

Conception d'un système push-pull pour l'évacuation des émissions gazeuses d'une hotte de vulcanisation

Ing. M. SERVAIS
Dr Ir. V. HANUS
HENALLUX - Pierrard – Virton

Capter des émissions gazeuses émises par un bain ou des pièces chaudes est compliqué lorsque la surface à couvrir est importante. Dans ce cas, le système le plus indiqué est de combiner l'induction d'un jet d'air avec l'aspiration d'une hotte, de manière à capturer les émissions dans un courant d'air : c'est le système push-pull. Cet article synthétise des études précédemment produites pour l'appliquer à la phase d'ouverture d'une presse de vulcanisation.

Mots-clefs : ventilation, push-pull, émissions gazeuses.

Capturing the gaseous emissions emitted by a bath or hot pieces is hard when the surface to cover is important. In that case, the most indicated system is to combine jet air induction with the aspiration of a hood in order to capture the emissions in an air stream : this is the push-pull system. This article synthesizes the studies previously produced to apply it to the opening phase of a vulcanizing press.

Keywords : ventilation, push-pull, gaseous emissions.

1. Contexte

Une société possédant une presse de vulcanisation (voir figure 1) souhaite installer un système d'aspiration afin d'aspirer des émanations de gaz non toxiques mais malodorants, émises lors de la cuisson et lors de la sortie de son plateau. Comme la surface du plateau est importante (7m x 3,5m), et que l'espace disponible au-dessus du plateau est réduit, il est impossible d'adapter un système de hotte couvrant la surface. La solution d'un système push-pull est donc choisie.

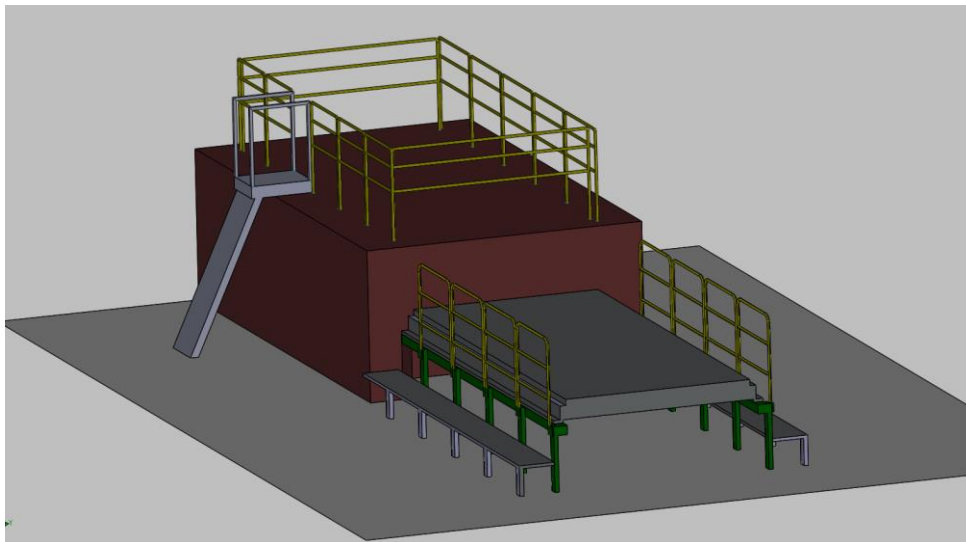


Figure 1 : Schéma de la presse, plateau sorti

1.1. Système push-pull

Le système est composé (figure 2), à une extrémité du cadre, d'une buse percée de trous (ou bouches de soufflage), poussant l'air (coté push) vers la hotte d'aspiration située au niveau du bâti (coté pull). Ce système push-pull est utilisé lorsque l'aspiration générale n'est pas envisageable (notamment pour des émissions toxiques) et permet de faire des économies énergétiques car le volume aspiré est moindre que dans le cas de l'aspiration générale.

