

Caractérisation expérimentale de la dispersion d'un pseudo-polluant d'usinage

F. TAFNOUT^{a,b}, E. BELUT^a, B. OESTERLÉ^b, J.R. FONTAINE^a

a. Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS), B.P.27, 54501 VANDOEUVRE-LES-NANCY

b. LEMTA, Université de Lorraine-UHP, CNRS, ESSTIN, 54519 VANDOEUVRE-LES-NANCY

Résumé :

Dans le cadre du développement d'une méthode numérique de conception des dispositifs de captage de polluants sur machines d'usinage, un banc d'essai recréant une situation similaire à une opération de meulage, mais dans un environnement parfaitement contrôlé, est utilisé. Le jet de polluant particulaire obtenu est caractérisé par vélocimétrie par suivi de particules (PTV pour Particle Tracking Velocimetry) afin d'obtenir des données d'entrée et de validation pour les simulations numériques. La dispersion d'un gaz traceur (hexafluorure de soufre - SF₆) émis simultanément avec le jet de particules est ensuite étudiée expérimentalement : la dispersion d'un tel gaz est en effet jugée représentative de celle des plus fines particules d'usinage dont le temps de réponse aérodynamique est négligeable. Dans cet article, nous décrivons le banc d'essai réalisé ainsi que les résultats expérimentaux obtenus.

Abstract :

As a part of the development of a numerical method of close capture exhausts systems for machining devices, a test rig recreating a situation similar to a grinding operation, but in a perfectly controlled environment, is used. The properties of the obtained spray of solid particles are characterized using particle tracking velocimetry (PTV), in order to obtain input and validation parameters for numerical simulations. The dispersion of a tracer gas (SF₆) emitted simultaneously with the jet of particles is then studied experimentally, as the dispersion of such a gas is considered as representative of that of finer particles, which aerodynamic response time is negligible. This article describes the test rig and the experimental results.

Mots clefs : captage, polluant, PTV, traçage gazeux

1 Introduction

Les machines portatives, largement utilisées dans les entreprises artisanales, sont parmi les plus polluantes en matière de poussière. Les opérateurs sont donc fortement exposés à de grandes quantités de poussières, souvent avec un dépassement des seuils de concentration admissibles. L'inhalation répétée des poussières peut être à l'origine de pathologies plus ou moins graves, notamment l'irritation des muqueuses, allergies, fibrose pulmonaire voire même cancer des cavités nasales et sinusiennes dans le cadre des poussières de bois. Le captage des polluants à la source est l'un des moyens privilégiés de prévention de l'exposition. C'est pourquoi l'Institut National de Recherche et de Sécurité (INRS) cherche à développer une méthode de conception optimale des captages basée sur la simulation numérique des écoulements.

A des fins de validation des modèles, un dispositif expérimental recréant une pseudo-opération de meulage, mais dans un environnement parfaitement contrôlé, a été réalisé. Un écoulement diphasique en veine d'essai est ainsi obtenu par l'interaction d'un jet de microbilles de verres sphériques avec l'écoulement de l'air entraîné par la rotation d'un cylindre. Le jet de particules recréant les effets aérauliques d'un polluant réel est produit par un système d'injection continu de microbilles de verres, utilisant une vis sans fin qui pousse les microbilles dans une buse jusqu'au cylindre qui les évacue par frottement.

Afin de constituer un cas de référence pour la mise au point des simulations numériques, les premiers travaux expérimentaux concernent la caractérisation des conditions aux limites du banc d'essai, conditions qui seront utilisées dans les calculs numériques. La première phase de la campagne expérimentale a consisté à caractériser le jet de particules créé par le banc d'essai par vélocimétrie par suivi de particules (PTV pour *Particle Tracking Velocimetry*). Cette technique permet d'obtenir les caractéristiques du jet,

essentiellement à proximité de sa source. Ensuite, afin d'évaluer expérimentalement la capacité des modèles numériques utilisés à rendre compte de la dispersion de la fraction la plus fine des particules d'usinage, dont le comportement se rapproche d'un traceur passif du fait de leur temps de réponse aérodynamique négligeable, un gaz traceur (hexafluorure de soufre SF₆) est injecté simultanément à la source du jet de microbilles de verre et son champ de concentration dans le banc d'essai est mesuré à l'aide d'un analyseur de gaz.

