

**Champs de vitesse
au voisinage de l'entrée
des dispositifs
d'aspiration localisée**

Champs de vitesse au voisinage de l'entrée des dispositifs d'aspiration localisée

R. Braconnier,
centre de recherche de l'INRS

Air velocity fields in the vicinity of local exhaust ventilation devices

This data sheet examines data in the literature on the calculation of air velocities induced in the vicinity of local exhaust openings. It studies the influence on air velocity fields of exhaust hood characteristics (shape, width to length ratio, flanging, transition angle) and environmental factors (free field or obstructed field of suction).

Cette note passe en revue les données disponibles dans la littérature pour le calcul des vitesses d'air induites au voisinage des ouvertures d'aspiration localisée. Elle examine l'influence, sur le champ des vitesses, des paramètres liés à l'ouverture (forme, rapport longueur sur largeur, présence d'une collerette, angle de transition) et liés aux conditions d'environnement (aspiration en champ libre ou en présence d'obstacles).

Dans de nombreux cas de processus industriels polluants, l'assainissement des postes de travail peut être réalisé à l'aide de dispositifs de captage placés à faible distance de la source de polluants. L'efficacité de ces dispositifs de captage est en grande partie conditionnée par la valeur des vitesses d'air induites dans la zone d'émission des polluants. Des valeurs minimales recommandées pour ces vitesses peuvent être trouvées dans la littérature [1], valeurs qui sont fonction de la nature et du mode d'émission du polluant, et des conditions d'environnement.

Aussi, lors de la conception des dispositifs d'aspiration localisée, il est nécessaire de connaître le champ des vitesses induites dans la zone d'action de l'aspiration. En particulier, il faut disposer de données permettant de prévoir les valeurs des vitesses in-

duites au voisinage des ouvertures en fonction de paramètres tels que la forme et la taille de l'ouverture, le débit d'aspiration, les conditions d'environnement, etc. Cette note a pour but :

- de faire une revue des données disponibles sur le sujet dans la littérature,
- d'effectuer un choix dans le domaine particulier des formules de calcul de la vitesse axiale devant les ouvertures libres.

Le champ couvert par cette revue bibliographique est le suivant :

- ouvertures planes, de forme rectangulaire ou circulaire, dont le plan frontal est perpendiculaire à l'axe du conduit (ce qui exclut en particulier les ouvertures biseautées);

Notations utilisées dans le texte

Les principales notations utilisées sont définies dans la liste des symboles ci-dessous, ainsi que sur les figures 1 à 5. En particulier, les figures 1 et 2 représentent les systèmes de coordonnées (rectangulaires et cylindriques) utilisés pour les ouvertures libres. L'origine O est placée au centre de l'ouverture et l'axe OX est choisi perpendiculaire au plan de l'ouverture. Pour les ouvertures rectangulaires, l'axe OY est choisi parallèle aux petits côtés et l'axe OZ parallèle aux grands côtés de l'ouverture.

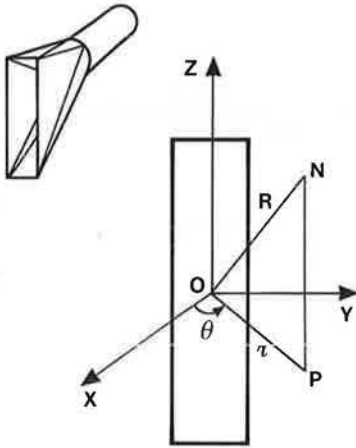


Fig. 1. Système de coordonnées pour les ouvertures rectangulaires libres.

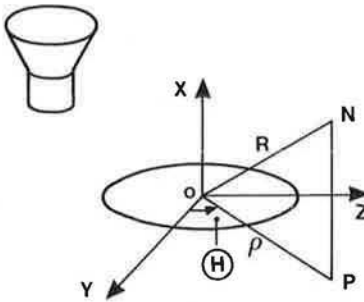


Fig. 2. Système de coordonnées pour les ouvertures circulaires libres.

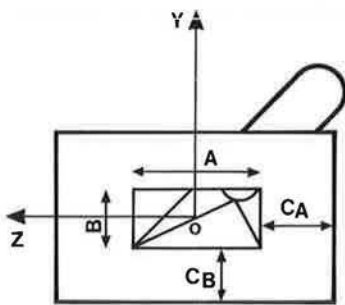


Fig. 3. Ouverture rectangulaire avec collerette (si $C_A = C_B$, on pose $C = C_A = C_B$).

Dans la liste ci-dessous, on n'a pas fait figurer :

– les longueurs E, H, L, M, Λ qui servent à caractériser l'environnement de l'ouverture, et dont la signification variable d'une configuration à l'autre est définie plus loin sur les figures 12 et 16,

– les symboles utilisés de façon locale dans le texte, qui sont définis au moment de leur utilisation (e, k, l, m, α_f , β_f , etc.).

A	(m)	: longueur d'une ouverture rectangulaire
B	(m)	: largeur d'une ouverture rectangulaire
C, C_A , C_B	(m)	: largeurs de collerette (fig. 3 et 4)
D	(m)	: diamètre intérieur d'une ouverture circulaire
D_h	(m)	: diamètre hydraulique de l'ouverture
D_{eq}	(m)	: diamètre équivalent en aire : $D_{eq} = \sqrt{4S/\pi}$
d	(m)	: diamètre d'un conduit d'aspiration (circulaire)
J	(-)	: vitesse réduite : $J = V/U_m$
K	(-)	: rapport d'aspect d'une ouverture rectangulaire : $K = \Lambda/B$
N, P		: points courants
$\mathcal{F}(z)$: potentiel complexe d'un écoulement plan : $\mathcal{F} = \Phi + i\psi$
Q	(m ³ /s)	: débit d'aspiration
R	(m)	: distance du point courant à l'origine (fig. 1 et 2)
r	(m)	: rayon-vecteur en coordonnées cylindriques d'axe OZ (fig. 1)
S	(m ²)	: aire de l'ouverture
S_c	(m ²)	: aire de la collerette
s	(m ²)	: aire du conduit d'aspiration
U_m	(m/s)	: vitesse débitante dans l'ouverture : $U_m = Q/S$
u	(m/s)	: projection du vecteur vitesse sur l'axe OX
u_p	(m/s)	: projection du vecteur vitesse sur le rayon vecteur p
V	(m/s)	: module du vecteur vitesse
V_o	(m/s)	: vitesse au centre de l'ouverture
v	(m/s)	: projection du vecteur vitesse sur l'axe OY
W(z)		: vitesse complexe dans le plan z : $W(z) = u - iv$
w	(m/s)	: projection du vecteur vitesse sur l'axe OZ
X	(m)	: abscisse
Y	(m)	: ordonnée
Z	(m)	: cote
z	(m)	: affixe dans le plan XOY : $z = X + iY$
α	(°)	: angle
Γ	(m)	: longueur de la pièce de transition (fig. 5)
Γ_o	(m)	: longueur de la section d'entrée (fig. 5)
$\gamma, \gamma_A, \gamma_B$	(°)	: angles de transition
ζ		: affixe dans le plan $\Omega\xi\eta$: $\zeta = \xi + i\eta$
η	(m)	: ordonnée (plan $\Omega\xi\eta$)
Θ	(°)	: angle polaire du plan YOZ (fig. 2)
θ	(°)	: angle polaire du plan XOY (fig. 1)
ξ	(m)	: abscisse (plan $\Omega\xi\eta$)
ρ	(m)	: rayon-vecteur du plan YOZ
τ	(m)	: épaisseur des parois de l'ouverture

Φ	(m ² /s)	: fonction potentiel des vitesses
ψ	(m ² /s)	: fonction de courant
ω (ζ)		: vitesse complexe dans le plan ζ

Abréviations

e	: expérimental
n.p.	: non précisé
t	: théorique

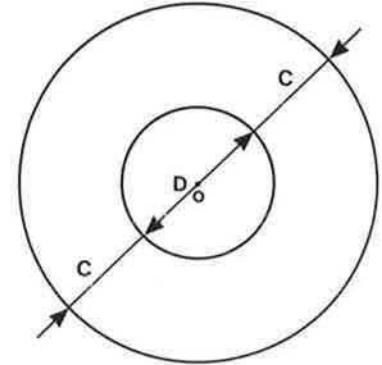


Fig. 4. Ouverture circulaire avec collerette.

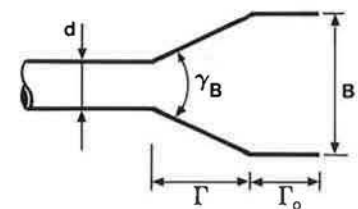
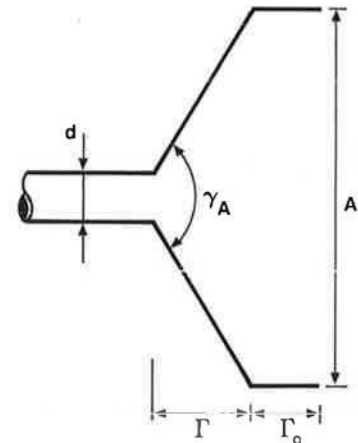
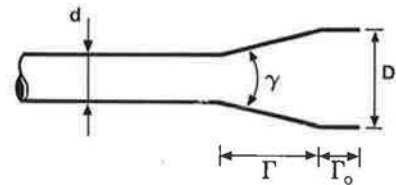


Fig. 5. Section d'entrée et pièce de transition entre l'ouverture et un conduit d'aspiration circulaire.

– ouvertures dépourvues d'obstacles dans leur plan d'entrée (grilles, tôles perforées, aubes de répartition); l'influence de tels obstacles n'a fait l'objet que de très peu d'études [2, 35].

De plus, les formules ou données présentées dans cette note s'appliquent uniquement en l'absence de courants d'air au voisinage des ouvertures d'aspiration. L'influence des courants d'air, bien que très importante lors de la conception des dispositifs de captage, a été très peu étudiée [21, 28, 30].

L'article présente tout d'abord les résultats d'études théoriques qui proposent des modèles mathématiques permettant de prévoir les caractéristiques de l'écoulement au voisinage des ouvertures. On examine ensuite les résultats expérimentaux obtenus à partir de mesures anémométriques devant des ouvertures d'aspiration réelles. Dans les deux cas, on considère les ouvertures « libres », c'est-à-dire aspirant en l'absence d'obstacles extérieurs proches, munies ou non d'une collerette; l'influence d'obstacles limitant le domaine d'aspiration; ainsi que le cas particulier des dispositifs d'aspiration sur les cuves de traitement. Enfin, on compare en détail les formules disponibles pour le calcul de la vitesse axiale devant les ouvertures libres, et on effectue un choix parmi ces formules.

Les notations relatives aux systèmes de coordonnées utilisés, aux caractéristiques géométriques et aérodynamiques des ouvertures, ainsi que les principales abréviations utilisées sont rassemblées dans l'encadré. Quelques rappels de mécanique des fluides isovolumes sont donnés dans l'annexe.

1. ÉTUDES THÉORIQUES

1.1. Ouvertures circulaires libres

1.1.1. Ouvertures circulaires sans collerette

Les modèles les plus simples (modèles géométriques) pour le calcul des vitesses d'air devant une ouverture d'aspiration consistent à assimiler celle-ci à un point puits ou à une ligne puits situé en son centre, et à calculer les valeurs des vitesses d'air induites à partir de la forme géométrique des contours d'égale vitesse. Ce type de modèles est discuté en détails par Hemeon [31].

