans la fosse de 0,20 à 0,51 m/s (Tableau 3). Comme pour la Simulation F, le profil longitudinal du débit de balayage de la fosse pour la Simulation I présente des dépressions locales à l'avant de chacun des orifices de soufflage (Figure 47). Ces dépressions sont toutefois beaucoup plus marquées et le débit de balayage passe par des valeurs locales négatives, ce qui indique la présence de sections de la fosse dans lesquelles l'écoulement d'air net est rétrograde. L'écoulement longitudinal net reste par ailleurs sortant vers l'extrémité avant de la fosse.

Les concentrations en polluant dans le plan vertical médian sont présentées pour la configuration I à la Figure 48a. Par rapport à la configuration F (Figure 34c), la multiplication par un facteur 4 du débit de soufflage en fosse permet de diminuer les niveaux de pollution, en particulier dans toute la partie à l'arrière du camion. Dans ce plan, la zone la plus polluée se restreint aux parties de la fosse situées au-dessous et à l'avant du véhicule. Par ailleurs la pénétration latérale du polluant dans l'atelier au voisinage du sol s'accroît (Figure 49a, à comparer à la Figure 35c). L'augmentation du débit de ventilation locale permet d'obtenir, sur presque toute la longueur de la fosse, un abaissement du profil longitudinal de concentration à hauteur des voies respiratoires (Figure 50). Le profil pour la Simulation I conserve un pic à

proximité de l'échappement et une décroissance vers l'arrière de la fosse, mais sous l'effet de la réduction des entrées d'air latérales entre les essieux ne présente plus de creux en limite des roues arrière.

Le taux de réduction de la concentration moyenne dans tout le volume de la fosse, par rapport à la configuration D sans ventilation locale, qui était de 19 % pour un soufflage de 500 m³/h progresse fortement à 71 % pour un soufflage de 2000 m³/h (Tableau 3). A hauteur des voies respiratoires (Tableau 4), des abaissements analogues sont obtenus pour la moyenne sur toute la longueur de la fosse : respectivement 21 et 68 %. Les réductions atteintes pour la concentration dans la zone de travail (sous le véhicule) sont plus faibles, mais s'améliorent également lorsque le débit d'air insufflé augmente : de 10 % pour 500 m³/h à 47 % pour 2000 m³/h (Tableau 4).

5.6. Diamètre des orifices en paroi de fosse

La Simulation J diffère de la Simulation I uniquement par l'utilisation d'orifices en paroi agrandis. Pour un même débit de ventilation localisée de 2000 m³/h, la vitesse de soufflage initiale est ainsi abaissée de 15,1 m/s à 2,6 m/s. Cette modification réduit l'intensité des vitesses d'air à l'intérieur des zones tourbillonnaires situées en face des orifices, mais affecte moins leur étendue (Figure 45b : plan vertical médian). Elle renforce par contre l'écoulement sortant de la fosse à son extrémité avant. Elle atténue les perturbations apportées au voisinage du sol à l'écoulement général dans l'atelier et altère moins les entrées latérales d'air neuf sous le véhicule entre les essieux (Figure 46b). L'augmentation du débit pénétrant dans la fosse au travers du plan supérieur entre les Simulations F et J se limite à 22 % (Tableau 2).

Le passage à des orifices en paroi de diamètre 300 mm abaisse la vitesse moyenne dans la fosse de 0,51 à 0,27 m/s (Tableau 3), ce qui peut améliorer le confort thermique des opérateurs. Sur le profil du débit de balayage, il atténue les dépressions à l'avant des orifices 1 et 2 et réduit ainsi l'étendue des sections de la fosse à écoulement d'air net rétrograde (Figure 47). Il accentue par contre cet écoulement rétrograde à l'avant de l'orifice 3.

L'augmentation du diamètre des orifices accroît dans le plan vertical médian l'étendue longitudinale de la zone la plus polluée, dans la fosse comme dans l'atelier et à la fois vers l'avant et vers l'arrière du véhicule (Figure 48b). A contrario, la pénétration latérale du polluant dans l'atelier au voisinage du sol est diminuée (Figure 49b). A hauteur des voies respiratoires, les concentrations augmentent sur presque toute la longueur de la fosse (Figure 50), à l'exception du voisinage du second essieu qui bénéficie d'entrées d'air neuf latérales sous le véhicule renforcées.

Le débit de ventilation localisée accru mis en œuvre dans la configuration J lui permet d'atteindre des taux de réduction de la concentration moyenne (par rapport à la configuration D avec ventilation naturelle seule) nettement meilleurs que ceux relevés pour la configuration F à plus faible débit (Tableaux 3 et 4). A débit de soufflage en fosse constant, le passage à un grand diamètre d'orifices (de la configuration I à la configuration J) atténue toutefois les taux de réduction obtenus : de 71 à 57 % dans tout le volume de la fosse et à

hauteur des voies respiratoires de 68 à 59 % sur toute la longueur de la fosse et de 47 à 43 % dans la zone de travail sous le véhicule.

5.7. Lèvre de soufflage longitudinale

La Figure 51 présente les vitesses d'air dans la fosse pour la simulation K dans deux plans de coupe transversaux, le premier situé 3,6 mètres derrière le véhicule et le second entre les essieux. Le jet d'air issu de la lèvre de soufflage longitudinale, initialement émis avec un angle de 45 degrés en dessous de l'horizontale, vient frapper la paroi verticale opposée de la fosse. Il se divise alors en deux fractions. Une fraction descend le long de la paroi et génère un tourbillon qui occupe toute la partie basse de la fosse. L'autre fraction forme un écoulement montant qui suit la paroi verticale puis sort de la fosse. Selon la position longitudinale par rapport au poids lourd, cet écoulement pénètre ensuite verticalement dans l'atelier ou est dévié latéralement par le dessous du véhicule.

Dans le plan vertical médian (Figure 45c), un écoulement de balayage unidirectionnel de la fosse subsiste uniquement vers le bas de la partie arrière. Ce balayage est toutefois moins régulier que celui observé précédemment pour la Configuration D (Figure 31a). Il est absent sous le véhicule et en partie supérieure de la fosse. Le sillage derrière le véhicule est fortement modifié par l'écoulement montant en provenance de la fosse. Dans le plan horizontal à mi-garde au sol du porteur (Figure 46c), des sorties d'air latérales en provenance du dessous du véhicule dévient localement au voisinage du sol l'écoulement général dans l'atelier.

Pour la Simulation K, le module de vitesse moyen dans la fosse atteint 0,26 m/s, valeur voisine de celle relevée pour la Simulation J (Tableau 3). Le soufflage par la lèvre permet de tripler la valeur du débit pénétrant dans la fosse au travers du plan supérieur par rapport à la Configuration D sans ventilation locale (Tableau 2). Le débit de balayage de la fosse pour la Simulation K se maintient partout orienté en direction de la sortie d'air, à l'exception d'un écoulement sortant à l'avant du véhicule (Figure 52). Sur son profil longitudinal, ce débit prend des valeurs généralement en retrait par rapport à celles obtenues sans ventilation locale. Il passe par un minimum pour une abscisse qui correspond à la face arrière du véhicule.

Les concentrations dans le plan vertical médian sont présentées pour la configuration K à la Figure 48c. Dans la fosse, en aval de la zone la plus polluée localisée en dessous de l'échappement, le transport du polluant vers la sortie d'air s'accompagne d'une dilution qui abaisse progressivement les niveaux de pollution. Les teneurs en polluant les plus fortes dans cette partie de la fosse se situent vers la mi-hauteur et l'air est relativement moins pollué en partie supérieure. L'avant de la fosse est occupé par des concentrations assez élevées. Le soufflage localisé occasionne une sortie d'air pollué hors de la fosse à l'avant (Figure 48c) et sur les côtés (Figure 41c) du véhicule.

Le long du profil de concentration à hauteur des voies respiratoires, le soufflage en fosse par la lèvre longitudinale permet d'obtenir un net abaissement des concentrations sur presque toute la longueur de la fosse (Figure 53). Toutefois ce soufflage restreint l'entrée d'air neuf à l'extrémité de la fosse et provoque ainsi une augmentation de la pollution sous l'avant du

véhicule. Du second essieu jusqu'à l'arrière de la fosse la croissance des concentrations de la Configuration D sans ventilation locale est remplacée par une diminution progressive.

Pour le même débit de soufflage en fosse, le remplacement des trois orifices en paroi de petit diamètre (Simulation I) par une lèvre longitudinale (Simulation K) modifie peu les taux de réduction de la concentration moyenne à hauteur des voies respiratoires (par rapport à la configuration D avec ventilation naturelle seule). Ces taux s'élèvent respectivement à 68 % et 67 % pour la longueur totale de la fosse et à 47 % et 50 % pour la portion située sous le véhicule (Tableau 4). La configuration avec les orifices en paroi permet cependant d'obtenir une diminution de la concentration moyenne dans tout le volume de la fosse nettement supérieure : 71 % contre 37 % (Tableau 3).

5.8. Ventilateur axial côté porte de départ des véhicules

La Figure 54 présente les vitesses d'air calculées dans le plan vertical médian pour la Configuration L, en présence d'un ventilateur axial de brassage posé sur le fond de la fosse près de la porte de départ des véhicules. Ce ventilateur renforce considérablement les écoulements d'air observés (Figure 31a) à l'intérieur de la fosse sans ventilation locale. Les vitesses augmentent à la fois dans le flux unidirectionnel de balayage de la fosse en aval de l'échappement et dans l'écoulement entrant à l'extrémité avant de la fosse. Le jet issu du ventilateur axial est également alimenté par des entrées latérales entre les essieux depuis les deux côtés du véhicule (Figure 55). En arrière du camion, ce jet se propage au bas de l'atelier puis est évacué par la porte de sortie. L'écoulement longitudinal renforcé parvient à dévier vers l'arrière le jet issu de l'échappement avant que ce dernier n'impacte directement sur le fond de la fosse (Figure 32b), au contraire de la Configuration D.

L'utilisation du ventilateur axial multiplie par un facteur 7,3 le débit d'air pénétrant dans la fosse au travers du plan supérieur (Tableau 2). Ce débit est de plus supérieur à tous les débits obtenus pour les configurations avec soufflage en fosse. Le module de vitesse d'air moyen dans la fosse atteint par ailleurs un niveau élevé, à 1,14 m/s. Les valeurs du débit de balayage de la fosse sont fortement augmentées tout au long du profil longitudinal, sans passage par des valeurs négatives (Figure 39).

Les cartes de concentration en polluant pour la configuration L montrent une forte réduction de l'étendue de la zone la plus polluée, à la fois dans le plan vertical médian (Figure 56) et au mi-garde au sol du porteur (Figure 57). Par rapport à la Configuration D sans ventilation locale, le profil longitudinal de concentration à hauteur des voies respiratoires présente une forte diminution des valeurs, un rétrécissement du pic de pollution en dessous de l'échappement et une réduction de la diffusion du polluant sous l'avant du véhicule (Figure 58).

La mise en œuvre du ventilateur axial permet d'obtenir une forte diminution des concentrations moyennes (par rapport à la Configuration D). Le taux de réduction pour tout le volume de la fosse atteint ainsi 90 % (Tableau 3). A hauteur des voies respiratoires (Tableau 4), l'abaissement est de 93 % pour la moyenne sur toute la longueur de la fosse et de 94 % pour la moyenne dans la zone de travail sous le véhicule.

5.9. Ventilateur axial côté porte d'accès des véhicules

La Figure 36b présente les vitesses d'air calculées dans le plan vertical médian pour la Configuration M, en présence d'un ventilateur axial de brassage posé sur le fond de la fosse près de la porte d'accès des véhicules. La mise en œuvre de ce ventilateur fait disparaître la recirculation verticale en partie arrière de l'atelier observée précédemment sur la Figure 36a. Elle impose un flux unidirectionnel de balayage de toute la fosse. Ce flux dévie vers l'avant le jet issu de l'échappement avant que ce dernier n'impacte directement sur le fond de la fosse (Figure 38b), puis sort de la fosse par l'intervalle libre en aval du nez du poids lourd et est évacué par la porte de départ des véhicules. La Figure 37b, tracée dans le plan à mi-garde au sol du porteur permet d'observer des sorties d'air latérales sous les deux côtés du véhicule entre les essieux. Cette figure montre également la présence en partie arrière de l'atelier de deux tourbillons horizontaux dont le sens de rotation est inversé par rapport à la Simulation N (Figure 37a).

L'utilisation du ventilateur axial multiplie par un facteur 5,1 le débit d'air pénétrant dans la fosse au travers du plan supérieur (Tableau 2). Le module de vitesse d'air moyen dans la fosse atteint, comme pour la Configuration L, une valeur élevée, à 1,17 m/s. Le profil longitudinal du débit de balayage de la fosse (Figure 39) ne possède plus les portions à écoulement net rétrograde de la Configuration N, mais atteint au contraire des niveaux élevés, voisins de ceux de la Configuration L.

Les cartes de concentration en polluant pour la Configuration M montrent une forte réduction de l'étendue de la zone la plus polluée, à la fois dans le plan vertical médian (Figure 40b) et au mi-garde au sol du porteur (Figure 41b). Le transport du gaz d'échappement en direction de la sortie s'effectue en partie haute de la fosse. Par rapport à la Configuration N sans ventilation locale, le profil longitudinal de concentration à hauteur des voies respiratoires présente une forte diminution des valeurs et une nette réduction de la diffusion du polluant sous le véhicule en arrière de l'échappement (Figure 42).

La mise en œuvre du ventilateur axial permet d'obtenir une forte diminution des concentrations moyennes (par rapport à la Configuration N). Le taux de réduction pour tout le volume de la fosse atteint ainsi 97 % (Tableau 3). A hauteur des voies respiratoires (Tableau 4), l'abaissement est de 95 % pour la moyenne sur toute la longueur de la fosse et de 96 % pour la moyenne sur la portion longitudinale correspondant au véhicule. L'utilisation d'un ventilateur de brassage axial permet d'obtenir pour les deux orientations du vent extérieur des valeurs voisines de la concentration moyenne dans la zone de travail sous le véhicule : 4,5 pour la Configuration L et 4,9 pour la Configuration M (Tableau 4).

6. Conclusion

La ventilation des fosses de visite des centres de contrôle technique pour poids lourds a été examinée à l'aide de la simulation numérique des écoulements. L'étude a porté sur un atelier ventilé, au travers des portes d'accès et de départ des véhicules, par une ventilation générale naturelle induite par un vent extérieur orthogonal aux portes du local. Trois exemples de véhicules ont été considérés : un poids lourd articulé (longueur 16,5 m,

échappement latéral), un autobus (longueur 12 m, échappement arrière) et un camion porteur type fourgon (longueur 9,3 m, échappement central).

Dans la limite des configurations étudiées, les simulations montrent la capacité d'une partie de l'air neuf issu de la porte d'entrée à pénétrer à l'intérieur de la fosse, spécialement au travers de l'espace libre entre les extrémités du véhicule et de la fosse. Les vitesses d'air dans la fosse décroissent nettement en s'éloignant de l'entrée. Leur moyenne dépend du véhicule et des conditions d'essai et se situe généralement entre 25 % et 50 % de la vitesse dans l'entrée (en l'absence de ventilation locale).

Dans le cas d'un échappement latéral, l'air pollué est évacué par la ventilation générale de l'atelier, sans retour notable en direction de la fosse de visite. Pour un véhicule avec un échappement arrière, une faible partie du gaz d'échappement touche la zone de travail uniquement lorsque l'écoulement général et la direction initiale de l'émission sont en sens opposés.

Les niveaux d'exposition les plus élevés sont atteints dans le cas d'un poids lourd muni d'un échappement central situé à l'aplomb de la fosse. Le polluant pénètre alors directement à l'intérieur de la fosse et s'y répand. Les concentrations en polluant dans la fosse présentent dans ces conditions un maximum local au voisinage de l'échappement. Elles sont très sensibles à l'intensité du vent extérieur.

Les résultats montrent également que les performances d'un assainissement de l'air de la fosse à l'aide de la ventilation naturelle seule dépendent fortement de l'orientation du vent extérieur. Dans le cas de l'autobus et du camion porteur, la situation la plus favorable est celle où l'air neuf pénètre dans l'atelier par la porte la plus proche du véhicule.

Une ventilation locale de la fosse (en complément de la ventilation générale naturelle) au travers d'orifices en paroi verticale permet de diminuer la concentration moyenne à hauteur des voies respiratoires dans la zone de travail sous le véhicule. Dans la limite des configurations explorées, un soufflage localisé d'air neuf apparaît un peu plus performant qu'une aspiration. Le taux de réduction obtenu est amélioré par une augmentation du débit de soufflage en fosse. Ce taux ne dépend que faiblement du diamètre des orifices. Les diminutions procurées par un soufflage au moyen d'une lèvre longitudinale sont similaires à celles obtenues à l'aide des orifices en paroi.

Dans la limite des configurations étudiées, les meilleurs résultats pour l'assainissement de l'air de la fosse sont obtenus grâce à un soufflage d'air au moyen d'un ventilateur axial placé au voisinage de l'extrémité de la fosse la plus proche de l'entrée d'air. Le soufflage est alors exercé dans le même sens que l'écoulement général dans l'atelier, sens qui est déterminé par l'orientation du vent extérieur. Il permet de créer un flux d'air longitudinal qui balaye toute la longueur de la fosse et qui dilue puis évacue les gaz d'échappement.

7. Références

- [1] VIERLING F. (2010) Modern Performance and Emission Test Procedures. Bad Wörishofen: Kraftband Verlag Walter Schulz.
- [2] GROVES J, CAIN JR. (2000) A Survey of Exposure to Diesel Engine Exhaust Emissions in the Workspace. *Ann Occup Hyg*; 44: 435-447.
- [3] LEWNÉ M, PLATO N, GUSTAVSSON P. (2007) Exposure to Particles, Elemental Carbon and Nitrogen Dioxide in Workers Exposed to Motor Exhaust. *Ann Occup Hyg*; 51: 693-701.
- [4] LI PH, KONG SF, GENG CM *et al.* (2013) Assessing the Hazardous Risks of Vehicle Inspection Workers' Exposure to Particulate Heavy Metals in Their Work Places. *Aerosol and Air Quality Research*; 13: 255-265.
- [5] COURTOIS B, SALLÉ B, FERREIRA M. (2016) Prévention des expositions liées aux émissions des moteurs thermiques. ED 6246. Paris: INRS.
- [6] ANSYS. (2010) Ansys Fluent User's Guide Release 13.0. Canonsburg, PA: ANSYS Inc.

Remerciements

L'auteur remercie la Caisse Régionale d'Assurance Maladie d'Ile-de-France (CRAMIF) pour l'aide apportée au recueil des données pour la définition des cas et au choix des configurations à simuler.

	Véhicule	Echappement	Porte d'entrée d'air		Vitesse d'entrée (m/s)	Ventilation locale			Fosse
						débit (m ³ /h)	ouvertures (mm)	mode	
A	articulé	-	départ		1.0	0	-	-	i
B	articulé	latéral	départ		1.0	0	-	-	i
C	porteur	central	départ		1.0	0	-	-	i
D	porteur	central	départ		0.3	0	-	-	i
E	porteur	central	départ		0.3	500	3 en paroi Ø 125	a	i
F	porteur	central	départ		0.3	500	3 en paroi Ø 125	s	i
G	autobus	arrière	départ		1.0	0	-	-	i
H	autobus	arrière		accès	1.0	0	-	-	i
I	porteur	central	départ		0.3	2000	3 en paroi Ø 125	s	d
J	porteur	central	départ		0.3	2000	3 en paroi Ø 300	s	d
K	porteur	central	départ		0.3	2000	20 x 16500	s	d
L	porteur	central	départ		0.3	2000	1 axiale Ø 300	b	d
M	porteur	central		accès	0.3	2000	1 axiale Ø 300	b	d
N	porteur	central		accès	0.3	0	-	-	d

Mode de ventilation locale : a = aspiration, s = soufflage, b = brassage via un ventilateur axial
 Fosse (modélisée) : d = extrémités droites, i = extrémités inclinées

Tableau 1 : Résumé des simulations

	Débits (m ³ /h)			
	Qe	Qs	Qi	Qa
A	3863	3863	-	-
B	3951	3951	-	-
C	3890	3890	-	-
D	1092	1092	-	-
E	1184	684	0	500
F	1867	2367	500	0
G	4863	4863	-	-
H	4135	4135	-	-
I	5995	7995	2000	0
J	2279	4279	2000	0
K	3284	5284	2000	0
L	8021	8021	-	-
M	8417	8417	-	-
N	1654	1654	-	-

Qe : Débit entrant au travers du plan horizontal supérieur (Z = 0 m)

Qs : Débit sortant au travers du plan horizontal supérieur (Z = 0 m)

Qi : Débit d'air neuf introduit par la ventilation locale

Qa : Débit aspiré par les orifices de ventilation locale en paroi

Tableau 2 : Débits d'air traversant les limites du volume de la fosse

	Module (m/s)	Concentration (-)
A	0.50	-
B	0.47	0.002
C	0.37	24.6
D	0.14	83.0
E	0.12	84.3
F	0.20	67.0
G	0.36	1.7
H	0.25	4.4
I	0.51	24.3
J	0.27	35.3
K	0.26	52.0
L	1.14	8.7
M	1.17	2.4
N	0.11	72.9

Tableau 3 : Moyennes dans le volume de la fosse du module de vitesse d'air et de la concentration en polluant

	r1 (-)	r2 (-)
B	0.008	0.008
C	16.1	11.8
D	73.5	70.0
E	59.7	64.6
F	57.9	62.9
G	1.6	< 0.001
H	5.0	4.1
I	23.6	37.1
J	29.9	39.9
K	24.3	34.8
L	5.3	4.5
M	3.4	4.9
N	65.7	117.3

r1 : moyenne sur toute la longueur de la fosse

r2 : moyenne limitée à la portion longitudinale correspondant au dessous du véhicule

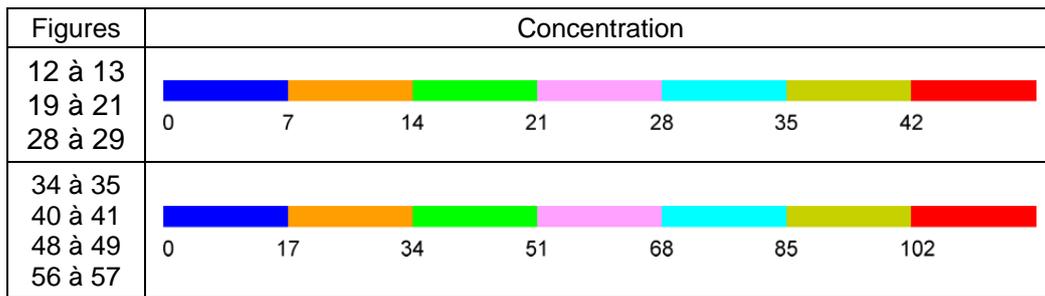
Tableau 4 : Moyennes surfaciques de concentration en polluant dans le plan horizontal à hauteur des voies respiratoires dans la fosse (Z = -0.040 m)

	porte d'accès	orifice 1	orifice 2	orifice 3	prise moteur
concentration (-)	1.5	108.8	112.3	12.0	0
captage (%)	46.5	25.0	25.8	2.7	0

Tableau 5 : Concentrations moyennes en polluant et efficacités de captage dans les différentes sorties d'air pour la simulation E

Figures	7 à 10 14 à 17 23 à 24	25 32 38	26	31 36 à 37 45 à 46 54 à 55	33	51
1 m/s						

Encadré 1 : Echelles utilisées dans les figures représentant les champs de vitesses d'air



Encadré 2 : Echelles utilisées pour les cartes de concentration en polluant

Marque	Position longitudinale
a	orifice en paroi de ventilation locale n° 1
b	arrière du véhicule
c	orifice en paroi de ventilation locale n° 2
d	limite avant des roues arrière du tracteur, du bus ou du porteur
e	échappement
f	orifice en paroi de ventilation locale n° 3
g	nez du véhicule