2 Présentation du banc d'essai

Le banc d'essai reproduit une situation d'usinage en laboratoire. L'objectif est de reconstituer un jet de particules calibrées, de débit contrôlé, engendré par la rotation d'un cylindre rugueux contre une buse alimentée en permanence en particules. Le gaz traceur, représentant le polluant passif, peut être émis au niveau de la source du jet via un capillaire. Le dispositif est placé dans une veine d'essai ventilée afin de permettre le traçage gazeux (figure 1).

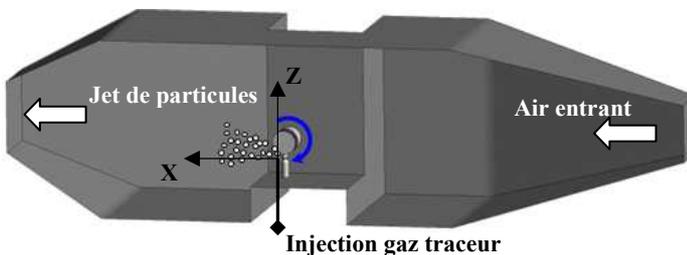


FIG.1- Aperçu du banc d'essai

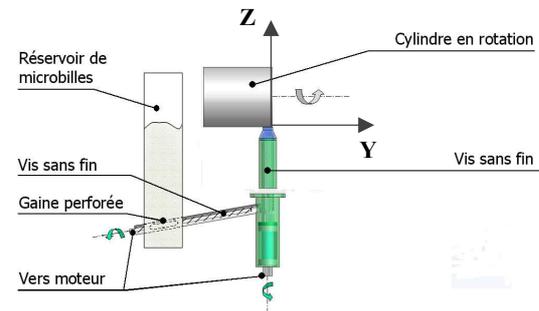


FIG.2- Système d'injection

Il est constitué d'un cylindre (diamètre 130.5 mm, longueur 150 mm) en rotation dans une veine d'essai ventilée. La vitesse de rotation du cylindre est pilotée par un variateur de fréquence et régulièrement contrôlée au tachymètre. Le système d'injection de particules (recréant les effets aérauliques d'un polluant réel), schématisé figure 2 est constitué de deux vis sans fin : la première entraîne les microbilles depuis le réservoir jusqu'à la base de la deuxième vis, qui pousse les microbilles dans une buse jusqu'au cylindre qui les évacue par frottement. Les particules utilisées sont des microbilles de verre, de densité 2500 kg m^{-3} . Leur distribution granulométrique a été caractérisée au granulomètre Malvern Mastersizer, leur diamètre médian est ainsi égal à $148 \mu\text{m}$. Le débit d'émission est stable et préalablement étalonné. Dans le cadre de cette étude il a été fixé à $1 \text{ g s}^{-1} \pm 6\%$, et deux vitesses de rotation du cylindre ont été utilisées : 500 tr min^{-1} et 1000 tr min^{-1} .

3 Mesure des vitesses des particules par PTV

3.1 Outils métrologiques

Pour les mesures de PTV, un laser Nd : Yag doublé à deux cavités est utilisé (émettant des impulsions de longueur d'onde 532 nm, de 120 mJ d'énergie), ainsi qu'une caméra numérique CCD HiSense MkII (1344×1024 pixels quantifiés sur 12 bits). L'ensemble est monté sur un système de déplacement et piloté par un ordinateur à l'aide du logiciel DynamicStudio de Dantec.

3.2 Développement du programme de suivi de particules

Une méthode de mesure PTV a été développée afin de caractériser la phase particulaire. Le principe général, similaire à celui de la vélocimétrie par images de particules (PIV pour *Particle Image Velocimetry*), se décline de la manière suivante :

- éclairage d'une tranche de l'écoulement à l'aide d'un plan lumineux, généré à l'aide d'un laser pulsé : les particules apparaissent comme des taches lumineuses ;
- acquisition d'images successives du plan éclairé à l'aide d'une caméra CCD ;
- traitement des images: caractérisation de la vitesse des particules entre deux images successives.