En particulier, dans le cas d'une ouverture circulaire libre sans collerette, les contours d'égale vitesse sont, pour des distances suffisantes par rapport à l'ouverture, assimilés à des sphères, d'où les formules :

$$Q = 4 \pi R^2 V \quad (1)$$

$$\frac{V}{U_m} = \frac{1}{4\pi} \frac{S}{R^2} = 0,080 \frac{S}{R^2} \quad (2)$$

1.1.2. Ouvertures circulaires avec collerette infinie

L'application d'un modèle géométrique à une ouverture circulaire avec collerette infinie conduit à assimiler, pour des distances suffisantes à l'ouverture, les contours d'égale vitesse à des demi-sphères, d'où la formule (Hemeon [31]) :

$$\frac{V}{U_m} = \frac{1}{2\pi} \frac{S}{R^2} = 0,159 \frac{S}{R^2} \quad (3)$$

Deux modèles plus élaborés pour le calcul des vitesses induites devant des ouvertures circulaires avec collerette ont été proposés par Dkral [12] et par Flynn et Ellenbecker [21]. Les deux modèles font l'hypothèse d'un écoulement de révolution d'un fluide parfait isovolume avec potentiel des vitesses, satisfaisant par conséquent à l'équation de Laplace :

$$\Delta \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} = 0 \quad (4)$$

Dans les deux cas, la largeur de la collerette est supposée infiniment grande par rapport à l'ouverture.

$$\Phi(\rho, X) = \frac{Q}{2\pi S} \int_0^{D/2} \int_0^{2\pi} \frac{m}{\sqrt{X^2 + \rho^2 + m^2 - 2\rho m \cos \alpha}} dm d\alpha \quad (7)$$

En particulier, le long de l'axe de l'ouverture, on a :

$$\Phi(0, X) = \frac{Q}{S} \left(\sqrt{X^2 + \frac{S}{\pi}} - X \right) \quad (8)$$

d'où, par dérivation, la valeur de la vitesse axiale devant une ouverture circulaire avec collerette infinie :

$$\frac{V}{U_m} = 1 - \frac{X}{\sqrt{X^2 + \frac{S}{\pi}}} = 1 - \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{1}{4} \left(\frac{D}{X} \right)^2}} \quad (9)$$

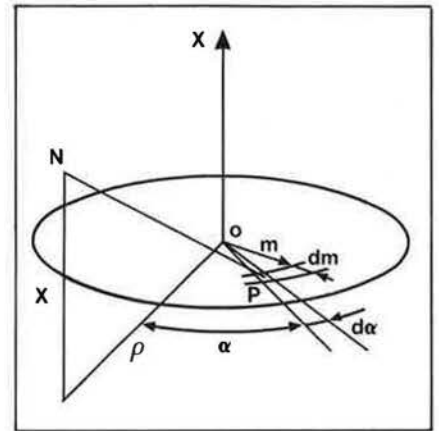


Fig. 6. Décomposition d'une ouverture circulaire avec collerette infinie en puits ponctuels élémentaires.

Dkral [12] divise la surface de l'ouverture en puits ponctuels élémentaires (fig. 6). Le potentiel élémentaire, en un point quelconque N créé par un puits placé en P et aspirant un débit $2dQ$, dont la moitié du côté des X positifs, est :

$$d\Phi = \frac{1}{4\pi} \frac{2dQ}{(NP)} \quad (5)$$

Il suppose ensuite que la densité de débit d'aspiration des puits ponctuels est uniforme, d'où avec les notations de la figure 6 :

$$dQ = \frac{Q}{S} m dm d\alpha \quad (6)$$

ce qui par intégration conduit au calcul du potentiel des vitesses :

Flynn et Ellenbecker [21] considèrent tout d'abord la solution de l'équation (4) avec pour condition aux limites un potentiel constant sur la surface de l'ouverture :

$$\Phi(\rho, X) = \frac{Q}{\pi D} \operatorname{Arccsin} \frac{D}{l_1 + l_2} \quad (10)$$

$$l_1 = \sqrt{X^2 + \left(\frac{D}{2} + \rho\right)^2} \quad (11)$$

$$l_2 = \sqrt{X^2 + \left(\frac{D}{2} - \rho\right)^2} \quad (12)$$

Dans tout plan méridien, les équipotentielles sont des ellipses (fig. 7), de foyers $\{X = 0, \rho = \pm D/2\}$ et d'excentricité e :

$$e = \frac{D}{l_1 + l_2} \quad (13)$$

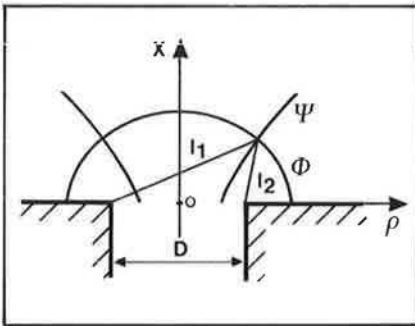


Fig. 7. Lignes de courant (ψ) et équipotentielles (Φ) théoriques pour une ouverture circulaire (D) avec collerette infinie d'après Flynn et Ellenbecker [21].

Cependant, les auteurs jugent que cette solution décrit mal le champ de vitesse réel; en particulier, la vitesse calculée au centre de l'ouverture n'est égale qu'à $U_m/2$. Aussi, ils proposent une modification de la solution précédente, en admettant, contrairement à ce que prévoit la théorie des écoulements à potentiel, que les contours d'égale vitesse coïncident avec les équipotentielles et sont donc des demi-ellipsoïdes de révolution aplatis.

Ils arrivent ainsi au résultat suivant : dans tout plan méridien, les contours d'égale vitesse sont des demi-ellipses ($X \geq 0$), d'équation :

$$\frac{\rho^2}{\left(\frac{D}{2e}\right)^2} + \frac{X^2}{\left(\frac{D}{2e} \sqrt{1 - e^2}\right)^2} = 1 \quad (14)$$

l'excentricité de l'ellipse e étant liée à la vitesse d'air par la relation :

$$V = \frac{2\sqrt{3} e^2 Q}{\pi D^2 \sqrt{3 - 2e^2}} \quad (15)$$

A partir des formules ci-dessus présentées dans l'article de Flynn et Ellenbecker [21], il est en particulier possible de déduire la formule suivante donnant la décroissance de la vitesse axiale devant une ouverture circulaire avec collerette infinie :

$$\frac{V}{U_m} = \frac{\sqrt{3}}{2\sqrt{\left(1 + \frac{4X^2}{D^2}\right)\left(1 + \frac{12X^2}{D^2}\right)}} \quad (16)$$

1.2. Ouvertures rectangulaires libres

1.2.1. Ouvertures rectangulaires sans collerette

L'application des modèles géométriques aux ouvertures rectangulaires sans collerette conduit à deux for-

mules différentes selon les valeurs du rapport longueur A sur largeur B de l'ouverture. Lorsque ce rapport est faible (c'est-à-dire voisin de 1), les contours d'égale vitesse sont, pour des distances suffisantes par rapport au plan d'ouverture, assimilés à des sphères, comme dans le cas des ouvertures circulaires, d'où la formule (Hemeon [31]) :

$$\frac{V}{U_m} = \frac{1}{4\pi} \frac{S}{R^2} = 0,080 \frac{S}{R^2} \quad (17)$$

Pour les ouvertures rectangulaires allongées (fentes d'aspiration), l'écoulement est considéré comme bidimensionnel, au moins au voisinage du plan médian parallèle aux petits côtés, et les contours d'égale vitesse sont alors assimilés à des cylindres, d'où les formules :

$$Q = 2\pi r A V \quad (18)$$

$$\frac{V}{U_m} = \frac{1}{2\pi} \frac{B}{r} = 0,159 \frac{B}{r} \quad (19)$$

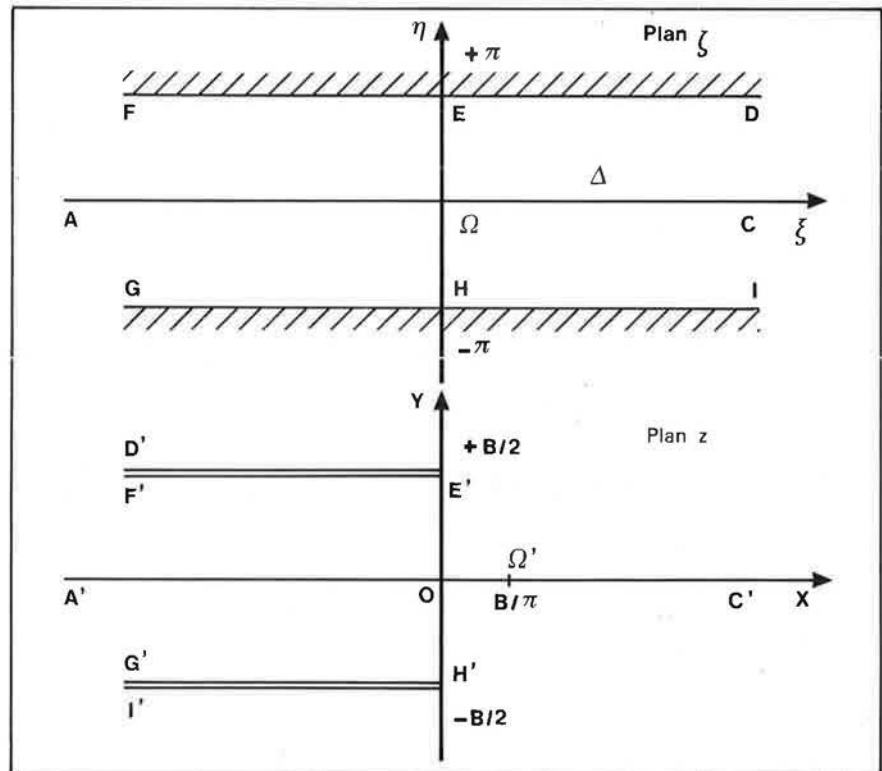


Fig. 8. Domaines se correspondant dans la transformation conforme :

$$z = \frac{B}{2\pi} (1 + \zeta + e^\zeta).$$

Ces deux dernières relations ne doivent être appliquées, d'après Hemeon [31], que dans le domaine suivant :

$$r \leq \frac{A}{4} \text{ à } \frac{A}{3} \text{ et } r \geq 2B \text{ à } 3B \quad (20)$$

Les autres modèles présentés ci-dessous font l'hypothèse d'un fluide iso-volume et d'un écoulement à potentiel des vitesses (ce type de modèles ne prend pas en compte les phénomènes visqueux).

Strauss [45] divise la surface de l'ouverture en 100 puits élémentaires de débit égal et, après avoir effectué les sommations sur un ordinateur, présente le tracé des surfaces équipotentielles pour quatre conditions d'environnement; les valeurs des vitesses d'air induites ne sont pas calculées.