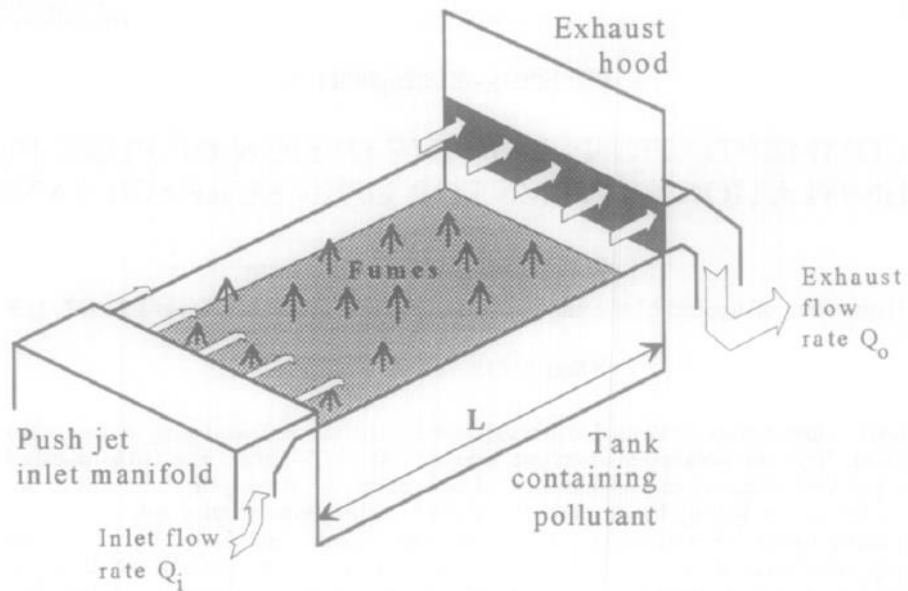


Figure 2 : Système push-pull [1]

Dans le cas présent, celui-ci utilise l'effet Coandă (figure 3) pour rester plaqué sur le cadre afin de déplacer les gaz captés vers l'aspiration. L'effet Coandă se produit lorsqu'un jet d'air est envoyé parallèlement à une surface, le faisant adhérer à celle-ci. Ce phénomène est dû à la dépression locale créée entre la surface et le jet en sortie de bouche.

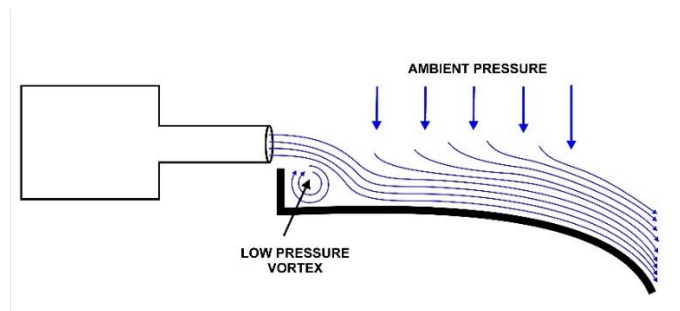


Figure 3 : Effet Coandă

2. Revue de la littérature existante

La plupart de la littérature traitant du système push-pull est basée sur des données empiriques et a pour but principal de donner des recommandations en ce qui concerne le design. Peu de ces observations prennent en considération la nature du flux d'air au-dessus de la surface à aspirer. Ces études se concentrent sur l'évaluation de l'efficacité de la capture du polluant en analysant la concentration en polluant de l'espace autour de la surface à aspirer.

L'étude la plus ancienne a été réalisée par Malin [2]. Celle-ci démontre que l'on peut économiser 50% du flux d'air nécessaire dans le cas d'une ventilation placée sur le contour de la surface à aspirer. Battista [3] parvient à des résultats similaires par une étude expérimentale utilisant une surface à aspirer de 1m x 2,5m, avec une zone d'aspiration située sur le côté le plus long de la surface. Celui-ci donne des recommandations pour le flux soufflant qui s'exprime pour une unité de largeur de la surface à aspirer. Le débit d'aspiration s'exprime pour une unité de cette surface. Des expérimentations menées par Hama [4] sur des surfaces plus importantes (2,6m x 5m) arrivent aux mêmes résultats que les études précédentes. Il donne, lui aussi, des recommandations pour les flux de soufflage et d'aspiration requis, tous deux pour une unité de surface de la surface à aspirer.

