

- Taille
- Pierre
- Ventilation
- Cabine
- Flux vertical
- Flux oblique
- Essai comparatif
- Poussière

► R. RÉGNIER, I. SUBRA, D. BÉMER,  
M.-T. LECLER, J.-M. DESSAGNE,  
INRS, Département Ingénierie des procédés

#### OPEN CABINS FOR STONE-CUTTING – COMPARISON OF VERTICAL AND "OBLIQUE" AIRFLOW EFFICIENCIES

A recent study of ventilated open cabin efficiency has revealed the superiority of vertical airflow over horizontal airflow in many configurations. These cabins perform well from a ventilation standpoint, but they can cause a number of location problems. This constraint has led manufacturers to offer a solution in which the main airflow is not vertical, but directed obliquely.

A stonecutting sector study conducted at the request of CRAM (French regional health insurance fund) Alsace-Moselle on three cabins, one vertical and two "oblique" airflow units (the latter made by two different manufacturers), shows that on average vertical airflow is more efficient than "oblique" airflow in a large number of tested situations.

The two "oblique" airflow cabins gave different results: in some situations, one cabin's performance characteristics approached those of vertical airflow cabins, whilst the other gave very scattered results, reflecting efficiencies lower than those of the other two cabins in many situations.

It would appear that for standard stone-cutting operations (cutting, grinding) "oblique" airflow is more sensitive to position and stone-cutters' machining method than vertical airflow.

- Cutting
- Stone
- Ventilation
- Cabin
- Vertical airflow
- Oblique airflow
- Comparative test
- Dust

# CABINES OUVERTES POUR LA TAILLE DE LA PIERRE

## Efficacité comparée du flux vertical et du flux « oblique »

Une étude récente concernant l'efficacité des cabines ouvertes ventilées a mis en évidence la supériorité du flux vertical sur le flux horizontal dans de nombreuses configurations. Performantes sur le plan ventilation, ces cabines peuvent poser néanmoins quelques problèmes d'implantation. Cette contrainte a incité des constructeurs à proposer une solution dans laquelle le flux principal n'est plus vertical mais s'oriente dans une direction oblique.

Une étude effectuée à la demande de la CRAM Alsace-Moselle dans le secteur de la taille de pierre sur trois cabines, une à flux vertical et deux à flux « oblique » (ces dernières provenant de deux constructeurs), montre qu'en moyenne le flux vertical est plus efficace que le flux « oblique » dans un grand nombre des situations testées.

Les deux cabines à flux « oblique » conduisent à des résultats différents : une cabine a, dans quelques situations, des performances proches de celles du flux vertical alors que l'autre présente des résultats très dispersés, traduisant dans nombre de situations des efficacités inférieures à celles des deux autres cabines.

Pour les opérations courantes de taille de pierre (découpe, ponçage), il apparaît que le flux « oblique » est plus sensible à la position et à la façon d'usiner des tailleurs de pierre que le flux vertical.

### 1. INTRODUCTION

Parmi les différents types de cabines ouvertes ventilées, le modèle mettant en œuvre un flux de ventilation vertical présente des performances qui tendent à le mettre au premier plan dans cette catégorie de dispositifs enveloppants. Cette qualité a été mise en évidence à la suite d'une étude réalisée dans le secteur de taille de la pierre dans laquelle le flux vertical était comparé au flux horizontal.

Ce dernier type de ventilation plus traditionnel est le plus représenté dans les entreprises [1].

Néanmoins, si le flux vertical constitue une solution performante quant à l'élimination du polluant, sa mise en place peut, dans certaines situations, s'avérer difficile pour plusieurs raisons : difficulté d'intégrer l'installation dans l'architecture existante des ateliers, nature du sol inappropriée (roche), coût de l'ensemble de l'opération (ventilation

et génie civil). La conception de la cabine à flux vertical occasionne en effet des travaux d'infrastructure qui ne peuvent pas toujours être réalisés et nécessitent un investissement financier important, notamment pour de petites entreprises. Ces causes multiples ont incité des constructeurs à proposer une solution intermédiaire dans laquelle le flux principal de ventilation n'est plus complètement vertical, mais est orienté dans une direction oblique, l'extraction d'air se faisant en partie basse de la paroi opposée à l'ouverture. De ce fait, la mise en place de ce type de cabines apparaît simplifiée, l'installation se trouvant au même niveau que l'atelier.

La présente étude a été effectuée à la demande de la CRAM d'Alsace-Moselle. Elle est un prolongement des précédents travaux dans le contexte identique du travail de la pierre. Son principal objectif est de mesurer l'efficacité des cabines à flux dit « oblique » et de comparer leurs performances à celles des cabines à flux vertical.

## 2. PRÉSENTATION DES ÉQUIPEMENTS TESTÉS

Les mesures ont été effectuées dans trois cabines différentes : une dotée d'un dispositif à flux vertical, identique à celui de l'étude précédente, et les deux autres d'un dispositif à flux « oblique ». Pour ces deux dernières, bien que les constructeurs soient différents, le mode de ventilation était le même ; seules quelques particularités mineures de construction les différenciaient.

Au moment des essais, les installations étaient vérifiées et disposaient de filtres neufs.

Les cabines ont été caractérisées au début de chaque campagne par des mesures de vitesses d'air, à l'aide d'anémomètres à fil chaud et de débits de ventilation par traçage gazeux (He).

### 2.1 FLUX VERTICAL

#### Description

L'installation (cf. Figure 1) constitue un ensemble indépendant. Elle comprend une cabine parallélépipédique (largeur = 6 m ; profondeur = 2,65 m ;

TABLEAU I

Vitesse d'air moyenne (72 points de mesure) dans le flux de soufflage  
Vertical airflow cabin: average air velocity (72 measuring points) in blowing airflow

Niveau de mesure	Vitesse moyenne [m.s <sup>-1</sup> ]	Ecart type [m.s <sup>-1</sup> ]	Coeff. de variation [%]
0,15 m du plafond	0,43	0,09	20
1,5 m du sol	0,41	0,07	17

TABLEAU II

Débit d'air moyen dans les deux branches du circuit de ventilation  
Vertical airflow cabin: average air flow rate in both ventilation circuit branches

Circuit		Débit théorique [m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]	Débit mesuré [m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]	Ecart type [m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]	Coeff. de variation [%]
Soufflage	2 postes	24 000	22 600	1 000	4,4
	1 poste	12 000	11 300	/	/
Extraction	1 poste	14 000	13 800	500	3,6

hauteur = 2,60 m) ouverte vers l'atelier sur toute sa largeur et une machinerie chargée de l'alimentation en air et de son traitement avant rejet. Un rideau escamotable sépare la cabine en deux zones identiques pouvant abriter chacune un poste de travail. L'air neuf est introduit via un plenum diffusant commun aux deux zones. Le flux vertical balaie la cabine de haut en bas, puis est conduit à l'extérieur au travers d'un caisson de filtration. L'extraction d'air pollué est effectuée par deux circuits distincts, raccordés à chaque zone, comprenant chacun un ventilateur d'aspiration et une batterie de filtres à manche. En période froide, l'air de soufflage peut être réchauffé au moyen d'un brûleur en veine d'air et la face ouverte peut être fermée par un rideau mobile.

#### Caractéristiques aérauliques

Des profils de vitesse d'air ont été déterminés à deux hauteurs dans le flux de soufflage et des mesures de débit par traçage gazeux ont été effectuées dans chacune des branches du circuit de ventilation (cf. Tableaux I et II).

