

→ R. Régnier, F. Brand,
J.M. Dessagne, Département
Ingénierie des procédés, Centre
de Lorraine, INRS, Vandœuvre

Cabines ouvertes ventilées : flux vertical ou horizontal ?

Étude comparative dans le secteur de la taille de pierre

OPEN VENTILATED BOOTHS: VERTICAL OR HORIZONTAL AIR FLOW?

COMPARATIVE STUDY IN THE STONE
MACHINING SECTOR

Open ventilated booths are one of the most frequently used means of eliminating the pollutants generated in workshops. Most of these booths employ a horizontal air flow introduced on one side open to the workshop and extracted on the opposite side. With regard to this type of protective system, vertical air flow ventilation is an alternative which could improve pollutant capture. This characteristic was assessed in two companies of the stone cutting sector using a methodology similar to those used on the test bench. The findings favour vertical air flow in a ratio of between 20 and 200.

● stone machining ● vertical air flow ventilation ● horizontal air flow ventilation ● open booth ● comparative test ● capture ● pollutant ● performance

Les cabines ouvertes ventilées constituent un des moyens les plus utilisés pour éliminer les polluants générés dans les ateliers. La plupart de ces cabines mettent en œuvre un flux d'air horizontal introduit à travers une face ouverte sur l'atelier et repris par la face opposée. Pour ce type de dispositif de protection, la ventilation à flux vertical constitue une alternative susceptible d'améliorer le captage des polluants. Cette caractéristique a été évaluée dans deux entreprises du secteur de l'usinage de la pierre, au moyen d'une méthodologie proche de celles utilisées en banc d'essai. Les résultats sont en faveur du flux vertical, dans un rapport compris entre 20 et 200.

● usinage de la pierre ● ventilation à flux vertical ● ventilation à flux horizontal ● cabine ouverte ● essai comparatif ● captage ● polluant ● performance

Les cabines ouvertes ventilées constituent un choix de solution bien adaptée de maîtrise de l'empoussièrément dans les secteurs où la diversité des situations de travail ne permet pas la mise en place de solutions pratiques de captage à la source.

Il existe de nombreux modèles, de formes et de tailles différentes, parmi lesquels le mode de ventilation le plus représenté est le flux horizontal.

Ce mode de ventilation a donné lieu à un certain nombre d'études de laboratoire visant la mise au point de modèles théoriques ou semi-empiriques [1, 2] basés, pour la plupart, sur l'étude des écoulements d'air autour d'obstacles figurant les opérateurs. Les cas étudiés mettent principalement en jeu des mesures de vitesse d'air et de concentration en gaz traceur.

En fait, il existe assez peu de données comparatives portant sur des cabines de

conceptions différentes testées en situation de travail avec des polluants réels [3].

La présente étude a pour objectif de contribuer à approfondir la connaissance des performances des cabines ventilées ouvertes en comparant deux modes de ventilation, le flux horizontal et le flux vertical, dans des conditions industrielles. Il s'agit d'une approche sur une situation particulière, dans le secteur du travail de la pierre, traitant uniquement de deux cabines du commerce.

Le travail de la pierre permet d'aborder une large gamme d'opérations où les caractéristiques des deux modes de ventilation pourront être évaluées. En outre, dans ce domaine particulier où les opérations de taillage font appel à différents types d'outils et de pierres, avec de fréquents changements de l'un et de l'autre, les cabines ouvertes ventilées constituent le moyen d'élimination des polluants le plus adopté.

Les multiples conditions de travail entraînent une grande variété des caractéristiques de l'émission de poussière suivant le mode de ventilation mis en œuvre. Cette émission peut être plus ou moins bien contrôlée. La méthode utilisée dans cette étude est différente de celles habituellement mises en œuvre pour caractériser un risque. Elle vise uniquement à mettre en évidence une efficacité de ventilation relative dans un contexte expérimental codifié, proche des conditions réelles d'utilisation.