Encadré 3 : Marques utilisées comme repères sur les profils longitudinaux

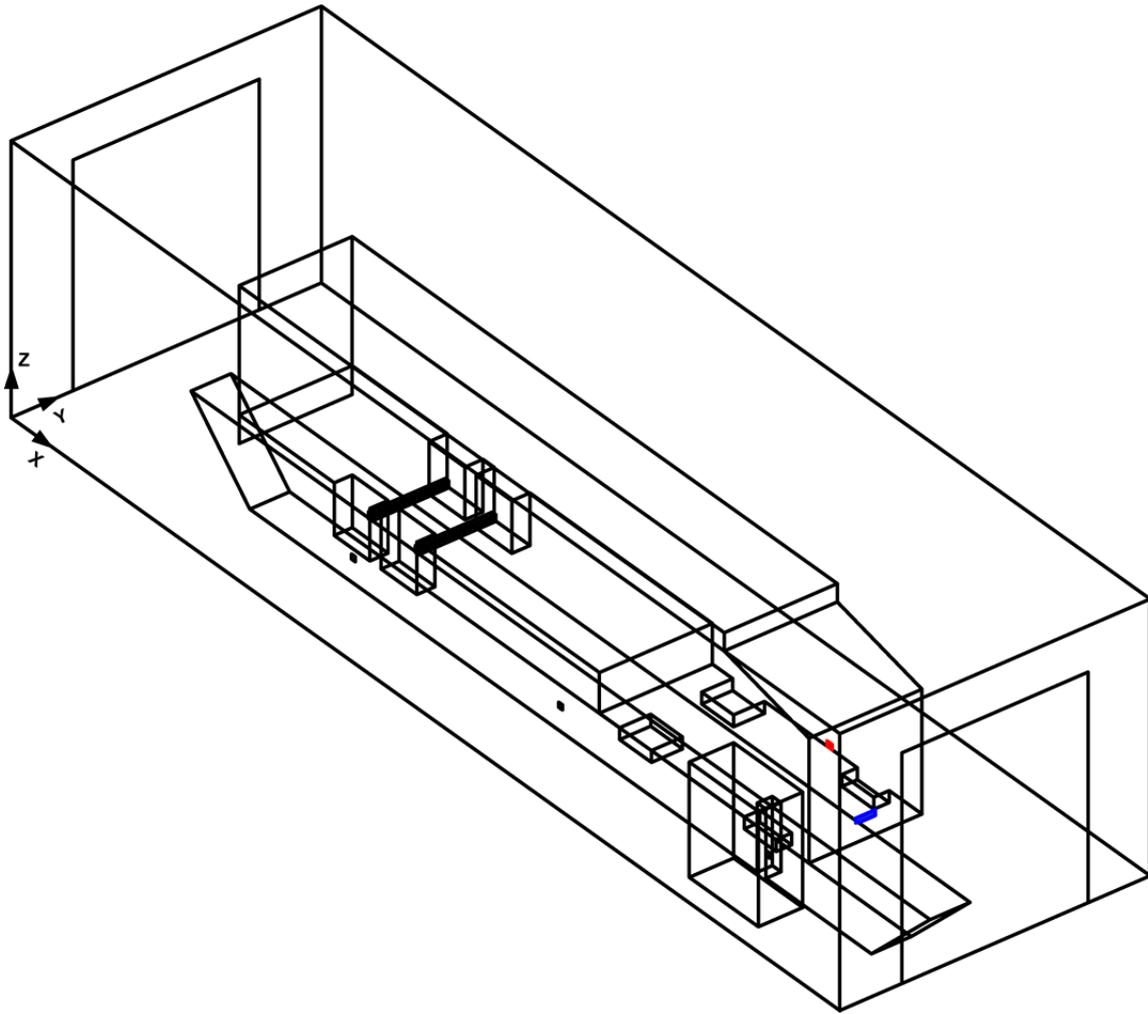


Figure 1 : Vue en perspective du local avec le poids lourd articulé

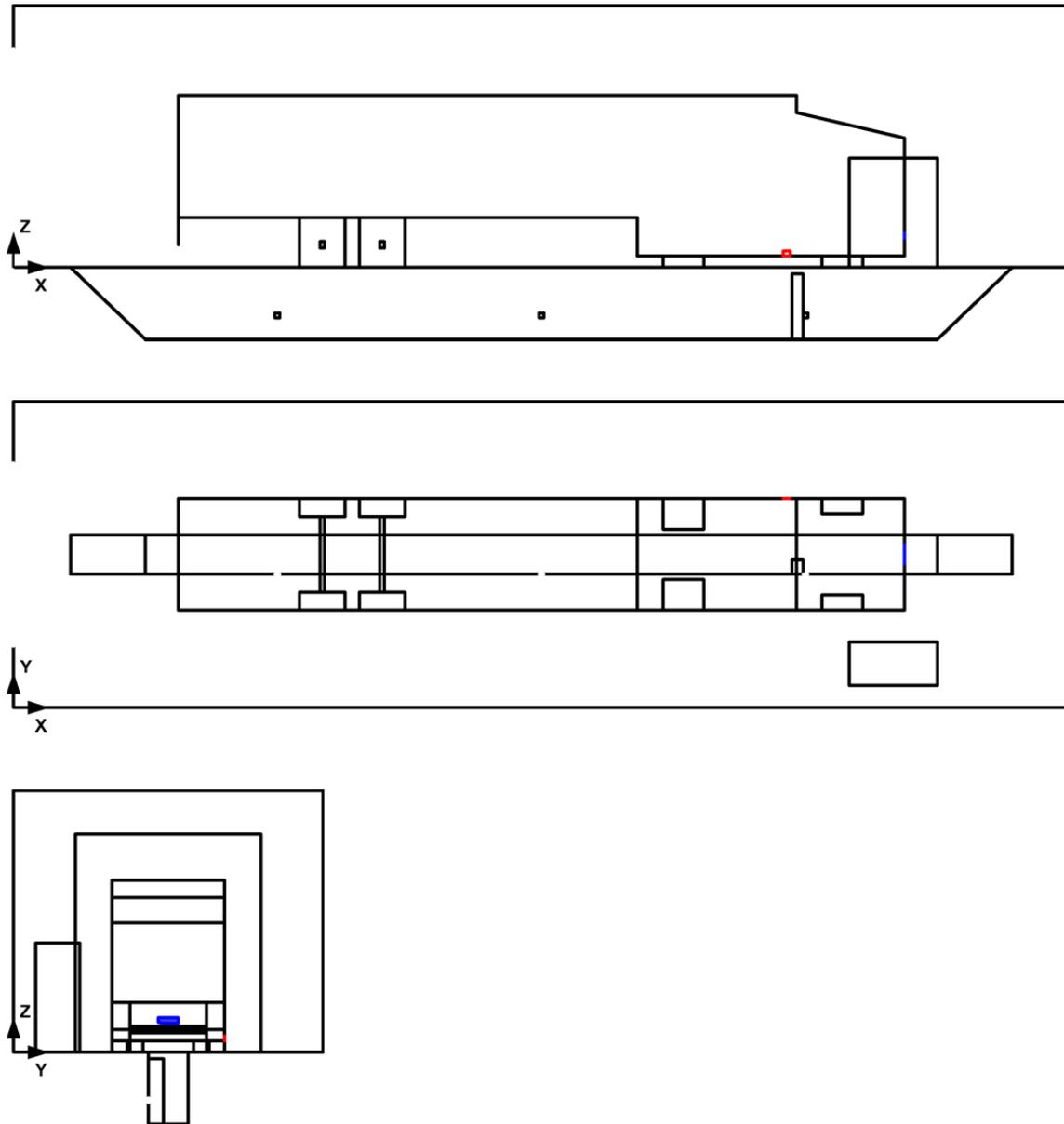


Figure 2 : Vues en projection du local et du poids lourd articulé

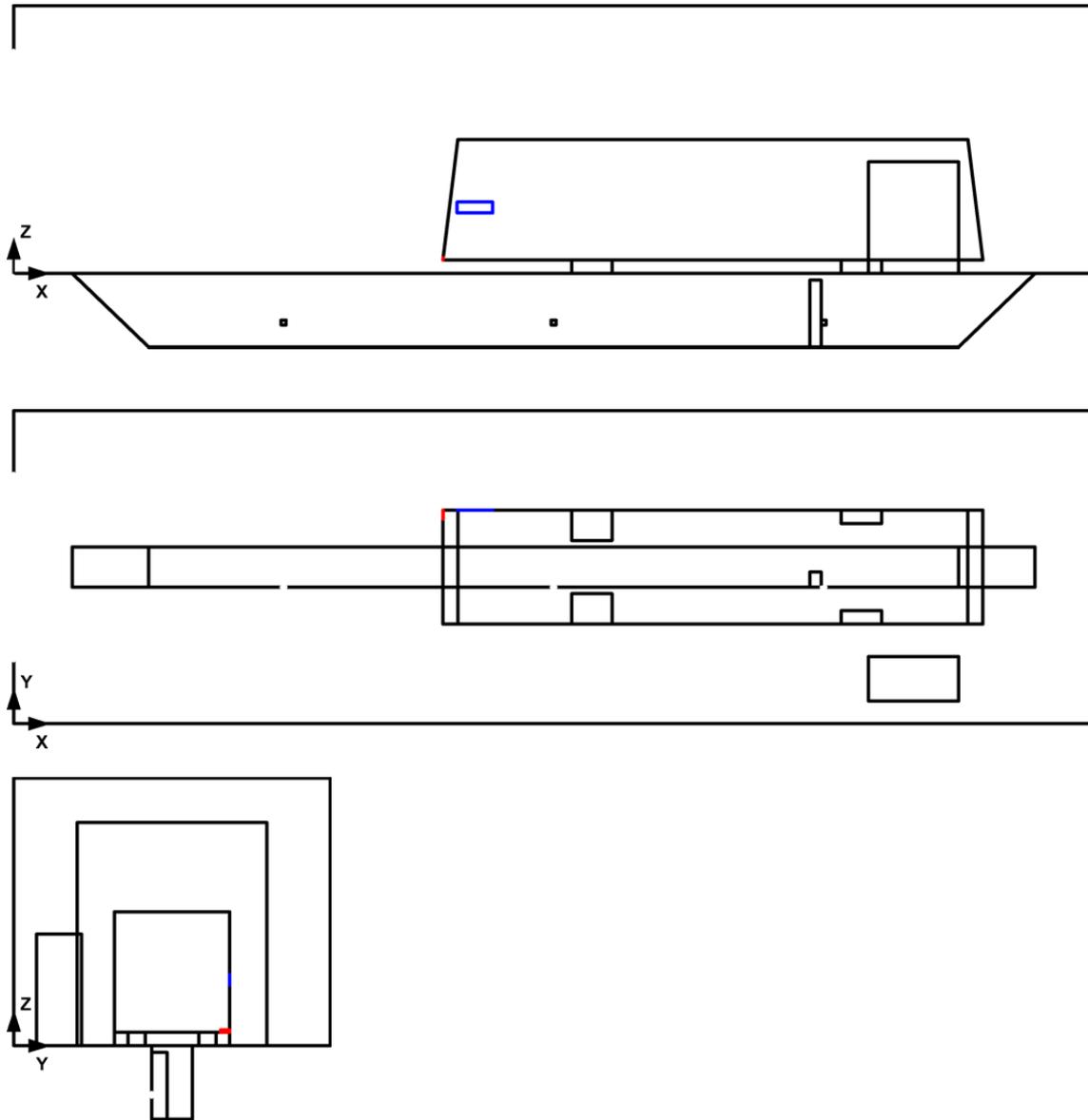


Figure 3 : Vues en projection du local et de l'autobus

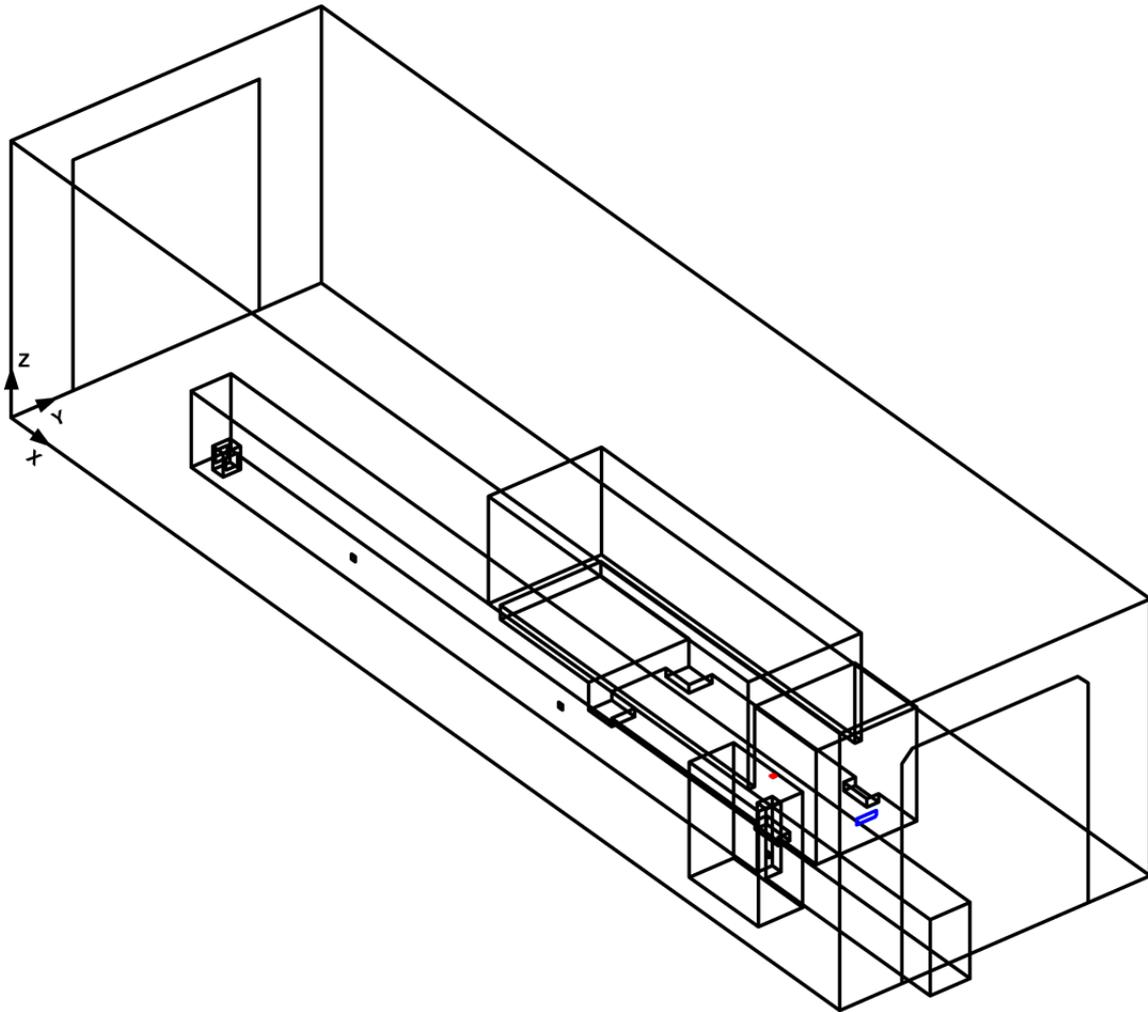


Figure 4 : Vue en perspective du local avec le camion porteur et un ventilateur axial placé côté accès

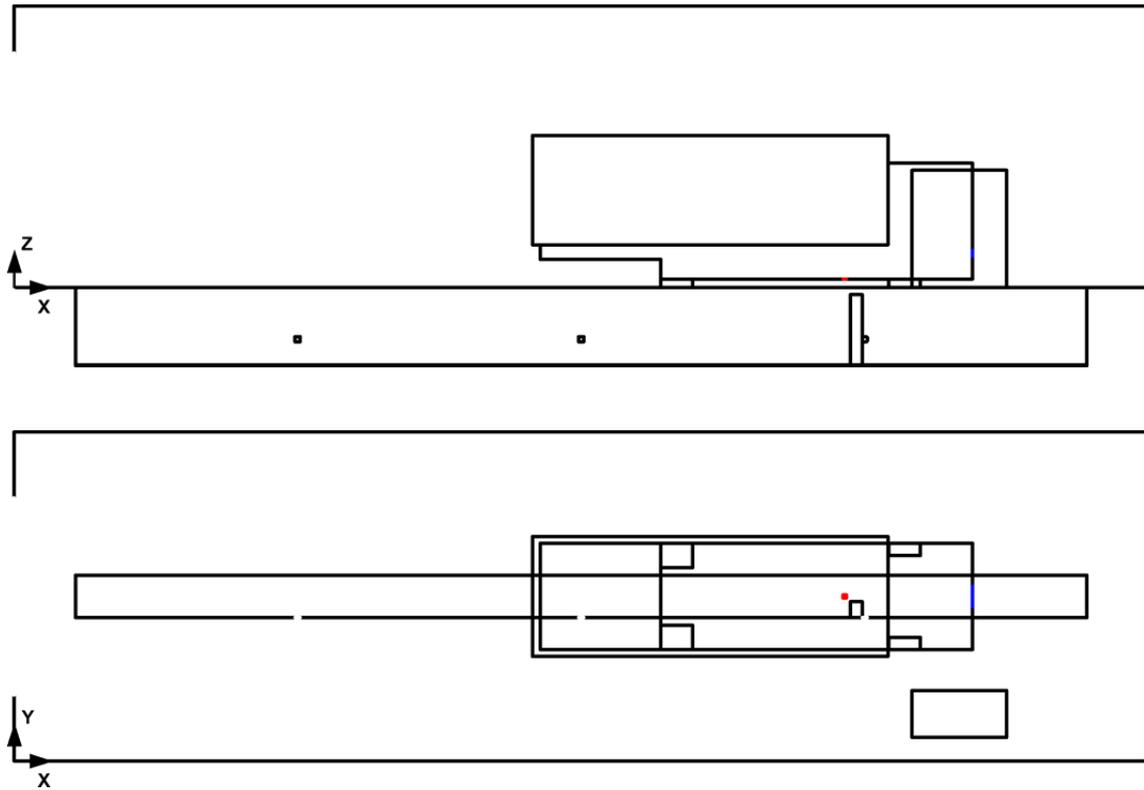


Figure 5 : Vues en projection du local avec le camion porteur et les orifices en paroi de la fosse

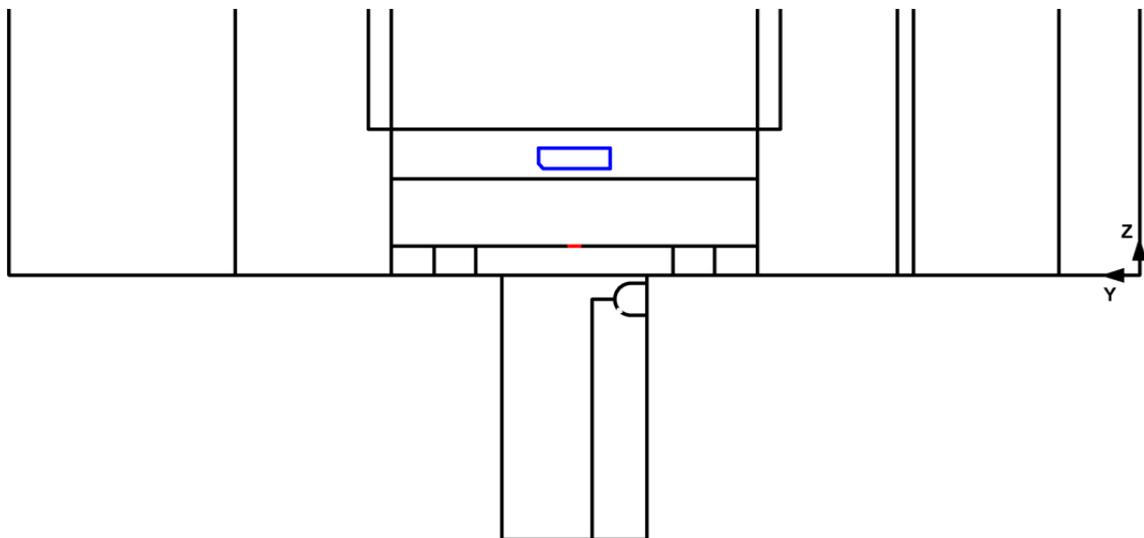


Figure 6 : Zoom au voisinage de la fosse en présence du camion porteur et de la lèvre longitudinale de ventilation

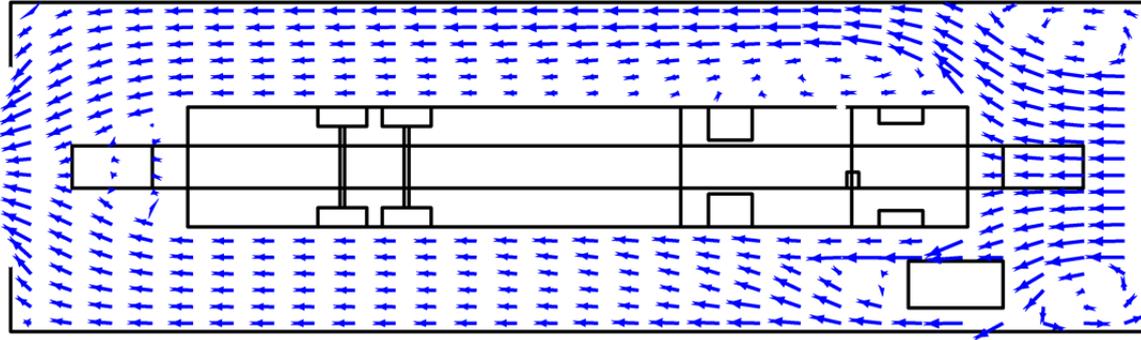


Figure 7 : Projection parallèlement à l'axe Z des vitesses d'air dans le plan horizontal à mi-hauteur de l'avant du tracteur. Simulation A (poids lourd articulé, sans échappement)

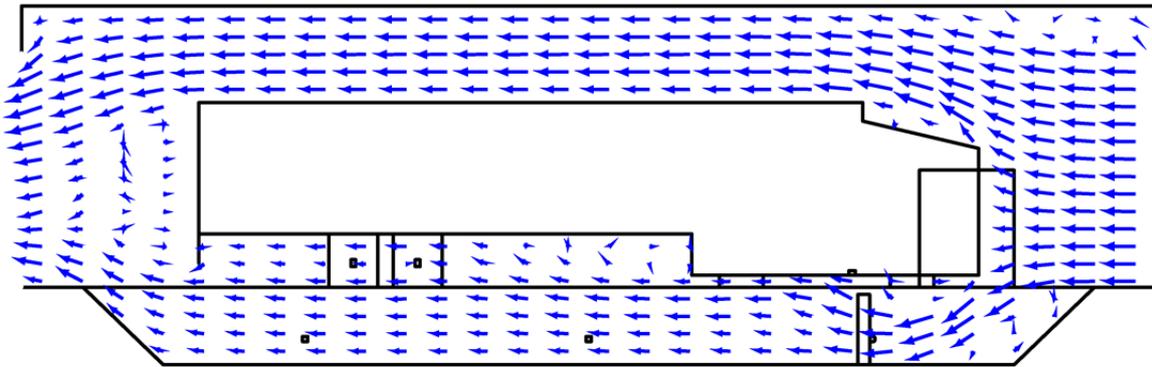


Figure 8 : Projection parallèlement à l'axe Y des vitesses d'air dans le plan vertical longitudinal médian. Simulation A (poids lourd articulé, sans échappement)