Le principe n'est pas d'établir le mouvement moyen d'un ensemble de particules comme le fait la PIV, mais plutôt de déterminer le déplacement d'une même particule sur des images successives séparées par un laps de temps donné.

L'algorithme utilisé se décompose en quatre étapes principales :

- équilibrage du fond lumineux de l'image en lui soustrayant les variations locales de luminosité obtenues via l'image moyenne d'une série de clichés ;
- détection des particules sur les deux images du doublet ;
- appariement des particules en déterminant les partenaires des particules de la première image dans la deuxième ;
- calcul du déplacement des particules entre les deux images et validation. Cette étape utilise une interpolation subpixel [1] pour calculer le déplacement exact des particules.

Cet algorithme, qui s'inspire de la méthode proposée par Vignal [2], a fait l'objet d'une campagne de validation étendue afin d'évaluer ses performances et de déterminer les éventuelles erreurs de mesures. Cette évaluation a été réalisée par translation synthétique d'images de synthèse et d'images réelles. Il s'agit d'imposer une translation uniforme connue à une image donnée, l'image traduite est calculée par interpolation cubique, puis à appliquer le traitement PTV entre l'image originale et l'image traduite. De même, pour se rapprocher des conditions expérimentales, un test supplémentaire utilisant la translation expérimentale de l'image d'une plaque ensemençée de particules fixes a été réalisé. Ces différents essais permettent d'estimer une erreur de mesure inférieure à 3% sur les déplacements mesurés.

3.3 Caractérisation des propriétés du jet de particules

Le programme de PTV est utilisé pour mesurer les propriétés du jet à sa source pour les différents paramètres expérimentaux envisagés (vitesse de rotation du cylindre, débit massique du jet). Les figures 3, 4 et 5 représentent les vitesses moyennes des particules mesurées à 8 mm de la source ainsi que la concentration relative en particules dans une section de l'écoulement pour une vitesse de rotation du cylindre de 500 tr min^{-1} et un débit massique du jet de 1 g s^{-1} . La concentration relative en particules (relative par rapport à la valeur maximale) a été estimée par le calcul de la surface des particules détectées.

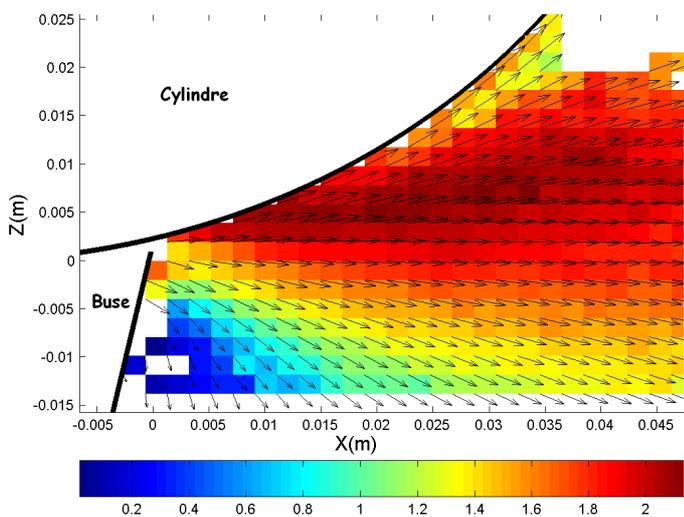


FIG. 4 – Plan axial : vitesse axiale moyenne des particules (m/s)