D'autres mesures, utilisant un gaz traceur (hélium), ont également été effectuées parallèlement aux mesures d'empoussièrement. Les deux produits étaient générés simultanément, le gaz traceur était propulsé dans le flux de poussière par l'intermédiaire de buses placées à proximité du point de contact de l'outil et de la pierre, puis mesurés au même endroit, à hauteur des voies respiratoires de l'opérateur. L'objectif était d'établir une relation entre les comportements aérodynamiques de la poussière et du gaz à des fins de simulation. Cette partie de la campagne d'essai concerne un autre volet de l'étude et ne sera pas développée dans ce document.

1. Présentation des cabines testées

Les installations de ventilation des cabines ont été caractérisées par des mesures de vitesses d'air dans les enceintes non occupées (libres de tout obstacle), en différents points dans les sections de soufflage et/ou d'aspiration et par des mesures de débits d'air à l'aide de la technique par traçage gazeux.

Outre la caractérisation des dispositifs de ventilation à l'état initial, les mesures de débits d'air ont permis de suivre en continu, tout au long des essais, l'incidence du colmatage des médias filtrants et ainsi de constater dans quelle mesure ces conditions d'origine pouvaient varier.

De plus, les mesures par traçage ont été comparées aux débits calculés à partir des vitesses d'air moyennes en conduit. Au moment des essais, les installations, en service depuis quelques années, étaient révisées et équipées de filtres neufs.

Fig. 1. Cabine ventilée ouverte à flux vertical (coupe verticale) - *Open ventilated booth with vertical air flow (side view)*

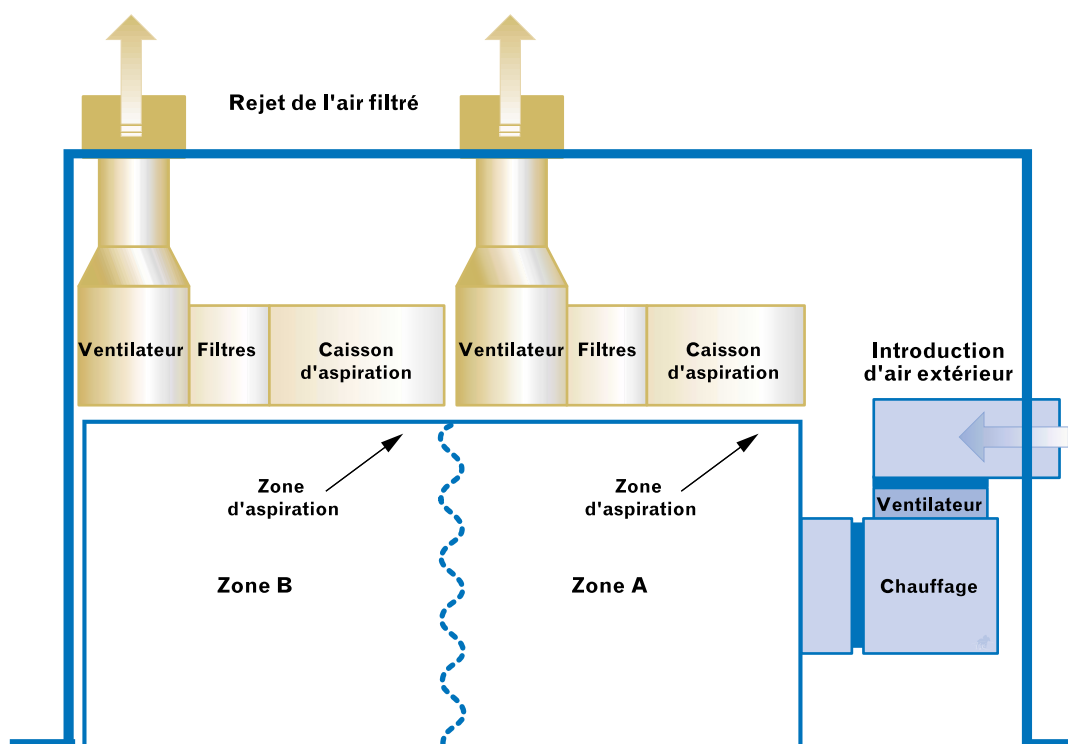
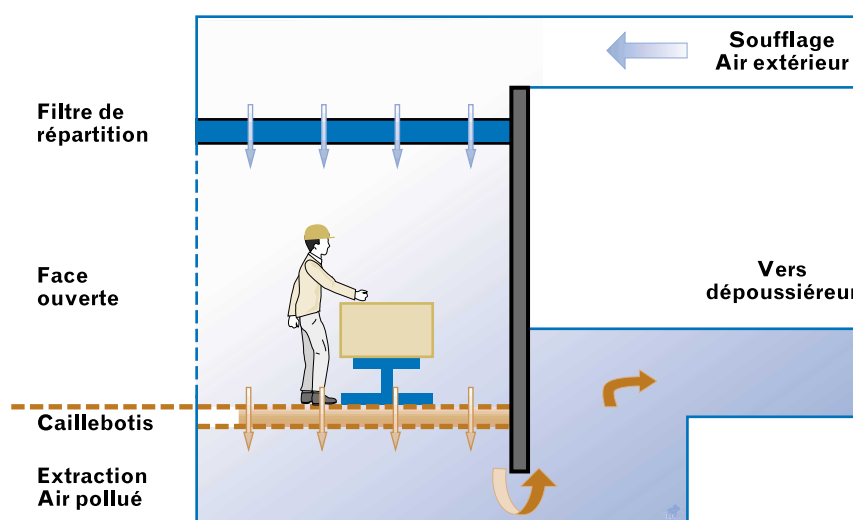