Lorsque l'écoulement est bidimensionnel (fente infiniment longue), il est possible d'utiliser la transformation conforme pour prévoir les vitesses d'air. Ainsi par exemple, la transformation conforme du plan $\zeta = \xi + i\eta$ vers le plan $z = X + iY$ définie par :

$$z = F(\zeta) = \frac{B}{2\pi} (1 + \zeta + e^\zeta) \quad (21)$$

transforme la bande $\Delta : -\pi < \eta < +\pi$ du plan ζ en le plan z moins les deux coupures $\{Y = \pm B/2; X \leq 0\}$ (fig. 8). Le potentiel complexe dans le plan z peut alors être calculé à partir de celui défini dans le plan ζ , par exemple pour un écoulement uniforme dans la bande Δ , ou pour un puits situé sur l'axe ξ . Les vitesses d'air induites dans le plan z peuvent être déterminées à l'aide de la relation entre les vitesses complexes $W(z)$ (plan z) et $\omega(\zeta)$ (plan ζ) :

$$W = \frac{\omega}{(dF/d\zeta)} \quad (22)$$

Une approche analogue a été présentée par Garrison [22, 27] mais bizarrement appliquée à l'écoulement devant une ouverture circulaire et avec confusion des équipotentielles et des contours d'égale vitesse.

1.2.2. Ouvertures rectangulaires avec collerette finie

Pavlov et Pocokhine [37] présentent une formule donnant la vitesse axiale devant une fente d'aspiration très longue assimilée à une ligne puits, munie d'une collerette de largeur finie C (écoulement bidimensionnel) (fig. 9) :

$$V(X) = \frac{Q}{2\pi A} \frac{X}{X^2 + M^2 - M \sqrt{X^2 + M^2}} \quad (23)$$

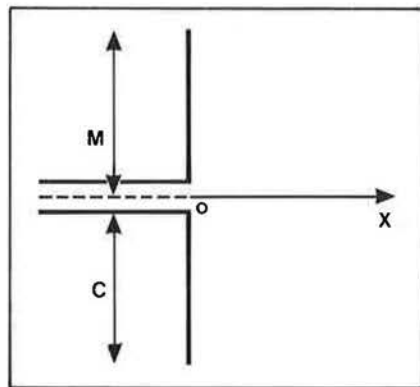


Fig. 9. Notations pour l'application de la formule (24) (fente d'aspiration très longue avec collerette finie).
C : largeur de collerette.
M : distance de l'axe au bord de la collerette.

avec $M = C + B/2$, d'où

$$\frac{V}{U_m} = \frac{B}{2\pi} \frac{X}{X^2 + M^2 - M \sqrt{X^2 + M^2}} \quad (24)$$

Niizu, Hayashi et Tsuji [36] étudient l'écoulement bidimensionnel devant une fente d'aspiration avec collerette en résolvant numériquement l'équation de Laplace relative à la fonction de courant par la méthode de relaxation (fig. 10). Ils montrent comment varie la position des équipotentielles en fonction de la hauteur de la collerette, de l'angle du convergent et de la hauteur de la fente au-dessus d'un plan, mais ne présentent pas de résultats concernant les vitesses d'air induites.

1.2.3. Ouvertures rectangulaires avec collerette infinie

L'application des modèles géométriques (Hemeon [31]) aux ouvertures rectangulaires avec collerette infinie de faible rapport longueur sur largeur conduit à assimiler les contours d'égale vitesse à des demi-sphères (pour des distances suffisantes à l'ouverture), d'où la formule :

$$\frac{V}{U_m} = \frac{1}{2\pi} \frac{S}{R^2} = 0,159 \frac{S}{R^2} \quad (25)$$

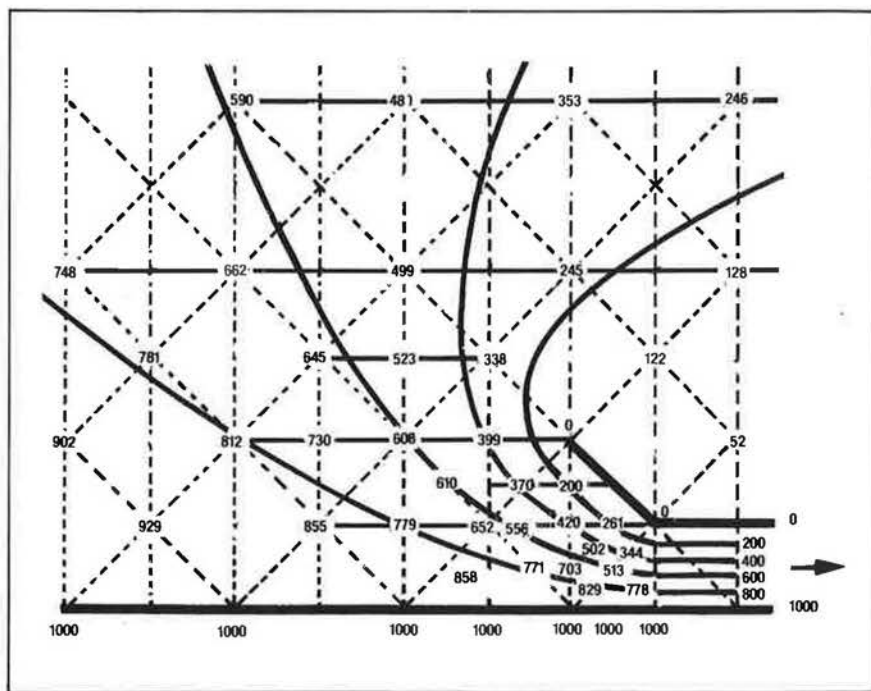


Fig. 10. Valeurs de la fonction de courant d'un écoulement bidimensionnel devant une fente de longueur infinie (débit d'aspiration 1 000 m³/s.m.), d'après Niizu et al. [36].

Pour les ouvertures rectangulaires allongées (fentes d'aspiration), les contours d'égale vitesse sont assimilés à des demi-cylindres, au moins au voisinage du plan médian parallèle aux petits côtés, d'où la formule :

$$\frac{V}{U_m} = \frac{1}{\pi} \frac{B}{r} = 0,318 \frac{B}{r} \quad (26)$$

dont l'application doit être limitée au domaine suivant [31] :

$$r \leq \frac{A}{4} \text{ à } \frac{A}{3} \text{ et } r \geq 2B \text{ à } 3B \quad (27)$$

Les autres modèles ci-dessous font l'hypothèse d'un fluide isovolume et d'un écoulement à potentiel des vitesses.

Tyaglo et Shepelev [47] présentent des formules applicables à l'écoulement tridimensionnel au voisinage d'une ouverture rectangulaire de longueur finie encastrée dans une paroi (ou avec collerette infinie). Les formules sont établies en divisant la sur-

face de l'ouverture en puits ponctuels élémentaires. La vitesse induite en un point N quelconque par le puits placé en P et de débit dQ est :

$$dV = \frac{dQ}{2\pi(NP)^2} \quad (28)$$

Par intégration sur la surface de l'ouverture, dans l'hypothèse d'une répartition uniforme des débits d'aspiration élémentaires, on obtient les formules suivantes ($X \geq 0$) :

$$u(X,Y,Z) = -\frac{U_m}{2\pi} \left\{ \begin{aligned} &\text{Arctg} \frac{(Y+B/2)(Z+A/2)}{X\sqrt{X^2+(Y+B/2)^2+(Z+A/2)^2}} - \text{Arctg} \frac{(Y-B/2)(Z+A/2)}{X\sqrt{X^2+(Y-B/2)^2+(Z+A/2)^2}} \\ &- \text{Arctg} \frac{(Y+B/2)(Z-A/2)}{X\sqrt{X^2+(Y+B/2)^2+(Z-A/2)^2}} + \text{Arctg} \frac{(Y-B/2)(Z-A/2)}{X\sqrt{X^2+(Y-B/2)^2+(Z-A/2)^2}} \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

$$v(X,Y,Z) = -\frac{U_m}{2\pi} \ln \left\{ \frac{\sqrt{X^2+(Y-B/2)^2+(Z+A/2)^2} + Z + \frac{A}{2}}{\sqrt{X^2+(Y+B/2)^2+(Z+A/2)^2} + Z + \frac{A}{2}} \times \frac{\sqrt{X^2+(Y+B/2)^2+(Z-A/2)^2} + Z - \frac{A}{2}}{\sqrt{X^2+(Y-B/2)^2+(Z-A/2)^2} + Z - \frac{A}{2}} \right\} \quad (30)$$

La formule donnant $w(X,Y,Z)$ est obtenue à partir de celle donnant $v(X,Y,Z)$ en échangeant Y et Z d'une

part, B et A d'autre part. Ces formules ne doivent pas être appliquées au voisinage des bords de l'ouverture, qui

sont des points singuliers. La vitesse axiale se déduit de la formule (29) :

$$\frac{V}{U_m} = \frac{2}{\pi} \text{Arctg} \frac{A/B}{\frac{2X}{B} \sqrt{\left(\frac{2X}{B}\right)^2 + \left(\frac{A}{B}\right)^2} + 1} = 1 - \frac{2}{\pi} \text{Arctg} \frac{2X\sqrt{4X^2 + A^2 + B^2}}{AB} \quad (31)$$

Lorsque la longueur de la fente devient très grande ($K = A/B \rightarrow +\infty$), l'écoulement tend vers un écoulement plan (bidimensionnel), et les formules

précédentes deviennent dans tout plan perpendiculaire à l'axe OZ (fente d'aspiration infiniment longue encastrée dans une paroi) :

$$u(X,Y) = -\frac{U_m}{\pi} \left(\text{Arctg} \frac{Y+B/2}{X} - \text{Arctg} \frac{Y-B/2}{X} \right) \quad (32)$$

$$v(X,Y) = -\frac{U_m}{2\pi} \ln \frac{X^2 + \left(Y + \frac{B}{2}\right)^2}{X^2 + \left(Y - \frac{B}{2}\right)^2} \quad (33)$$

et pour la vitesse axiale :

$$\frac{V}{U_m} = 1 - \frac{2}{\pi} \text{Arctg} \frac{2X}{B} \quad (34)$$

Ces trois dernières formules peuvent être établies directement par l'étude de l'écoulement plan, en passant par le calcul des fonctions potentiel des vitesses et fonction de courant comme l'a fait Dkral [13] (fig. 11), ou par utilisation des potentiels complexes des écoulements.

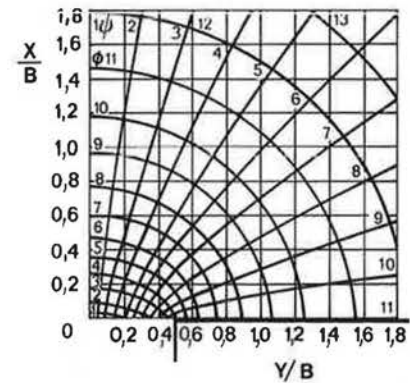


Fig. 11. Lignes de courant et équipotentielles théoriques pour une fente d'aspiration infiniment longue avec collerette infinie, d'après Dkral [13]. B : largeur de la fente.

1.3. Influence d'obstacles plans

L'influence d'obstacles plans (infinis, ou en pratique très grands par rapport à l'ouverture) peut être calculée théoriquement par la méthode des images. Quelques exemples d'application sont présentés par Dallavalle [10], Pavlov et Pocokhine [37], Pozin [38, 39] et Garrison [27].

Ainsi par exemple, selon cette théorie, le champ des vitesses induites en présence d'un plan limitant perpendiculaire à l'axe est identique à celui de deux ouvertures se faisant face (l'ouverture réelle et son image au travers du plan). De même, une ouverture rectangulaire appuyée sur un plan parallèle à son axe induit le même champ des vitesses que l'ouverture libre équivalente obtenue en complétant l'ouverture réelle par son image au travers du plan, de surface $S_{ie} = 2S$, aspirant un débit $Q_{ie} = 2Q$, et dont les caractéristiques sont précisées au tableau I, avec les notations de la figure 12.