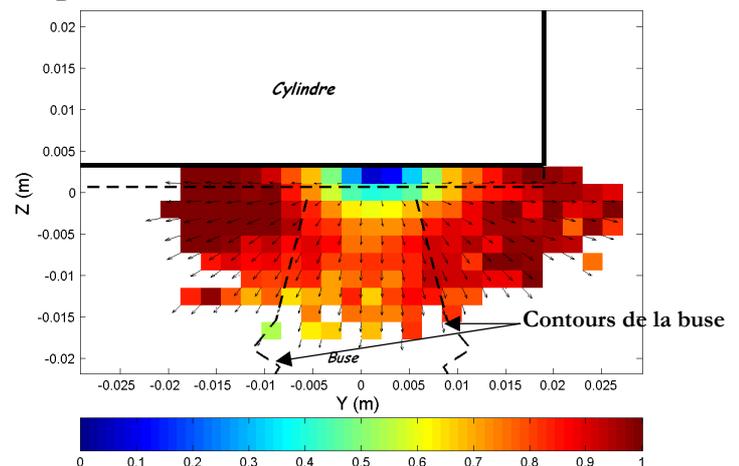


FIG. 3 – Section du jet : vitesse radiale moyenne des particules (m/s)

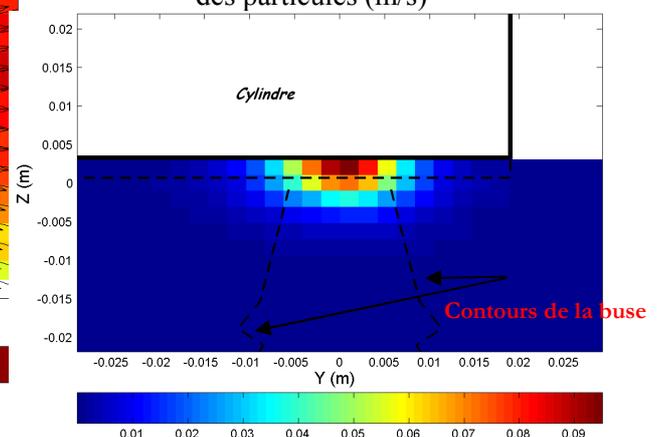


FIG. 5 – Section du jet : concentration relative en particules

4 Mesure de la concentration d'un gaz traceur

La dispersion d'un gaz traceur (hexafluorure de soufre - SF₆) émis simultanément avec le jet de particules est également étudiée expérimentalement : la dispersion d'un tel gaz est en effet jugée représentative de celle des plus fines particules d'usinage, dont le temps de réponse aérodynamique est négligeable. Les essais expérimentaux consistent à générer un traceur gazeux [3] à la source du jet de particules via un capillaire, et à effectuer des mesures de concentrations du traceur en différents points de la veine d'essai.

4.1 Description du montage expérimental

Le montage expérimental est constitué de deux parties principales :

- un dispositif d'émission du gaz traceur (mélange gazeux SF₆/N₂ présentant une teneur volumique de 10% en SF₆) constitué par un régulateur de débit Bronkhorst EL-FLOW (capacité 0-0.57 NI min⁻¹ (normo litres par minute) de mélange) et un capillaire d'émission ;
- un système de mesure et d'acquisition de données, constitué de 15 sondes de prélèvement (formant une grille rectangulaire de 50 × 30 cm de 5 × 3 sondes, lesquelles sont espacées de 10 cm) reliées à un analyseur de gaz SF₆ Wilks Infraran (cellule de 6.5 m, longueur d'ondes 10.68 μm) et d'un ordinateur équipé d'un programme d'acquisition, qui permet à la fois d'acquérir les données et de visualiser en temps réel l'évolution des concentrations.

En complément des sondes de prélèvement à l'intérieur de la veine d'essai, la concentration en traceur est également mesurée en permanence à l'entrée et à l'extrémité du conduit de sortie de la veine (i.e. à environ 10 m de la sortie de la veine dans le conduit d'extraction de diamètre 200 mm). Le suivi de la concentration en entrée de veine permet d'évaluer la dérive de l'analyseur, tandis que la concentration en sortie sert de point de référence aux mesures de concentration, celle-ci étant égale au rapport des débits de traceur et d'air dans la veine du fait du mélange.

Afin de préparer la campagne expérimentale, une étude numérique prévisionnelle du banc d'essai a été réalisée. Elle avait en particulier pour objet de déterminer le débit de renouvellement d'air dans la veine et le débit de gaz traceur à employer, en respectant les contraintes suivantes :

- éviter la saturation des capteurs en évitant les concentrations supérieures à 7 ppm aux points de prélèvement ;
- non prédominance des effets convectifs dus au renouvellement d'air sur les effets aérauliques du jet de particules et du cylindre tournant qui font l'objet de la présente étude.