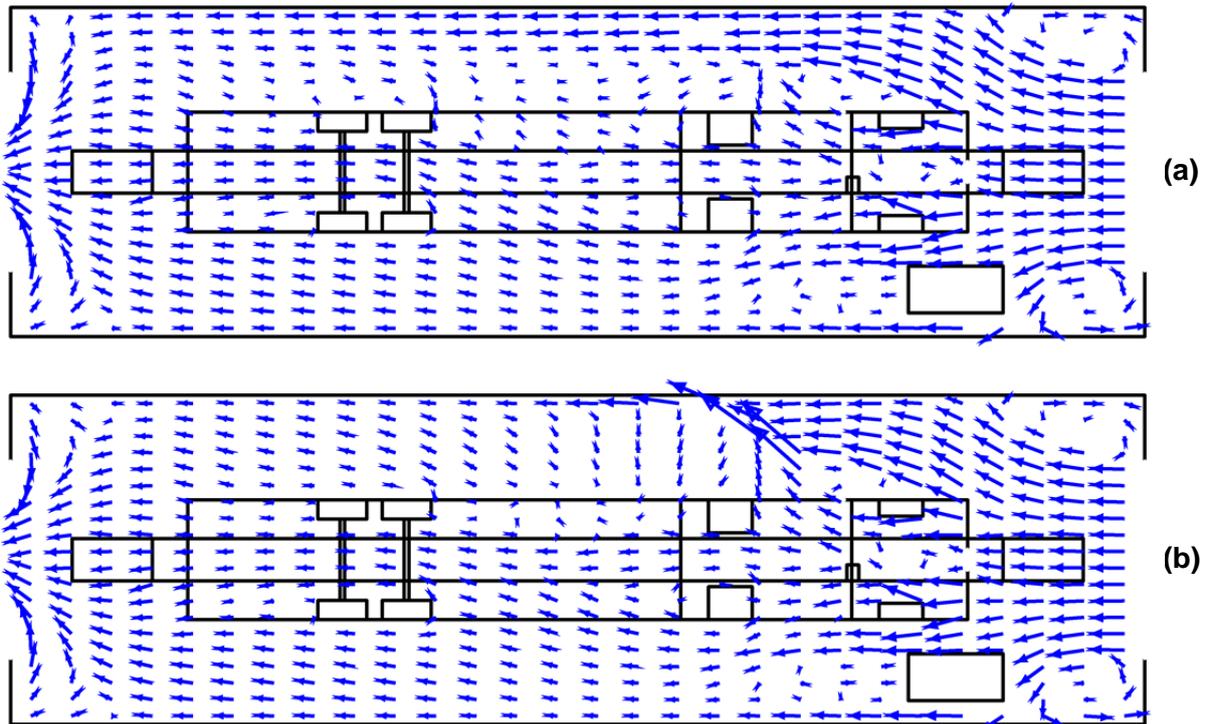


Figure 9 : Projection parallèlement à l'axe Z des vitesses d'air dans le plan horizontal à mi-garde au sol du tracteur. (a) : simulation A, (b) : simulation B (échappement latéral)

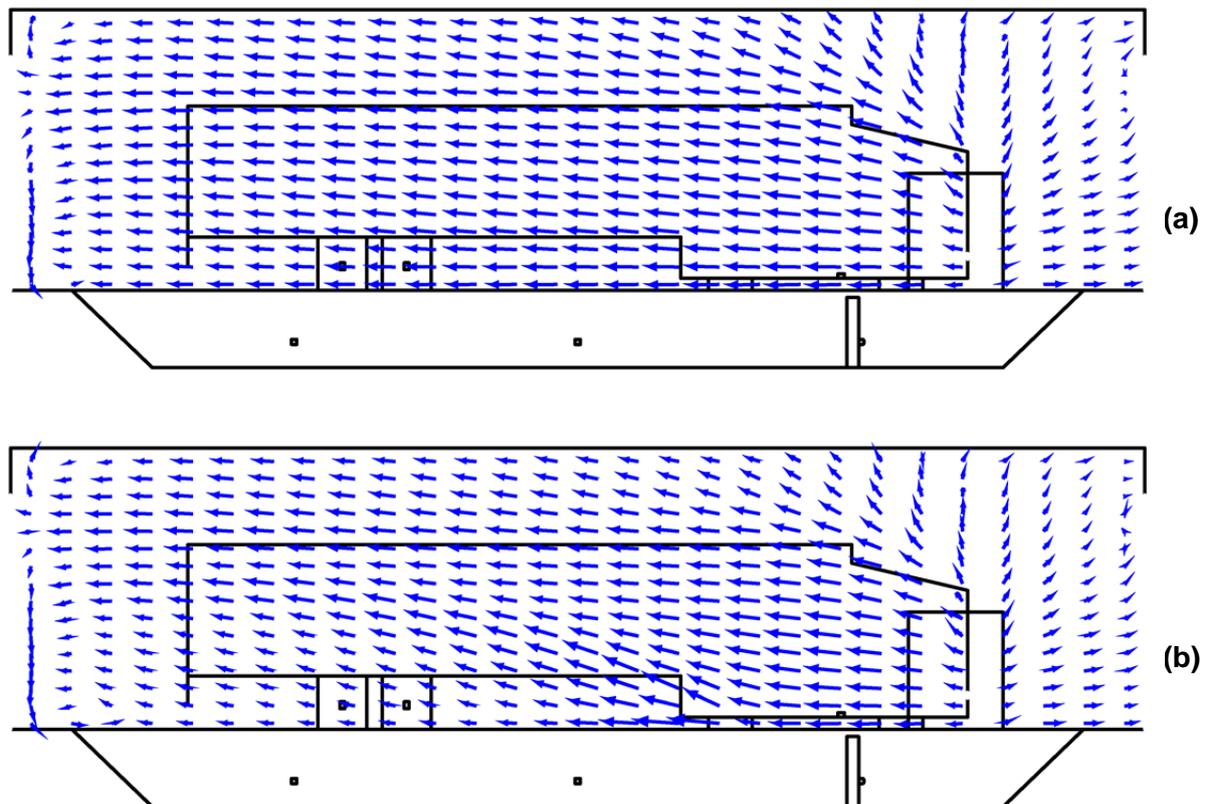


Figure 10 : Projection parallèlement à l'axe Y des vitesses d'air dans le plan vertical $Y = 6,825$ m, proche de la paroi gauche de l'atelier. (a) : simulation A, (b) : simulation B

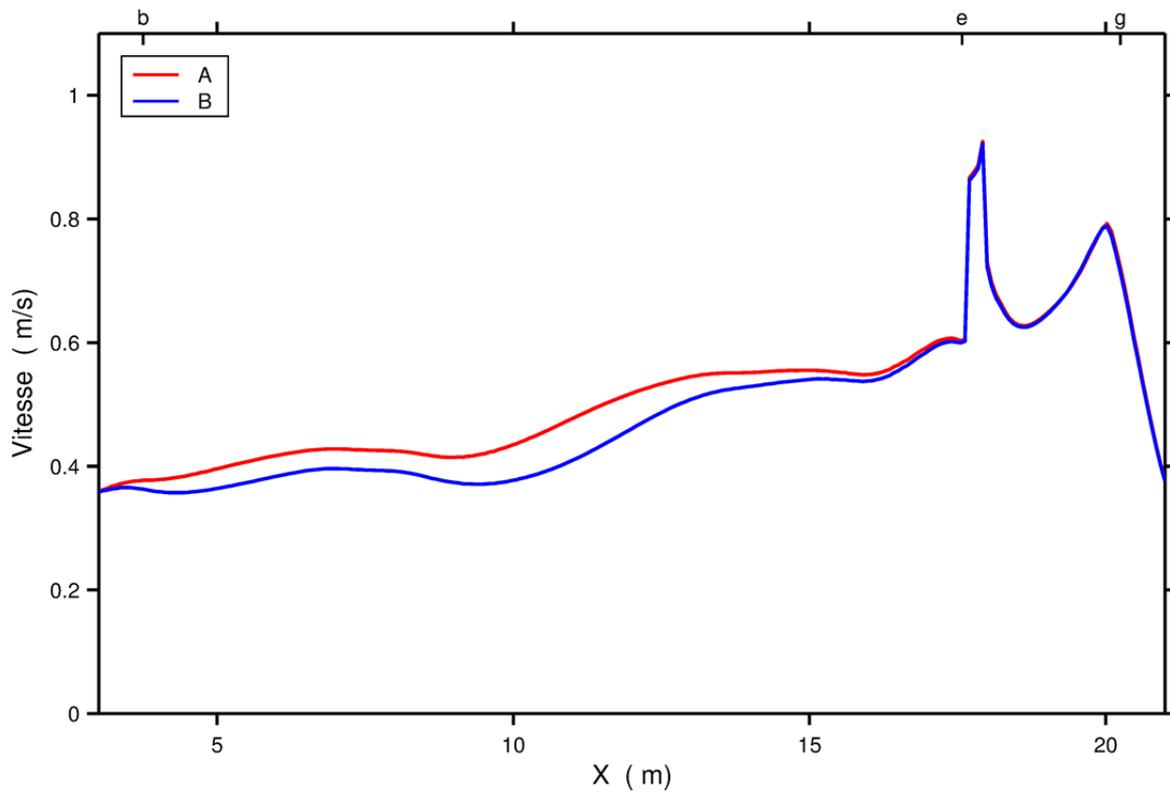


Figure 11 : Profils longitudinaux de module de vitesse d'air dans la fosse en présence du poids lourd articulé. Simulations A (sans échappement) et B (échappement latéral)

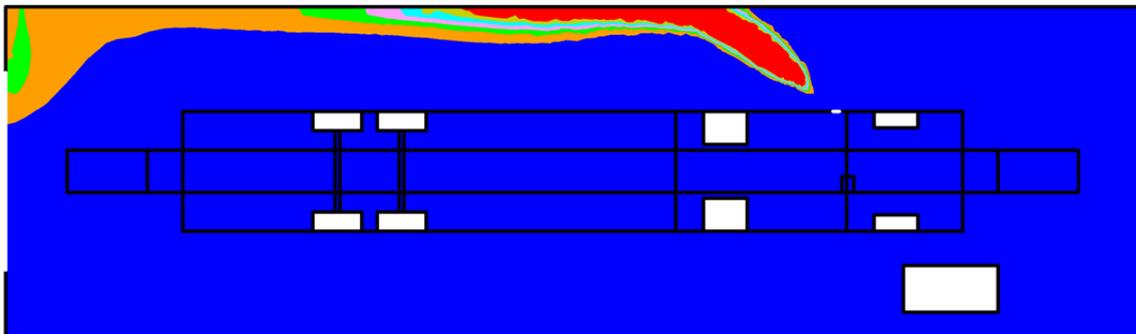


Figure 12 : Concentration en polluant au niveau du sol de l'atelier. Simulation B (poids lourd articulé, échappement latéral)

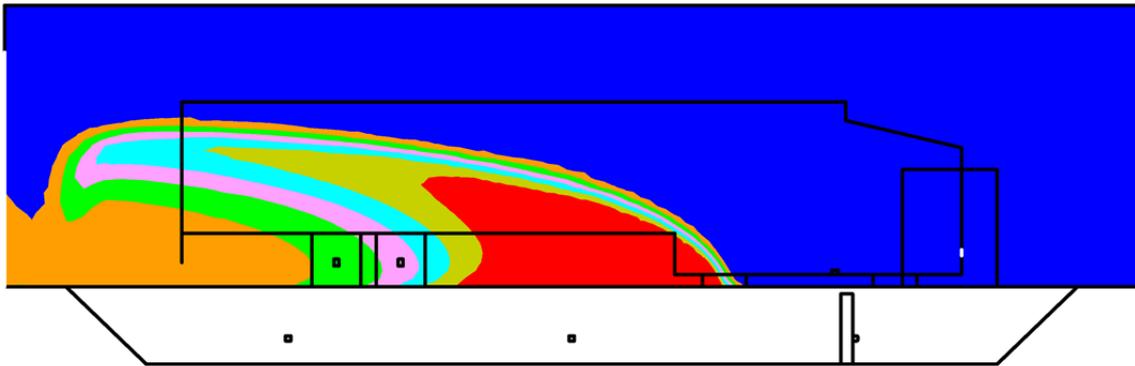


Figure 13 : Concentration en polluant sur la paroi verticale gauche de l'atelier.
Simulation B (poids lourd articulé, échappement latéral)

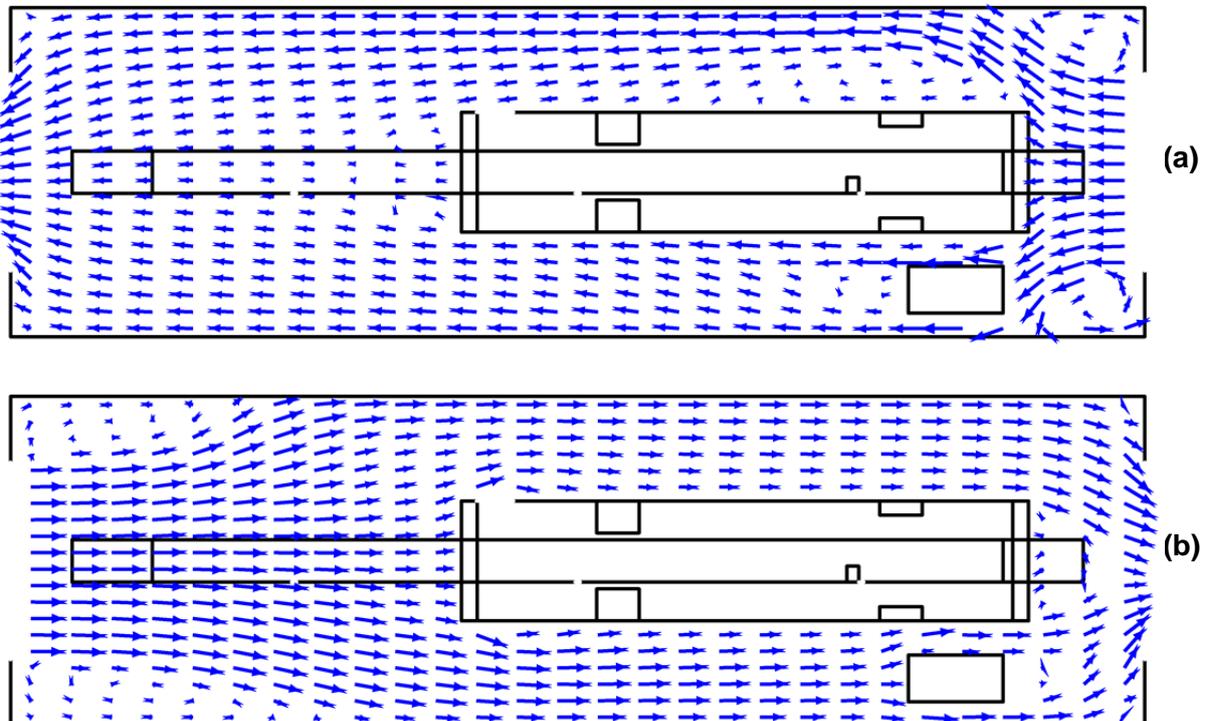


Figure 14 : Projection parallèlement à l'axe Z des vitesses d'air dans le plan horizontal $Z = 1,610$ m, proche de la mi-hauteur de l'autobus. (a) : simulation G (entrée d'air par la porte de départ), (b) : simulation H (entrée d'air par la porte d'accès)

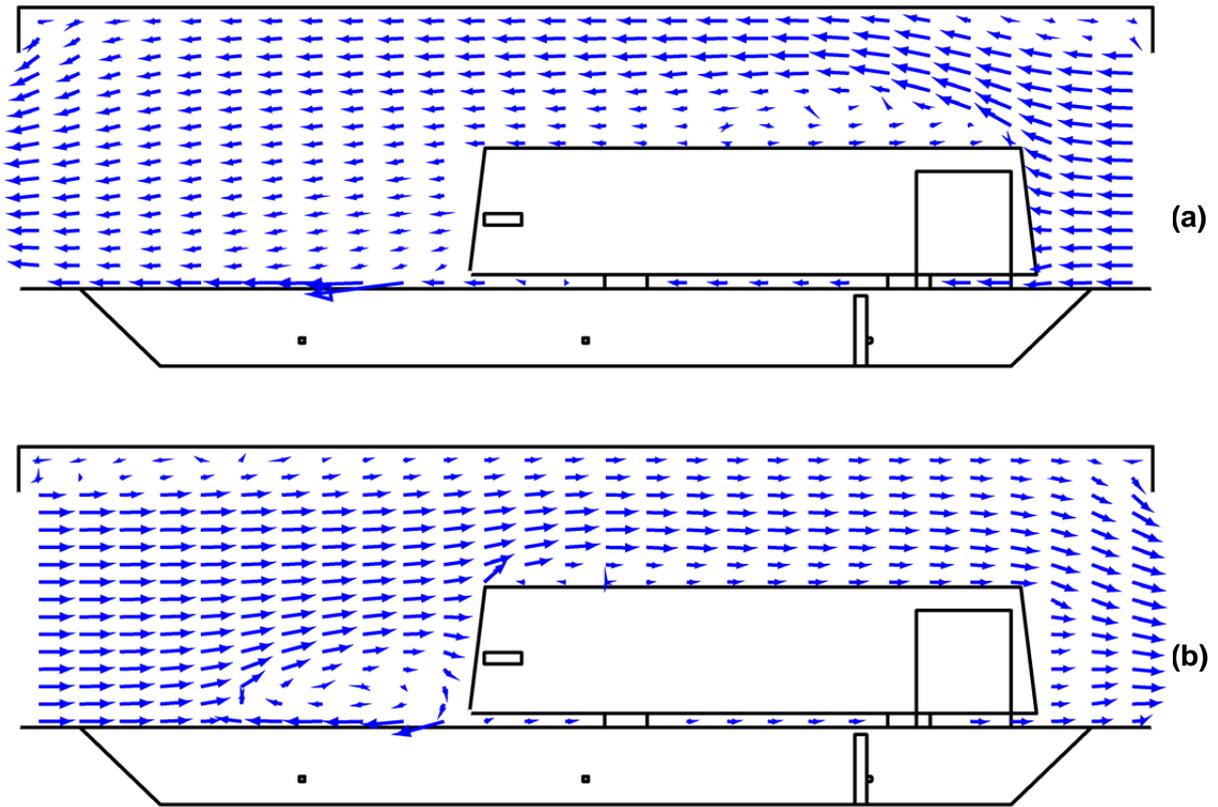


Figure 15 : Projection parallèlement à l'axe Y des vitesses d'air dans le plan vertical à mi-largeur de l'échappement. (a) : simulation G, (b) : simulation H

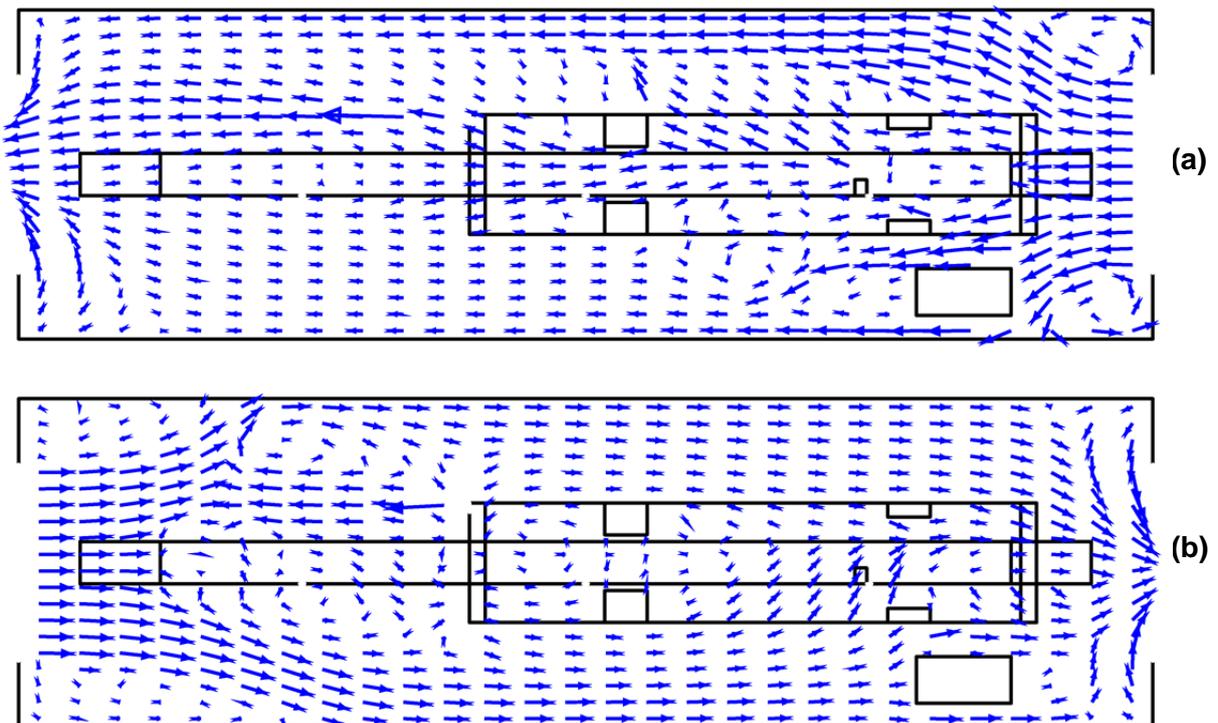


Figure 16 : Projection parallèlement à l'axe Z des vitesses d'air dans le plan horizontal à mi-hauteur sous jupe de l'autobus. (a) : simulation G, (b) : simulation H

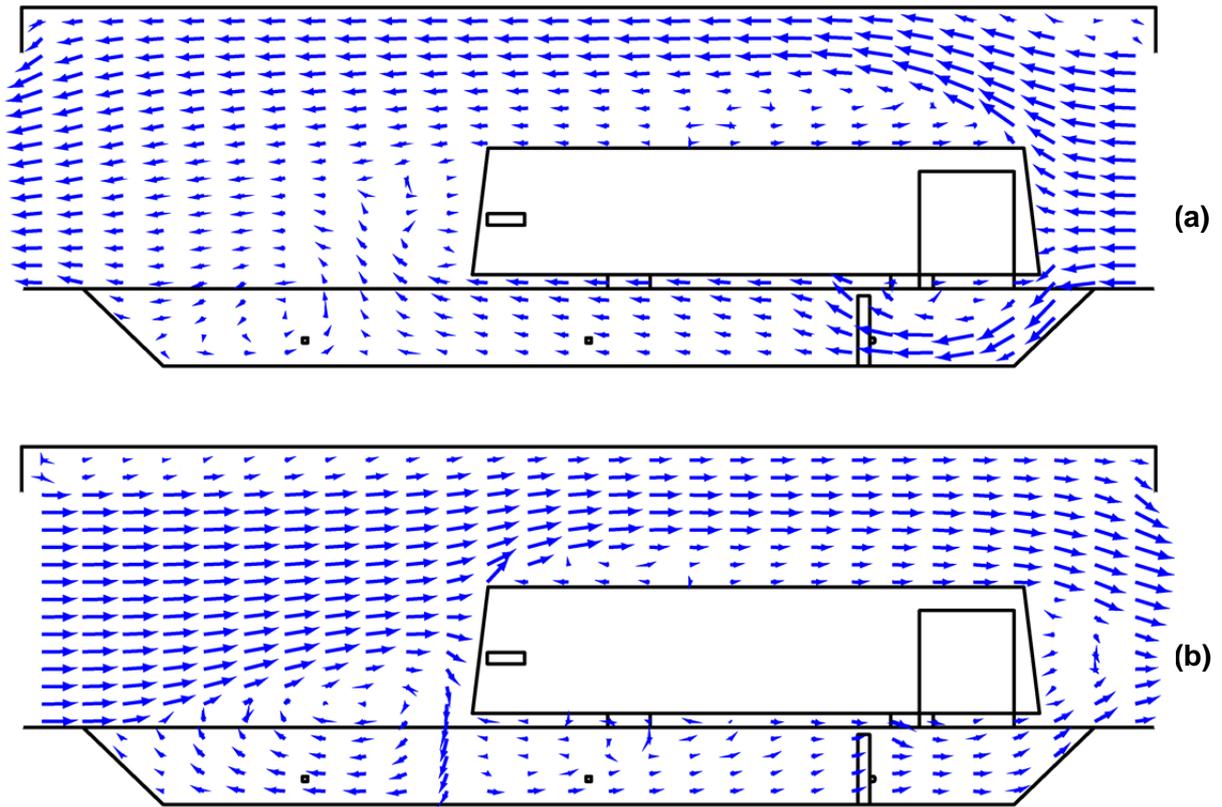


Figure 17 : Projection parallèlement à l'axe Y des vitesses d'air dans le plan vertical longitudinal médian. (a) : simulation G (entrée d'air par la porte de départ), (b) : simulation H (entrée d'air par la porte d'accès)