TABLEAU I

Caractéristiques de l'ouverture libre équivalente (indices « le ») à une ouverture rectangulaire reposant sur un plan infini d'après la théorie des images

	$0 < \Lambda/H \leq 1$	$1 \leq \Lambda/H \leq 2$	$2 \leq \Lambda/H$
A	H	Λ	Λ
B	Λ	H	H
A_{ie}	2H	2H	Λ
B_{ie}	Λ	Λ	2H
A_{ie}/B_{ie}	2A/B	2B/A	A/2B
Q_{ie}	2Q	2Q	2Q

1.4. Cuves de traitement

L'analyse théorique des champs de vitesse au voisinage de cuves de traitement a été conduite en écoulement bidimensionnel par Haase [29].

Plus intéressante est l'approche de Csanády et Kiss [7], car elle semble moins éloignée des cuves réelles. Les écoulements au voisinage des cuves sont considérés comme des écoule-

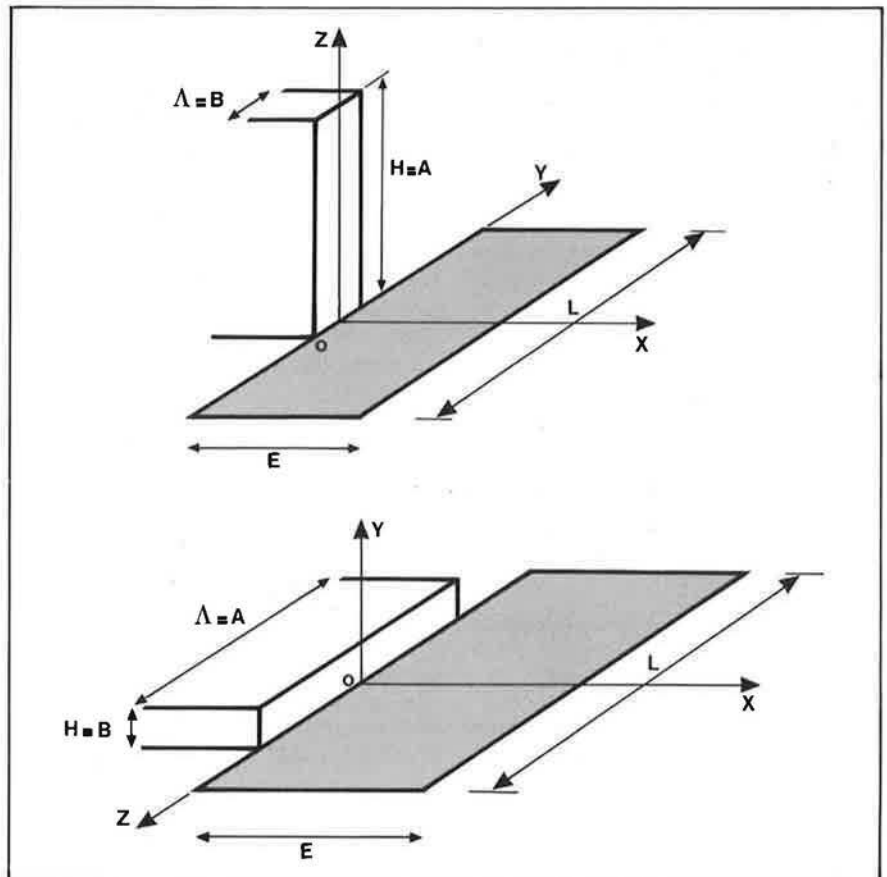


Fig. 12. Ouvertures rectangulaires reposant sur un plan.

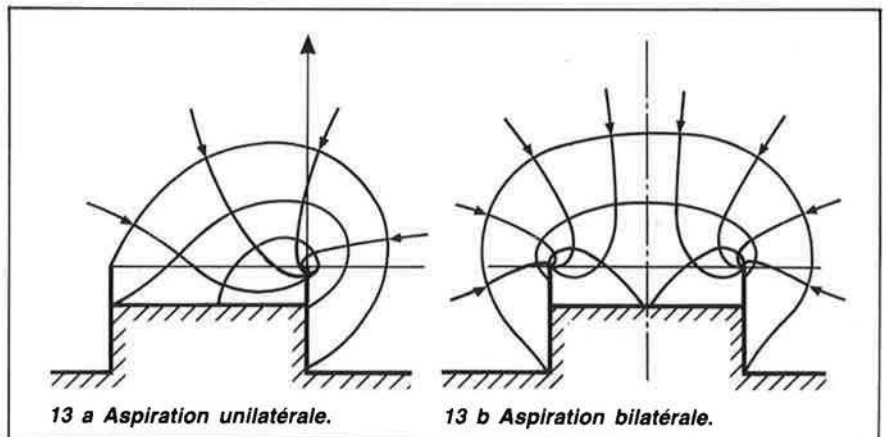


Fig. 13. Équipotielles et lignes de courant autour de cuves de traitement, dans un plan normal aux fentes, d'après Csanády et Kiss [7].

ments tridimensionnels à potentiel des vitesses, les fentes d'aspiration étant assimilées à des lignes puits de longueur finie. Les auteurs forment sept modèles d'écoulement à partir d'une ligne ou de deux lignes d'aspiration parallèles de longueur finie, et de plusieurs conditions d'environnement, mais ne donnent pas le détail des calculs. La figure 13 présente deux exemples d'écoulements analysés.

2. ÉTUDES EXPÉRIMENTALES

2.1. Présentation et résultats généraux

Les études expérimentales sur les champs de vitesse au voisinage d'ouvertures d'aspiration localisée ont

porté sur des ouvertures de forme et de dimensions très variées, et ont été effectuées dans des conditions expérimentales très diverses.

Les techniques utilisées par les différents auteurs pour les mesures de vitesse d'air à l'extérieur des ouvertures sont indiquées au tableau II. Pour le calcul de la vitesse moyenne dans l'ouverture U_m à partir du débit aspiré, le plus souvent un diaphragme ou un tube de Venturi est inséré dans la conduite reliant l'ouverture au ventilateur.

Les résultats de mesures sont généralement présentés sous forme :

– de tracés des contours d'égal vitesse dans les plans de symétrie du dispositif de captage ;

– de courbes donnant la décroissance de la vitesse axiale en fonction de la distance au plan de l'ouverture ;

– de formules empiriques de régression rendant compte de cette décroissance.

Un résultat fondamental vérifié expérimentalement par de nombreux auteurs [2, 8, 15, 22, 34, 40, 43] est que pour des ouvertures géométriquement semblables, les contours d'égal vitesse sont identiques lorsqu'ils sont tracés en coordonnées adimensionnelles rapportées à une dimension caractéristique de l'ouverture (diamètre D , ou largeur B , ou diamètre hydraulique D_h , ou diamètre équivalent en aire D_{eq} , ou racine carrée de l'aire de l'ouverture \sqrt{S}), et que les vitesses sont rapportées à la vitesse débitante dans l'ouverture, U_m . Ainsi, en particulier, la vitesse réduite $J = V(X,Y,Z)/U_m$ induite en un point donné au voisinage d'une ouverture donnée est indépendante du débit d'air aspiré et du nombre de Reynolds.

Les mesures de la vitesse d'air V_o au centre des ouvertures donnent au contraire des résultats très différents selon l'auteur et les ouvertures étudiées (tableau III) : des valeurs de V_o / U_m variant de 0,9 à 1,7 ont été rapportées. Ces différences sont peut-être dues en partie à la pièce de transition entre l'ouverture et le conduit d'aspiration, dont les caractéristiques ne sont pas toujours précisées et dont l'influence sur l'ensemble du champ de vitesse est discutée ci-dessous.

Ainsi, pour Dallavalle et Hatch [8], la forme de la pièce de transition n'a pas

TABLEAU II

Techniques utilisées pour la mesure des vitesses d'air devant des ouvertures d'aspiration par les différents auteurs

Auteurs	Moyens de mesure	Vitesse minimale mesurable (m/s)
Dallavalle et Hatch [8]	tube de Pitot modifié	0,5
Dallavalle [9, 10]	électro-anémomètre thermomètre chauffé (Yaglou) n.p. thermomètre chauffé tube de Pitot type Prandtl tube de Pitot modifié	0,15
Pruzner [40]		0,12
Silverman [42, 43, 44]		n.p.
Koop [34]		n.p.
Brandt et al. [3]		n.p.
Thomas [46]	tube de Pitot modifié	n.p.
Clain et al. [6]	n.p.	n.p.
Baturin [2]	n.p.	n.p.
Engels et Willert [14]	n.p.	n.p.
Kaslow et Emrich [33]	traçage par gouttelettes d'huile, puis traitement d'image	n.p.
Glinski [28]	anémomètre thermique	n.p.
Garrison et Byers [23, 24] ; Garrison [22]	tube de pression statique	6,5
Fletcher [15, 16]	anémomètre à fil chaud à température constante	n.p.
Fletcher et Johnson [18]	sonde omnidirectionnelle à film chaud	n.p.
Kuzmina et Tyaglo [35]	n.p.	n.p.

n.p. = non précisé.

TABLEAU III

Vitesses mesurées au centre des ouvertures (sans collerette)

Auteurs	Ouvertures	γ ou γ_A (°)	$\sqrt{S/s}$	$\frac{V_o}{U_m}$
Dallavalle et Hatch [8]	circulaires	n.p.	0,5 à 2	0,9 à 1,2
Pruzner [40]	circulaires ou carrées	n.p.	n.p.	0,95
Pruzner [40]	rectangulaires	n.p.	n.p.	1,0
Silverman [43]	circulaires	n.p.	n.p.	1,5 à 2
Silverman [44]	fentes	57 à 77	0,6 à 1,5	1,5
Baturin [2]	rectangulaires	50 à 63	3 à 5,4	1,0 à 1,1
Baturin [2]	carrées	88 à 95	3,1 à 6,3	1,6 à 1,7
Garrison [22]	circulaires et rectangulaires	0	1	1,07 à 1,08
Garrison [22]	circulaires	90	3	1,71
Fletcher [15]	carrées	n.p.	n.p.	1,075

n.p. : non précisé

d'influence sur les contours d'égale vitesse : les valeurs mesurées restent inchangées devant une ouverture circulaire lorsque l'angle du convergent γ passe de 0° à 37° ($D/d = 2$), ainsi que devant une ouverture rectangulaire lorsque γ_A est égal à 0° , 29° ou 60° ($\sqrt{S/s} = 1,6$). Koop [34] arrive à une conclusion identique pour des angles de transition γ variant de 0° à 90° .

Au contraire, pour Baturin [2], la vitesse axiale induite devant des ouvertures carrées augmente dans la zone proche de l'ouverture ($X \leq 0,5 D_h$) lorsque l'angle de transition γ_A passe de 60° à 90° (pour $\sqrt{S/s} = 3$ à $6,3$). En particulier, V_o/U_m passe de 1,05 à 1,65 environ. Cette augmentation est due à une répartition moins uniforme des vitesses dans le plan de l'ouverture et n'est plus sensible pour les grandes distances à ce dernier. Les mesures de vitesse axiale de Garrison [22] devant des ouvertures circulaires fournissent des résultats très voisins : V_o/U_m passe de 1,08 pour $\gamma = 0^\circ$, à 1,71 pour $\gamma = 90^\circ$ ($D/d = 3$), soit une augmentation de 58 %. Cette augmentation est encore de 16 % pour $X = D/3$.