Cette étude est confirmée par Ege et Silvermann [5], qui concluent aussi qu'il est possible, grâce au système push-pull, d'économiser 50% du flux d'air par rapport à une aspiration simple, placée sur un coté de la surface. Ceux-ci ont étudié le comportement du flux d'air pour des surfaces de différentes formes et dimensions, allant jusque quarante fois la hauteur de la bouche de soufflage. De ces observations, ils ont émis une méthode pour déterminer la taille de la bouche de soufflage ainsi que le débit requis. Cependant, cette technique est limitée par le fait que la taille de la bouche de soufflage doit être supérieure à $1/40^e$ de la surface à aspirer. Cette restriction n'est en fait pas une exigence du système push-pull, mais un reflet de la portée de leurs expériences. Les débits résultants suggérés sont significativement différents de ceux trouvés dans d'autres études du système push-pull.

Hayasi *et al.* [6] ont produit une méthode pour déterminer les débits optimaux et la géométrie du système push-pull, mais, comme la technique d'Ege et Silverman, cette méthode est limitée par l'exigence que la longueur du réservoir ne dépasse pas 30 fois la hauteur de la buse de soufflage.

Dans les années 1980, le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) a publié une série d'articles reprenant les résultats d'études expérimentales. Un de ces articles, rédigé par Hughes et Huebener [7], rapporte les résultats d'études effectuées en laboratoire. Ce document suggère des débits minimaux requis en entrée et sortie pour différentes tailles de réservoir et montrent les profils de vitesse pour

une configuration du système déterminée. Klein [8], en reprenant les travaux de Hughes et Hubener, démontre que les résultats trouvés par ceux-ci sont valides, même avec des obstructions importantes sur la trajectoire du jet. L'ACGIH (American Conference of Governmental Industrial Hygienists) [9] donne des recommandations pour la conception d'un système push-pull, basées en grande partie sur les travaux de NIOSH.

Robinson et Ingham [10] publient à leur tour une méthode de dimensionnement complète, reprise et validée ensuite par Goodfellow et Wang [1]. C'est cette étude qui est reprise dans cet article pour le développement du système push-pull.

3. Méthode de dimensionnement et résultats

3.1. Aspect général du flux d'air

La méthode décrite par Goodfellow et Wang [1] est utilisée pour calculer les débits d'air entrants et sortants du système. Cette méthode explique que dans un système push-pull, il est important de synchroniser la vitesse d'aspiration et de souffler. De cette façon le flux pulsé, capturant les gaz s'élevant du plateau, est guidé vers l'aspiration sans créer de turbulence afin que la captation soit maximale.