### 2.2 FLUX « OBLIQUE »

#### Description

Comme pour le modèle à flux vertical, les deux modèles de cabines à flux « oblique » testés sont des entités indépendantes. L'ensemble comprend un circuit de ventilation relié à une cabine abritant deux postes de travail. L'air neuf est introduit sur toute la surface du pla-

fond à l'aide d'un ventilateur de soufflage et uniformément réparti grâce à un caisson équipé de filtres plans. Cet air, dirigé verticalement vers le poste de travail, est ensuite extrait horizontalement à travers des grilles disposées en partie basse sur la paroi opposée à l'ouverture.

Après passage dans la cabine, l'air pollué est filtré puis rejeté à l'extérieur de l'atelier. En période froide, un brûleur en veine d'air assure le chauffage de l'air introduit. De plus, la face ouverte peut être fermée par un rideau escamotable également utile lors de certaines opérations susceptibles d'éjecter du polluant hors de la cabine.

Sur un plan conception aéraulique, les deux installations sont assez proches (cf. Figures 2 et 3). Les seules différences résident dans les dimensions des cabines, le nombre de bouches d'extraction ainsi que la présence ou non d'un rideau de séparation des deux postes de travail. Il est à noter que la cabine « oblique 2 » ne dispose pas de système de filtration, l'air empoussiéré est rejeté directement dans l'atmosphère extérieure proche de l'atelier. Cela n'a bien entendu pas d'incidence sur la répartition des flux d'air à l'intérieur de la cabine.

■ Cabine « oblique 1 » :

- deux bouches d'extraction en partie basse de la face opposée à l'ouverture ;
- largeur = 6 m ; profondeur = 2,45 m ; hauteur = 2,50 m ;
- rideau de séparation des postes de travail (deux par cabine).

FIGURE 1

### Cabine ouverte à flux vertical Vertical airflow open cabin

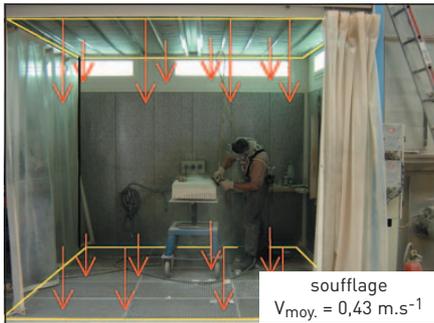


FIGURE 2

### Cabine à flux « oblique 1 » "Oblique 1" airflow cabin



FIGURE 3

### Cabine à flux « oblique 2 » "Oblique 2" airflow cabin



#### ■ Cabine « oblique 2 » :

- trois bouches d'extraction en partie basse de la face opposée à l'ouverture ;
- largeur = 6 m ; profondeur = 2,60 m ; hauteur = 2,54 m ;
- pas de rideau de séparation des postes de travail (deux par cabine).

#### Caractéristiques aérauliques

#### ■ Cabine « oblique 1 »

Pour ce type de cabine, les profils de vitesse d'air ont été déterminés uniquement à proximité du plafond dans le flux

TABLEAU III

### Cabine « oblique 1 » : vitesse d'air moyenne (9 points de mesure) dans le flux de soufflage

"Oblique 1" cabin: average air velocity (9 measuring points) in blowing airflow

Niveau de mesure	Vitesse moyenne [m.s <sup>-1</sup> ]	Ecart type [m.s <sup>-1</sup> ]	Coeff. de variation [%]
0,15 m du plafond	0,55	0,09	16

TABLEAU IV

### Cabine « oblique 1 » : débit d'air moyen dans les deux branches du circuit de ventilation

"Oblique 1" cabin: average air flow rate in both ventilation circuit branches

Circuit		Débit théorique [m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]	Débit mesuré [m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]	Ecart type [m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]	Coeff. de variation [%]
Soufflage	2 postes	28 000	27 400	1 300	4,8
	1 poste	14 000	13 700	/	/
Extraction	1 poste	/	13 900	390	2,8

TABLEAU V

### Cabine « oblique 2 » : vitesse d'air moyenne (144 points de mesure) dans le flux de soufflage

"Oblique 2" cabin: average air velocity (144 measuring points) in blowing airflow

Niveau de mesure	Vitesse moyenne [m.s <sup>-1</sup> ]	Ecart type [m.s <sup>-1</sup> ]	Coeff. de variation [%]
0,20 m du plafond	0,57	0,12	21

TABLEAU VI

### Cabine « oblique 2 » : estimation du débit d'air dans le conduit principal de rejet d'air à l'extérieur

"Oblique 2" cabin: estimated air flow rate in main external air discharge line

Circuit		Débit théorique [m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]	Débit mesuré [m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]	Ecart type [m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> ]	Coeff. de variation [%]
Soufflage	(2 postes)	30 000	32 000*	6 900*	22
	(1 poste)	/	36 000**	1 400	/

\* Estimation par la mesure des vitesses d'air au soufflage.

\*\* Estimation grossière par traçage gazeux.

d'air soufflé et les mesures de débit dans chacune des branches du circuit de ventilation (cf. Tableaux III et IV).

#### ■ Cabine « oblique 2 »

De même que pour la cabine précédente, les profils de vitesse d'air ont été déterminés à proximité du plafond dans le flux de soufflage. En revanche, les débits ont été déterminés globalement dans une section du conduit d'extraction à partir d'un point de prélèvement situé en aval du ventilateur (cf. Tableaux V et VI).

Pour obtenir une valeur fiable du débit d'extraction, il est nécessaire de disposer d'un bon mélange hélium/air

dans la section de conduit située au point de prélèvement. D'une manière générale, le mélange est assuré dès lors que le point de mesure se situe en aval du ventilateur, à une distance équivalente à plusieurs diamètres de conduit.

Dans le cas de la cabine « i2 », il n'a pas été possible de vérifier la condition de bonne homogénéité. Pour des raisons pratiques, la mesure a été effectuée immédiatement après le ventilateur en un point quelconque de la section. De ce fait, le débit d'air ainsi déterminé doit être considéré comme une approximation.

### 3. METHODOLOGIE

#### 3.1 CONDITIONS D'ENVIRONNEMENT

Les trois installations ont été testées dans leur environnement industriel spécifique et à des périodes différentes de l'année. Les cabines étaient toutes mises en place dans des ateliers de travail de la pierre et uniquement destinées à abriter des postes de taille.

Les essais ont été effectués en juillet pour le modèle à flux vertical et respectivement en décembre et janvier pour les modèles à flux « oblique 1 et 2 ». Dans ces deux derniers cas, les cabines étaient chauffées à environ 18°C pour des températures dans l'atelier d'environ 10°C.

Dans ces conditions de température, des visualisations du flux d'air par fumigène n'ont pas révélé d'incidence de la convection thermique au voisinage de la face ouverte.

Les protocoles d'essai, conçus pour obtenir des résultats dans des situations identiques dans chaque cabine, n'ont pu être systématiquement appliqués sur le terrain. Dans certains cas, il est apparu difficile de concilier les exigences d'une méthode proche de celles utilisées dans des conditions de laboratoire avec la réalité d'une application in situ. Compte tenu de ces modalités, toutes les configurations prévues dans les grilles d'essai n'ont pu être explorées.

#### 3.2 MÉTHODE D'ESSAIS

L'efficacité des cabines a été déterminée à partir d'un ensemble d'essais types répétés systématiquement au cours des trois campagnes de mesures. Il s'agissait, pour chaque tailleur de pierre, de réaliser des opérations de découpe et de ponçage à l'aide des outils utilisés habituellement pour ce genre de tâche.