Baturin [2] et Garrison [22] ont par ailleurs montré que pour des ouvertures rectangulaires ($A/B = 1$ à 4), l'addition d'une « jupe » de longueur Γ_o prolongeant le convergent (fig. 5) ne modifiait pas les vitesses axiales induites, pour Γ_o/B variant de 0 à 3.

2.2. Ouvertures libres sans collerette

Le tableau IV donne les caractéristiques principales des ouvertures libres sans collerette sur lesquelles des mesures de vitesses d'air induites ont été effectuées.

La majeure partie des résultats publiés concerne la mesure des vitesses d'air induites le long de l'axe OX perpendiculaire à l'ouverture en son centre, qui en l'absence d'obstacles et de courants d'air est une ligne de courant. Les courbes obtenues sont ensuite ajustées par les différents auteurs (sauf Baturin [2]) à des formules de régression empiriques. Les différentes formules existantes sont rassemblées au tableau V pour les ouvertures circulaires libres sans collerette et aux tableaux VI et VII pour les ouvertures rectangulaires libres sans collerette.

TABLEAU IV

Ouvertures libres sans collerette étudiées

Références	Ouvertures circulaires			Ouvertures rectangulaires			
	nombre	S (cm ²)	X _{max}	nombre	A/B	S (cm ²)	X _{max}
[8, 9, 10]	5	81 à 1 297	1,5 D	22	1 à 3	103 à 3 135	1,6 B
[40]	n.p.	n.p.	1 D	n.p.	1 à 80	n.p.	1,2 D _h
[43, 44]	8	20,3 à 2 027	4,4 D	6	5 à 39,5	63,7 à 387	8 B à 20 B
[34]	n.p.	20 à 165	2,2 D	n.p.	n.p.	n.p.	2,2 D _{eq}
[3]	6	81 à 3 694	2 D	3	1 à 4	1 561 à 1 652	1,15 \sqrt{S}
[6]	1	400	0,25 D	3	1 à 12	400	0,25 D _h
[2]	4	78,5 à 707	1,8 D	6	1 à 4	3 600 à 15 625	0,9 D _h
[14]	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.
[33]	1	0,126	1,35 D	0	—	—	—
[22, 23, 24]	5	1,3 à 11,4	1,5 D	7	1 à 10	6,45	1,5 B à 3,5 B
[15, 18]	0	—	—	n.p.	1 à 16	25 à 900	3 \sqrt{S}

n.p. : non précisé.

X_{max} : distance maximale à laquelle des mesures de vitesse d'air sont rapportées (sur tout ou partie des ouvertures étudiées).

Les limites d'utilisation de ces formules sont rarement précisées de façon complète. Les éléments disponibles sont toutefois indiqués aux tableaux V et VI.

L'exploration du champ des vitesses en dehors de l'axe de l'ouverture est plus délicate (la direction du vecteur vitesse n'étant plus connue a priori) et plus laborieuse (grand nombre de points de mesure). Aussi, elle n'a été effectuée que par un nombre restreint d'auteurs (tableau VIII). Les mesures ont été limitées aux plans de symétrie (XOY et XOZ) de l'ouverture. Elles sont présentées sous forme de contours d'égale vitesse V/U_m ou V/V_o dans ces plans de symétrie, sauf pour Kaslow et Emrich [33] : ces derniers utilisent une technique expérimentale qui permet la mesure en tout point d'un maillage des deux composantes du vecteur vitesse, mais qui est limitée à des ouvertures de très petite dimension ($D = 4$ mm). Une modélisation empirique des contours d'égale vitesse devant les ouvertures circulaires sans collerette a été proposée par Röthele [41] à partir des résultats de Dallavalle [9, 10].

2.3. Ouvertures libres avec collerette

Les mesures de vitesse d'air effectuées sur l'axe d'ouvertures libres avec collerette ont donné lieu à l'éta-

blissement de formules de régression expérimentales qui sont rassemblées au tableau IX pour les ouvertures circulaires et aux tableaux X et XI pour les ouvertures rectangulaires. Les limites d'utilisation de ces formules (lorsqu'elles sont précisées) sont également indiquées dans ces tableaux.

Les contours d'égale vitesse dans les plans de symétrie d'ouvertures d'aspiration libres avec collerette ont été établis par quelques auteurs, pour les ouvertures précisées au tableau XII.

Toutefois, pour chaque ouverture, les résultats précédents n'ont été établis que pour des valeurs fixées de la largeur de collerette C. L'étude systématique de l'influence de ce paramètre a été menée par Fletcher [16] sur des ouvertures rectangulaires pour trois valeurs de A/B : 1, 4 et 16, et pour C/\sqrt{S} variant de 0 à 2. Les mesures (fig. 14) montrent que l'addition d'une collerette apporte un accroissement de la vitesse axiale d'autant plus grand que X/\sqrt{S} et A/B sont élevés, cet accroissement pouvant atteindre 55 % et plus. Une augmentation de C/\sqrt{S} au-delà de 1 n'amène plus que des accroissements faibles des vitesses axiales induites, dans le domaine étudié.

2.4. Influence d'un plan limitant parallèle à l'axe de l'ouverture

Les mesures effectuées sur des ouvertures d'aspiration en présence d'un

TABLEAU V

**Formules expérimentales pour le calcul de la vitesse axiale
induite devant des ouvertures circulaires libres sans colerette**

Auteurs	$V(X)/U_m$	N°	Domaine d'application Remarques
Dallavalle et Hatch [8]	$\frac{1}{1 + 12,1 X^{1,91} S^{-1,04}}$	(35)	X et \sqrt{S} en inches 4 in $\leq D \leq 16$ in 0 $\leq X/D \leq 1,5$; $\gamma \leq 60^\circ$
	$\frac{1}{1 + 6,49 X^{1,91} S^{-1,04}}$	(36)	conversion de la formule précédente en unités S.I.
Dallavalle [10]	$\frac{1}{1 + 10 X^2/S}$	(37)	idem (35) et (36)
Pruzner [40]	$\frac{0,95}{1 + 1,25 (4 X/D)^{1,4}}$	(38)	0 $\leq X/D \leq 0,5$ γ : n.p.
	$\frac{0,95}{1 + (4 X/D)^{1,7}}$	(39)	0,5 < X/D ≤ 1 γ : n.p.
Silverman [43]	$0,88 (X/\sqrt{S})^{0,4} - 0,65$	(40)	0,05 $\leq X/\sqrt{S} \leq 2$ X $\geq 25,4$ mm ; γ : n.p. 50,8 mm $\leq D \leq 508$ mm
	$0,17 \left(\frac{X}{\sqrt{S}} \right)^{-1,5}$	(41)	0,5 $\leq X/\sqrt{S} \leq 3$ X $\geq 25,4$ mm ; γ : n.p. 50,8 mm $\leq D \leq 508$ mm
	$\frac{1}{1 + 4,45 X^2/S}$	(42)	idem (41)
Koop [34]	$\exp(-3,2 X/D) \text{ (*)}$	(43)	0 $\leq X/D \leq 2,2$ 0° $\leq \gamma \leq 90^\circ$
Brandt et al. [3]	$\frac{1}{1 + 9,35 X^{2,03}/S}$	(44)	X et \sqrt{S} en feet 4 in $\leq D \leq 27$ in 2 in $\leq X \leq 18$ in 0° $\leq \gamma \leq 58^\circ$
	$\frac{1}{1 + 9,68 X^{2,03}/S}$	(45)	conversion de la formule précédente en unités S.I.
Engels et Willert [14]	$\frac{1}{1 + (4 X/D)^{1,6}}$	(46)	0 $\leq X/D \leq 0,5$ γ : n.p.
	$\frac{1}{1 + (4 X/D)^{1,7}}$	(47)	0,5 < X/D $\leq 3,5$ γ : n.p.
Garrison et Byers [23] Garrison [22]	$1,1 (0,06)^{X/D}$	(48)	0 $\leq X/D < 0,5$; $\gamma = 0^\circ$ 0,025 $\leq \tau/D \leq 0,25$
	$0,08 (X/D)^{-1,7}$	(49)	0,5 $\leq X/D \leq 1,5$; $\gamma = 0^\circ$ 0,025 $\leq \tau/D \leq 0,25$
	$1,62 (1 + 3 X/D)^{-1,7}$	(50)	0 $\leq X/D \leq 1/3$ $\gamma = 90^\circ$; S/s = 9

n.p. = non précisé.

(*) note : la formule de Koop fournit en fait la valeur de $V(X)/V_0$. La relation entre V_0 et U_m n'est pas donnée.

TABLEAU VI

**Formules expérimentales pour le calcul de la vitesse axiale
Induite devant des ouvertures rectangulaires libres sans collerette**

Auteurs	$V(X)/U_m$	N°	Domaine d'application Remarques
Dallavalle et Hatch [8]	$\frac{1}{1 + 12 [1 + 0,259 (K-1)^{1,104}] X^{1,91} S^{-1,04}}$	(51)	X et \sqrt{S} en inches $1 \leq K \leq 3$; $\gamma_A \leq 60^\circ$; S/s : n.p. $16 \text{ in}^2 \leq S \leq 486 \text{ in}^2$; X : n.p.
	$\frac{1}{1 + 6,45 [1 + 0,259 (K-1)^{1,104}] X^{1,91} S^{-1,04}}$	(52)	conversion de la formule précédente en unités S.I.
Dallavalle [10]	$\frac{1}{1 + 10 X^2/S}$	(53)	idem (51) et (52)
Pruzner [40]	$\frac{0,95}{1 + 1,25 (4 X/D_h)^{1,4}}$	(54)	$A/B = 1$; $0 \leq X/D_h \leq 0,5$
	$\frac{0,95}{1 + (4 X/D_h)^{1,7}}$	(55)	$A/B = 1$; $0,5 < X/D_h \leq 1$
	$\frac{1}{1 + 1,25 (4 X/D_h)^{1,4}}$	(56)	$2 \leq A/B \leq 10$; $0 \leq X/D_h \leq 0,5$
	$\frac{1}{1 + (4 X/D_h)^{1,7}}$	(57)	$2 \leq A/B \leq 10$; $0,5 < X/D_h \leq 1$
Silverman [44]	$\frac{V}{U_m} = 0,165 \frac{B + B_s}{X}$ $B_s = 1 \text{ in} = 25,4 \text{ mm}$	(58)	$5 \leq A/B \leq 39,5$; γ_A : n.p. $12,7 \text{ mm} \leq B \leq 50,8 \text{ mm}$ $25,4 \text{ mm} \leq X$; X_{\max} : n.p.
Koop [34]	$\exp(-3,2 X/D_{eq}) (*)$	(59)	$0 \leq X/D_{eq} \leq 2,2$ $A/B, \gamma_A, S/s$: n.p.
Brandt et al. [3]	$\frac{1}{1 + 9,35 X^{2,03} S^{-1}}$	(60)	X et \sqrt{S} en feet $1 \leq A/B \leq 4$; $0,125 \leq X/\sqrt{S} \leq 1,15$ $45^\circ \leq \gamma_A \leq 107^\circ$; S/s = 5
	$\frac{1}{1 + 9,68 X^{2,03} S^{-1}}$	(61)	conversion de la formule précédente en unités S.I.
Engels et Willert [14]	$\frac{1}{1 + (4 X/D_h)^{1,6}}$	(62)	A/B : n.p.; $0 \leq X/D_h \leq 0,5$ γ_A : n.p.
	$\frac{1}{1 + (4 X/D_h)^{1,7}}$	(63)	A/B : n.p.; $0,5 < X/D_h \leq 3,5$ γ_A : n.p.
Garrison et Byers [24] Garrison [22]	$1,07 (k_{G1})^{X/B}$	(64)	$0 \leq X/B < 0,5$
	$k_{G2} (X/B)^{k_{G3}}$	(65)	$0,5 \leq X/B < 1$
	$k_{G2} (X/B)^{k_{G4}}$	(66)	$1 \leq X/B \leq k_{G5}$ Pour ces trois formules : $1 \leq A/B \leq 10$; $\Gamma_o = \sqrt{S}$ $\tau = 0,125 \sqrt{S}$
Fletcher [15], [17]	$\frac{1}{0,93 + 8,58 \alpha_F^2}$	(67)	$1 \leq A/B \leq 16$ $0,05 \leq X/\sqrt{S} \leq 3$
	$\alpha_F = \frac{X}{\sqrt{S}} \left(\frac{A}{B} \right)^{\beta_F}$	(68)	$\gamma_A, S/s$: n.p.
	$\beta_F = 0,2 \left(\frac{X}{\sqrt{S}} \right)^{-1/3}$	(69)	

n.p. : non précisé.