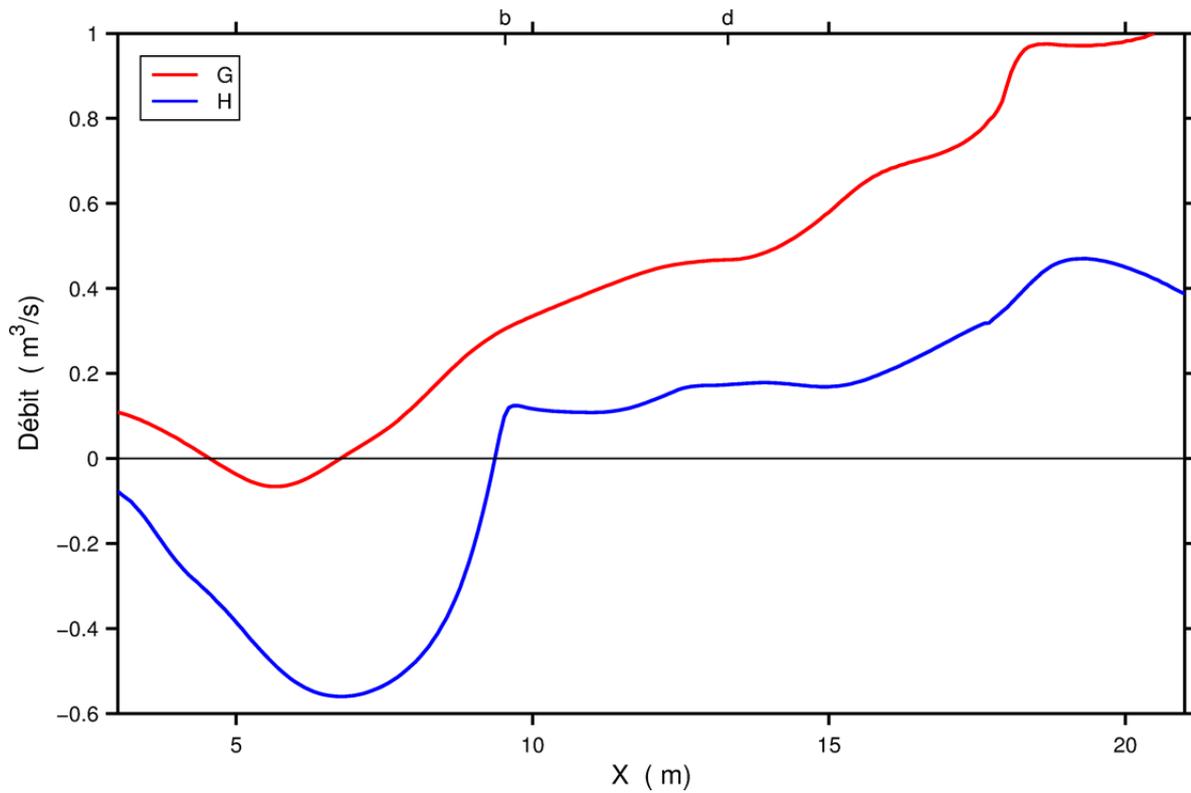


Figure 18 : Profils longitudinaux du débit de balayage de la fosse en présence de l'autobus. Simulations G (entrée d'air par la porte de départ) et H (entrée d'air par la porte d'accès)

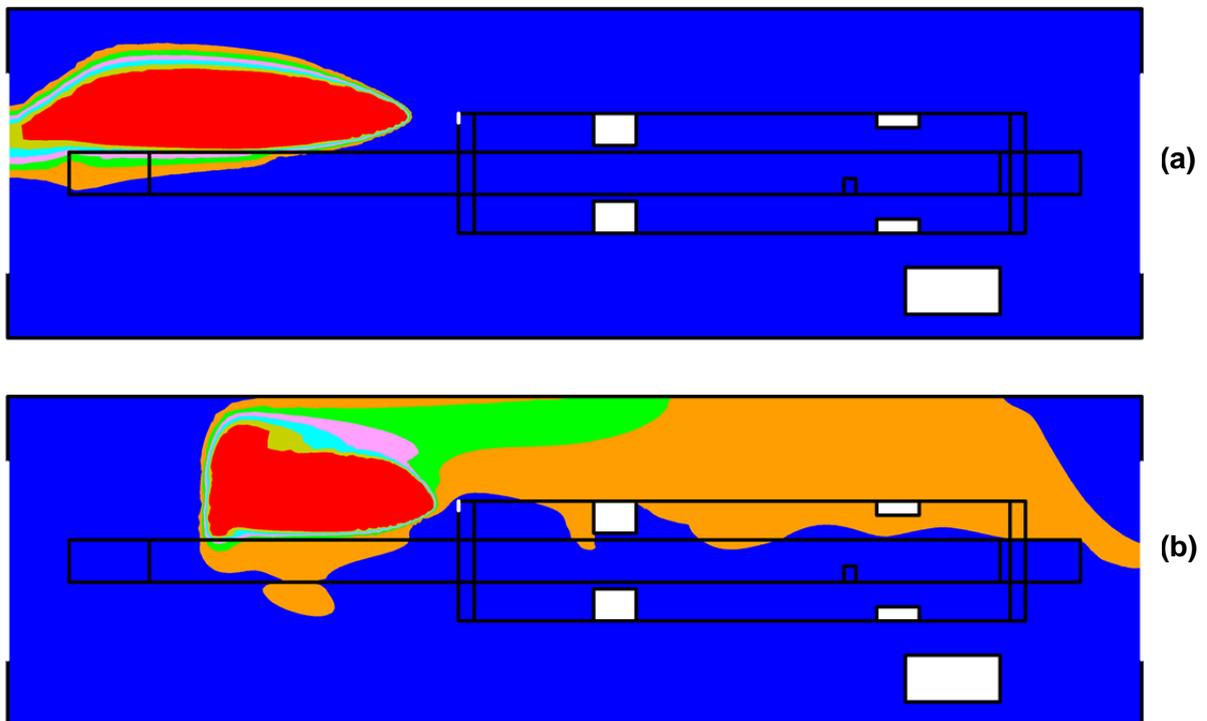


Figure 19 : Concentration en polluant au niveau du sol de l'atelier. (a) : simulation G (entrée d'air par la porte de départ), (b) : simulation H (entrée d'air par la porte d'accès)

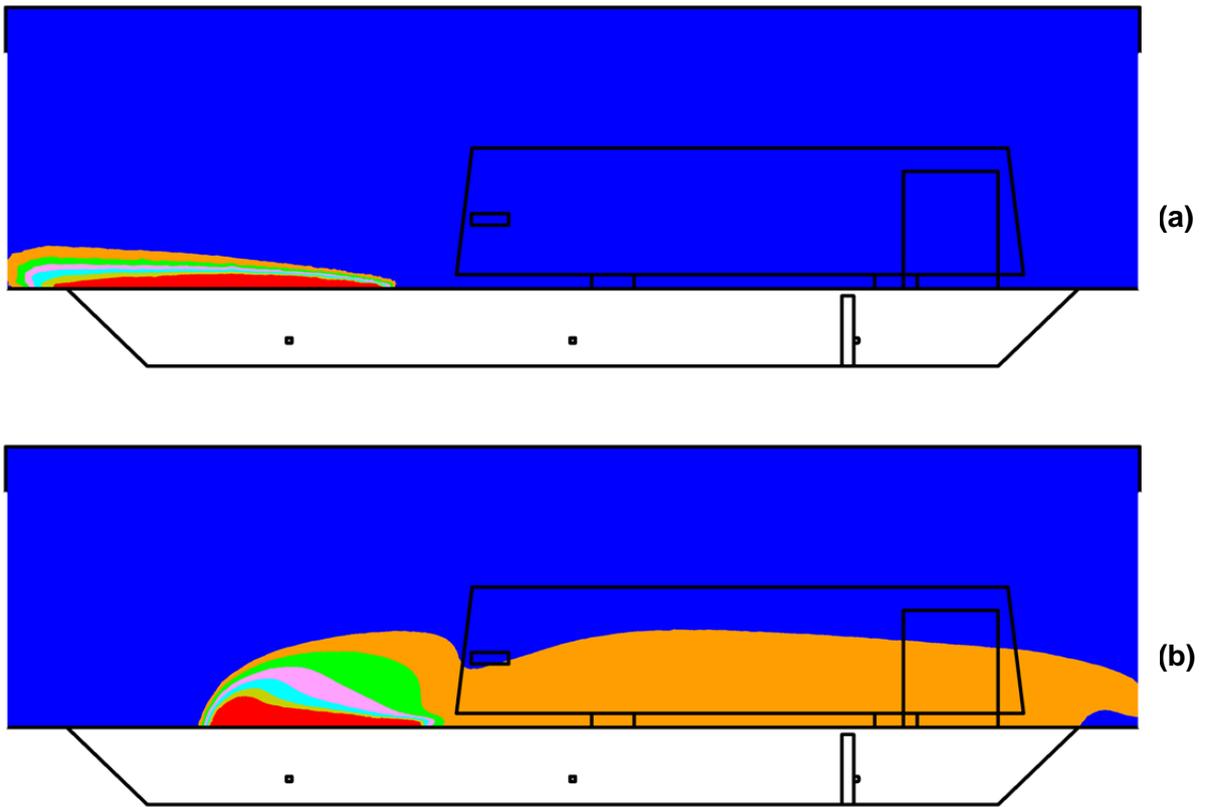


Figure 20 : Concentration en polluant dans le plan vertical $Y = 5,035$ m, situé à 0,26 m à gauche de l'autobus. (a) : simulation G, (b) : simulation H

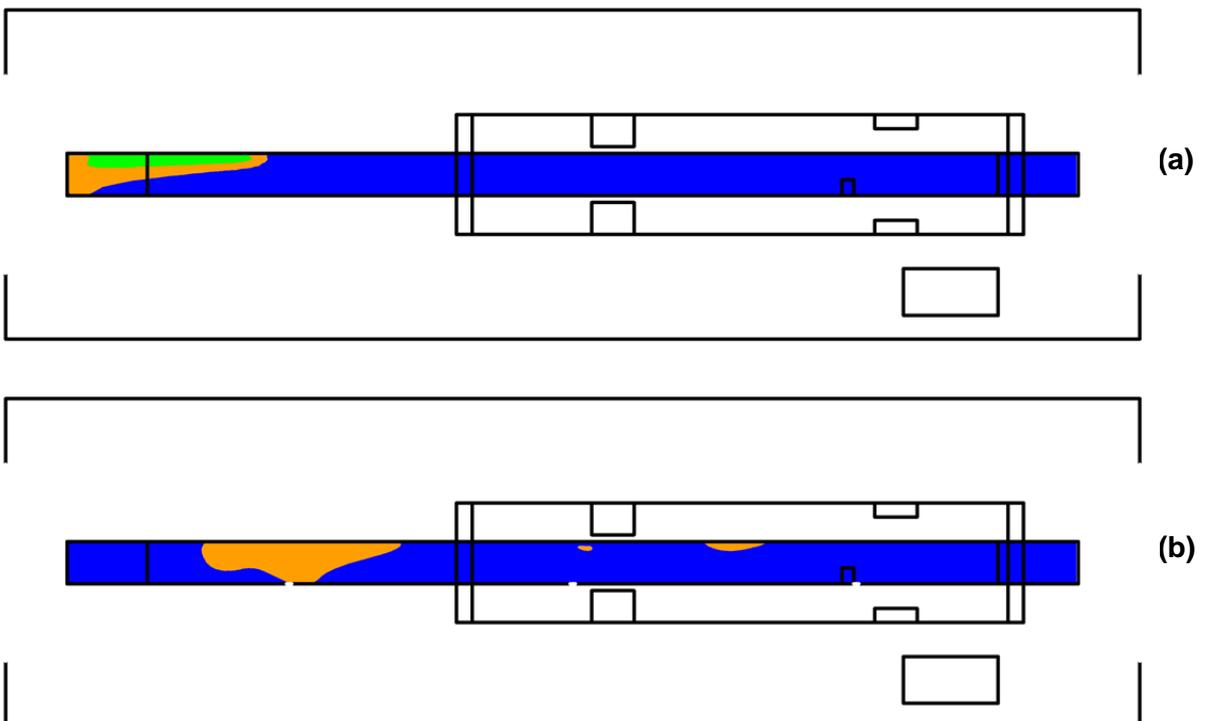


Figure 21 : Concentration en polluant à hauteur des voies respiratoires dans la fosse en présence de l'autobus. (a) : simulation G, (b) : simulation H

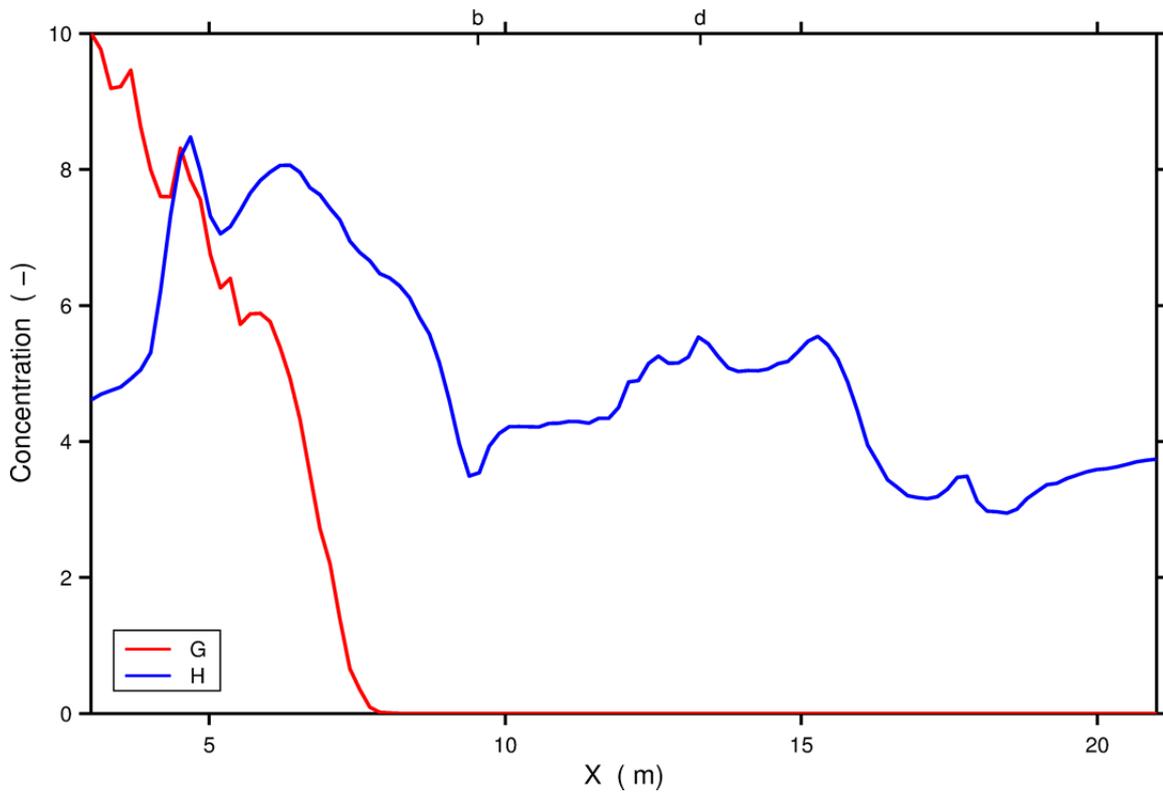


Figure 22 : Profils longitudinaux de concentration en polluant à hauteur des voies respiratoires dans la fosse en présence de l'autobus. Simulations G (entrée d'air par la porte de départ) et H (entrée d'air par la porte de départ)

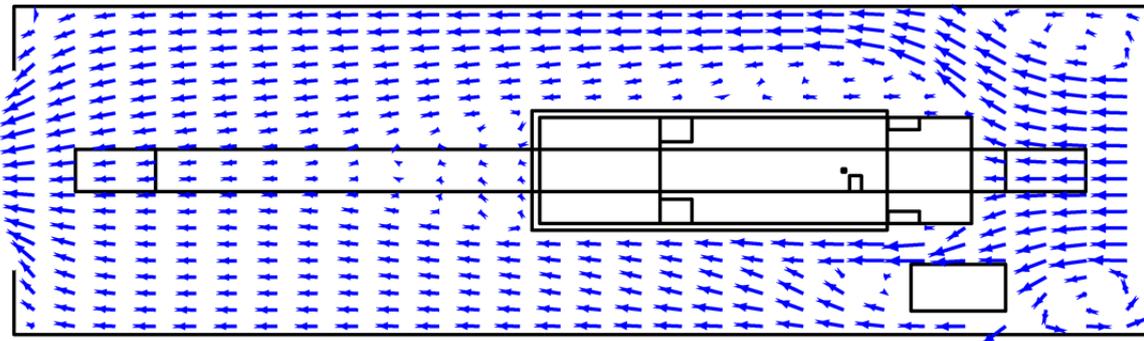


Figure 23 : Projection parallèlement à l'axe Z des vitesses d'air dans le plan Z = 1,610 m, proche de la mi-hauteur du camion porteur. Simulation C (vitesse d'entrée 1 m/s)

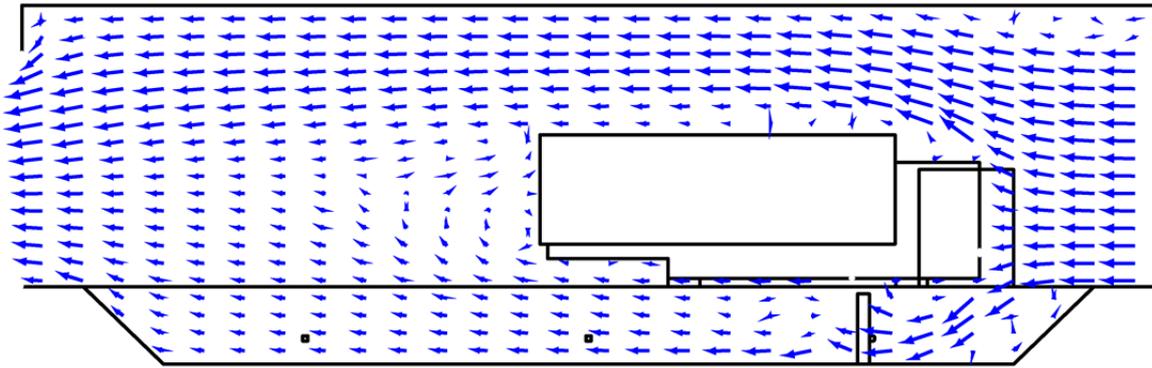


Figure 24 : Projection parallèlement à l'axe Y des vitesses d'air dans le plan vertical longitudinal médian. Simulation C (porteur, vitesse d'entrée 1 m/s)

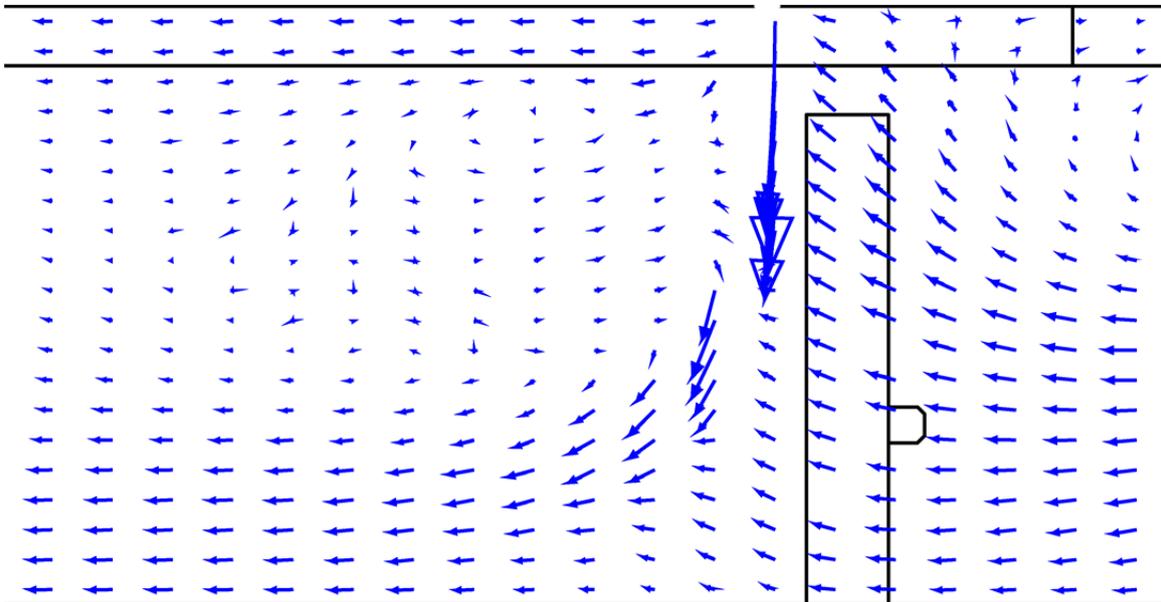


Figure 25 : Projection parallèlement à l'axe Y des vitesses d'air dans le plan vertical longitudinal médian. Zoom au voisinage de la sortie d'échappement. Simulation C (porteur, vitesse d'entrée 1 m/s)

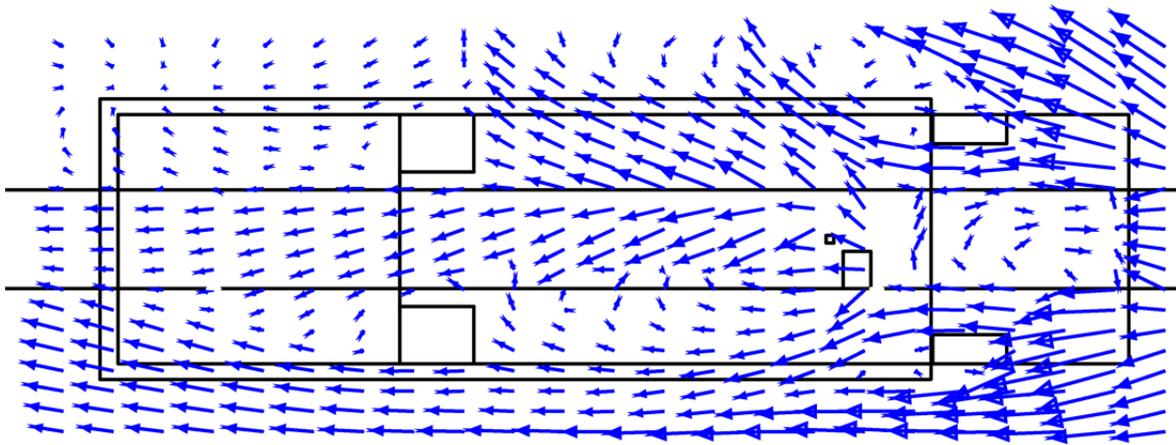


Figure 26 : Projection parallèlement à l'axe Z des vitesses d'air dans le plan horizontal à mi-garde au sol du porteur. Zoom au voisinage du véhicule.
Simulation C (porteur, vitesse d'entrée 1 m/s)