Cette étude préliminaire nous a conduits à retenir un débit d'air dans la veine de 150 m³.h⁻¹ et un débit de mélange gazeux de traceur inférieur à 0.04 NI min⁻¹. Elle a également permis de fixer une zone d'intérêt pour le positionnement des sondes de prélèvement. Celles-ci sont ainsi positionnées suivant un rectangle parallèle au plan YZ, centré sur Y = -13 cm et Z = 0, et dont la position suivant l'axe X (axe approximatif du jet) varie. Les deux positions X = 25 cm et X = 50 cm sont choisies pour les plans de mesure. L'ensemble du dispositif est schématisé en figure 6.

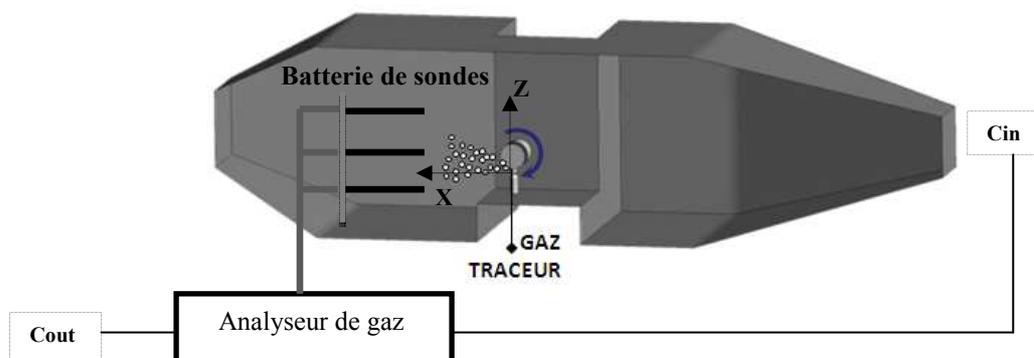


FIG. 6 – Dispositif de traçage gazeux

4.2 Protocole de mesure

Le protocole expérimental adopté pour les essais est le suivant :

- Mesure de la concentration C_{in} à l'entrée de la veine pendant une durée de 100 s : cette valeur permet d'évaluer la dérive de l'analyseur entre le début et la fin d'un cycle de mesure ;
- Mesure de la concentration au premier point de prélèvement, C_{prel} , pendant une durée de 200 s ;
- Mesure de la concentration à l'extrémité du conduit de sortie de la veine, C_{out} , pendant une durée de 200 s : concentration de référence pour normaliser les mesures et s'affranchir du débit de génération en traceur (utile pour la comparaison avec les simulations numériques) ;
- Contrôle de la dérive de l'analyseur : répétition de la mesure de la concentration à l'entrée de la veine C_{in} (100 s).

Les durées d'acquisition ont été choisies afin d'obtenir une convergence des moyennes à au moins 6% près pour chaque acquisition, avec un intervalle de confiance à 95%. Cette démarche est réalisée 4 fois pour chaque position des sondes. Les résultats finaux regroupent les quatre séries de mesure, l'erreur de mesure finale prenant en compte la dispersion des mesures entre chaque essai ainsi que leurs incertitudes propres.

A titre d'illustration, la figure 7 représente un exemple de mesure de la concentration au niveau des sondes placées à 25 cm de la source le long de l'axe du jet, avec une vitesse de rotation du cylindre de 1000 tr min^{-1} .