(*) note : identique à celle du tableau V.

TABLEAU XI

Valeurs du coefficient k_D à utiliser dans la formule (82), d'après Dallavalle [10]

$\frac{B}{A}$	unités utilisées pour X et \sqrt{S}		$\frac{B}{A}$	unités utilisées pour X et \sqrt{S}	
	inches	m		inches	m
0,1	0,046	0,077	0,6	0,126	0,211
0,2	0,072	0,120	0,7	0,132	0,221
0,3	0,090	0,151	0,8	0,138	0,231
0,4	0,105	0,176	0,9	0,142	0,237
0,5	0,117	0,196	1,0	0,144	0,241

TABLEAU XII

Contours d'égale vitesse établis devant des ouvertures d'aspiration avec collerette

Ouvertures circulaires				
Auteurs	γ (°)	S/s	C/D	Mesure de la direction de V
Dallavalle [9], [10]	0	1	5/8 ?	oui
Koop [34]	0	1	2	non

Ouvertures rectangulaires			
Auteurs	A/B	C/ \sqrt{S}	Mesure de la direction de V
Dallavalle [10]	1 ; 4/3 ; 2 ; 3	0,43 à 0,63	non
Kuzmina et Tyaglo [35]	4	≥ 1	non

plan parallèle à l'axe de l'ouverture ont porté uniquement sur des ouvertures rectangulaires et reposant directement sur le plan adjacent (notations utilisées : voir fig. 12).

Le tracé des contours d'égale vitesse est effectué par Pruzner [40] pour Δ/H égal à 3 et 10 (avec $L = A$) et par Fletcher et Johnson [18] pour Δ/H égal à 1 ; 4 et 16 (L non précisé).

Les courbes de décroissance de la vitesse induite le long de l'axe passant par le centre de l'ouverture ($Y = H/2, Z = 0$) sont données par Pruzner [40] pour $\Delta/H = 3$ et 10. Brandt et al. [3] établissent pour cette décroissance la formule de régression suivante :

$$\frac{V}{U_m} = \frac{1}{1 + 5,3 X^{1,67}/S} \quad (89)$$

Domaine d'application : X et \sqrt{S} en feet ; S = 1,75 square foot ; $\Delta/H = 3,94$; $X/\sqrt{S} = 0,126$ à 1,13, L et E : non précisés.

Conversion en unités S.I. :

$$\frac{V}{U_m} = \frac{1}{1 + 3,58 X^{1,67}/S} \quad (90)$$

Fletcher et Johnson [18] et Fletcher [20] donnent pour Δ/H variant de 16 à 1/16 et pour deux distances au plan de l'ouverture les valeurs mesurées du rapport Q_p/Q où Q_p est le débit d'aspiration d'une ouverture reposant sur un plan qui, pour une distance donnée, induit une vitesse d'air près de ce plan égale à la vitesse d'air induite à la même distance le long de l'axe de la même ouverture librement

suspendue et ayant un débit Q. Ces résultats ont été discutés par Dewell [11].

Par ailleurs, en appliquant la théorie des images aux résultats empiriques de Dallavalle sur les ouvertures libres (formule (53)), Hemeon [31] obtient la formule suivante pour la vitesse induite le long de l'axe OX :

$$\frac{V}{U_m} = \frac{S}{5X^2 + S} \quad (91)$$

2.5. Influence d'un plan limitant perpendiculaire à l'axe de l'ouverture

La présence d'un plan limitant perpendiculaire à l'axe de l'ouverture concerne en particulier les hottes en dôme placées au-dessus de processus polluants. Les notations utilisées sont celles de la figure 15.

A partir d'« études de terrain », Dallavalle [10] propose la formule suivante :

$$Q = 1,4 L_p EV \quad (92)$$

où L_p est le périmètre de la zone polluante placée sous la hotte, zone dont les dimensions ne doivent pas excéder les dimensions de l'ouverture, et V la vitesse induite sur les bords de cette zone. Les limites d'application de la formule ne sont pas précisées.

Le tracé des contours d'égale vitesse dans les plans de symétrie de l'ouverture est donné par Thomas [46] dans les configurations suivantes :

- ouvertures rondes avec $E/D = 3/13$; 6/13 et 9/13 ;
- ouvertures carrées avec $E/B = 1/4$; 1/2 et 3/4 ;
- ouvertures rectangulaires ($A/B = 2$) avec $E/B = 1/4$; 1/2 et 3/4.

Dans le cas des ouvertures circulaires, il constate que lorsque le plan limitant est loin de l'ouverture ($E/D = 9/13$), il y a peu de différences entre les contours obtenus avec ou sans obstruction.

Thomas [46] propose de plus dans le cas des ouvertures circulaires ou carrées la formule de régression suivante donnant la vitesse d'air V au point { X = E ; Y = B/2 ou D/2 ; Z = 0 } de la figure 15 :

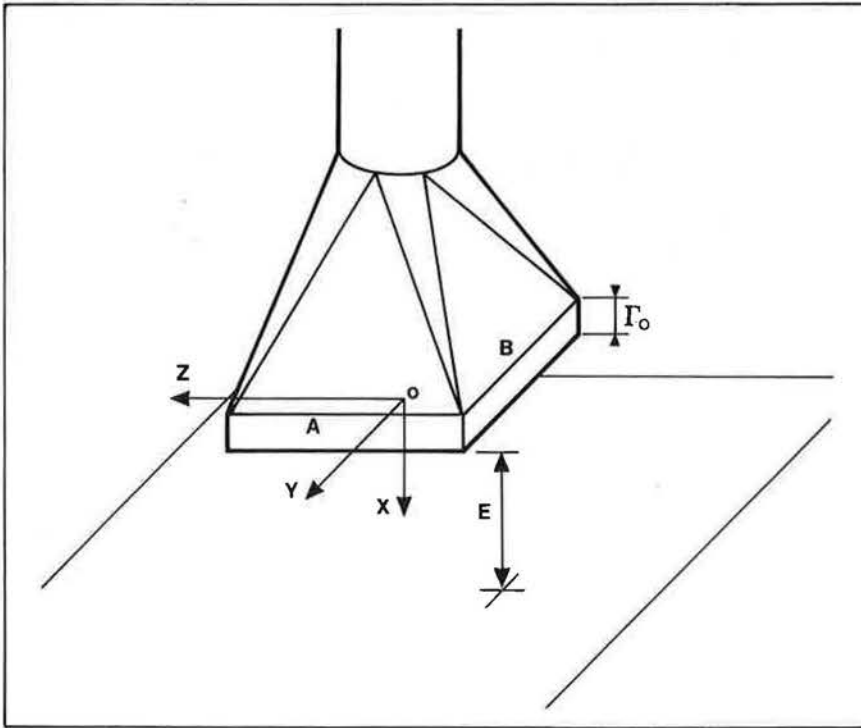


Fig. 15. Plan limitant perpendiculaire à l'axe de l'ouverture.

$$\frac{V}{U_m} = \frac{1}{14,5} \frac{S}{E^{1,81} D_h^{0,19}} \quad (93)$$

Domaine d'application : ouvertures circulaires ou carrées;
 $0,23 \leq E/D_h \leq 0,75$.

2.6. Cuves de traitement

Des mesures de vitesse d'air sur des cuves de traitement ont été effectuées par Silverman [42] dans le cas de cuves non chauffées munies d'une fente d'aspiration latérale unique disposée en-dessous du bord de la cuve (notations de la figure 16). Les vitesses d'air étaient mesurées aux angles de la cuve opposés à la fente.

Dans le cas des cuves avec écran arrière, Silverman [42] établit la formule de régression suivante :

$$Q = 1,9 \left(\frac{E}{L}\right)^{0,3} \left(\frac{M}{M_0}\right)^{0,15} ELV \quad (94)$$

Domaine d'application : $C = E$; $\alpha = 0^\circ$; $M_0 = 203,2$ mm; $0,17 \leq E/L \leq 2$; $0,25 \leq M/M_0 \leq 1,25$.

Cette formule est indépendante de la largeur de la fente dans le domaine : $12,7$ mm $\leq B \leq 50,8$ mm.

L'auteur donne également des relations permettant de corriger la formule ci-dessus lorsque la hauteur de l'écran arrière C ou l'inclinaison α de cet écran varient.

Dans le cas des cuves sans écran arrière, la formule suivante est obtenue :

$$Q = 2,3 \left(\frac{E}{L}\right)^{0,15} ELV \quad (95)$$

Domaine d'application : $C = 0$; $B = 50,8$ mm; $0,25 \leq E/L \leq 2$.

Cette formule est indépendante de la hauteur du liquide sous le bord inférieur de la fente M dans le domaine $50,8$ mm $\leq M \leq 203,2$ mm, mais dépend fortement de la largeur de la fente B.

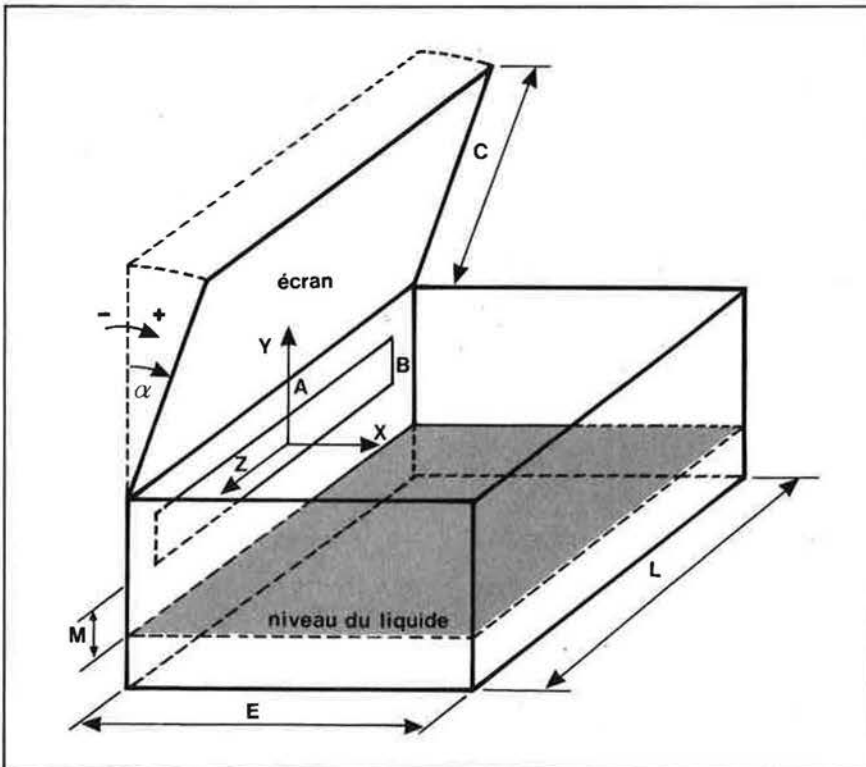


Fig. 16. Cuve de traitement avec fente d'aspiration située sous le bord de la cuve, et écran arrière.