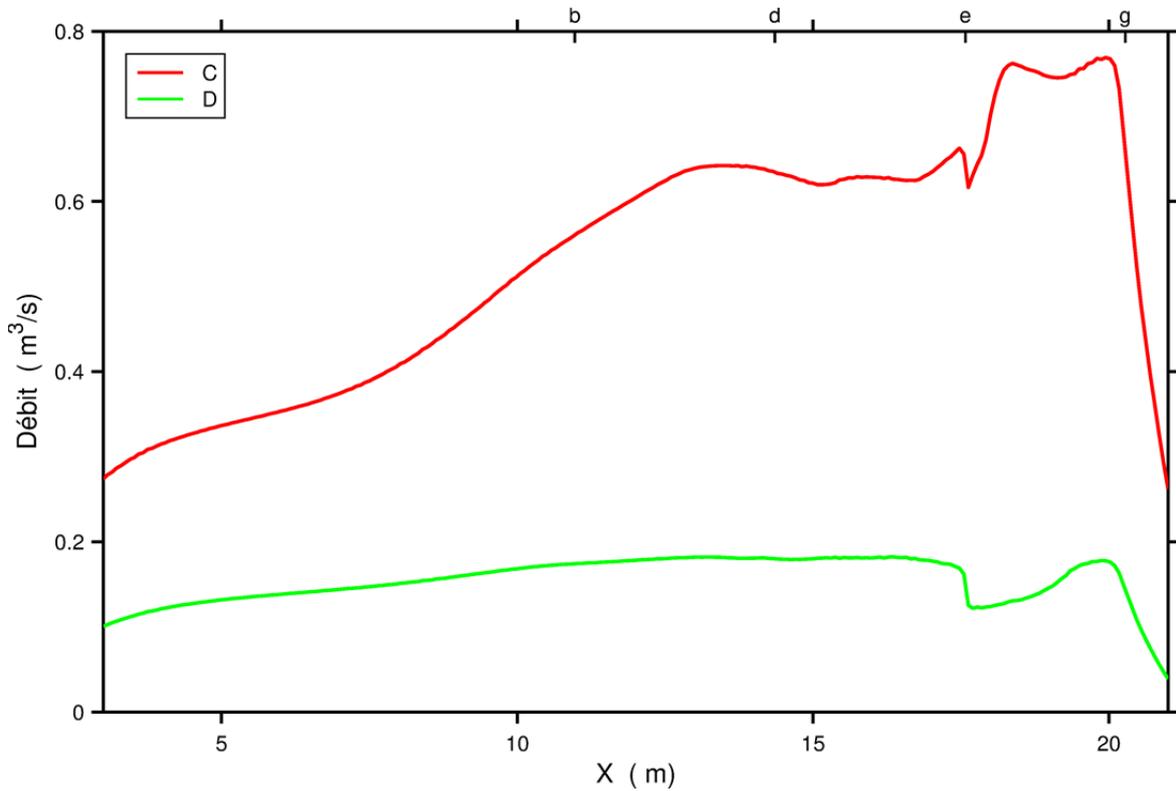


Figure 27 : Profils longitudinaux du débit de balayage de la fosse en présence du camion porteur. Simulations C (vitesse d'entrée 1 m/s) et D (vitesse d'entrée 0,3 m/s)

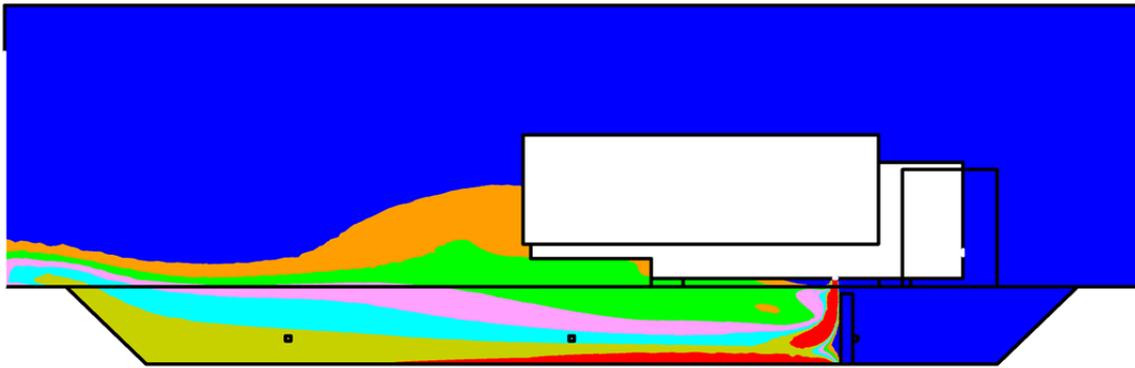


Figure 28 : Concentration en polluant dans le plan vertical longitudinal médian.
Simulation C (porteur, vitesse d'entrée 1 m/s)

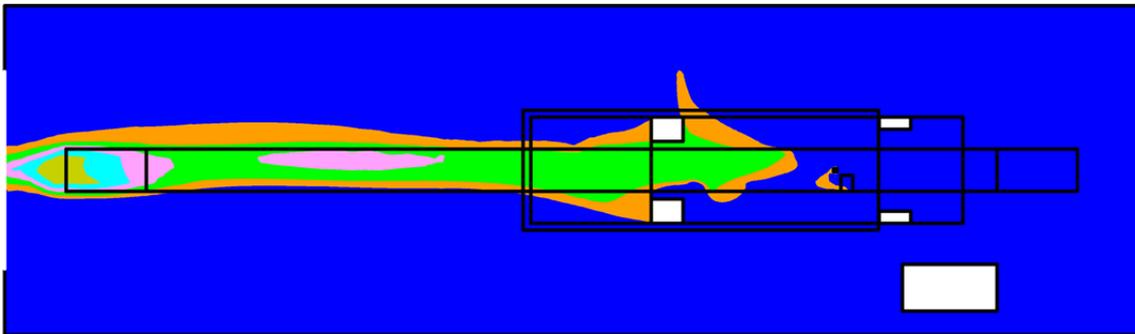


Figure 29 : Concentration en polluant dans le plan horizontal à mi-garde au sol du porteur.
Simulation C (porteur, vitesse d'entrée 1 m/s)

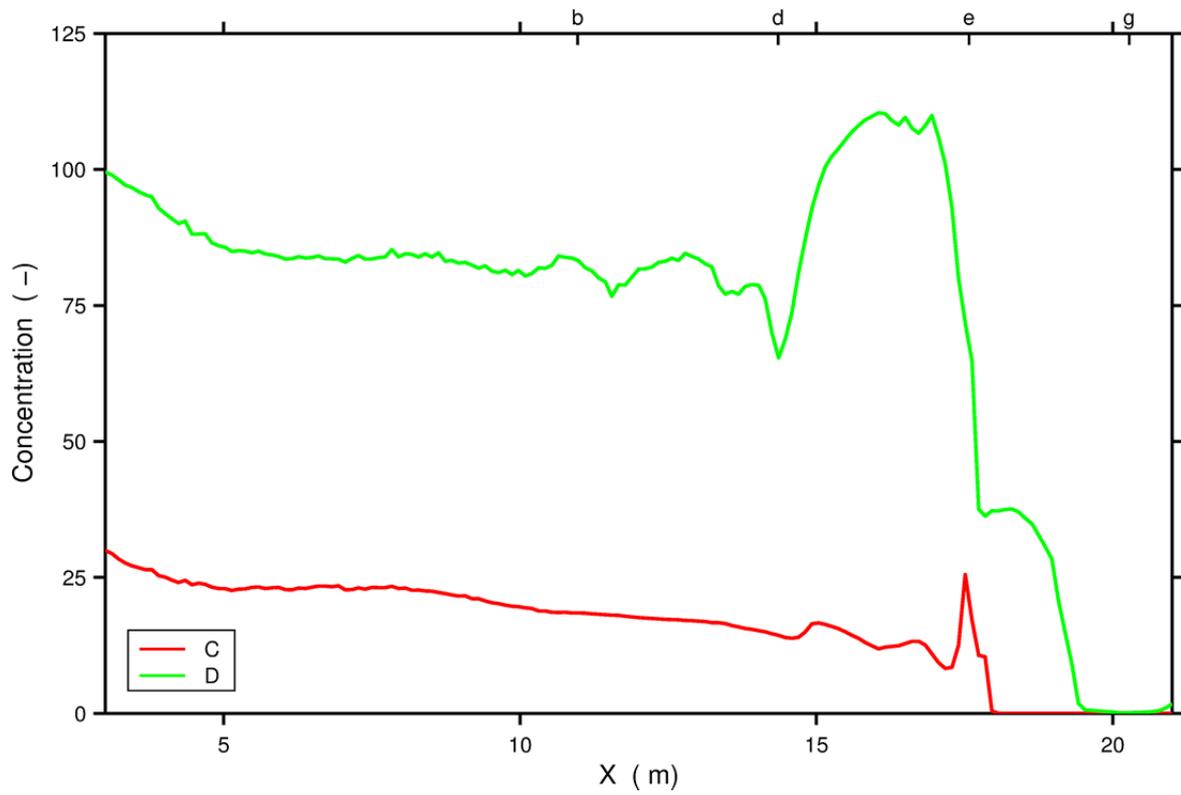


Figure 30 : Profils longitudinaux de concentration en polluant à hauteur des voies respiratoires dans la fosse en présence du camion porteur. Simulations C (vitesse d'entrée 1 m/s) et D (vitesse d'entrée 0,3 m/s)

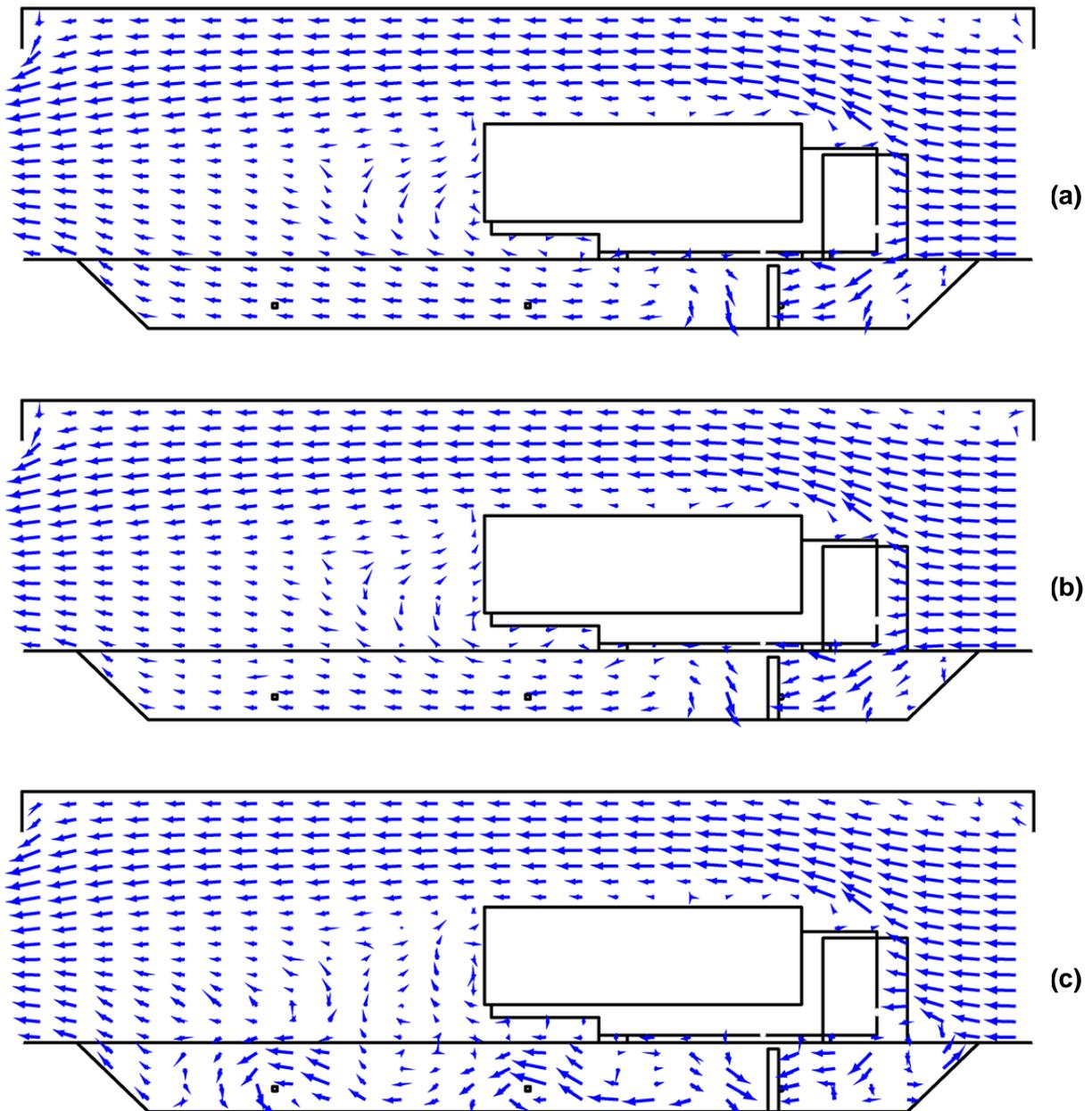
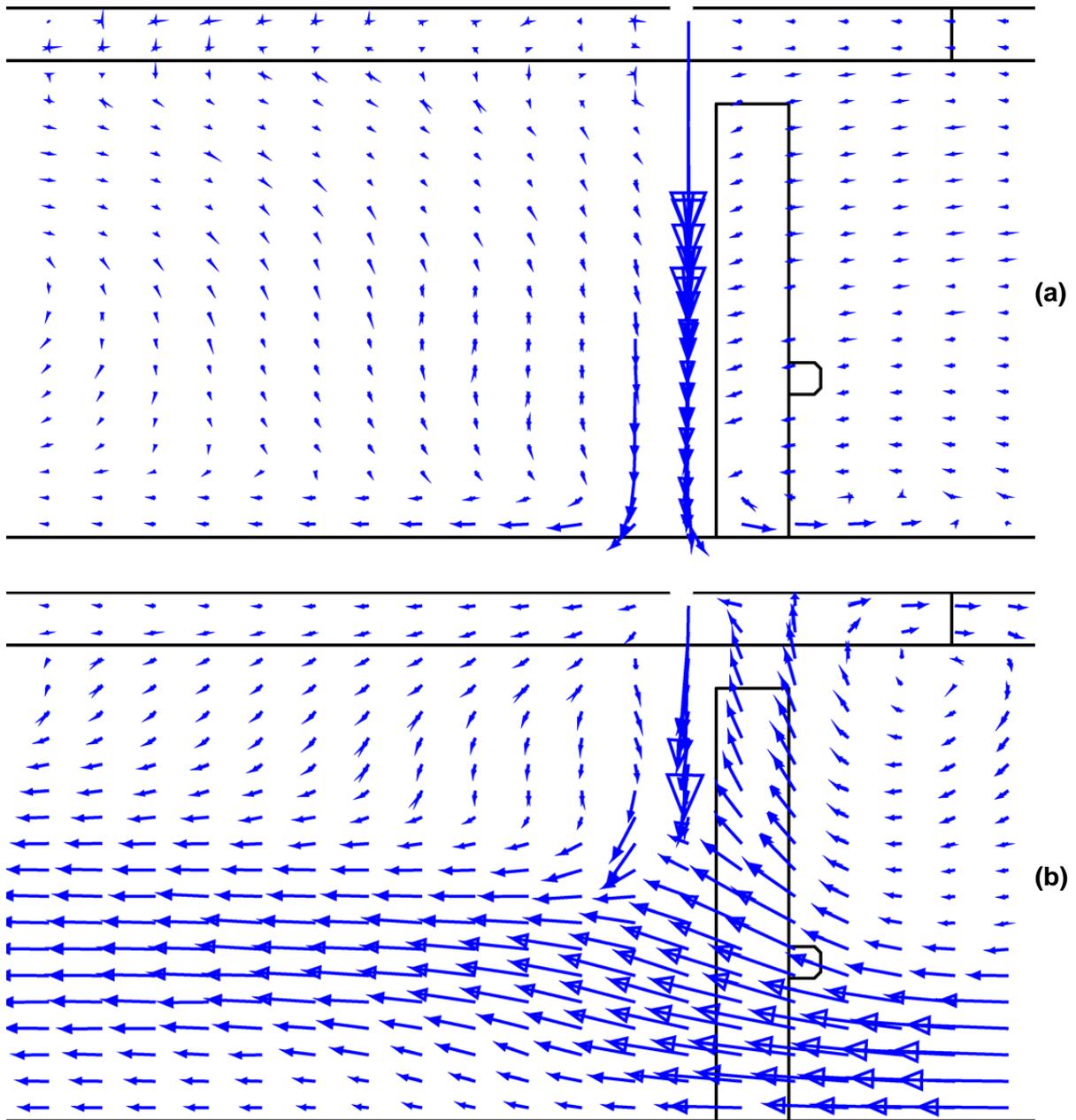


Figure 31 : Projection parallèlement à l'axe Y des vitesses d'air dans le plan vertical longitudinal médian. (a) : simulation D (sans ventilation locale), (b) : simulation E (aspiration), (c) : simulation F (soufflage)



**Figure 32 : Projection parallèlement à l'axe Y des vitesses d'air dans le plan vertical longitudinal médian. Zoom au voisinage de la sortie d'échappement.
(a) : simulation D (sans ventilation locale), (b) : simulation L (avec ventilateur axial)**

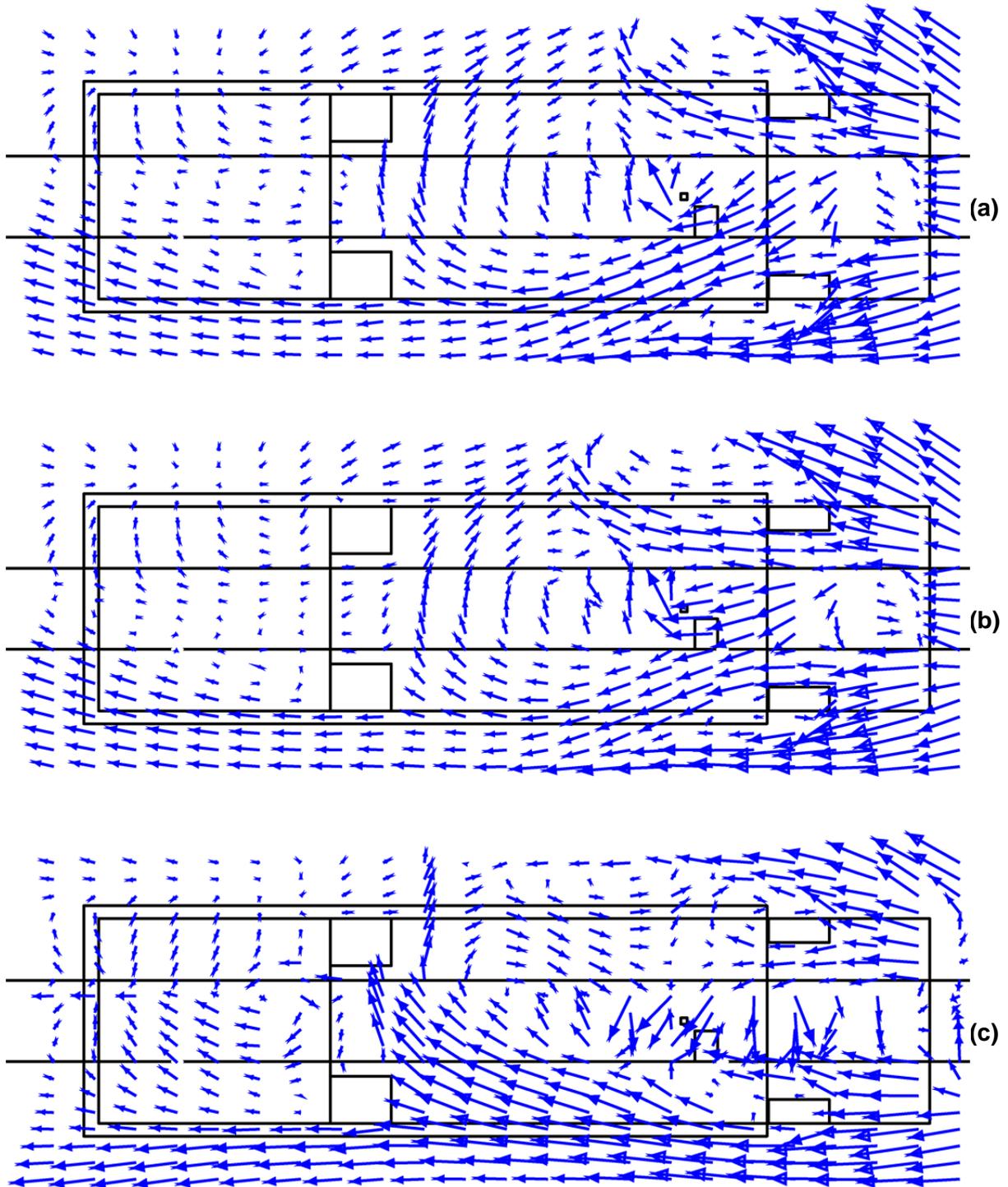
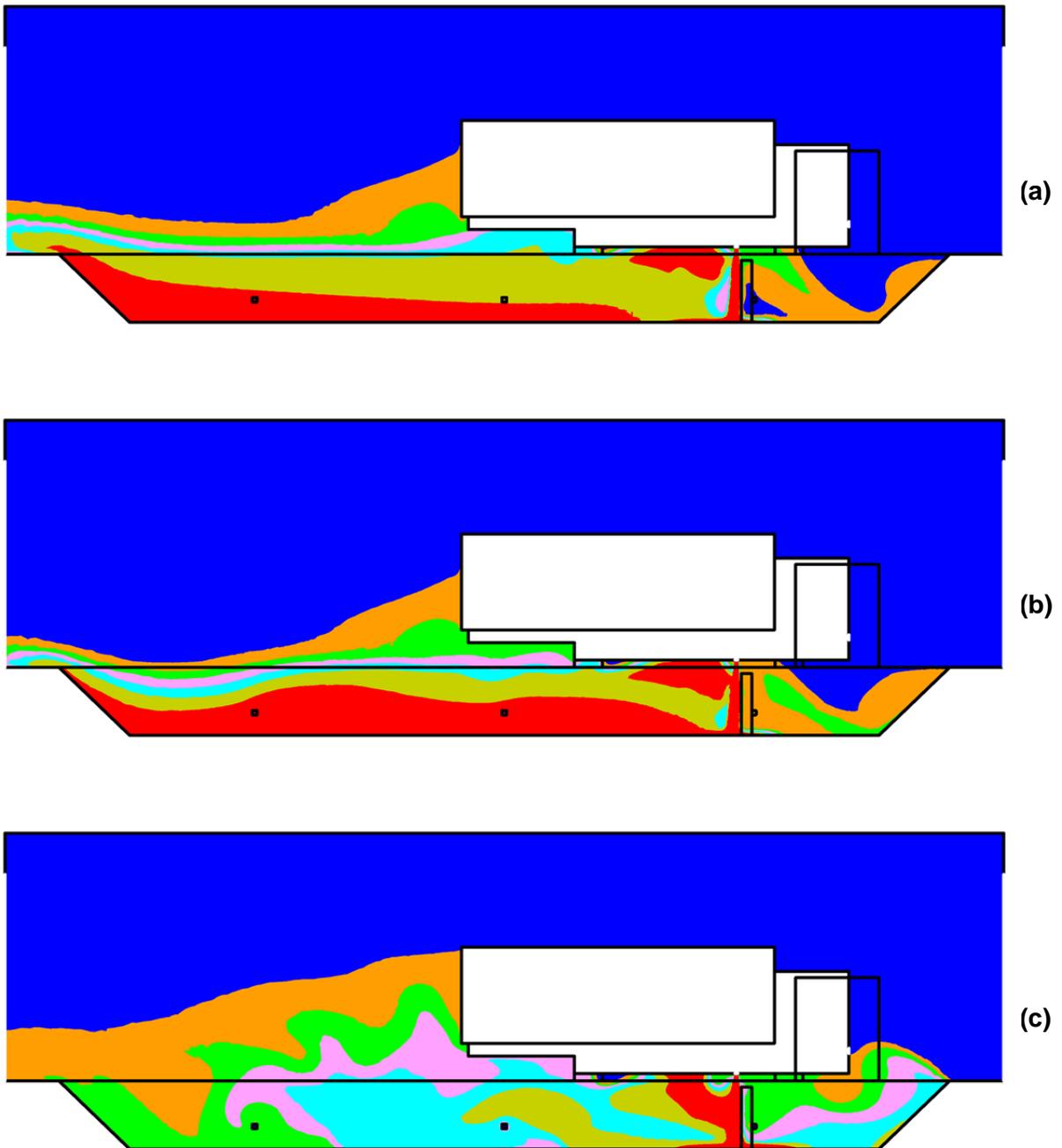