Fig. 2. Cabine ventilée ouverte à flux vertical (coupe horizontale) - *Open ventilated booth with vertical air flow (top view)*

1.1. Flux vertical

1.1.1. Description

L'installation (fig. 1 et 2) constitue un ensemble indépendant. Elle comprend une cabine parallélépipédique (largeur = 6 m ; profondeur = 2,65 m ; hauteur = 2,6 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 plénum diffusant de 16 m², commun aux deux zones. Le flux vertical balaie la cabine de haut en bas, puis est conduit à l'extérieur au travers d'un élément 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, fermée par un rideau mobile.

1.1.2. Caractéristiques aérauliques

Les mesures ont été effectuées dans la zone A selon une configuration couramment rencontrée avec ce type de cabine : face ouverte dégagée (rideau ouvert). Le rideau est essentiellement fermé lors de certaines opérations où la poussière est susceptible d'être projetée à l'extérieur de la cabine (découpe avec une meuleuse à disque par exemple).

L'orientation et la répartition du flux d'air principal ont été déterminées par des mesures de vitesses d'air dans quatre sections réparties sur la hauteur de la cabine : 2,5 m (10 cm du plafond) ; 1,5 m ; 0,65 m et 0,17 m du sol. Deux grilles de mesure ont été utilisées : l'une, de 72 points, concerne les deux sections supérieures (fig. 3) ; l'autre, de 15 points, les deux sections inférieures (fig. 4).

L'allure générale du flux, influencée par l'ouverture et la position du dispositif d'aspiration dans un angle de la cabine, n'est pas verticale. La visualisation à l'aide d'un générateur de fumée (fig. 5) est confirmée par les mesures.