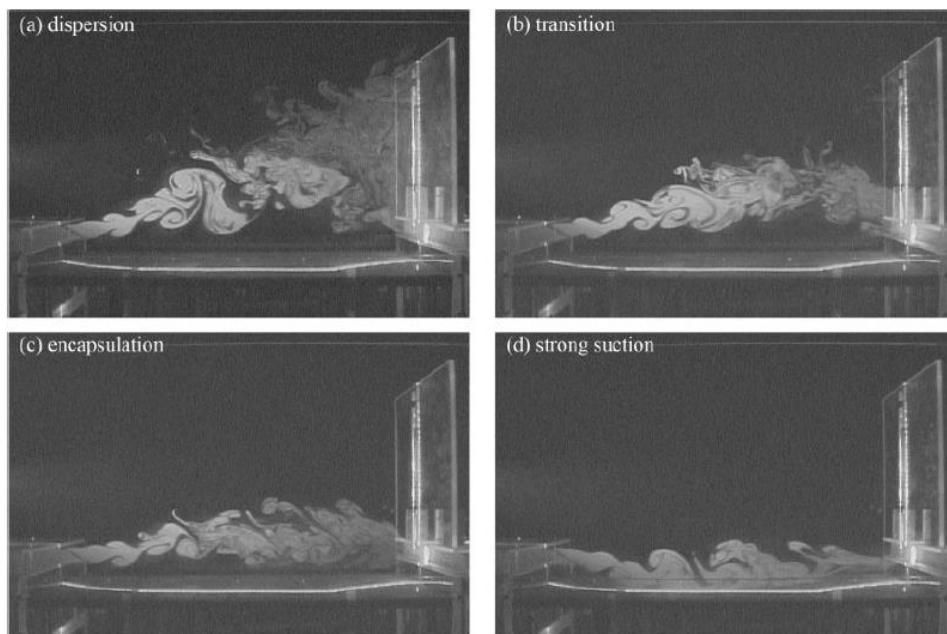


Figure 4 : Types d'écoulements caractéristiques en fonction de la variation de la vitesse d'aspiration [1]

Sur la figure 4, on peut observer :

- Figure 4.a : la vitesse d'aspiration est trop faible par rapport à la vitesse de soufflage, celle-ci poussant donc l'air avec une certaine inclinaison. De plus, le gaz représentant l'air déplacée par le plateau participe lui aussi à l'élévation du flux d'air. Une partie des gaz n'est donc pas captée par l'aspiration et s'échappe du système.
- Figure 4.b : la vitesse d'aspiration est supérieure à la vitesse d'aspiration de la figure 4.a. le point haut atteint par le flux d'air est donc déplacé plus près de l'aspiration et une bonne partie des gaz est aspirée.
- Figure 4.c : la totalité des gaz est aspirée ; cependant, il y a encore un trop gros niveau de turbulence dû à la vitesse d'entraînement du jet.
- Figure 4.d : la vitesse d'aspiration est suffisante pour permettre au flux d'avoir une trajectoire horizontale et même de profiter de l'effet Coandă.

Des situations quasi similaires apparaissent en faisant varier la vitesse de soufflage. Il faut donc choisir des vitesses adaptées de manière à être dans le cas de la figure 4.d.

3.2. Calcul des vitesses

D'après la méthode décrite par Goodfellow et Wang [1], la composante horizontale de la vitesse du dard du flux soufflé à n'importe quel endroit par rapport à la sortie est décrite comme valant :

$$u_m = \varphi \sqrt{\frac{j_i}{\rho}} x^{-c} \quad (1)$$

Avec φ un coefficient trouvé après une étude numérique valant 3,86, J_i étant le moment initial du jet par unité de largeur du plateau, au niveau de la sortie de la bouche de pulsion, exprimé en N/m, ρ la masse volumique du fluide en kg/m³, x la distance par rapport à la sortie, en m et C valant 0,509, lui aussi trouvé après une étude numérique.

La vitesse du dard du jet étant la plus petite pour $x = L$, qui vaut 7 m dans le cas étudié.

Pour s'assurer que la vitesse du jet est suffisante pour capturer le flux montant, celle-ci doit être supérieure à la vitesse de captation. La seule partie variable de l'équation étant J_i/ρ , celle-ci doit valoir :

$$\frac{j_i}{\rho} \geq \beta L \quad (2)$$

Avec :

$$\beta = \left(\frac{V_{cap}}{3,86} \right)^2 \quad (3)$$

V_{cap} étant la valeur de capture conseillée par l'ACGIH [9], en fonction du type de process et de la turbulence de l'air ambiant dans la zone aspirée. Cette V_{cap} vaut 1 m/s dans cette situation.

On obtient donc une vitesse de 2 m/s à 7 m de la sortie de soufflage (dans la zone d'aspiration de la hotte). En reprenant la même équation et en faisant tendre x vers 0, on obtient une vitesse de soufflage de 60 m/s en sortie de bouche.