Figure 33 : Projection parallèlement à l'axe Z des vitesses d'air dans le plan horizontal à mi-garde au sol du porteur. Zoom au voisinage du véhicule. (a) : simulation D (sans ventilation locale), (b) : simulation E (aspiration), (c) : simulation F (soufflage)



**Figure 34 : Concentration en polluant dans le plan vertical longitudinal médian.
(a) : simulation D (sans ventilation locale), (b) : simulation E (aspiration),
(c) : simulation F (soufflage)**

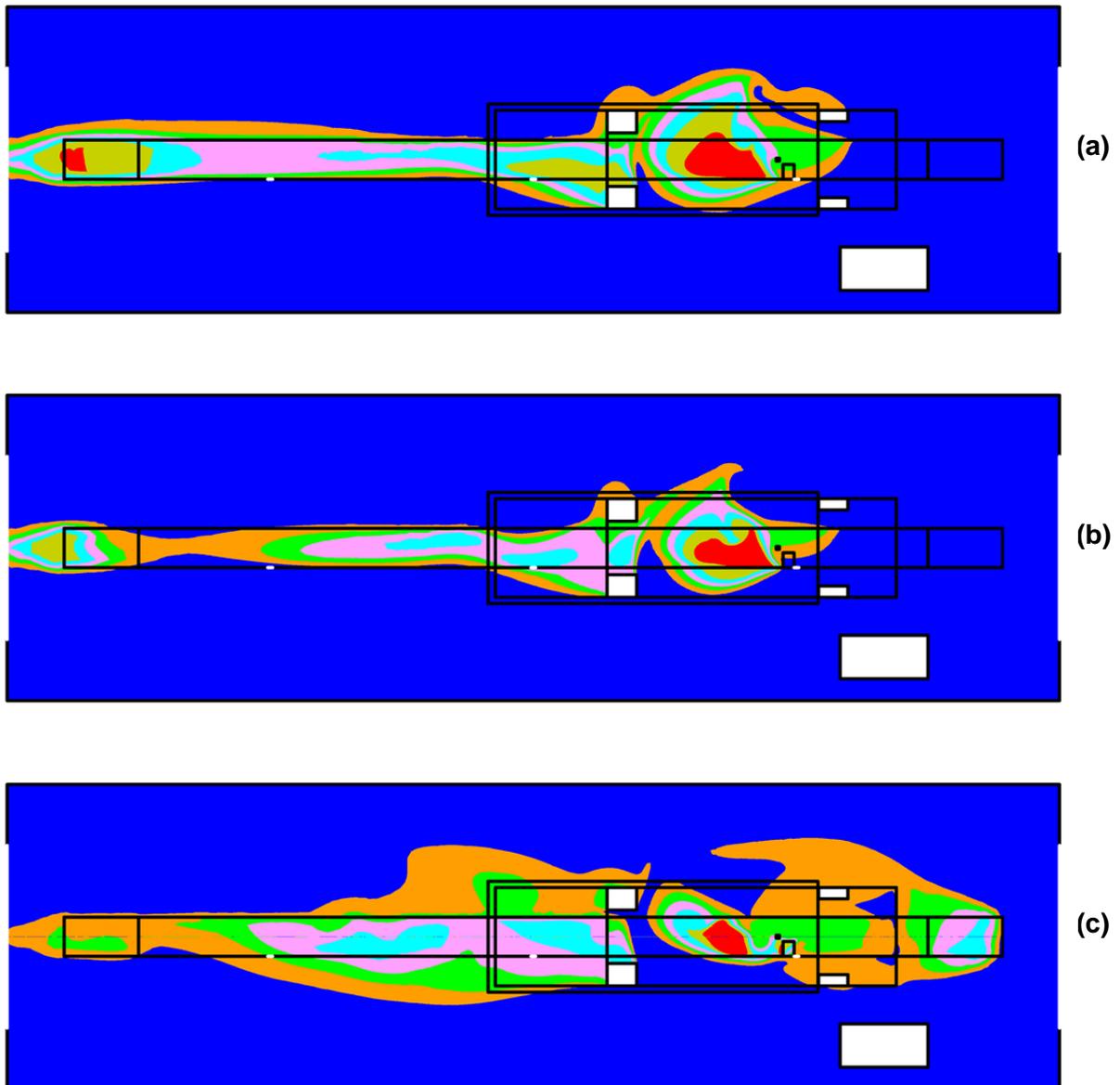


Figure 35 : Concentration en polluant dans le plan horizontal à mi-garde au sol du porteur.
(a) : simulation D (sans ventilation locale), (b) : simulation E (aspiration),
(c) : simulation F (soufflage)

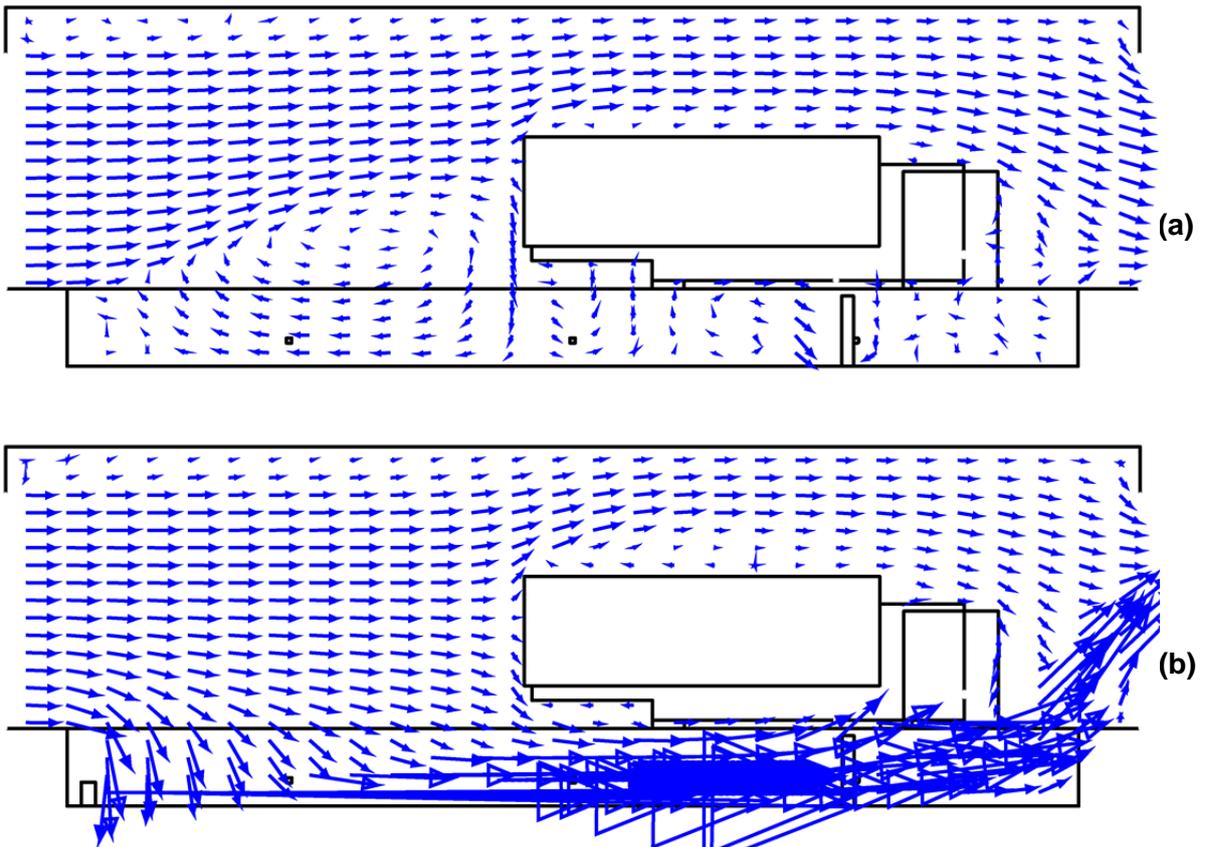


Figure 36 : Projection parallèlement à l'axe Y des vitesses d'air dans le plan vertical longitudinal médian. (a) : simulation N, (b) : simulation M (avec ventilateur axial)

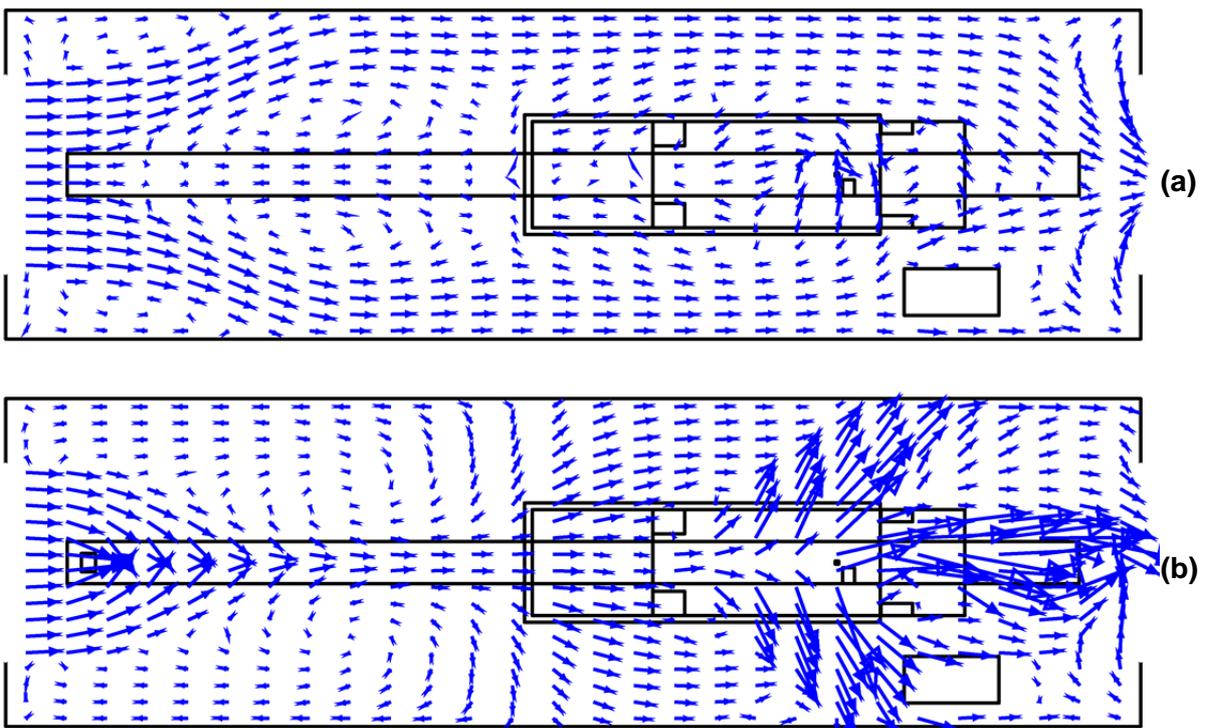


Figure 37 : Projection parallèlement à l'axe Z des vitesses d'air dans le plan horizontal à mi-garde au sol du porteur. (a) : simulation N, (b) : simulation M (avec ventilateur axial)

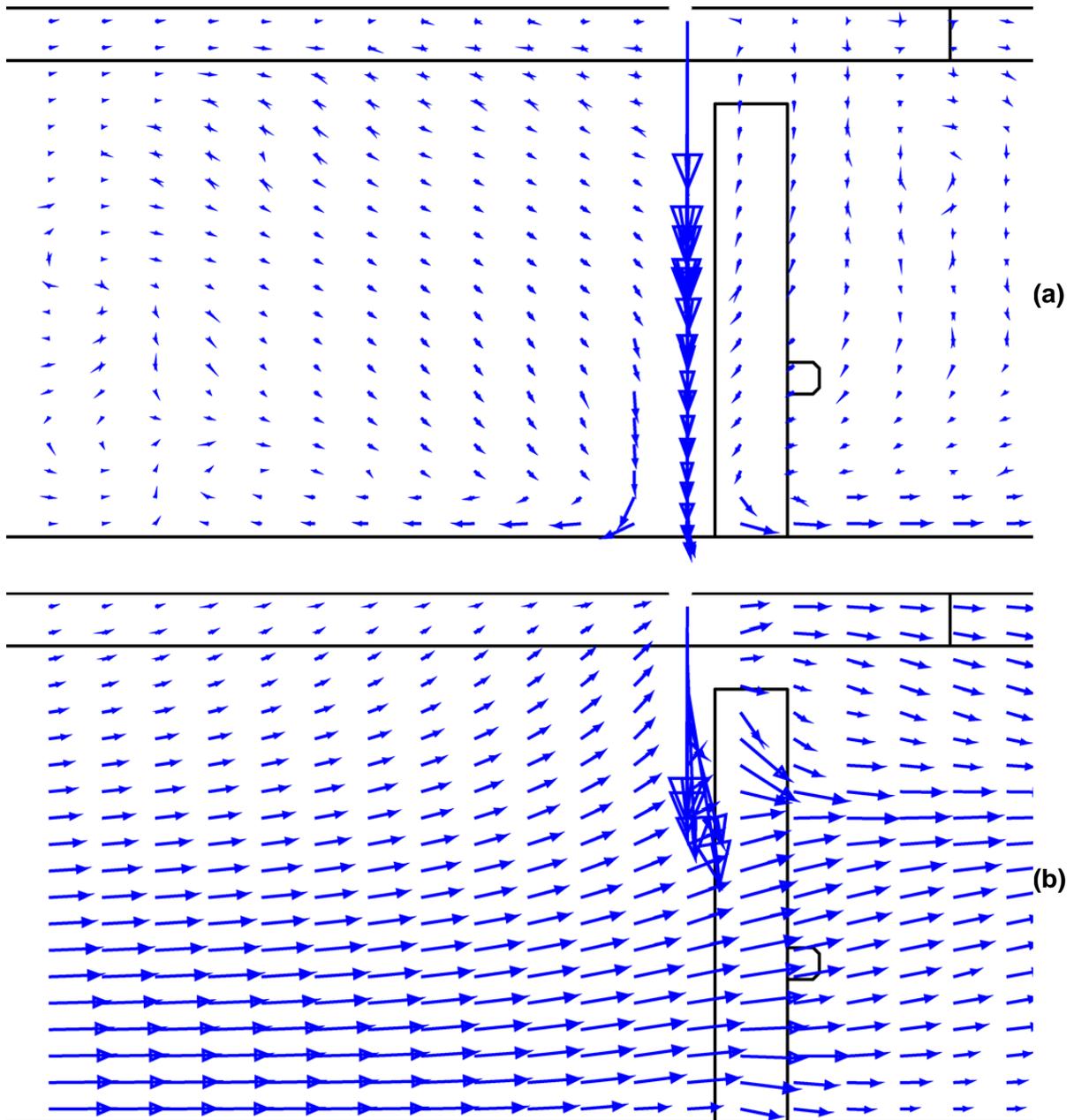


Figure 38 : Projection parallèlement à l'axe Y des vitesses d'air dans le plan vertical longitudinal médian. Zoom au voisinage de la sortie d'échappement.
(a) : simulation N (sans ventilation locale), (b) : simulation M (avec ventilateur axial)

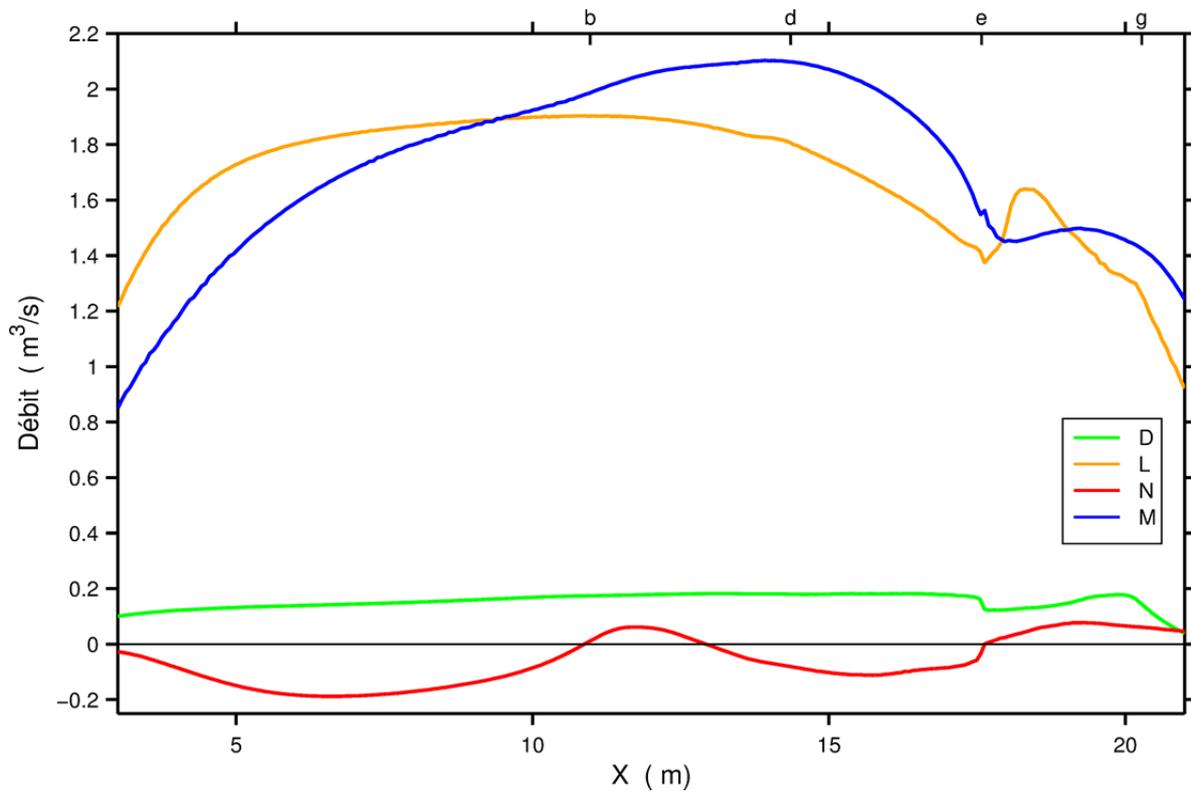


Figure 39 : Profils longitudinaux du débit de balayage de la fosse en présence du camion porteur. Simulations D et N (sans ventilation locale) et L et M (avec ventilateur axial)

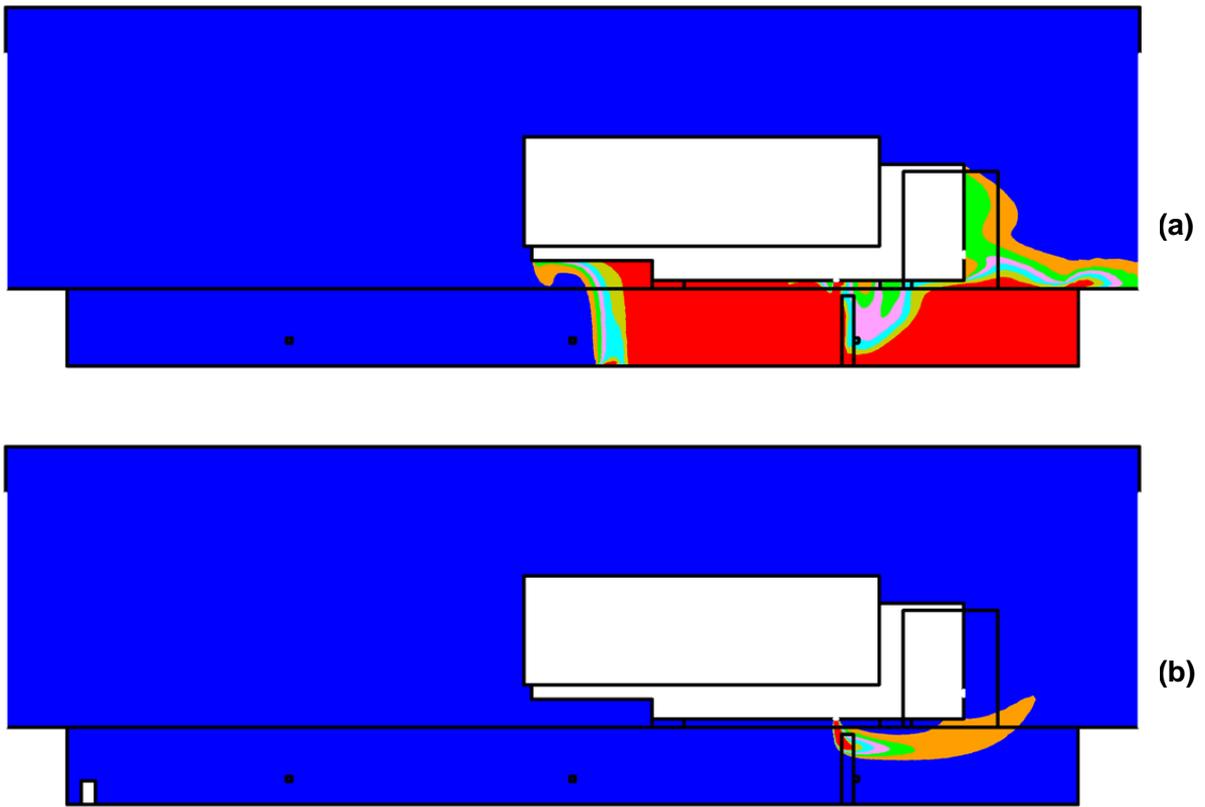


Figure 40 : Concentration en polluant dans le plan vertical longitudinal médian.
(a) : simulation N (sans ventilation locale), (b) : simulation M (avec ventilateur axial)

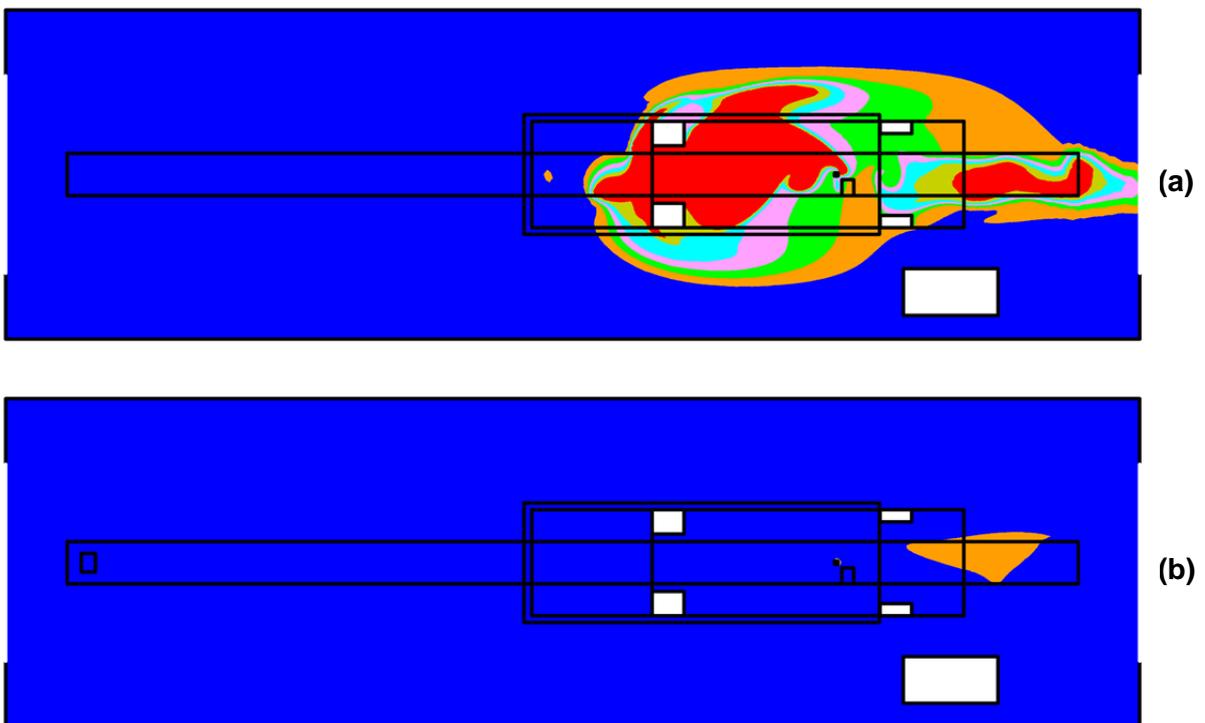


Figure 41 : Concentration en polluant dans le plan horizontal à mi-garde au sol du porteur.
(a) : simulation N (sans ventilation locale), (b) : simulation M (avec ventilateur axial)