3. DISCUSSION

La discussion des résultats présentés dans les deux chapitres précédents sera limitée ici à la comparaison des formules de calcul des vitesses induites le long de l'axe des ouvertures libres, avec ou sans collerette.

Dans ce domaine, le manuel de ventilation industrielle de l'ACGIH [1], que l'on peut considérer comme représentatif de la pratique courante actuelle [5], recommande un certain nombre de formules, qui sont rassemblées au tableau XIII. L'ACGIH fait référence pour ces formules aux travaux de Dallavalle [10] et de Silverman [44]; en fait, seules les formules (96) et (97) figurent dans les publications citées.

Pour effectuer la comparaison, douze classes d'ouvertures ont été choisies :

- ouvertures circulaires libres sans collerette;
- ouvertures rectangulaires libres sans collerette, de rapport d'aspect K égal à 1 ; 2 ; 4 ; 10 et 16;
- ouvertures circulaires libres avec collerette;

- ouvertures rectangulaires libres avec collerette, de rapport d'aspect K égal à 1 ; 2 ; 4 ; 10 et 16.

Pour chacune de ces classes, on a tracé les courbes donnant la décroissance de la vitesse axiale réduite $J(X) = V(X)/U_m$ en fonction de la distance adimensionnelle X/\sqrt{S} , dans l'intervalle X/\sqrt{S} égal 0 à 1,6 (fig. 17 à 28); les symboles t et e rappellent l'origine théorique ou expérimentale des courbes présentées. Ces figures font apparaître une dispersion assez importante entre les vitesses axiales calculées selon les différentes formules pour une même distance au plan frontal de l'ouverture.

Toutefois, pour chaque classe d'ouvertures, un certain nombre de courbes restent assez voisines tout au long de l'intervalle de variation de X/\sqrt{S} : par exemple, dans le cas des ouvertures circulaires libres sans collerette les courbes données par Engels et Willert [14], ACGIH [1] et Garrison et Byers ($\gamma = 0^\circ$) [23]. On fera l'hypothèse que la valeur exacte de la vitesse axiale est contenue dans le faisceau formé par ces courbes.

Dans le cas des ouvertures circulaires sans collerette, la formule simplifiée de Dallavalle [10] reprise par l'ACGIH [1] peut être choisie parmi les trois formules citées plus haut, eu égard à sa forme mathématique simple.

Dans le cas des ouvertures rectangulaires libres sans collerette, seules les courbes de décroissance de la vitesse axiale proposées par Garrison [24] et par Fletcher [15] restent, lorsque le rapport des côtés de l'ouverture K varie, à l'intérieur des différents faisceaux supposés contenir la vitesse réelle. La formule de Fletcher [15] peut être préférée, car elle présente les avantages suivants :

- elle est utilisable dans des intervalles plus larges en rapport des côtés ($K = 1$ à 16) et en distance à l'ouverture ($X/\sqrt{S} = 0,05$ à 3);
- elle rend compte de façon continue et synthétique de l'influence de K.

Les formules (97) et (98), recommandées par l'ACGIH, donnent des vitesses trop élevées, dès que K est plus grand que 2.

TABLEAU XIII

**Formules recommandées par l'ACGIH [1]
pour le calcul des vitesses axiales devant des ouvertures libres**

Ouvertures	$V(X)/U_m$	N°	Domaine d'application	Notes
Circulaires sans collerette	$\frac{1}{1 + 10 X^2/S}$	(96)	$X \leq 1,5 D$	D
Rectangulaires sans collerette	$\frac{1}{1 + 10 X^2/S}$	(97)	$A/B \leq 5$ $X : n.p.$	D
Rectangulaires sans collerette	$\frac{B}{3,7 X}$	(98)	$A/B \geq 5$ $X : n.p.$	S
Circulaires avec collerette	$\frac{4}{3 (1 + 10 X^2/S)}$	(99)	$X : n.p. ; C : n.p.$	D
Rectangulaires avec collerette	$\frac{4}{3 (1 + 10 X^2/S)}$	(100)	$A/B \leq 5$ $X : n.p. ; C : n.p.$	D
Rectangulaires avec collerette	$\frac{B}{2,8 X}$	(101)	$A/B \geq 5$ $X : n.p. ; C : n.p.$	S

Notes : D : référence à Dallavalle [10]
S : référence à Silverman [44]

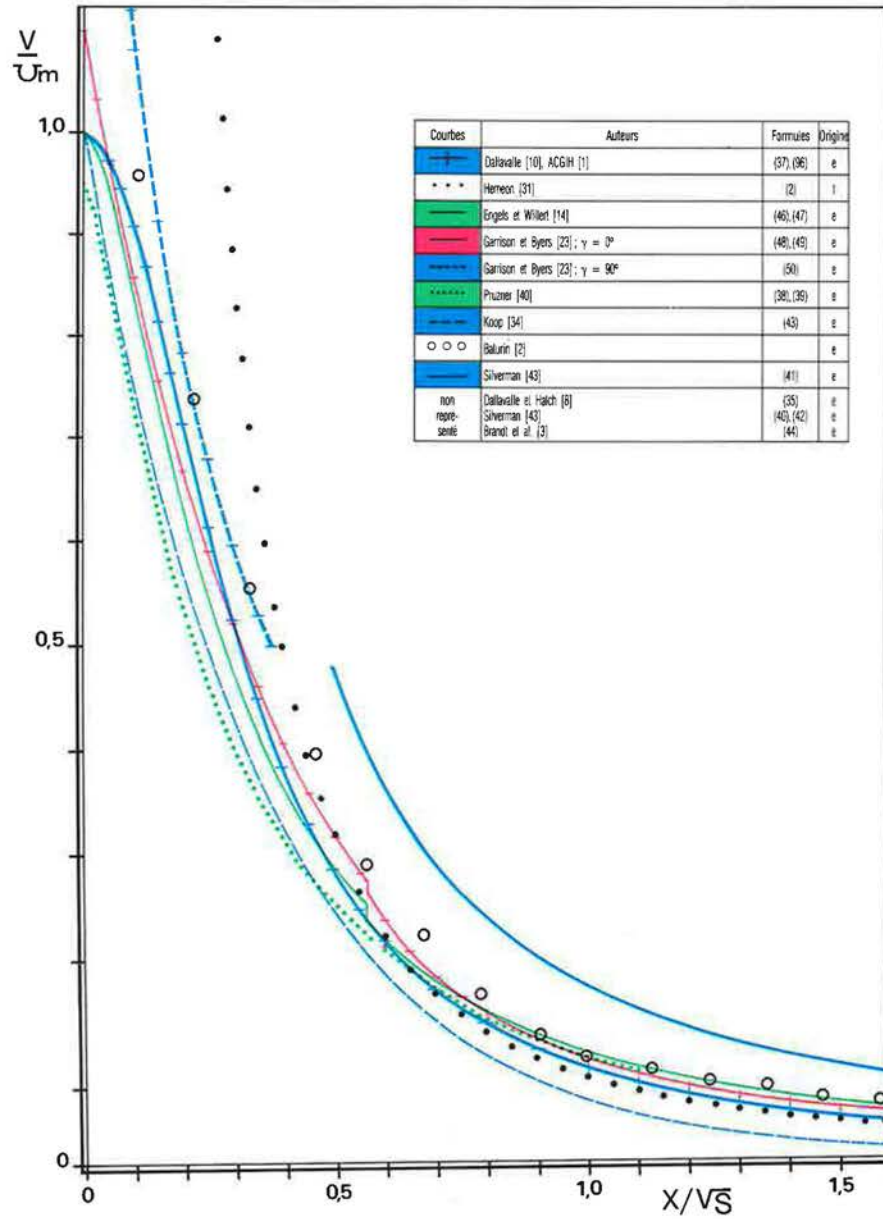


Fig. 17. Vitesse axiale induite devant une ouverture circulaire libre sans collerette. X: distance le long de l'axe; V/U_m : vitesse axiale réduite; S: aire de l'ouverture.

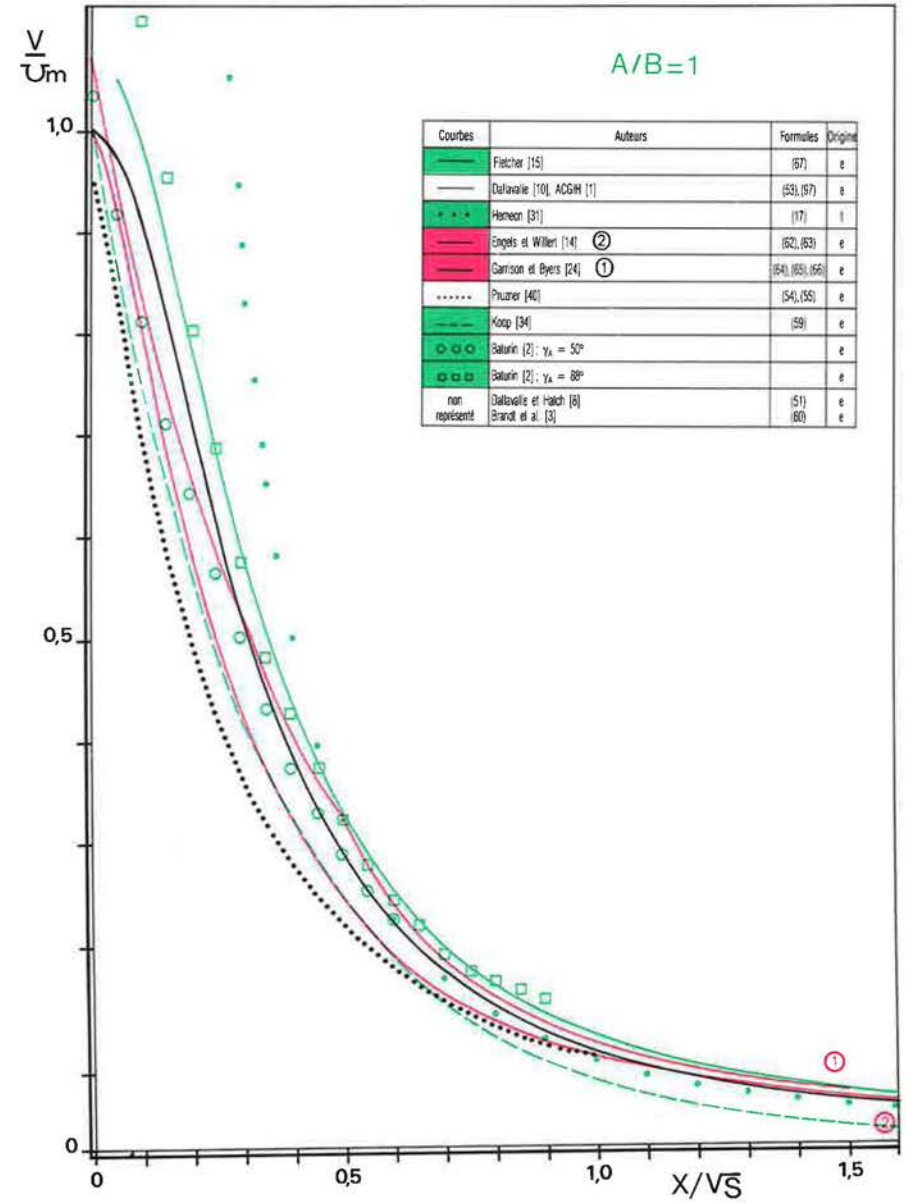


Fig. 18. Vitesse axiale induite devant une ouverture rectangulaire libre sans collerette, de rapport d'aspect $A/B = 1$.