3.3. Calcul du débit

Le paramètre suivant à déterminer est le débit d'aspiration. Celui-ci doit être capable d'aspirer tout le fluide amené par le jet. Le débit d'aspiration vaut donc le débit d'air arrivant à 7 m de distance de la bouche de soufflage multiplié par un facteur de sécurité SF :

$$q_0 = SFq_j(L) \quad (4)$$

En se basant sur les études précédentes, la méthode décrit, en intégrant et en remplaçant les constantes par celles trouvées expérimentalement, un débit d'aspiration valant :

$$q_0 = 0,443L^{0,491} \sqrt{\frac{j_i}{\rho}} \quad (5)$$

Dans notre cas, on obtient donc un débit d'aspiration de 18111 m³/h. Des résultats similaires ont été trouvés expérimentalement par Hama [4] pour un bain de décapage à l'acide de 8 m de long par 2,5 m de large (le débit d'aspiration étant supérieur, dû à la quantité, et à la vitesse d'élévation des gaz).

3.4. Dimensionnement de la hotte

En reprenant des dimensions de hotte standard et en les adaptant à l'espace disponible à l'avant de la machine, le choix s'est porté sur deux hottes de 1,625m de long et 60 cm de large. On arrive à une vitesse d'aspiration de 2,58 m/s (ce qui est bien supérieur à la vitesse du flux d'air à 7 m de la sortie).

3.5. Dimensionnement de la buse de soufflage

En ce qui concerne la hauteur de soufflage ainsi que les dimensions des trous et de la buse, celle-ci n'influence pas ou peu les résultats, selon les études. Il a donc été décidé de suivre les directives de l'ACGIH. La buse fait donc 3,26 m de long, 125 mm de diamètre (en respectant la règle : $\text{Section}_{\text{buse}} \geq 3 \times \text{Surface}_{\text{trous}}$), percée de 63 trous d'un diamètre de 6,35mm, espacés de 50,8 mm.

3.6. Disposition finale

Afin d'éviter toute dispersion du flux d'air sur les côtés du cadre, des panneaux sont ajoutés pour caréner les côtés du cadre.

La hotte d'aspiration ne pouvant être placée dans l'alignement du flux, celui-ci doit être guidé afin de changer son mouvement horizontal en mouvement vertical au niveau de la hotte pour pouvoir être aspiré et éviter de souffler le flux dans le bâti de la machine. Une bâche est donc accrochée aux hottes afin de servir de guide (voir figure 5).