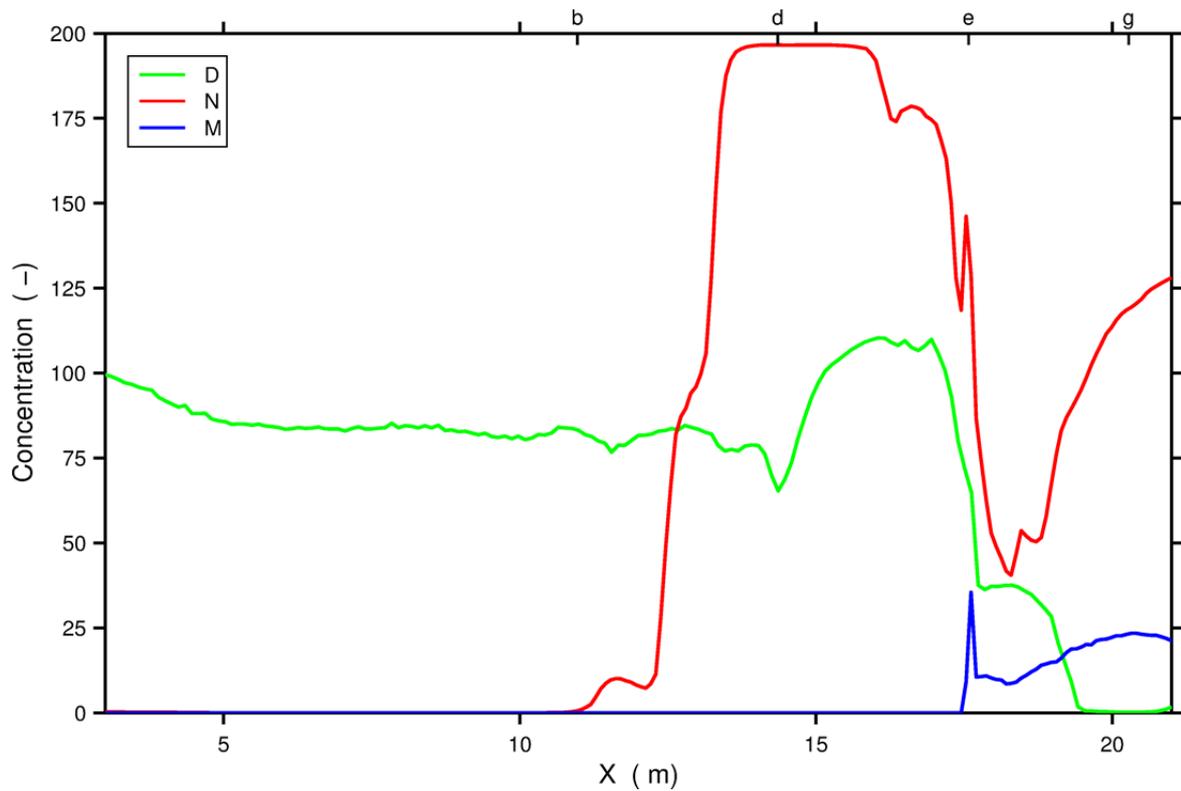


Figure 42 : Profils longitudinaux de concentration en polluant à hauteur des voies respiratoires en présence du camion porteur. Simulations D et N (sans ventilation locale) et M (avec ventilateur axial)

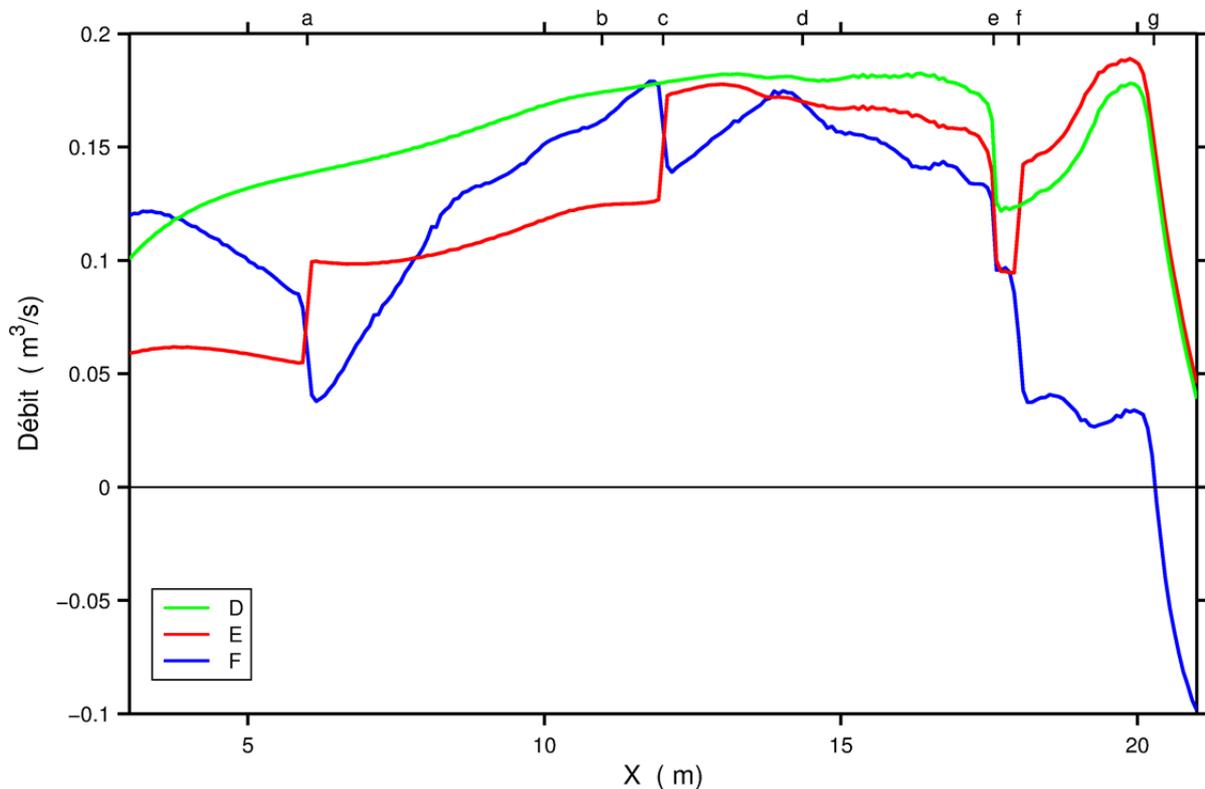


Figure 43 : Profils longitudinaux du débit de balayage de la fosse en présence du camion porteur. Simulations D (sans ventilation locale), E (aspiration) et F (soufflage)

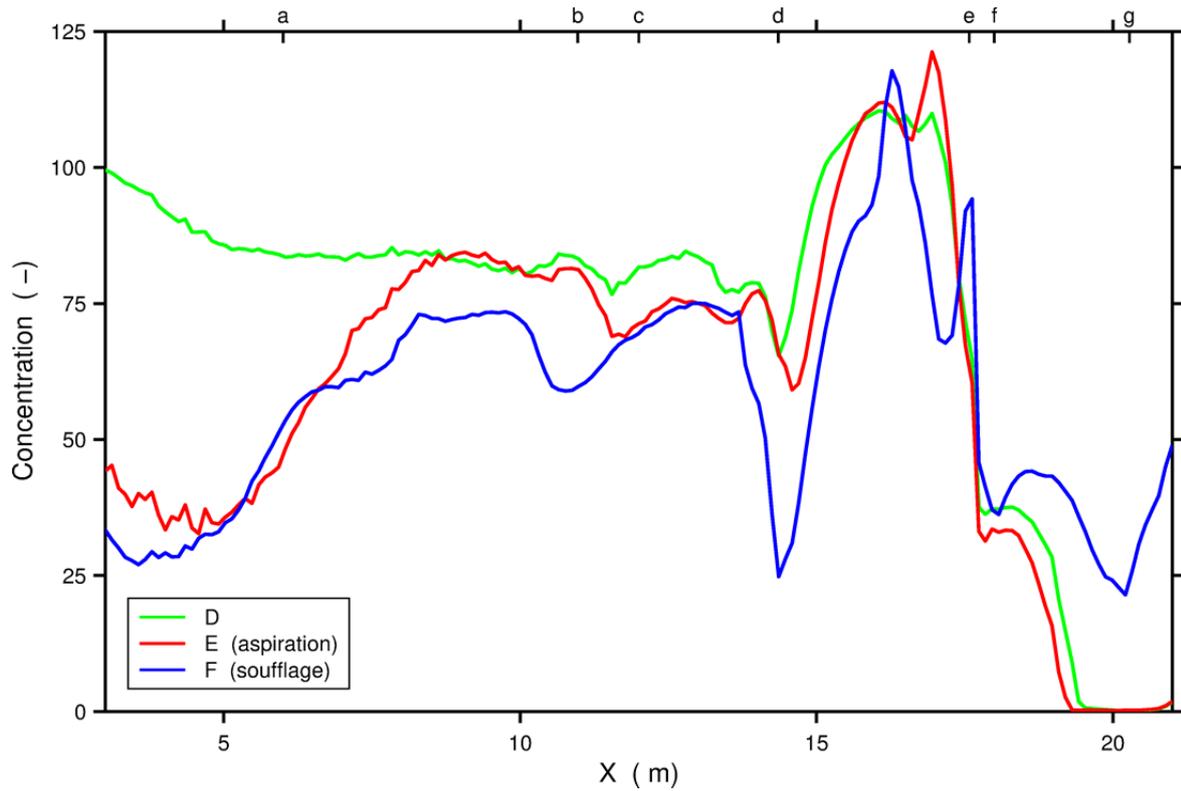


Figure 44 : Profils longitudinaux de concentration en polluant à hauteur des voies respiratoires dans la fosse en présence du camion porteur. Simulations D (sans ventilation locale), E (aspiration) et F (soufflage)

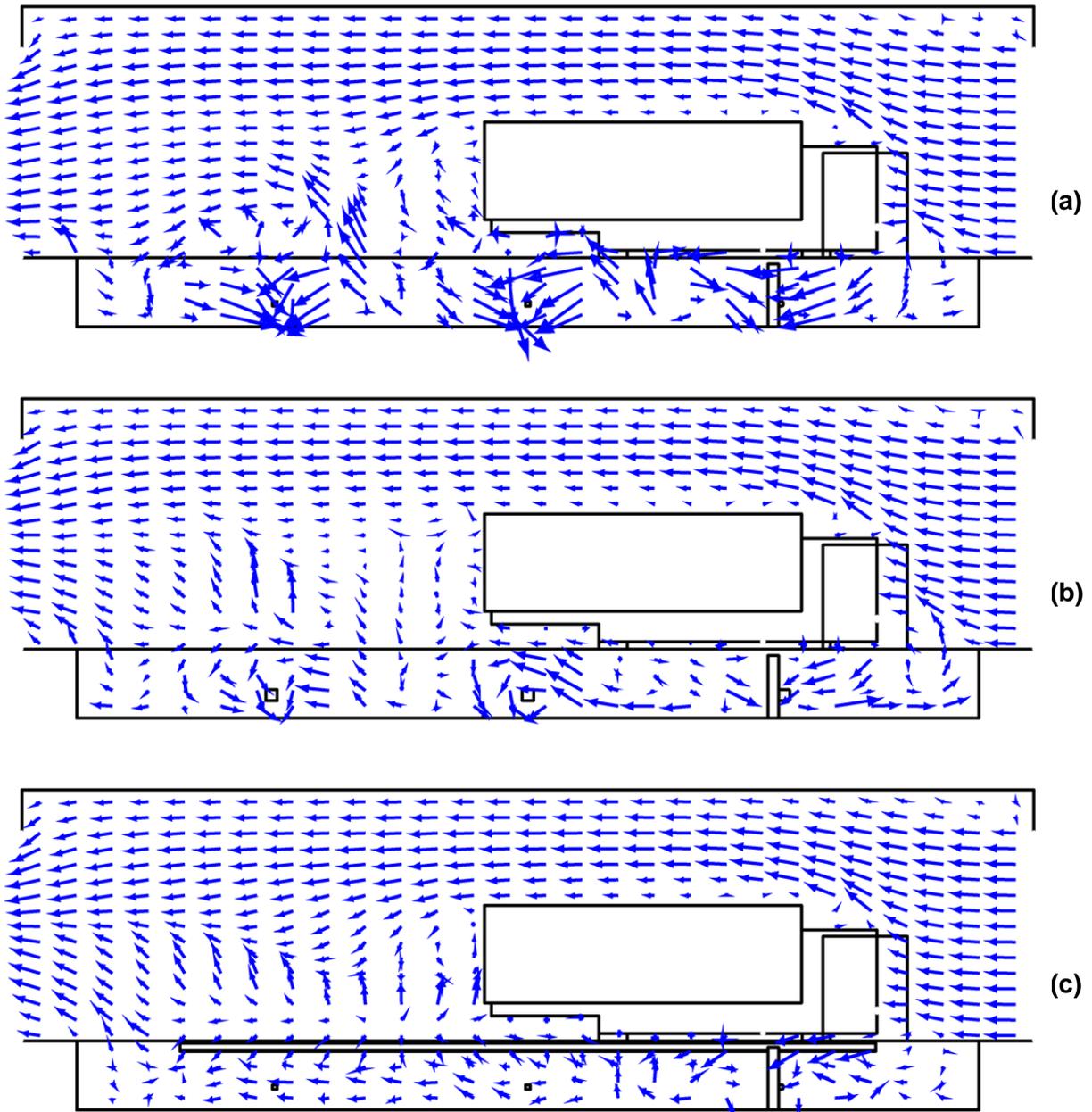


Figure 45 : Projection parallèlement à l'axe Y des vitesses d'air dans le plan vertical longitudinal médian. (a) : simulation I (orifices \varnothing 125 mm), (b) : simulation J (orifices \varnothing 300 mm), (c) : simulation K (lèvre longitudinale)

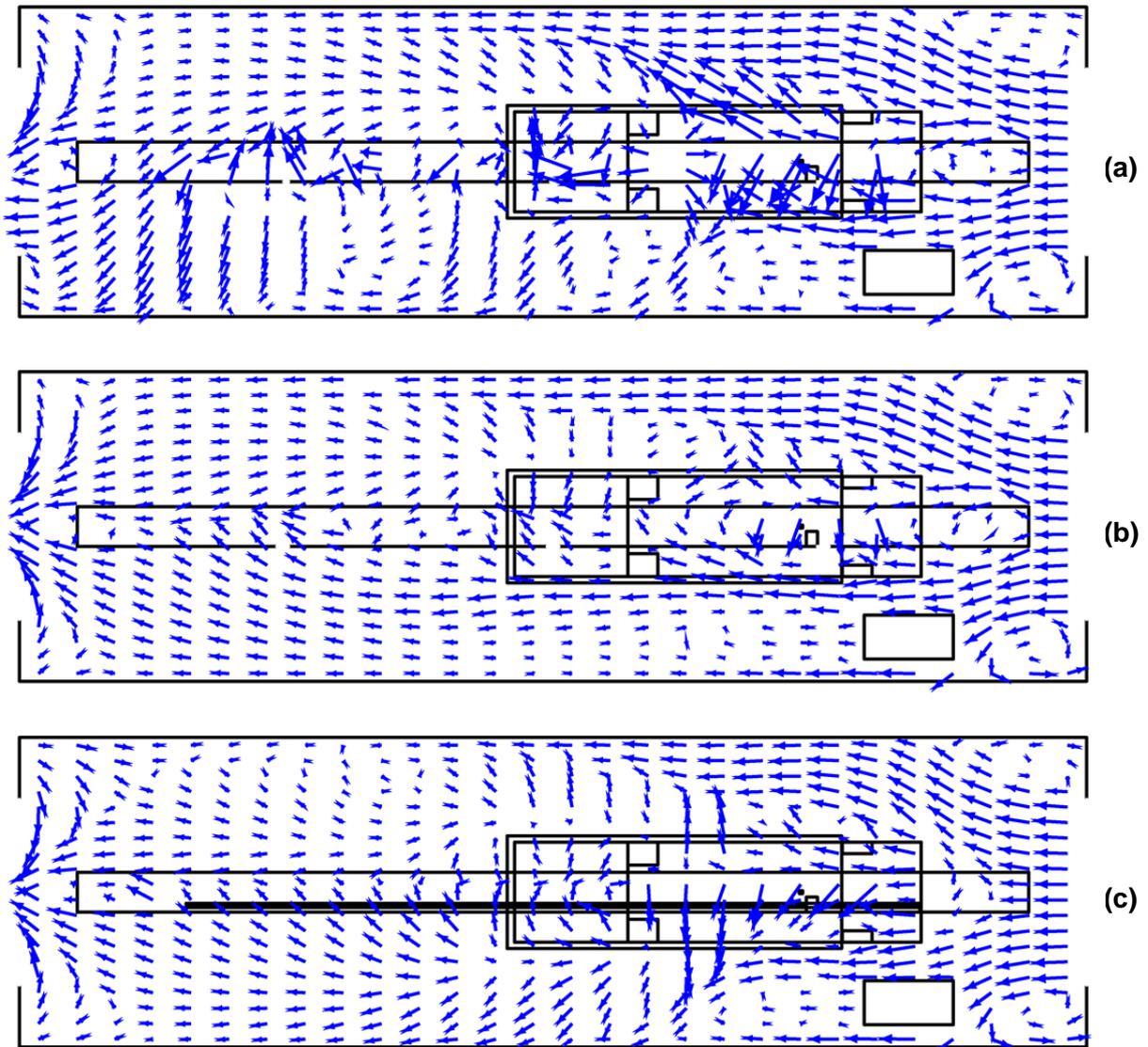


Figure 46 : Projection parallèlement à l'axe Z des vitesses d'air dans le plan horizontal à mi-garde au sol du porteur. (a) : simulation I (orifices \varnothing 125 mm), (b) : simulation J (orifices \varnothing 300 mm, (c) : simulation K (lèvre longitudinale)

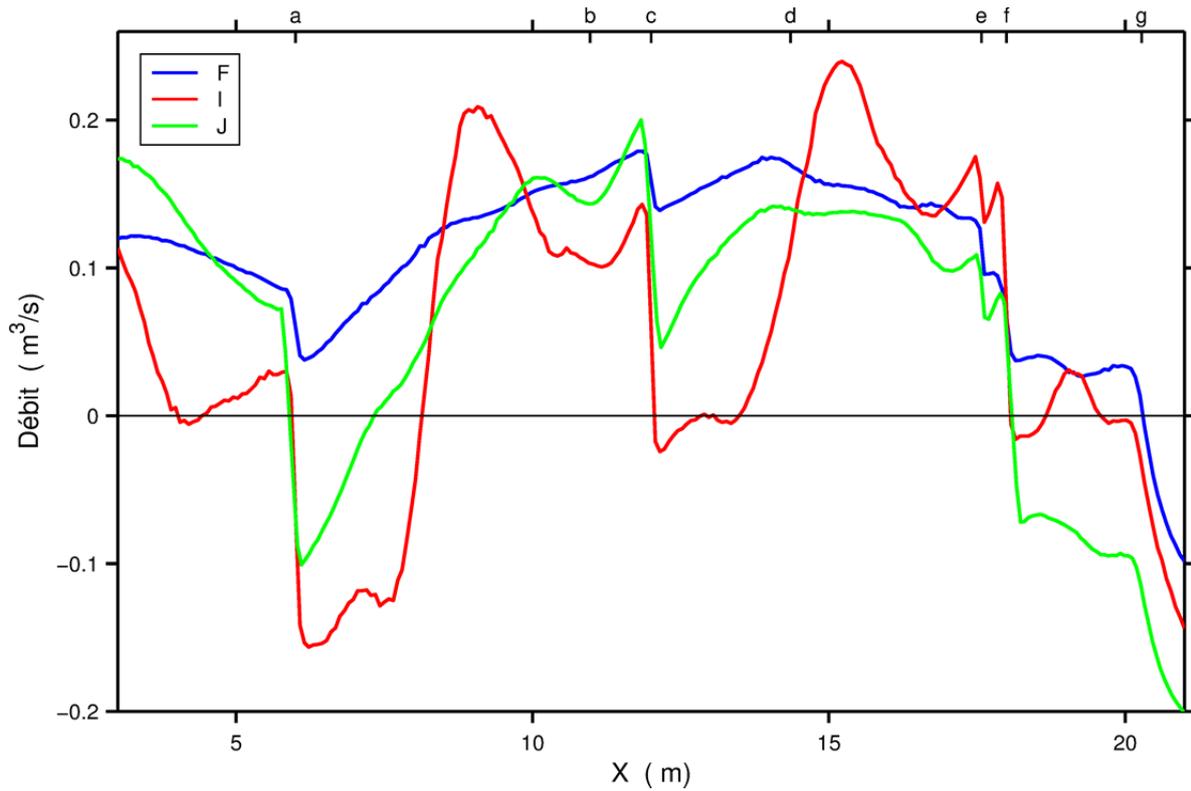


Figure 47 : Profils longitudinaux du débit de balayage de la fosse en présence du camion porteur. Soufflage d'air par trois orifices en paroi de fosse. Simulations F (débit 500 m³/h), I (débit 2000 m³/h, orifices Ø 125 mm) et J (débit 2000 m³/h, orifices Ø 300 mm)

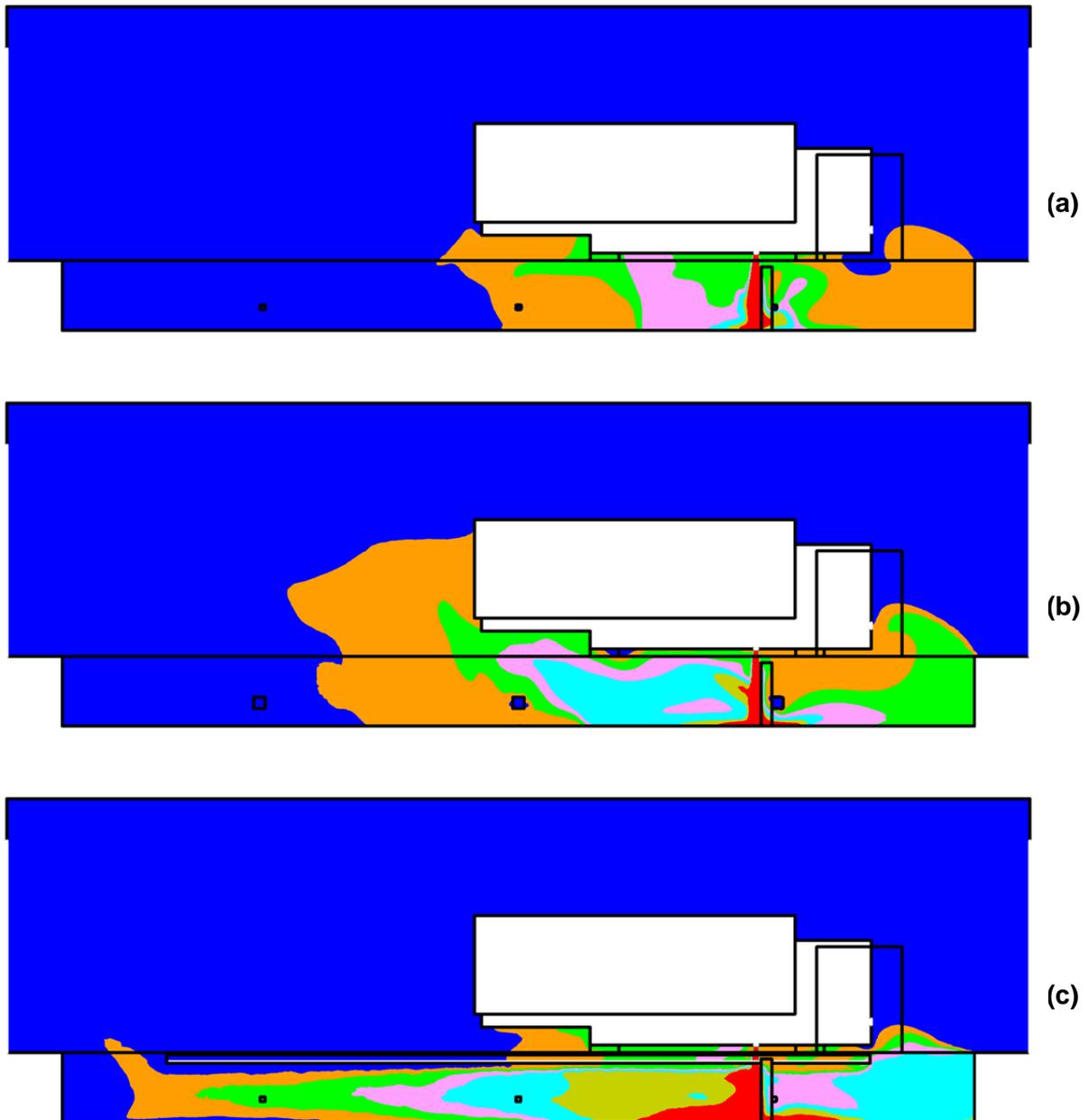


Figure 48 : Concentration en polluant dans le plan vertical longitudinal médian.
(a) : simulation I (orifices \varnothing 125 mm), (b) : simulation J (orifices \varnothing 300 mm),
(c) : simulation K (lèvre longitudinale)