Fig. 3. Cabine à flux vertical. Guide de mesure de vitesse d'air à 0,15 m et 2,5 m du sol - Vertical air flow booth. Air velocity measurement grid 1.5 m and 2.5 m from ground level

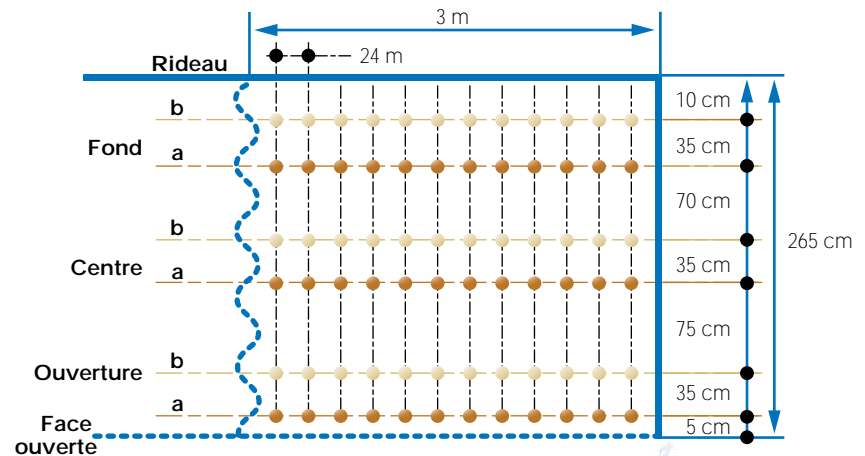


Fig. 4. Cabine à flux vertical. Grille de mesure de vitesse d'air à 0,17 m et 0,65 m du sol - Vertical air flow booth. Air velocity measurement grid 0.17 m and 0.65 m from ground level

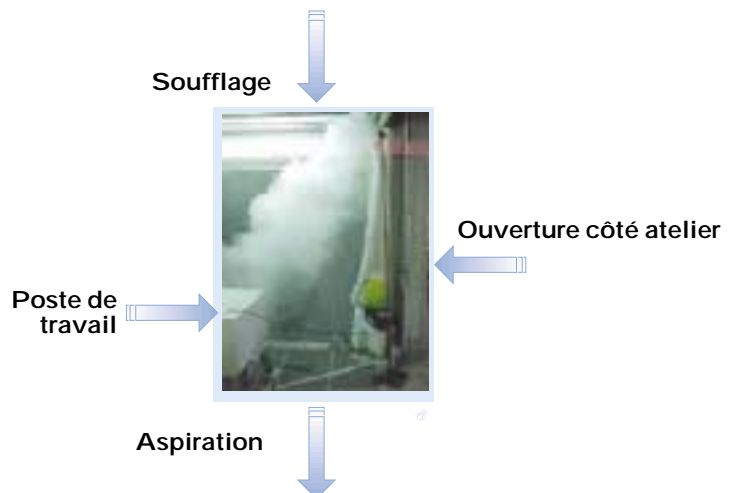
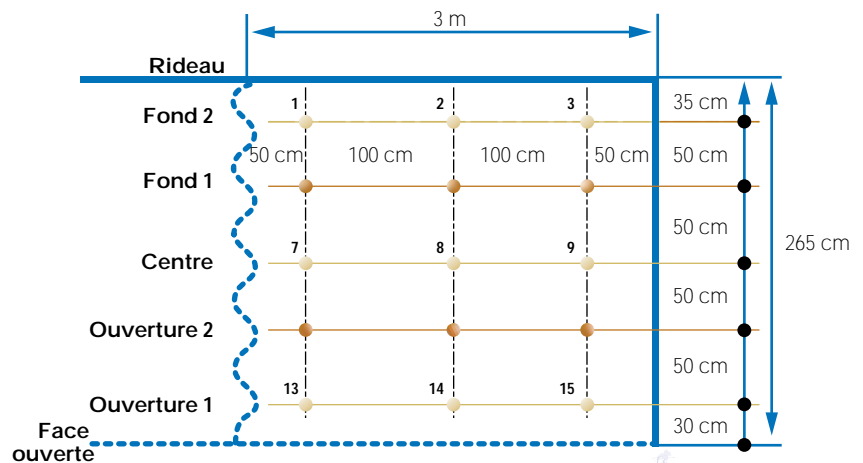


Fig. 5. Visualisation du flux d'air dans la cabine à flux vertical

- Display of the air flow in a vertical flow booth

Partant d'un profil régulier à 10 cm du plénum de soufflage (*tableau I*), dont la moyenne est de 0,46 m.s⁻¹, le flux suit une oblique orientée vers la paroi opposée à la face ouverte de la cabine.