En l'occurrence, les travaux étaient réalisés sur des pierres parallélépipédiques de différentes natures (cf. *Tableau VII*). Le travail consistait à :

- tracer des sillons parallèles sur une face plane à l'aide d'une tronçonneuse à disque diamanté de diamètre 230 mm ;
- effectuer un surfaçage d'une face au moyen d'une ponceuse rotative équipée d'un abrasif également diamanté (utilisé

TABLEAU VII

Caractéristiques des pierres utilisées  
Characteristics of stones used

	Roche marbrière (dure)	Pierre calcaire (tendre)	Grès
	STCorneille	Charentenay	Grès des Vosges
Masse volumique apparente [kg.m <sup>-3</sup> ]	2 400 à 2 500	1 800 à 1900	2 160 / 2 180(hum.) / 2 000 (sec)
Porosité [%]	1 à 3	30 à 35	15 à 21
Résistance à la compression [MPa]	160 à 180	18 à 25	50 à 70
Vitesse de propagation du son [m.s <sup>-1</sup> ]	5 500 à 5 600	2 800 à 3 000	2 615

notamment pour le dégrossissage de pierres de grès) de diamètre 125 mm ;

- exécuter un travail courant dans ce métier, la découpe puis le surfaçage de chanfreins sur les arêtes des pierres. Pour cette opération, les deux outils précédents étaient utilisés tour à tour.

Les mêmes types d'outils et de pierres ont été mis en œuvre sur les trois sites. Cependant, les cabines testées étant spécifiquement destinées au tailleur de grès, des essais ont été effectués dans quelques cas avec des pierres de grès provenant des carrières exploitées par les entreprises.

En revanche, les tailleurs appartenaient à leurs entreprises respectives. Chaque cabine a donc été testée avec au moins un opérateur différent. Dans un cas, celui de la cabine dite « flux oblique 1 », il a été nécessaire de faire appel à un second opérateur pour quelques essais seulement.

Les travaux étaient exécutés, au centre des cabines, dans des positions courantes avec ce type d'équipement : dos à l'ouverture (face au dispositif d'aspiration) et de profil. Des mesures ont également été effectuées dans la position face à l'ouverture (dos au dispositif d'aspiration) dans les cabines à « flux oblique », afin de tenir compte de situations de travail pratiquées régulièrement. C'est en effet une position qu'adoptent volontiers les tailleurs de pierre quand la dimension des pièces et la tâche à exécuter le permettent.

Les consignes en vigueur dans les entreprises stipulaient un travail rideau fermé lors des opérations de tronçonnage, voire systématiquement pour toutes opérations dans le cas du flux « oblique 2 ».

#### Séquences d'essais

Le tailleur de pierre, placé dans une position donnée, effectuait un travail continu pendant 12 minutes avec l'un ou l'autre des outils. Cette durée constituait une limite acceptée par tous les tailleurs de pierre sollicités pour effectuer les opérations répétitives en continu. Les premiers essais (flux vertical), effectués sur une durée unitaire initialement prévue de 20 minutes, se sont révélés trop longs par rapport à la monotonie des tâches demandées.

#### Mesures de concentrations de poussière

■ Mesures à l'aide du photomètre

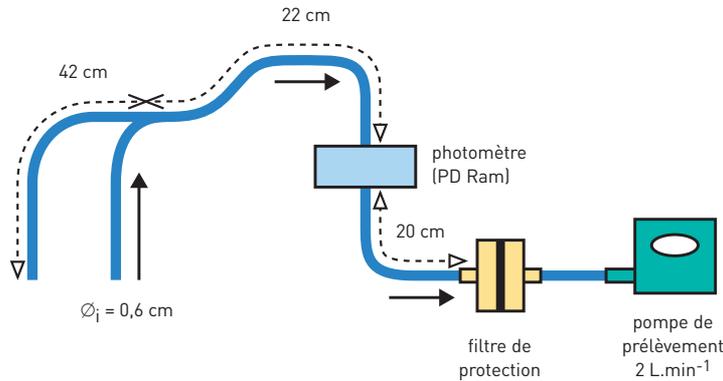
Durant le temps d'usinage, la concentration de poussière était mesurée en permanence, à hauteur des voies respiratoires de l'opérateur (quelques cm de la bouche), au moyen d'un analyseur optique portable (photomètre Pdram). L'appareil délivrait des concentrations moyennées sur une durée choisie d'une seconde. Il était inséré dans un circuit de prélèvement comprenant une pompe (2 L.min<sup>-1</sup>) et des conduits souples de diamètre intérieur 6 mm (cf. *Figure 4*).

Avant chaque essai, l'empoussièrément résiduel dans la cabine était mesuré et la pierre utilisée était pesée avant et après l'essai afin d'en déduire un débit de matière enlevée sous forme de poussière.

Le photomètre utilisé délivre des concentrations issues d'un étalonnage avec une poussière type normalisée (SAE fine ou ISO fine) dont les caractéristiques sont éloignées de celle qui est effectivement mesurée.

FIGURE 4

### Ligne de prélèvement de poussière Dust sampling line



Ce type d'appareil présente la particularité d'être sensible à la nature, à la forme et à la granulométrie des particules et nécessite donc un étalonnage avec la poussière prélevée pour obtenir une échelle de concentration réelle.

La comparaison des différentes configurations testées dans les cabines a été établie à partir de la valeur directe délivrée par le photomètre. Cependant, dans le but d'obtenir un ordre de grandeur des niveaux de concentrations réelles, l'appareil a été étalonné à partir d'échantillons de poussière provenant de pierres de même nature que celles utilisées pour les essais (cf. *Tableau XI, Annexe 2*).

■ Mesures à l'aide d'un impacteur et d'un cyclone

En plus de la mesure réalisée en continu au moyen du photomètre, à chaque séquence d'essai, deux autres types de mesure de la pollution particulaire ont été mis en œuvre au cours de configurations d'essai choisies.

L'objectif était de déterminer la granulométrie des poussières inhalables émises par l'usinage ainsi que la fraction alvéolaire. Ces mesures étaient réalisées avec, respectivement, un impacteur (Marpple) et un cyclone Dorr-Oliver équipé d'un filtre et d'une pompe de prélèvement réglée à 1,7 L.min<sup>-1</sup>. Les appareils étaient positionnés dans la zone respiratoire de l'opérateur sur le revers de son vêtement de travail.

Dans quelques situations où les concentrations étaient trop faibles pour fournir un résultat exploitable, l'impacteur était placé dans la zone de dispersion de la poussière émise.

### REMARQUE IMPORTANTE

Compte tenu des types de pierres utilisées et des protocoles particuliers d'usinage, les mesures de concentrations alvéolaires ne visaient pas l'évaluation d'une exposition à un risque. Elles ont été effectuées dans un but indicatif sur de courtes durées de l'ordre de 12 minutes (durée moyenne des séquences de travail).

### Critère d'évaluation des essais

Par nature, le mode de libération de poussière, provenant des opérations de ponçage et de tronçonnage, se caractérise par des successions de « bouffées » plus ou moins importantes. Un facteur explicatif de ce phénomène serait la pression variable exercée par l'outil sur la pierre. Ceci se traduit au niveau des voies respiratoires de l'opérateur par des échelons de concentration plus ou moins espacés, d'amplitudes et de durées variables, dont les valeurs inférieures sont souvent proches de zéro.

Le critère de comparaison choisi est la moyenne calculée par intégration sur le temps d'essai des concentrations instantanées, en fait une valeur par seconde, mesurées par l'analyseur optique :

$$\bar{C}_p = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} C_{pb} dt$$

avec

$C_{pb}$  : concentration mesurée pendant l'essai ;

$t_1 ; t_2$  : temps de début et de fin d'essai ;

$T$  : durée de l'essai =  $t_2 - t_1$  ;

Pour chaque configuration (une position, un outil, un type de pierre, un opé-

rateur, une cabine) de la concentration moyenne ( $\bar{C}_p$ ) était déduite la concentration moyenne issue de l'empoussièremment résiduel ( $\bar{C}_r$ ) mesurée durant au moins 2 minutes avant chaque essai dans la cabine.