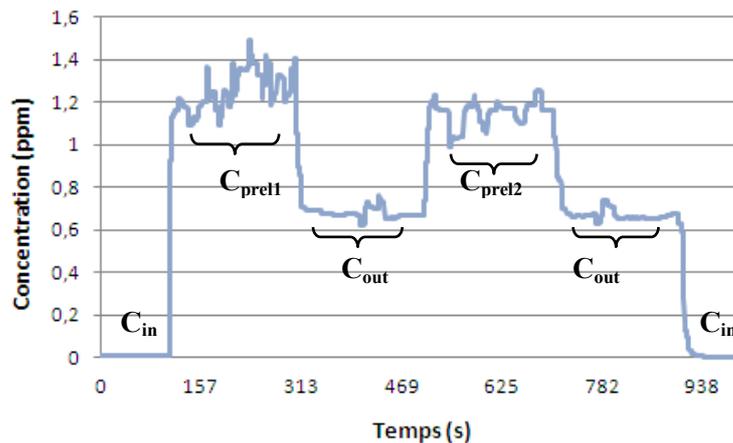


FIG. 7 – Exemple de mesure : évolution temporelle de la concentration à 25 cm de la source pour une vitesse de rotation du cylindre de 1000 tr min^{-1}

4.3 Résultats de la campagne de traçage gazeux

Les concentrations moyennes en SF_6 sont normées par la concentration en sortie de veine, déduction faite de la concentration à l'entrée de la veine afin de limiter les erreurs liées à la dérive de l'analyseur. On introduit ainsi le rapport de concentration R , défini par la relation :

$$R = \frac{C_{prel} - C_{in}}{C_{out} - C_{in}}$$

La répétabilité des mesures de concentration a été vérifiée, ainsi que la reproductibilité des résultats sur des journées différentes au cours desquelles les conditions expérimentales ont légèrement varié (température ambiante, pression atmosphérique, dérive de l'analyseur, redémarrage des appareils de mesure, correction du positionnement des sondes, etc.).

Les valeurs moyennes du rapport R représentées intègrent les erreurs résultant de la répétabilité des mesures au cours d'un même essai, sur la base d'un intervalle de confiance à 95%, ainsi que la dispersion des résultats entre les essais. A titre d'illustration, les figures suivantes représentent l'évolution du rapport R mesuré en fonction de Y pour les trois positions verticales (avec barres d'incertitudes) ainsi que les cartes de concentrations (représentées par le rapport R) pour les deux vitesses de rotation du cylindre.

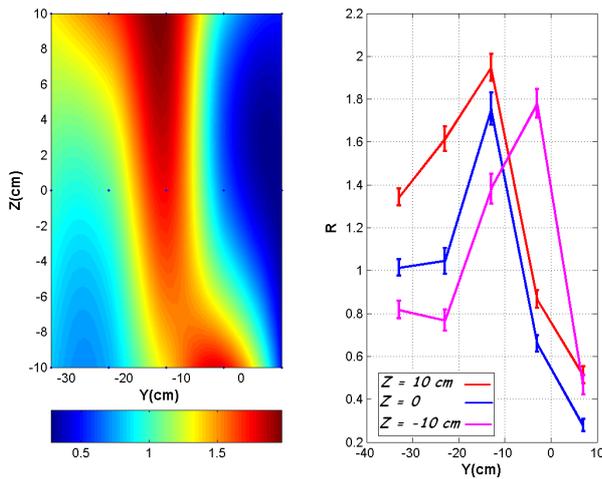


FIG. 8 – Champ de concentration et évolution du rapport R
(1000 tr.min⁻¹, X = 25 cm)

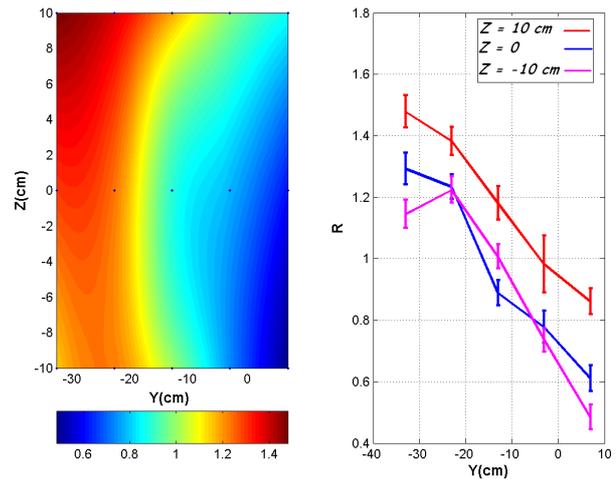


FIG. 9– Champ de concentration et évolution du rapport R
(1000 tr.min⁻¹, X = 50 cm)