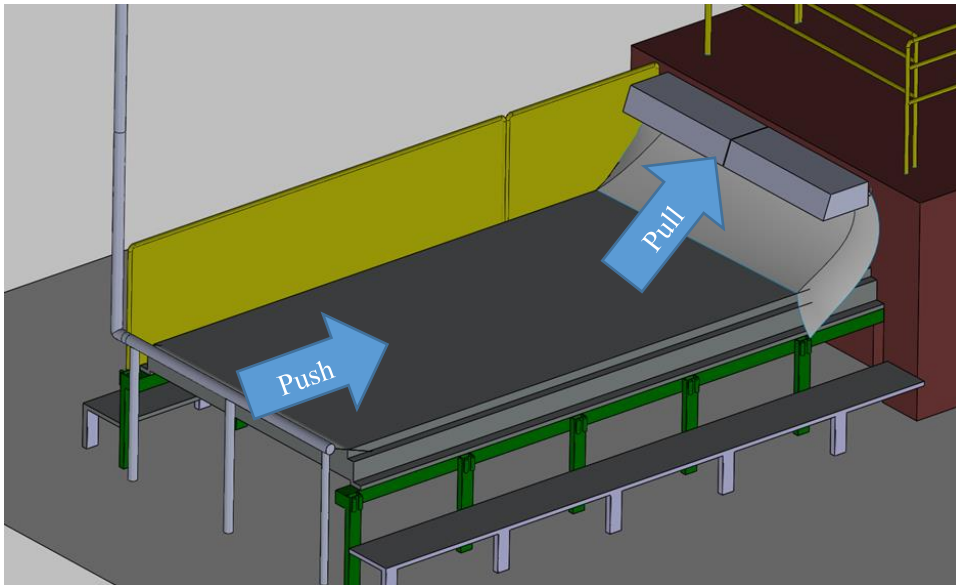


Figure 5 : Système push-pull adapté au plateau

4. Conclusion

Le système push-pull, destiné à évacuer les gaz libérés, est donc dimensionné suivant la méthode de Goodfellow et Wang [1]. Ce système permet d'évacuer les gaz émis sur une grande surface. Le système souffle de l'air extérieur de manière à atteindre une vitesse de 2,58 m/s en bout de cadre, emportant les émanations dans la zone d'aspiration des hottes. Cette vitesse est nécessaire pour s'assurer que les gaz montant du cadre soient capturés et emmenés vers l'aspiration. Celle-ci a un débit de 18112 m³/h. Cette valeur s'approche des valeurs expérimentées par Hama [4] pour de dimensions similaires.

Les occasions de dimensionner des systèmes push-pull sont rares dans l'industrie : dans le cas présent, c'est la mise en conformité à la directive « machines » qui a nécessité de recourir à un tel système. Il est une solution particulièrement adaptée pour capter les émissions gazeuses liées à de grandes surfaces : mêmes si le débit obtenu pour le dimensionnement peut sembler important, il reste néanmoins modeste par rapport à l'application d'une hotte.

Comme le nombre d'applications dans ce secteur est limité, le nombre d'acteurs prenant en charge le dimensionnement l'est également. Il est donc particulièrement confortable pour une entreprise qui doit implémenter un tel système de pouvoir se reposer sur les directives de l'ACGIH pour le dimensionnement d'un tel système.

5. Sources

- [1] H. D. Goodfellow et Y. Wang, *Industrial Ventilation Design Guidebook: Volume 2: Engineering Design and Applications*. London: Academic Press, 2021.
- [2] B. S. Malin, « Practical pointers on industrial exhaust systems », *Heat Vent*, vol. 42, p. 75-82, 1945.
- [3] W. P. Battista, « Semi-lateral tank ventilation hood controls contamination, cuts costs », *Heat Piping Air Condition*, vol. 19, p. 85-89, 1947.
- [4] G. M. Hama, « Supply and Exhaust Ventilation for the Control of Metal Pickling Operations », *American Industrial Hygiene Association Quarterly*, vol. 18, n° 3, p. 214-217, sept. 1957, doi: 10.1080/00968205709343496.
- [5] J. F. Ege et L. Silverman, « Design of push-pull exhaust systems », *Heating and Ventilating*, vol. 10, p. 73-78, 1950.
- [6] T. Hayashi, R. H. Howell, M. Shibata, et K. Tsuji, *Industrial Ventilation and Air Conditioning*. Boca Raton: CRC press, 1985.
- [7] D. J. Huebener et R. T. Hughes, « Development of Push-Pull Ventilation », *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 46, n° 5, p. 262-267, mai 1985, doi: 10.1080/15298668591394789.
- [8] M. K. Klein, « A Demonstration of NIOSH Push-Pull Ventilation Criteria », *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 48, n° 3, p. 238-246, mars 1987, doi: 10.1080/15298668791384689.
- [9] American Conference of Governmental Industrial Hygienists, *Industrial Ventilation: A Manual of Recommended Practice for Design*, 28^e éd. Cincinnati, Ohio: American Conference of Governmental Industrial Hygienists, 2010.
- [10] M. Robinson et D. B. Ingham, « Recommendations for the design of push-pull ventilation systems for open surface tanks », *The Annals of Occupational Hygiene*, vol. 40, n° 6, p. 693-704, déc. 1996, doi: 10.1093/annhyg/40.6.693.