## 4. RÉSULTATS ET DISCUSSION

Malgré quelques difficultés d'application, le protocole d'essai utilisé (durée, types de poussière et mode de prélèvement...) ainsi que les quelques répétitions ont permis de caractériser les cabines testées dans des situations de travail type et de formuler des hypothèses plus générales sur leur utilisation.

Les paragraphes 4.1 et 4.2 traitent exclusivement des résultats en concentration avec les deux types de pierres calcaires. Les essais avec le grès sont succinctement évoqués au paragraphe 4.3.

### 4.1 COMPARAISON GLOBALE

En préalable, il convient de noter que, dans le cadre de cette étude, les concentrations, mesurées au moyen d'un appareil étalonné par le constructeur avec une poussière type différente des poussières produites, sont à considérer uniquement comme des repères d'un niveau d'empoussièremment permettant de comparer les différentes configurations de travail. Toute référence à des valeurs limites réglementaires ou recommandées est donc à proscrire.

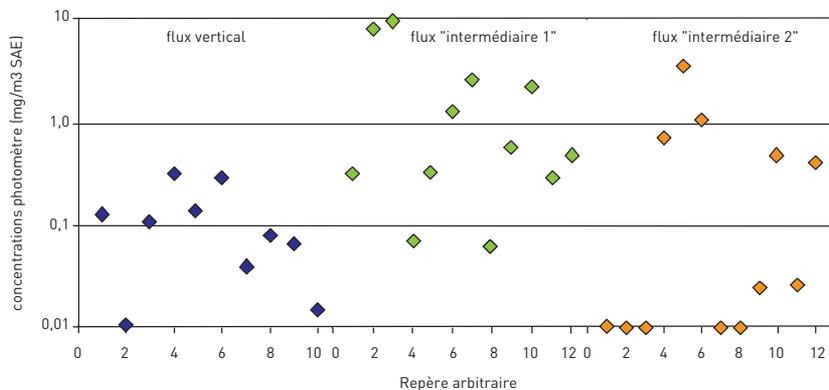
### Caractéristiques des cabines

L'examen de la *Figure 5*, où sont regroupés tous les résultats obtenus avec les deux types de pierres calcaires, met globalement en évidence une supériorité de la cabine à flux vertical, en dépit d'un débit de soufflage de 15 % à 20 % inférieur à celui des autres cabines. Toutes situations confondues (10 à 12 résultats pour chaque cabine), la cabine à flux vertical permet d'atteindre en moyenne des concentrations de 4 à 18 fois plus basses que les deux modèles à flux « oblique ». C'est également la seule cabine dans laquelle les concentrations ne dépassent pas le niveau de 0,3 mg.m<sup>3</sup> SAE. Dans les deux autres modèles, les concentrations maximales pouvaient atteindre 10 mg.m<sup>-3</sup> SAE et 3,5 mg.m<sup>-3</sup> SAE, respectivement pour le

**FIGURE 5**

**Ensemble des concentrations mesurées avec le photomètre dans les trois cabines lors des essais avec les pierres calcaires**

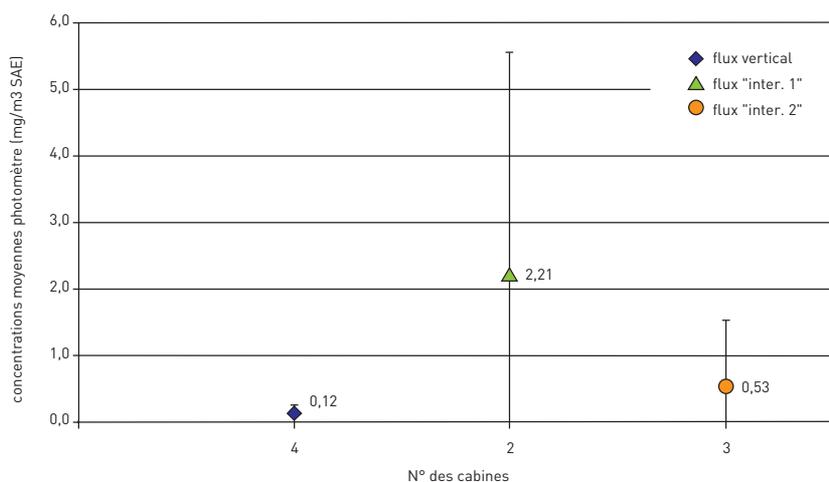
All concentrations measured using photometer in three cabins during tests using limestone blocks



**FIGURE 6**

**Concentrations moyennes et variabilités, par rapport aux mesures dans les différentes configurations, dans chaque cabine, toutes configurations confondues**

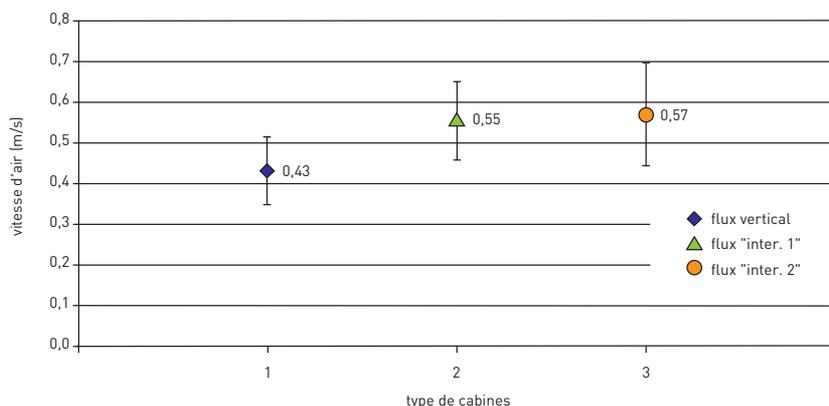
Average concentrations and variabilities w.r.t. measurements in different configurations in each cabin – all configurations included



**FIGURE 7**

**Vitesses d'air au soufflage à hauteur du plafond dans les trois cabines**

Airflow rates for ceiling height blowing in three cabins



flux « oblique 1 » et le flux « oblique 2 » soit des niveaux maximaux 12 à 30 fois plus élevés.

Cette réduction des performances avec le flux oblique s'accompagne d'une beaucoup plus grande dispersion (compte tenu de l'échelle logarithmique des ordonnées), notamment pour le modèle « il ».

Le graphique présenté à la *Figure 6*, présentant la valeur moyenne et l'écart type des résultats pour chaque cabine, est une autre illustration des observations précédentes (cette fois, l'échelle des ordonnées est linéaire). On observe le classement des performances entre cabines ainsi que des dispersions très différenciées, notamment entre les deux modèles à flux oblique bien que leurs schémas d'écoulement d'air soient en principe identiques.

Ces écarts de résultats, parfois importants entre les deux cabines à flux « oblique » (cf. *Figure 10*), ne peuvent s'expliquer par les seules caractéristiques géométriques (différence de largeur de 15 cm) ou aérodynamiques (trois bouches d'aspiration dans une cabine, deux dans l'autre). De plus, les tests ont été réalisés dans des conditions de ventilation très proches. Les flux de soufflage, caractérisés par les vitesses d'air, dont l'effet principal est d'assurer un balayage régulier des voies respiratoires de l'opérateur, étaient pratiquement identiques dans les deux cabines (cf. *Figure 7*).

**Émission de poussière (débit, direction)**

La disparité des résultats constatée entre les deux cabines à flux « oblique » pourrait en partie s'expliquer par des facteurs spécifiques à l'opérateur, essentiellement la manière dont il effectue sa tâche.