Dans la zone d'occupation autour du poste de travail, située approximativement dans le plan transversal à 1,5 m du sol, la vitesse d'air moyenne est identique à celle mesurée sous le plénum soufflant (0,46 m.s⁻¹) si l'on excepte la valeur mesurée dans la zone d'ouverture a (0,23 m.s⁻¹) (*tableau II*). Cependant, le profil de vitesse à ce niveau, plus dispersé que dans la section proche du soufflage, met en évidence l'influence de l'ouverture et de l'aspiration. Dans les deux plans de mesure inférieurs à 0,65 m (*tableau III*) et particulièrement à 0,17 m, les profils sont nettement dissymétriques avec des vitesses d'air moyennes faibles dans l'ouverture (0,2 à 0,3 m.s⁻¹) et plus élevées vers le fond de la cabine (0,8 à 0,9 m.s⁻¹) (*tableau IV*).

Les débits déterminés par traçage et à partir de mesures de vitesse d'air sont concordants (compte tenu des fourchettes d'incertitude), tant au soufflage qu'à l'aspiration (*tableau V*). Néanmoins, dans ce dernier cas, l'hétérogénéité du flux en partie basse entraîne une grande variabilité de la moyenne calculée.

TABLEAU I

CABINE À FLUX VERTICAL
PROFIL DE VITESSE D'AIR DANS LE PLAN HORIZONTAL À 2,5 M DU SOL (10 CM DU PLAFOND)
- VERTICAL AIR FLOW BOOTH. AIR VELOCITY PROFILE IN A HORIZONTAL PLANE 2.5 M FROM GROUND LEVEL (10 CM FROM CEILING)

POSITION DES AXES DE MESURE		VITESSE MOYENNE	ECART TYPE	EC. TYP./MOY.
		m.s ⁻¹	m.s ⁻¹	%
OUVERTURE	a	0,47	0,02	4
	b	0,48	0,04	8
CENTRE	a	0,40	0,05	12
	b	0,49	0,03	6
FOND	a	0,46	0,04	9
	b	0,48	0,04	8
GÉNÉRALE		0,46	0,01	2

TABLEAU II

CABINE À FLUX VERTICAL PROFIL DE VITESSE D'AIR À 1,5 M DU SOL
- VERTICAL AIR FLOW BOOTH. AIR VELOCITY PROFILE 1.5 M FROM GROUND LEVEL

POSITION DES AXES DE MESURE		VITESSE MOYENNE	ECART TYPE	EC. TYP./MOY.
		m.s ⁻¹	m.s ⁻¹	%
OUVERTURE	a	0,23	0,09	40
	b	0,46	0,06	13
CENTRE	a	0,45	0,06	13
	b	0,46	0,09	19
FOND	a	0,44	0,07	16
	b	0,48	0,07	14
GÉNÉRALE		0,42	0,11	26

TABLEAU III

CABINE À FLUX VERTICAL
PROFIL DE VITESSE D'AIR DANS LE PLAN HORIZONTAL À 0,65 M DU SOL
- VERTICAL AIR FLOW BOOTH. AIR VELOCITY PROFILE IN A HORIZONTAL PLANE 0.65 M FROM GROUND LEVEL

AXES DE MESURE	POINTS	VITESSE MOYENNE	ECART TYPE	EC. TYP./MOY.
		m.s ⁻¹	m.s ⁻¹	%
OUVERTURE 1	1 à 3	0,17	0,05	28
OUVERTURE 2	4 à 6	0,31	0,04	11
CENTRE	7 à 9	0,48	0,06	13
FOND 1	10 à 12	0,52	0,07	13
FOND 2	13 à 15	0,53	0,05	9
GÉNÉRALE		0,40	0,15	38