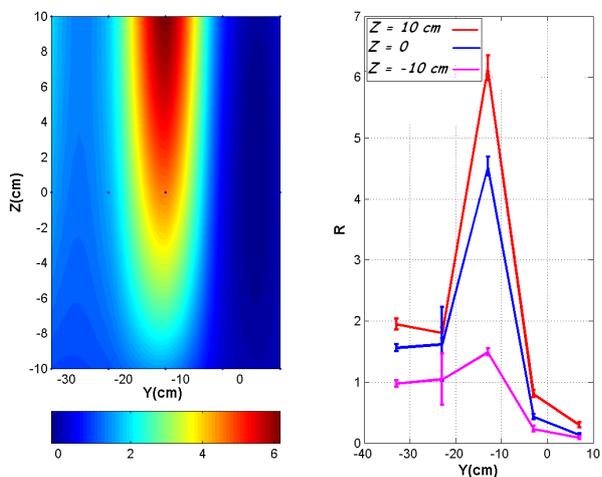


FIG. 10– Champ de concentration et évolution du rapport R
(500 tr.min⁻¹, X = 25 cm)

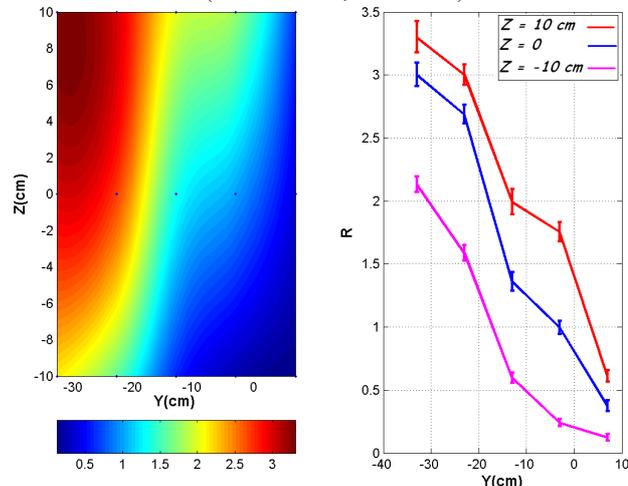


FIG. 11– Champ de concentration et évolution du rapport R
(500 tr.min⁻¹, X = 50 cm)

5 Discussion et conclusions

La campagne de mesure par vélocimétrie par suivi de particules nous a permis d'obtenir le profil de vitesse du jet au voisinage de sa source. Les propriétés du jet à 8 mm de la source sont représentatives des conditions d'émission des particules. Du fait de leur vitesse d'émission, les particules parcourent cette distance de 8 mm en un temps inférieur à 1/10 de leur temps de relaxation. Ainsi, ces données serviront comme données d'entrée dans le cadre des simulations numériques du banc d'essai. Quant à la campagne de mesure par traçage gazeux, elle nous a permis de caractériser partiellement le transport d'un gaz traceur émis simultanément au jet de particules, pour les configurations envisagées. L'allure des profils de concentrations mesurées semble remettre partiellement en cause le choix des positions de prélèvement. En effet, on observe que la zone de contamination semble s'étendre au-delà de la grille de mesure. La confrontation entre ces résultats expérimentaux et les simulations numériques devraient permettre de progresser dans la validation des modèles utilisés pour décrire l'écoulement diphasique engendré par les machines d'usinage.

Références

- [1] M.Marxen et al. Comparison of Gaussian particle center estimators and the achievable measurement density for particle tracking velocimetry. *Exp. Fluids*, 29, 145-153, 2000
- [2] Vignal L., Chute d'un nuage de particules dans une turbulence diffuse. Etude du couplage entre phases par diagnostics optiques. Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, 2006.
- [3] Niemelä R., Characterization of the performance of industrial ventilation systems by the tracer gas technique. Institute of Occupational Health, Helsinki, Finland, ISBN 951-801-556-2, 1986.