La détermination des quantités de poussière enlevées<sup>(1)</sup> au cours des différentes opérations apporte un élément d'information supplémentaire. En règle générale, les débits d'émission se situent à un niveau plus élevé dans la cabine « i2 » que dans la cabine « il » (cf. *figure 11*). Paradoxalement, dans « i2 », les concentrations mesurées sont

<sup>(1)</sup> Calculées à partir des dimensions géométriques de la matière enlevée et de la densité de la pierre. Il s'agit donc d'une majorante du débit de poussière véhiculée par l'air.

FIGURE 8

Comparaison flux vertical / flux oblique 1 (les résultats entourés correspondent à des répétitions)  
Vertical / Oblique 1 airflow comparison (circled results correspond to repetitions)

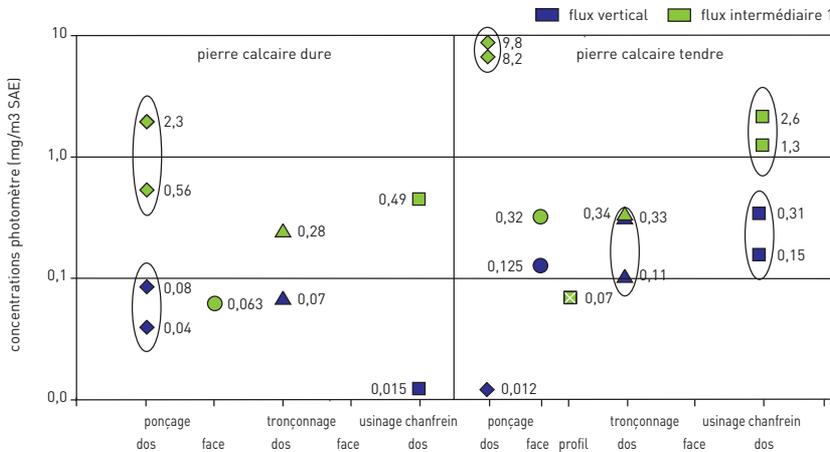


FIGURE 9

Comparaison flux vertical / flux oblique 2 (les résultats entourés correspondent à des répétitions)  
Vertical / Oblique 2 airflow comparison (circled results correspond to repetitions)

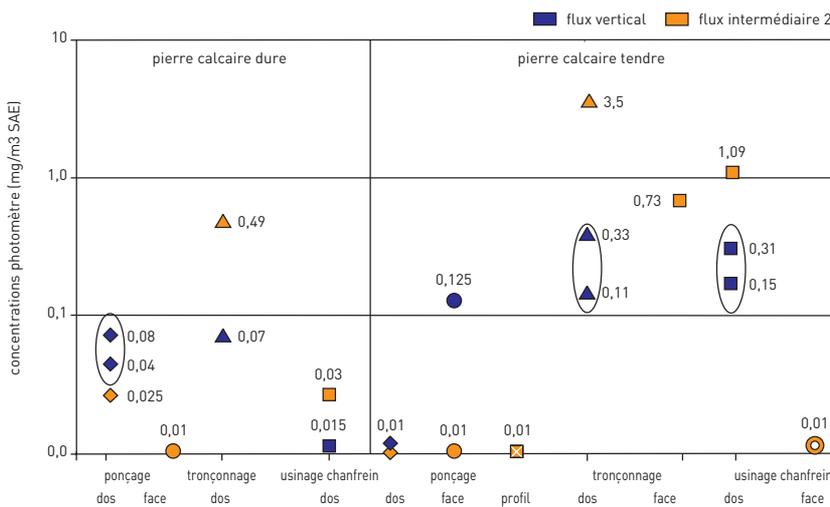
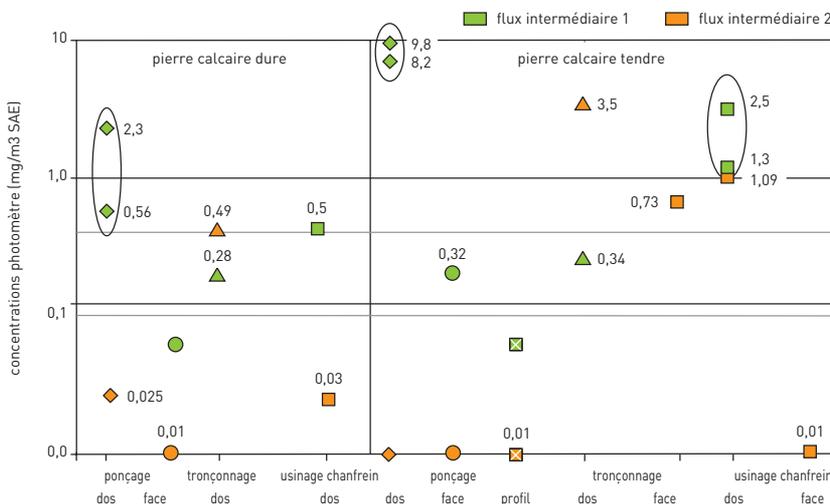


FIGURE 10

Comparaison flux oblique 1 / flux oblique 2 (les résultats entourés correspondent à des répétitions)  
Oblique 1 / Oblique 2 airflow comparison (circled results correspond to repetitions)



souvent plus faibles que celles mesurées dans « il ». La comparaison des résultats de la cabine « i2 » avec ceux de la cabine à flux vertical conduit, pour quelques configurations, à un constat analogue.

Bien que le protocole d'essai prévoit des séquences de tâches assez bien définies, la façon d'opérer des trois tailleurs de pierre était différente. Dans le cas du tronçonnage, par exemple, les sillons étaient plus ou moins profonds et la quantité de poussière produite sur l'arrière de la machine, donc dirigée vers l'opérateur quand celui-ci travaillait en ramenant l'outil vers lui, pouvait être plus ou moins importante selon la façon de procéder. La dispersion de poussière variait également avec le ponçage quand l'opérateur se tenait plus ou moins proche de la pierre et qu'il manipulait l'outil juste devant lui en effectuant des mouvements circulaires.

#### 4.2 ANALYSE D'AUTRES FACTEURS EXPLICATIFS

##### Incidence de l'activité

Le flux de ventilation n'est pas le seul facteur explicatif des performances des cabines. Le facteur activité, regroupant des paramètres tels que l'opérateur, sa position, sa posture et l'exécution de la tâche, est également déterminant.

##### Flux vertical

Les résultats obtenus avec la cabine à flux vertical confirment, à l'instar de ceux obtenus lors d'une précédente étude [1], l'un des avantages de ce type de ventilation : son indépendance par rapport à la position de l'opérateur autour de la pièce.

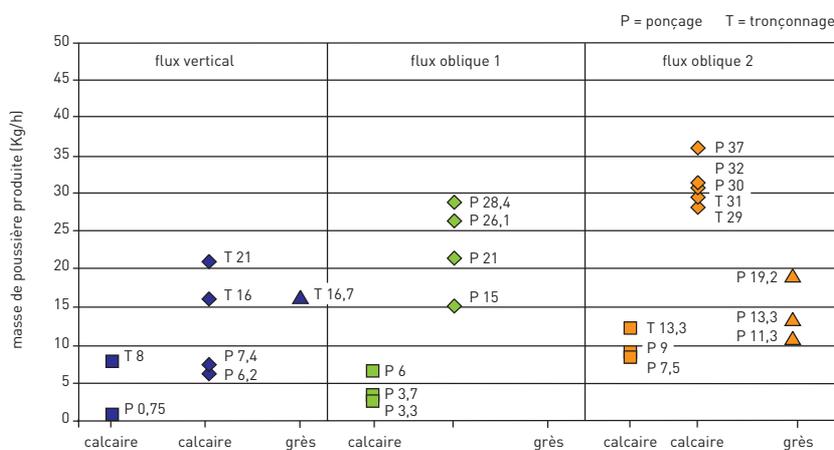
Les concentrations sont peu dispersées (cf. figure 8) et évoluent à des niveaux faibles, inférieurs à 0,33 mg.m<sup>-3</sup> SAE, quelle que soit la position de l'opérateur et malgré des débits de poussière émise parfois élevés (0,75 à 19 kg.h<sup>-1</sup>). Pour une même opération et une même pierre, en l'absence de résultats quant à la position de l'opérateur face à l'ouverture, il sera donc possible de se référer aux résultats obtenus avec la position dos à l'ouverture.