Fig. 6. Flux vertical : débit d'aspiration mesuré par traçage au long de la campagne d'essais - Vertical flow : exhaust flow rate measured by tracing for the entire test campaign

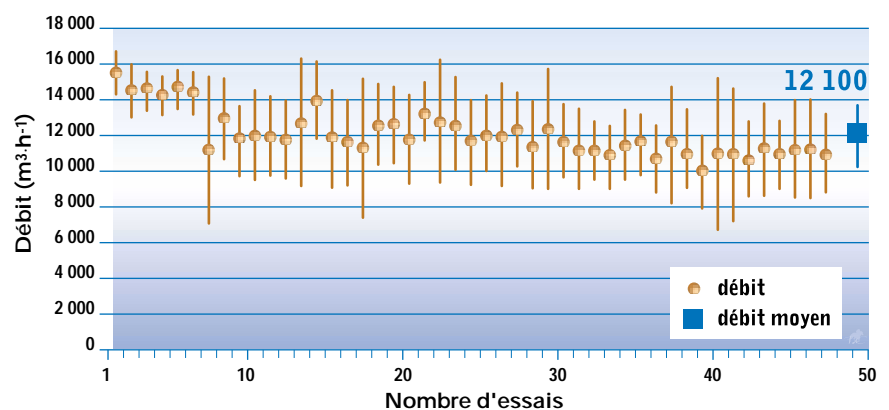


TABLEAU IV

CABINE À FLUX VERTICAL

PROFIL DE VITESSE D'AIR DANS LE PLAN HORIZONTAL À 0,17 M DU SOL

- VERTICAL AIR FLOW BOOTH. AIR VELOCITY PROFILE IN A HORIZONTAL PLANE 0.17 M FROM GROUND LEVEL

AXES DE MESURE	POINTS	VITESSE MOYENNE	ECART TYPE	EC. TYP./MOY.
		m.s ⁻¹	m.s ⁻¹	%
OUVERTURE 1	13 à 15	0,22	0,07	34
OUVERTURE 2	10 à 12	0,29	0,06	20
CENTRE	7 à 9	0,48	0,07	14
FOND 1	4 à 6	0,75	0,06	8
FOND 2	1 à 3	0,91	0,16	18
GÉNÉRALE	1 à 15	0,53	0,28	53

Les débits mesurés au soufflage sont conformes aux données du constructeur pour une cabine neuve, soit 12 000 m³.h⁻¹ pour chaque zone. A l'aspiration, les valeurs sont également conformes, mais uniquement en début d'utilisation : 14 000 m³.h⁻¹ donnés et mesurés sur les six premiers essais. Passée cette phase, le débit varie entre 12 500 m³.h⁻¹ et 11 500 m³.h⁻¹ (fig. 6), soit une diminution du débit de 15 % entre le début et la fin des essais.

Cette caractéristique reflète assez bien un état de fait constaté par ailleurs. Lors du démarrage d'une installation de dépoussiérage, à l'état neuf, les filtres ont une efficacité en fonction du type choisi, en l'occurrence un filtre de moyenne efficacité (type F5). Cette efficacité s'accroît au cours du temps et peut évoluer jusqu'à atteindre un régime de fonctionne-

ment établi, qui dépend en grande partie de la fréquence et de la puissance des décolmatages. De cette caractéristique de filtration, découle la variation de débit constatée.

Au début, la fréquence des décolmatages était trop espacée, eu égard aux fortes quantités de poussières produites, en particulier avec les outils rotatifs.

Une séquence automatique de quelques dizaines de secondes était effectuée à chaque arrêt de l'installation, le plus souvent à la fin de chaque demi-journée.

Par la suite, en plus de ce processus systématique, une séquence manuelle de plusieurs minutes était mise en œuvre, environ trois à quatre fois par jour.