18. FLETCHER B., JOHNSON A.E. – Velocity profiles around hoods and slots and the effects of an adjacent plane. *Ann. Occup. Hyg.*, 1982, 25, n° 4, pp. 365-372.
19. FLETCHER B. – In « The Forum ». *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1983, 44, n° 5, B17.
20. FLETCHER B. – Author's reply (to P. DEWELL). *Ann. Occup. Hyg.*, 1985, 29, n° 1, pp. 119-121.
21. FLYNN M.R., ELLENBECKER M.J. – The potential flow solution for air flow into a flanged circular hood. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1985, 46, n° 6, pp. 318-322.
22. GARRISON R.P. – Nozzle performance and design for high-velocity/low-volume exhaust ventilation – Doctoral Dissertation. Ann Arbor, Université du Michigan, 1977.
23. GARRISON R.P., BYERS D.H. – Static pressure and velocity characteristics of circular nozzles for high velocity/low volume exhaust ventilation. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1980, 41, n° 11, pp. 803-811.
24. GARRISON R.P., BYERS D.H. – Static pressure, velocity and noise characteristics of rectangular nozzles for high velocity/low volume exhaust ventilation. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1980, 41, n° 12, pp. 855-863.
25. GARRISON R.P. – Centerline velocity gradients for plain and flanged local exhaust inlets. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1981, 42, n° 10, pp. 739-746.
26. GARRISON R.P. – Velocity calculation for local exhaust inlets. Empirical design equations. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1983, 44, n° 12, pp. 937-940.
27. GARRISON R.P. – Velocity calculation for local exhaust inlets. Graphical design concepts. *Am. Ind. Hyg. Assoc. J.*, 1983, 44, n° 12, pp. 941-947.
28. GLINSKI M. – Influence des flux perturbateurs sur l'efficacité des capots d'aspiration des installations d'aspiration localisée (en polonais). *Prace centralnego instytutu ochrony pracy*, 1978, 28, n° 96, pp. 45-60.
29. HAASE D. – Beitrag zur Absaugung von oben offenen Behältern. *Chemiker Zeitung*, 1965, 89, n° 16, pp. 559-563.
30. HAASE D. – Die Wirkung des Windes bei der Absaugung. *Staub – Reinhalt. Luft*, 1967, 27, n° 3, pp. 131-133.
31. HEMEON W.C.L. – Plant and process ventilation, 2^e éd. New-York, Industrial Press, 1963.
32. JANSSON A. – Beskrivning av luftströmning utanför cirkulära sugöppningar utan fläns. Undersökningsrapport 1985 : 36. Solna, Arbetsmarknadsstyrelsen, Forskningsavdelningen, 1985.
33. KASLOW D.E., EMRICH R.J. – Aspirating flow pattern and particle inertia effects near a blunt thickwalled tube entrance – technical report n° 23. Bethlehem, Lehigh University, Department of Physics, 1973.
34. KOOP H.A. – Staub-Saugdüsen an Schleifmaschinen. *Zeitschrift des Vereines Deutscher Ingenieure (VDI) im NSBDT*, 1944, 88, n° 1/2, pp. 21-24.
35. KUZMINA L.V., TYAGLO I.G. – Calcul du débit d'air en cas d'extraction par des orifices rectangulaires de forme allongée (en russe). In : Amélioration des conditions de travail et de la prévention – Recueil des travaux scientifiques des instituts de prévention du VCSPS. Moscou, Profizdat, 1982, pp. 43-47.
36. NIIZU Y., HAYASHI T., TSUJI K. – Contribution à l'étude de la caractéristique d'extraction et de la conception des hottes aspirantes latérales (en japonais). *Journal of the Society of Heating, Air-conditioning and Sanitary Engineers of Japan (SHASE)*, 1969, 43, n° 5, pp. 29-34.
37. PAVLOV B.M., POCOKHINE B.N. – Formules pour le calcul des vitesses d'écoulement de l'air vers des orifices d'aspiration en forme de fentes (en russe). In : Industrie et Santé – Recueil des travaux scientifiques des Instituts de prévention du VCSPS. Moscou, Profizdat, 1980, pp. 81-88.
38. POZIN G.M. – Calcul de l'influence des plans limitants sur les spectres d'aspiration (en russe). Nauchnye raboty Institutov ochrany truda VCSPS, Moscou, 1977, 105, n° 1, pp. 8-13.
39. POZIN G.M. – Détermination de l'efficacité des systèmes de ventilation par extraction à travers des orifices de faible surface (en russe). In : Amélioration des conditions de travail et de la prévention – Recueil des travaux scientifiques des Instituts de prévention du VCSPS. Moscou, Profizdat, 1982, pp. 36-42.
40. PRUZNER A.S. – Flow structure in the zone of action of suction apertures (en russe). *Otopleniye i Ventilyatsiya*, 1939, 10, n° 3, pp. 13-21.
41. ROETHELE S. – Saugwirkung von Erfassungseinrichtungen. In : Erfassungsanlagen für Luftfremde Stoffe – VDI Berichte 532. Düsseldorf, Verlag des Vereines Deutscher Ingenieure, 1985, pp. 129-158.
42. SILVERMAN L. – Fundamental factors in the design of lateral exhaust hoods for industrial tanks. *J. Ind. Hyg. Tox.*, 1941, 23, n° 5, pp. 187-195.
43. SILVERMAN L. – Centerline velocity characteristics of round openings under suction. *J. Ind. Hyg. Tox.*, 1942, 24, n° 9, pp. 259-266.
44. SILVERMAN L. – Velocity characteristics of narrow exhaust slots. *J. Ind. Hyg. Tox.*, 1942, 24, n° 9, pp. 267-276.
45. STRAUSS H.J. – Über eine Näherung zur Bestimmung von Strömungsfeldern von Absaugehauben. *Staub – Reinhalt. Luft*, 1973, 33, n° 3, pp. 142-146.
46. THOMAS F.A. – Design characteristics of canopy exhaust hoods. *Heating and Ventilating*, 1950, avril, section 1, pp. 84-89.
47. TYAGLO I.G., SHEPELEV I.A. – Ecoulement de l'air à proximité d'un orifice d'extraction (en russe). *Vodosnabzhenie i sanitarnaya tekhnika*, 1970, n° 5, pp. 24-25.

ANNEXE

Rappels sommaires de mécanique des fluides isovolumes

On considère ici les écoulements stationnaires d'un fluide isovolume, dans les deux cas particuliers suivants :

1. écoulement de révolution, d'axe OX (les notations utilisées sont celles de la figure 1) ;

2. écoulement plan, dans un plan XOY (les notations utilisées sont celles de la figure 1).

Écoulement de révolution

L'écoulement étant stationnaire et isovolume, l'équation de conservation de la masse s'écrit :

$$\operatorname{div} \vec{V} = 0 \quad (A1)$$

ce qui implique l'existence d'une fonction de courant ψ (ρ , X) telle que :

$$u_p = \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial X} \quad (A2)$$

$$u = - \frac{\rho_0}{\rho} \frac{\partial \psi}{\partial \rho} \quad (A3)$$

la longueur constante ρ_0 étant introduite uniquement pour des raisons d'homogénéité.

Si on fait l'hypothèse supplémentaire que l'écoulement est irrotationnel, il existe également une fonction potentiel des vitesses $\Phi(\rho, X)$, qui vérifie :

$$u_\rho = \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} \quad (\text{A4})$$

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial X} \quad (\text{A5})$$

Du fait du double caractère d'incompressibilité et d'irrotationnalité, la fonction potentiel des vitesses Φ est harmonique, c'est-à-dire qu'elle satisfait à l'équation de Laplace :

$$\Delta \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \Phi}{\partial \rho} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} = 0 \quad (\text{A6})$$

Ainsi par exemple, le potentiel des vitesses créé par un puits ponctuel placé à l'origine et aspirant un débit Q dans 4π stéradians est donné par :

$$\Phi = \frac{Q}{4\pi R} \quad (\text{A7})$$

Écoulement plan

L'écoulement étant stationnaire et isovolume, l'équation de conservation de la

masse implique l'existence d'une fonction de courant $\psi(X, Y)$ telle que :

$$u = \frac{\partial \psi}{\partial Y} \quad (\text{A8})$$

$$v = -\frac{\partial \psi}{\partial X} \quad (\text{A9})$$

L'hypothèse supplémentaire d'un écoulement irrotationnel implique l'existence d'un potentiel des vitesses $\Phi(X, Y)$, qui vérifie :

$$u = \frac{\partial \Phi}{\partial X} \quad (\text{A10})$$

$$v = \frac{\partial \Phi}{\partial Y} \quad (\text{A11})$$

Avec les hypothèses ci-dessus, les fonctions Φ et ψ définies pour l'écoulement plan sont harmoniques :

$$\Delta \Phi = \frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y^2} = 0 \quad (\text{A12})$$

$$\Delta \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial Y^2} = 0 \quad (\text{A13})$$

Pour la représentation des écoulements plans isovolumes et irrotationnels, il est de plus possible d'introduire le potentiel complexe des vitesses $\mathfrak{F}(z)$ défini par :

$$\mathfrak{F}(z) = \Phi(X, Y) + i\psi(X, Y) \quad (\text{A14})$$

où z est l'affixe : $z = X + iY$.

$\mathfrak{F}(z)$ est une fonction analytique de la variable complexe et sa dérivée, appelée vitesse complexe, est donnée par :

$$W(z) = \frac{d\mathfrak{F}}{dz} = u - iv \quad (\text{A15})$$

A titre d'exemple, le potentiel complexe créé par une ligne puits infinie placée sur l'axe OZ aspirant un débit par unité de longueur Q/A dans 2π radians est donné par :

$$\mathfrak{F}(z) = -\frac{Q}{2\pi A} \ln z \quad (\text{A16})$$

Les potentiels complexes peuvent en particulier être utilisés avec la transformation conforme pour calculer, à partir d'un écoulement plan connu, les caractéristiques d'un écoulement plan avec d'autres conditions aux limites.

Références

BRUN E.A., MARTINOT-LAGARDE A., MATHIEU J. - Mécanique des fluides, tome II, 1^{re} éd. Paris, Dunod, 1968. ■

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

Tiré à part du Cahier de notes documentaires, 3^e trimestre 1986, n° 124 - ND 1586 - N° CPPAP 804 AD
Directeur de la publication : D. MOYEN
ISSN 0007-9952 - ISBN 2-85599-587-6