##### Flux oblique

Il n'en va pas de même quand le flux de ventilation présente une composante horizontale. Avec ce mode de ventilation, la position de l'opérateur peut constituer

FIGURE 11

**Débit masse de matière enlevée au cours des différents essais**  
**Rate of mass removal during different tests**



un facteur de sensibilité déterminant. Les résultats montrent toutefois des effets différenciés, bien que les modes de ventilation des deux cabines soient similaires, suggérant également l'incidence de l'activité. Les résultats de l'ensemble des tests sont regroupés Figures 8 et 9. Ils sont analysés ci-dessous en fonction de la position de l'opérateur et des types d'opération (ponçage, tronçonnage, usinage de chanfrein) et comparés aux résultats correspondants de la cabine à flux vertical.

**La position de profil**, testée pour la seule opération de ponçage à plat de calcaire tendre, paraît peu sensible. Dans les deux cabines, elle conduit à des performances très satisfaisantes avec des concentrations mesurées inférieures à 0,1 mg.m<sup>-3</sup> SAE (rappelons que la concentration résiduelle est déduite) pour une opération fortement génératrice de poussière (21,7 et 33 kg.h<sup>-1</sup>).

Dans le cas de flux induisant une composante horizontale, l'intérêt de cette position n'est plus à démontrer : nombre d'études et documents [2 à 5] mettent en évidence une forte réduction du niveau d'exposition d'un opérateur travaillant de profil.

En revanche, **la position dos à l'ouverture** présente une plus grande sensibilité, variable avec le modèle de cabine, la nature du matériau, le type d'opération et la façon de travailler du tailleur de pierre. C'est pour cette position qu'ont été observées les plus fortes concentrations de l'ensemble des essais,

soit 8,3 et 9,8 mg.m<sup>-3</sup> SAE, dans la cabine « i1 » pour une opération de **ponçage** de calcaire tendre. Cette sensibilité à la position est moindre dans le cas du ponçage de calcaire dur, avec des concentrations de 0,56 et 2,3 mg.m<sup>-3</sup> SAE (cf. Figure 10). Le niveau, quoique élevé, se rapproche de celui obtenu pour le flux vertical. La sensibilité de cette position est nettement plus faible dans le modèle « i2 », et les concentrations, inférieures à 0,1 mg.m<sup>-3</sup> SAE pour les deux pierres calcaires, sont du même niveau que pour le flux vertical avec pourtant des débits d'émission de poussière bien supérieurs.

Le constat est quelque peu inversé pour l'opération de **tronçonnage**. En effet, les résultats sont proches de ceux obtenus avec la cabine à flux vertical et de l'ordre de 0,1 à 0,3 mg.m<sup>-3</sup> SAE avec la cabine « i1 » pour les deux pierres, alors qu'ils sont de 7 à plus de 10 fois plus élevés, respectivement pour la pierre dure et la pierre tendre, atteignant 3,5 mg.m<sup>-3</sup> SAE pour cette dernière (cf. Figure 9).

Lors de l'opération d'**usinage de chanfrein**, les concentrations mesurées sont plus élevées dans les deux cabines à flux oblique. Cependant, elles restent faibles et inférieures à 0,5 mg.m<sup>-3</sup> SAE pour la pierre dure, alors qu'elles dépassent systématiquement 1 mg.m<sup>-3</sup> SAE pour la pierre tendre.

Bien que peu nombreux, les essais en **position face à l'ouverture** permettent

de dégager quelques enseignements. Les niveaux atteints lors de l'opération de **ponçage** restent faibles puisqu'ils sont inférieurs à 0,3 mg.m<sup>-3</sup> SAE pour la cabine « i1 » et quasi nuls pour la cabine « i2 » ; ils sont donc du même ordre de grandeur que ceux obtenus avec la cabine à flux vertical, alors que les débits d'émission sont respectivement quatre à cinq fois plus élevés.

Le seul résultat disponible en ce qui concerne l'opération de **tronçonnage** de pierre tendre dans la cabine « i2 », certes deux à trois fois plus élevé que celui obtenu avec le flux vertical (position de dos, seuls résultats disponibles), est cependant modéré car il correspond à un débit d'émission 50 % plus élevé.

Le seul essai pratiqué avec cette position de l'opérateur pour l'opération d'usinage de chanfrein montre que la performance de la cabine « i2 » est très satisfaisante.

**Incidence de la position**

Dans le cas d'un flux de ventilation induisant une composante horizontale, il est d'usage de présenter **la position face à l'ouverture** comme la plus défavorable vis-à-vis du risque chimique. Cette composante est présente dans les cabines à flux « oblique », mais les quelques résultats recueillis au cours des trois opérations (ponçage, tronçonnage et usinage de chanfrein) semblent contredire ce principe. L'incidence de la position face ou dos à l'ouverture peut être évaluée par type d'opération pour les deux cabines à flux oblique<sup>(2)</sup>, en considérant le rapport des concentrations mesurées respectivement pour la position de face et la position de dos (cf. Tableau VIII).

Les concentrations mesurées en position de face sont systématiquement inférieures à celles correspondant à la position de dos, dans de très fortes proportions lors de l'opération de ponçage des deux types de pierre pour la cabine « i1 » ainsi que lors de l'opération d'usinage de chanfrein et, dans une moindre mesure, de tronçonnage pour la cabine « i2 ». En ce qui concerne le ponçage dans la cabine « i2 », la valeur du rapport n'est pas significative car les concentrations sont quasi nulles dans les deux positions.

(2) On a vu que la position de l'opérateur n'était pas un facteur discriminant dans le cas du flux vertical.

TABLEAU VIII

**Rapport des concentrations face à l'ouverture / dos à l'ouverture**  
**Ratio of concentrations facing towards/away from opening**

Opération	Cabine i1		Cabine i2	
	Calcaire dur	Calcaire tendre	Calcaire dur	Calcaire tendre
Ponçage	10 à 40	20 à 30	2	1
Tronçonnage	/	/	/	5
Usinage de chanfrein	/	/	/	100

### 4.3 RÉSULTATS AVEC LE GRÈS

Quelques essais ont été effectués avec la pierre de grès. Cependant, les configurations testées, trop peu nombreuses, ne permettent d'obtenir qu'un ordre de grandeur des performances des cabines. Les concentrations<sup>(3)</sup> étaient faibles dans les trois cabines : sept concentrations inférieures à  $0,6 \text{ mg.m}^{-3}$  SAE pour des débits de poussière élevés ( $11,3$  à  $19,2 \text{ kg.h}^{-1}$ ), la huitième à  $4,6 \text{ mg.m}^{-3}$  SAE correspondant au débit de poussière le plus élevé de l'ensemble des configurations testées, soit  $46,8 \text{ kg.h}^{-1}$ .

## 5. CONCLUSION

L'évaluation des performances des cabines, suivant les configurations retenues dans le cadre de cette étude, confirme l'intérêt du flux vertical lors des opérations très diversifiées de taille de pierre. Ce type de dispositif permet d'obtenir une efficacité avérée et homogène quelle que soit la position de travail, en particulier pour une condition d'utilisation courante, l'opérateur travaillant dans une posture proche de la verticale.