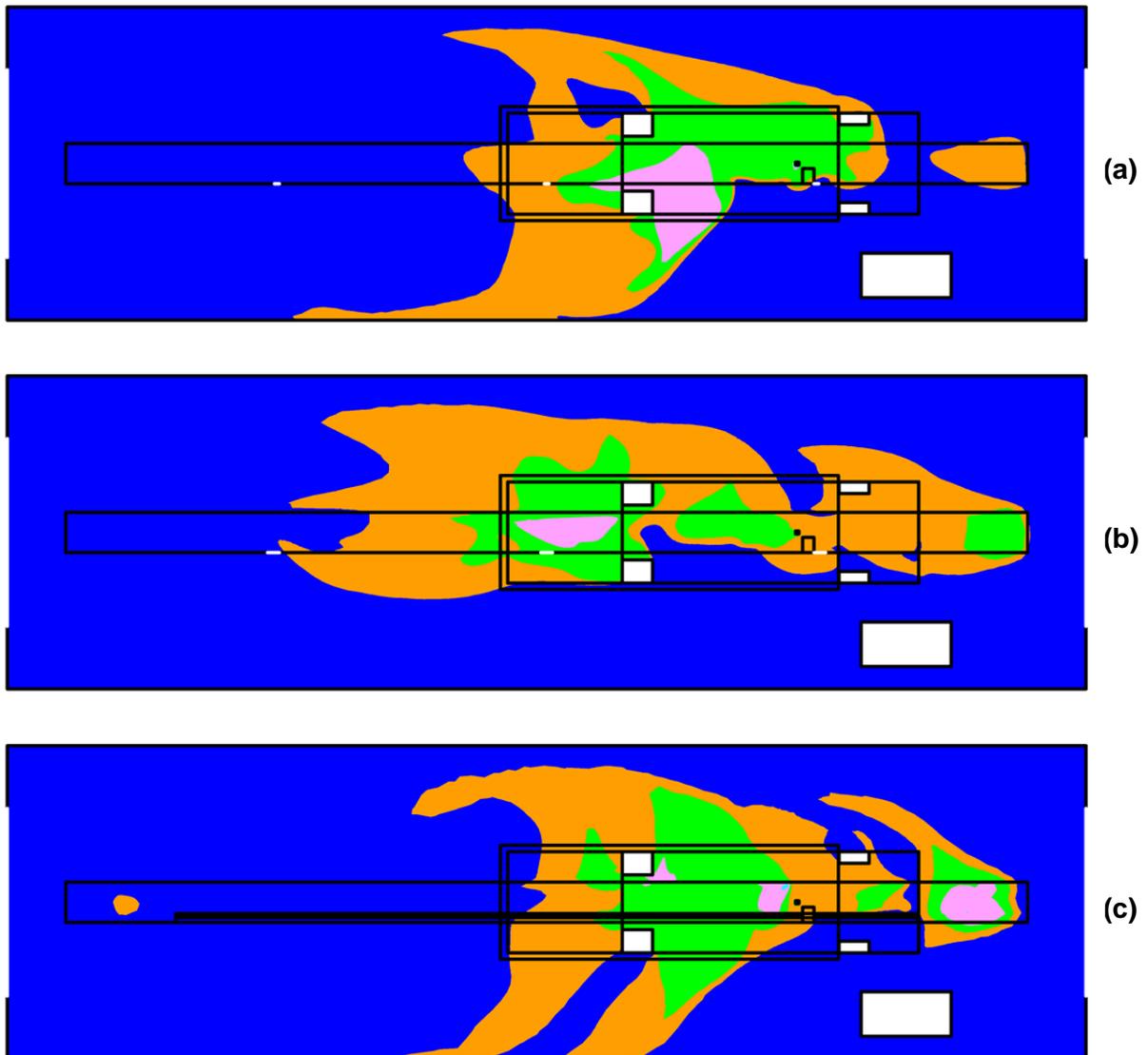


Figure 49 : Concentration en polluant dans le plan horizontal à mi-garde au sol du porteur.
(a) : simulation I (orifices \varnothing 125 mm), (b) : simulation J (orifices \varnothing 300 mm),
(c) : simulation K (lèvre longitudinale)

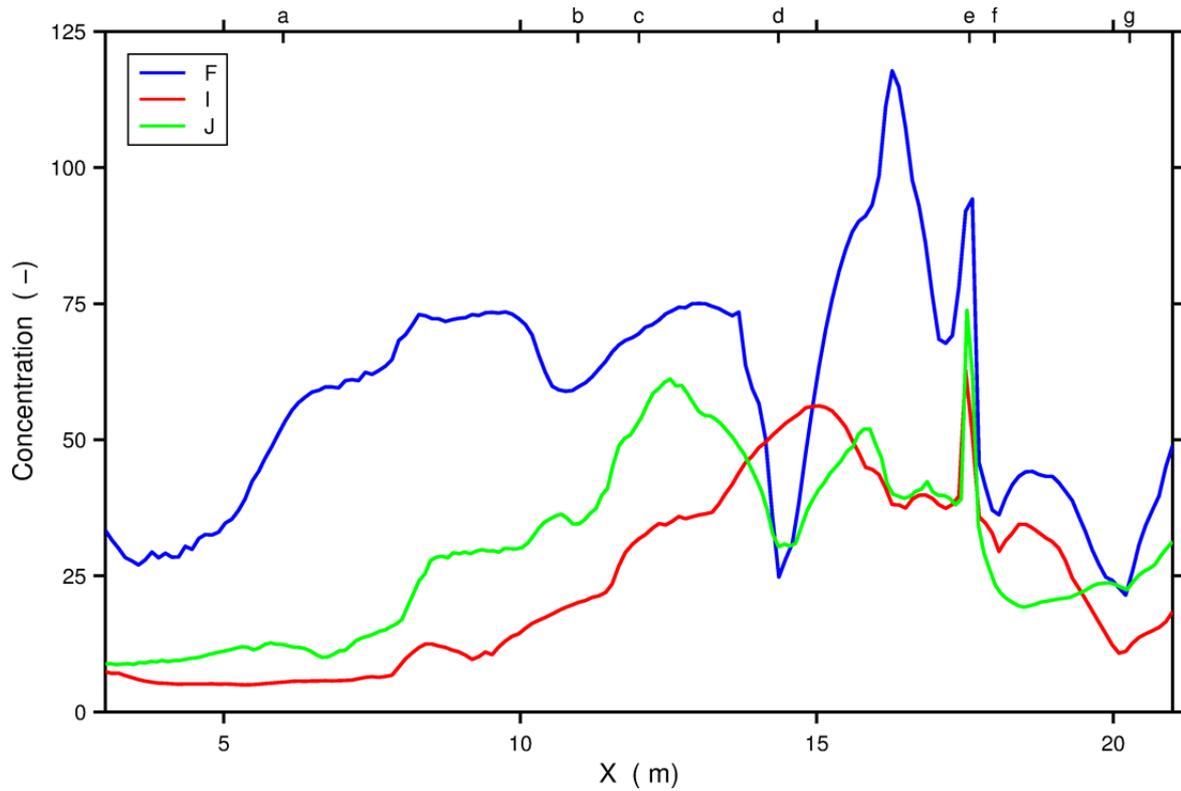


Figure 50 : Profils longitudinaux de concentration en polluant à hauteur des voies respiratoires, en présence du camion porteur. Soufflage d'air par trois orifices en paroi de fosse. Simulations F (débit $500 \text{ m}^3/\text{h}$), I (débit $2000 \text{ m}^3/\text{h}$, orifices $\varnothing 125 \text{ mm}$) et J (débit $2000 \text{ m}^3/\text{h}$, orifices $\varnothing 300 \text{ mm}$)

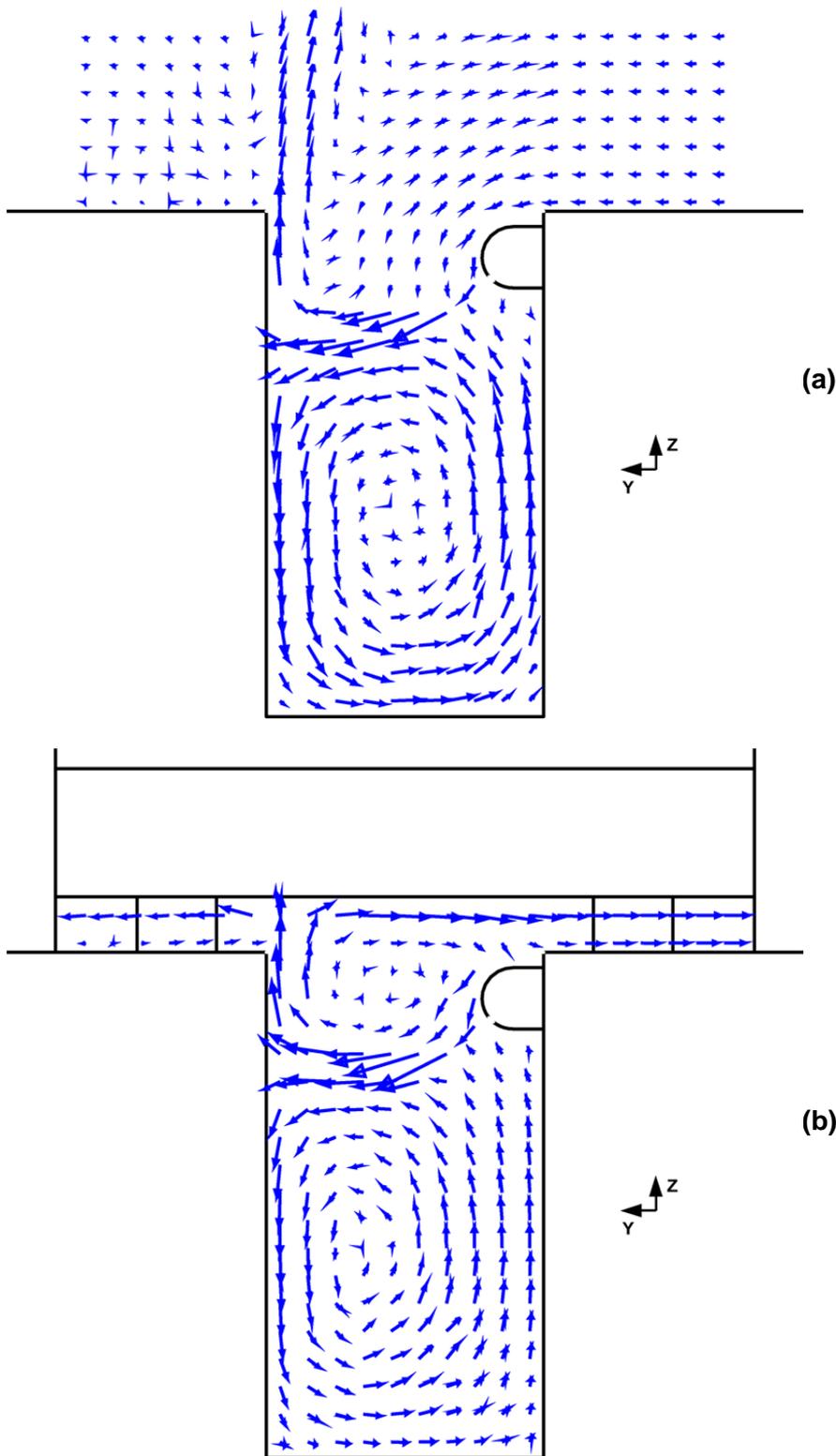


Figure 51 : Projection parallèlement à l'axe X des vitesses d'air dans deux plans transversaux. Simulation K (soufflage par une lèvres longitudinale). (a) : plan X = 7.36 m, (b) : plan X = 15 m

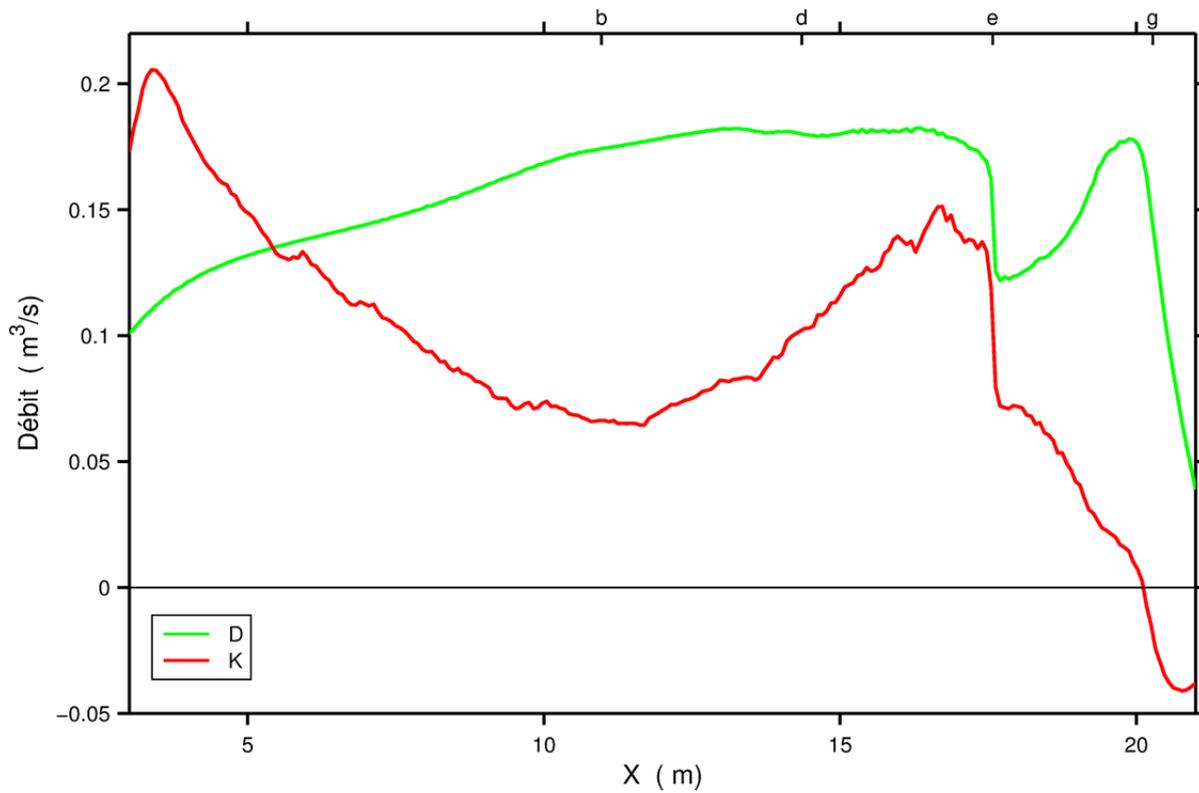


Figure 52 : Profils longitudinaux du débit de balayage de la fosse en présence du camion porteur. Simulations D (sans ventilation locale) et K (soufflage par une lèvre longitudinale)

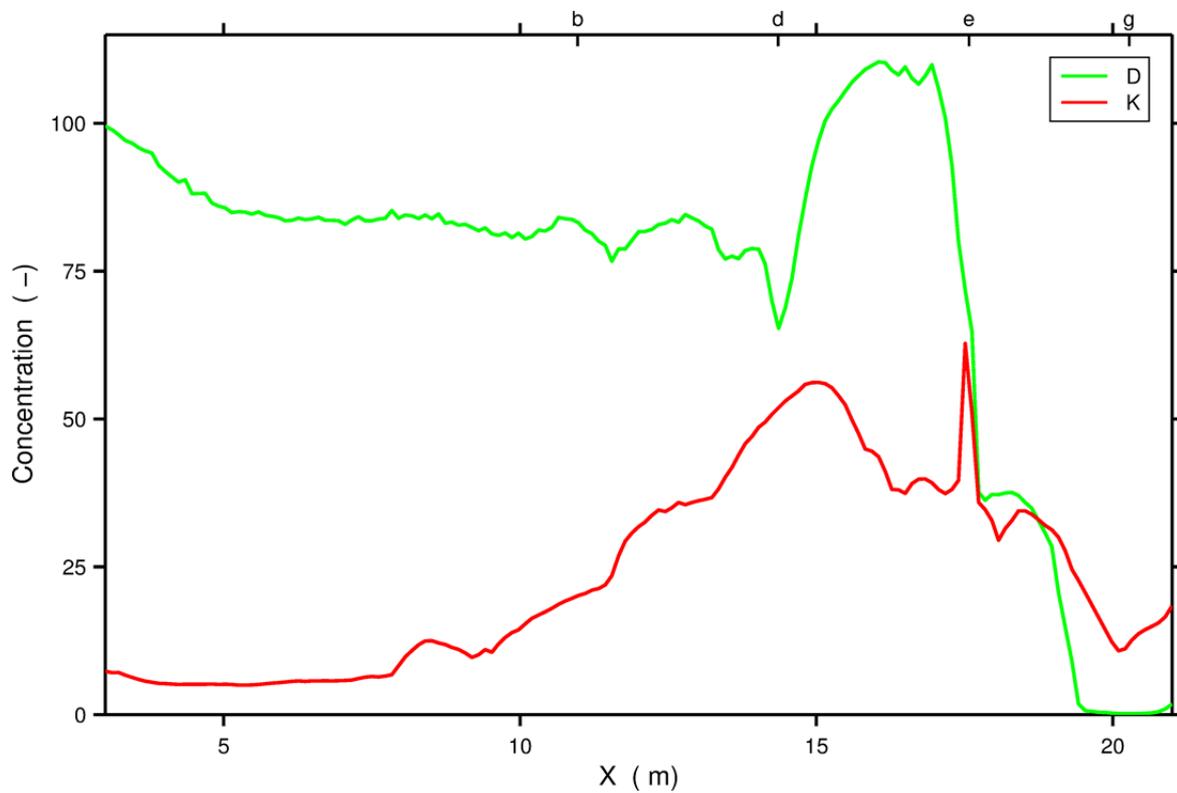


Figure 53 : Profils longitudinaux de concentration en polluant à hauteur des voies respiratoires en présence du camion porteur. Simulations D (sans ventilation locale) et K (soufflage par une lèvre longitudinale)

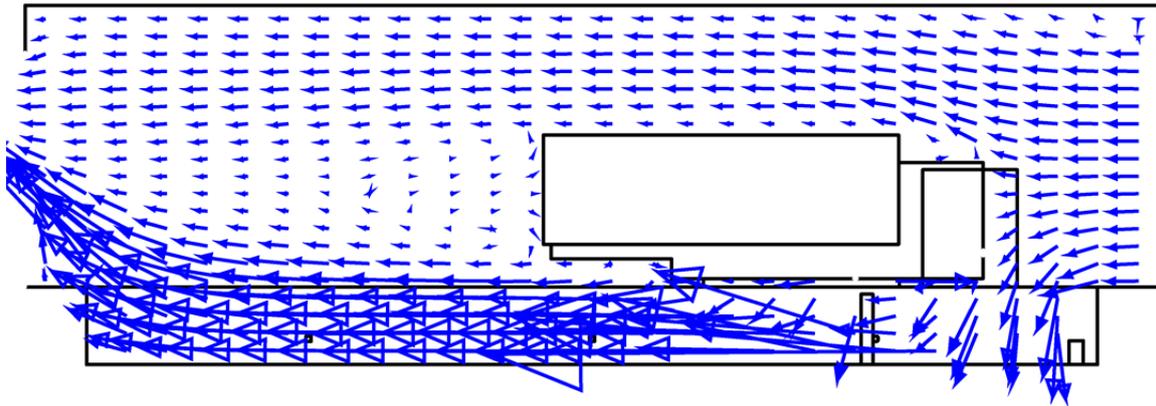


Figure 54 : Projection parallèlement à l'axe Y des vitesses d'air dans le plan vertical longitudinal médian. Simulation L (avec ventilateur axial)

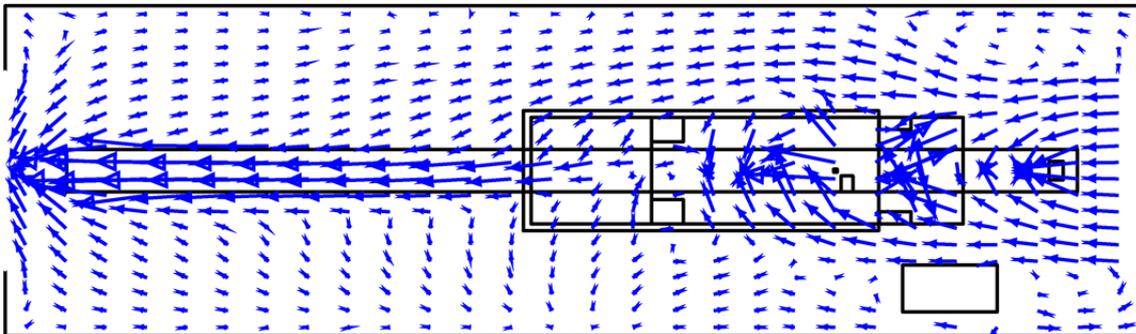


Figure 55 : Projection parallèlement à l'axe Z des vitesses d'air dans le plan horizontal à mi-garde au sol du porteur. Simulation L (avec ventilateur axial)

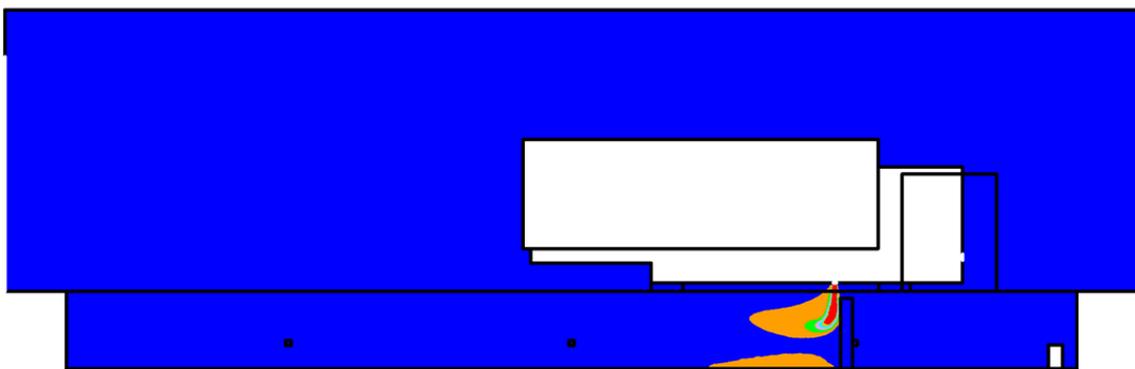


Figure 56 : Concentration en polluant dans le plan vertical longitudinal médian. Simulation L (avec ventilateur axial)