Les cabines à flux « oblique » utilisées dans cette étude présentent une efficacité notable dans plusieurs configurations de travail. Pourtant, malgré des systèmes de ventilation quasi identiques, ces dispositifs peuvent présenter des efficacités différentes. Les concentrations peuvent varier considérablement,

(3) Ces valeurs ne peuvent pas être comparées à celles obtenues avec la pierre calcaire en raison des différences de répartition granulométrique des poussières.

particulièrement lorsque l'opérateur travaille dos à la face ouverte.

En ce qui concerne les opérations simples mais courantes de taille de pierre, découpe, ponçage, il apparaît que le flux « oblique » est plus sensible à la position et surtout à la façon d'usiner des tailleurs de pierre que le flux vertical.

Les résultats recueillis au cours de cette étude permettent d'évaluer l'efficacité de cabines proposées dans le commerce pour les opérations de taille de la pierre. Ils concernent les configurations de travail les plus fréquemment rencontrées dans ce secteur industriel. La comparaison a été établie dans des conditions d'essai spécifiques notamment en ce qui concerne la durée des opérations unitaires et les forts débits de poussière qu'elles entraînaient, une situation qui peut être différente des conditions habituelles. Celles-ci sont souvent basées sur des séquences de tâches de durée plus réduite et des changements de pièces et d'outils plus fréquents.

La gamme des diamètres des poussières émises par les opérations de tronçonnage et de ponçage est très étendue, de  $1 \mu\text{m}$  à plus de  $50 \mu\text{m}$ . Cependant, le diamètre médian ( $d_{50}$ ) se situe majoritairement au-dessus de  $10 \mu\text{m}$ .

Les tests effectués au cours de cette étude suscitent une interrogation sur la remise en cause d'un principe de base associé à l'utilisation des cabines ouvertes à flux horizontal et oblique : l'incidence sur le niveau d'exposition de la position dos au plan aspirant.

La difficulté à différencier l'incidence des flux de ventilation à partir de conditions de travail assez bien définies met en évidence la complexité et l'interaction des paramètres d'influence.

L'approche expérimentale est une voie de recherche permettant d'expliquer le fonctionnement des cabines en situation réelle, mais elle est très lourde à mettre en œuvre. Elle est notamment soumise à des conditions d'essai souvent difficiles à maîtriser en entreprise. Pour certaines configurations, la compréhension des phénomènes en jeu pourrait être facilitée par une utilisation de la simulation numérique, par exemple lorsqu'il s'agit de comprendre pourquoi deux cabines aux caractéristiques quasi identiques procurent des résultats aussi différents.

Cette étude a permis d'évaluer trois modèles de cabines ouvertes ventilées uniquement du point de vue de leur efficacité de ventilation. Ce critère est sans doute déterminant lors d'un choix, c'est celui qui conditionne la santé des opérateurs vis-à-vis du risque d'inhalation de poussière.

Cependant d'autres caractéristiques concernant l'aménagement des cabines, leur disposition dans l'atelier, la filtration amont et aval, l'insonorisation, le chauffage, l'éclairage et d'une manière générale tout ce qui a trait à l'ergonomie du poste, ont une incidence majeure sur leur utilisation en tant qu'outil de travail au quotidien. Une cabine efficace sur un plan aérodynamique peut être difficile à exploiter si tous les éléments relatifs à son exploitation ne sont pas pris en compte au moment de l'acquisition.

### IMPORTANT

Les résultats et conclusions concernant l'étude des cabines à flux dit « oblique » concernent un type d'installation donné : soufflage vertical sur toute la surface du plafond et extraction en partie basse sur toute la largeur de la face opposée à la face ouverte. Pour toute autre disposition, il n'est pas possible de garantir un niveau de performance équivalent sans avoir au préalable procédé à une évaluation.

Reçu le : 01/03/2004

Accepté le : 30/06/2004

## GRANULOMÉTRIE

Avec les types d'outils utilisés, l'analyse granulométrique des différents types de poussières montre que la majorité des opérations génère des poussières couvrant une large gamme de granulométrie dont la médiane ( $d_{50}$ ) se situe le plus souvent au-dessus de  $10 \mu\text{m}$  (cf. *Tableau IX*).

Les poussières les plus fines sont obtenues, dans certains cas, par le ponçage de calcaire tendre ( $d_{50} = 4,65$  et  $6,59$ ) et lors du tronçonnage de grès ( $d_{50} = 9,1$ ). Dans un grand nombre de configurations (11/14), 20 % des poussières ont un diamètre inférieur à  $2,35 \mu\text{m}$  et 40 % un diamètre inférieur à  $3,69$ .

## POUSSIÈRES ALVÉOLAIRES

Les concentrations mesurées dans diverses configurations sont à considérer comme des repères (cf. *Tableau X*). Elles constituent une indication de l'efficacité des dispositifs vis-à-vis de la gamme alvéolaire pour quelques situations de travail typiques.

Compte tenu des conditions de mesure, de l'aspect hétérogène du tableau et de la durée réduite du prélèvement, une comparaison des trois cabines basée sur la concentration alvéolaire n'est guère réaliste.

Quelques valeurs se situent à un niveau assez élevé dans les cabines à flux oblique, en particulier dans le modèle « 12 » pour lequel la grille de mesure est complète : 3 valeurs sur 14 sont supérieures à  $5 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ . La moitié des concentrations (7 sur 14) était égale ou inférieure à  $1 \text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ .

TABLEAU IX

### Granulométrie des poussières générées par les différentes opérations Particle size distribution of dust produced by different operations

Granulométrie (impacteur Marpple)				
Type de cabine	Type de pierre	Opération	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	$\sigma_g$ ( $\mu\text{m}$ )
Flux vertical	Calcaire tendre	Ponçage	15,28	1,81
		Tronçonnage	*	*
	Calcaire dur	▽ Tronçonnage	22,98	2,71
Flux « oblique 1 »	Grès	Tronçonnage	9,1	2,66
			4,65	4,51
			6,59	3,98
	Calcaire tendre	Ponçage	16,19	2,27
			12,25	2,24
			11,17	2,76
Flux « oblique 2 »	Calcaire tendre	▽ Ponçage	19,8	2,16
			14,42	5,27
	Calcaire dur	▽ Ponçage	25,75	2,05
			12,07	5,38
			30,01	1,83
	Grès sec	▽ Ponçage	21,11	1,94
Grès humide	▽ Ponçage			

\* Peu de poussière recueillie (pas d'analyse possible).

▽ Appareil placé dans le nuage de poussière (niveau inférieur aux voies respiratoires).

TABLEAU X

### Estimation des concentrations de poussière alvéolaire Estimated alveolar dust concentrations

Concentration de poussière alvéolaire [ $\text{mg}\cdot\text{m}^{-3}$ ]				
Type de pierre	Opération	Flux de ventilation		
		vertical	« oblique 1 »	« oblique 2 »
Calcaire tendre	Ponçage	/	/	<b>0,3</b> [0,0-2,9]
		/	<b>0,6</b> [0,0 - 2,6]	<b>&lt; 2,7</b>
	Tronçonnage (sillons)	<b>0,8</b> [0 - 2,6]	/	<b>18</b> [13-24]
		/	/	<b>4,7</b> [0,0-9,8]
Usinage de chanfrein		<b>1,5</b> [0 - 3]	<b>3,1</b> [1,5 - 4,8]	<b>&lt; 5</b>
		<b>2,0</b> [0,6 - 3,5]	<b>13,9</b> [10,5 - 17,3]	<b>6</b> [2-11]
Calcaire dur	Ponçage	/	<b>0,4</b> [0,0 - 2,0]	<b>0,3</b> [0,0-3,8]
		/	<b>2,9</b> [1,6 - 4,1]	<b>0,8</b> [0,0-3,8]
Tronçonnage (sillons)		/	<b>0,1</b> [0,0 - 1,4]	<b>0,5</b> [0,0-3,1]
		/	/	<b>1,6</b> [0,0-3,3]
Grès (sec)	Ponçage	/	/	<b>2,3</b> [0,5-4,1]
		/	/	<b>1,0</b> [0,0-4,3]
Usinage de chanfrein		/	/	<b>1,0</b> [0,0-4,3]
		/	/	<b>0,1</b> [0,0-1,8]
Grès (humide)	Ponçage (à plat)	/	/	<b>0,1</b> [0,0-1,8]
	Usinage de chanfrein	/	<b>0,8</b> [0,0 - 2,8]	<b>1,0</b> [0,0-2,7]

## ANNEXE II

## ÉTALONNAGE DU PHOTOMÈTRE

Les conditions mises en place pour l'étalonnage visaient à obtenir une loi de correspondance entre la concentration mesurée par le photomètre et la concentration réelle de poussières inhalables produites par les différentes opérations effectuées dans les cabines.

La méthode utilisée était simple ; elle consistait à injecter une masse connue de poussière dans une enceinte de volume 1 m<sup>3</sup> et à prélever pendant un temps donné (5 min) une certaine quantité de poussière.

La mesure était effectuée au moyen de deux circuits parallèles, respectivement reliés au photomètre et à une membrane filtrante *via* une tête de prélèvement spécifique (CATHIA®) permettant de sélectionner la partie inhalable de l'aérosol. L'homogénéité de ce dernier était assurée par un brassage constant de l'air dans l'enceinte au moyen d'un petit ventilateur.

La concentration, déterminée par gravimétrie à partir de la poussière recueillie sur le filtre, était ensuite comparée à la valeur moyenne des concentrations mesurées par le photomètre sur la durée du prélèvement.

Les données analysées à partir d'un modèle de régression linéaire ont permis d'obtenir une courbe d'étalonnage pour les deux types de poussière générée au cours des essais : le calcaire et le grès (cf. Figures 12 et 13).

FIGURE 12

Droite d'étalonnage du photomètre pour la poussière calcaire  
Photometer calibration line for limestone dust

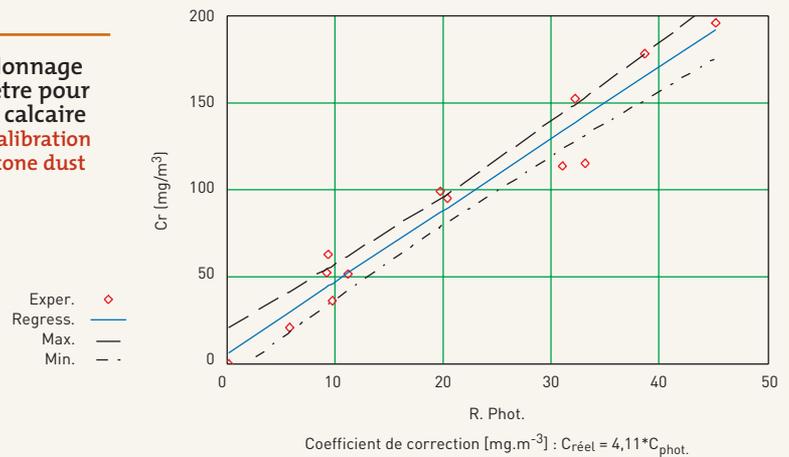


FIGURE 13

Droite d'étalonnage du photomètre pour la poussière de grès  
Photometer calibration line for sandstone dust

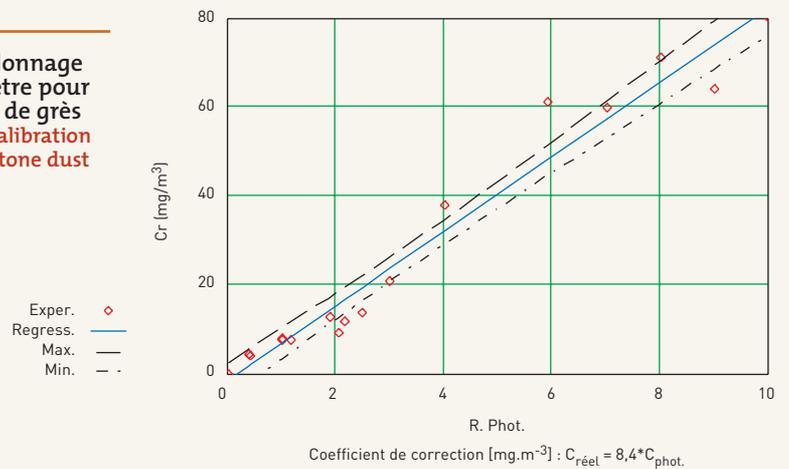


TABLEAU XI

Concentrations estimées par étalonnage du photomètre avec les deux types de poussière émise au cours des essais in situ  
Estimated concentrations by photometer calibration for both types of dust

Type de pierre	Opération	Position	Flux de ventilation (en mg/m <sup>3</sup> )		
			Vertical	Oblique 1	Oblique 2
Calcaire tendre	Ponçage (à plat)	Face	0,52	1,32	0,01
		Dos	0,045	34,3 / 40,4	0,01
		Profil	/	0,28	0,01
	Tronçonnage (sillons)	Face	/	/	3,00
		Dos	0,46 / 1,34	1,43	14,38
		Tronç. / Ponç. (chanfrein)	Face	/	/
Calcaire dur	Ponçage	Dos	0,6 / 1,27	5,34 / 10,6	4,7
		Face	/	0,25	0,01
	Tronçonnage (sillons)	Dos	0,16 / 0,34	2,38 / 9,56	0,10
		Dos	0,28	1,16	2,01
	Tronç. / Ponç. (chanfrein)	Dos	0,062	2,00	2,38
		Dos	/	38,75	3,43 / 3,73
Grès sec	Tronçonnage (sillons)	Dos	0,61	/	/
		Dos	/	/	0,56
	Ponçage	Dos	/	/	0,7
Grès humide	Tronç. / Ponç. (chanfrein)	Dos	/	1,98	0,67
		Dos	/	/	0,67

## BIBLIOGRAPHIE

[1] REGNIER R., BRAND F., DESSAGNE J.-M. – Cabines ouvertes ventilées : flux horizontal ou vertical ? Étude comparative dans le secteur de taille de la pierre. *INRS, Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail*, 2001, 185, ND 2160, pp. 49 – 67.

[2] American conference of Governmental Industrial Hygienists : Industrial Ventilation – A manual of Recommended Practice, 22th ed. ACGIH, Cincinnati, OH (1995).

[3] GEORGE D.K., FLYNN. M.R., GOODMAN R. – The impact of boundary layer separation on local exhaust design and worker exposure. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 1990, 5, 8, pp. 501-509.

[4] FLYNN M.R., SHELTON W.K. – Factors affecting the design of local exhaust ventilation for the control of contaminants from hand-held sources. *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 1990, 5, 10, pp. 707-714.

[5] Rexnord, Inc., Milwaukee, WI- Demonstration of air contaminant control methods for torch cutting and air carbon-arc gouging. Prepared for NIOSH, Cincinnati, OH, 83. Rexnord, Inc., Milwaukee, WI- Demonstration of air contaminant control methods for torch cutting and air carbon-arc gouging. Prepared for NIOSH, Cincinnati, OH, 83.