TABLEAU V

FLUX VERTICAL : COMPARAISON DES DÉBITS MESURÉS PAR TRAÇAGE ET PAR CALCUL À PARTIR DE LA VITESSE D'AIR MOYENNE

- VERTICAL FLOW : COMPARISON OF THE FLOW RATES MEASURED BY TRACING AND BY CALCULATION FROM AVERAGE AIR VELOCITY

DÉBIT (m ³ .h ⁻¹)	CALCUL	TRAÇAGE
Soufflage	13 200 ± 440	12 200 ± 1 700
Extraction	15 200 ± 3 800	12 100 ± 200

1.2. Flux horizontal

1.2.1. Description

L'installation se compose d'une cabine parallélépipédique (fig. 7) (longueur = 2,56 m ; largeur = 2,41 m ; hauteur = 2,08 m) comprenant sur un petit côté une face ouverte et sur la face opposée un dispositif d'aspiration constitué de sept fentes transversales (fig. 8).

L'air provient de l'atelier, traverse la cabine horizontalement et circule au travers des fentes. Il est ensuite rejeté à l'extérieur via un dépoussiéreur à manches raccordé à la base du caisson d'aspiration. Le débit aspiré est partiellement réintroduit dans l'atelier en période froide (environ 50 %).

Fig. 7. Cabine ventilée ouverte à flux horizontal (coupe verticale) - Open ventilated booth with horizontal air flow (side view)

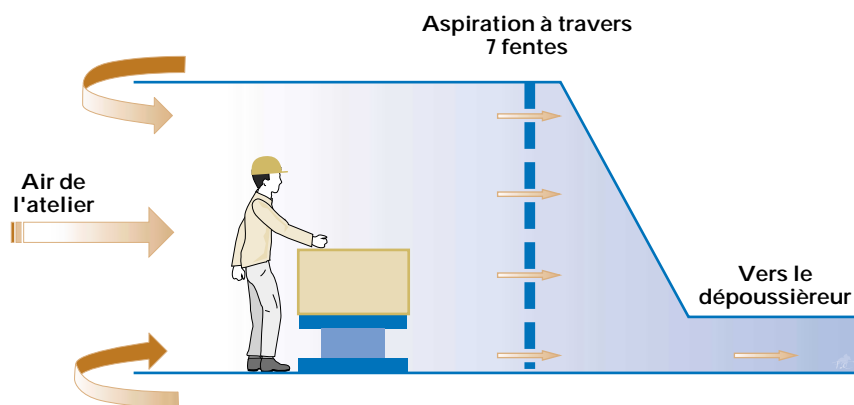
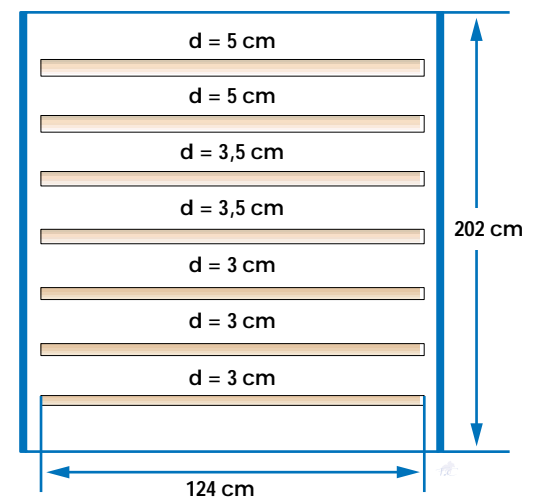


Fig. 8. Fentes d'aspiration - Suction slots



1.2.2. Caractéristiques aérauliques

Des profils de vitesse d'air ont été effectués dans une section verticale à 0,5 m à l'intérieur de la cabine (fig. 9). En moyenne, la valeur calculée sur la section est de 0,45 m.s⁻¹ (tableau VI), identique à celle du flux vertical et proche de la valeur préconisée de 0,5 m.s⁻¹ [4]. Le profil est homogène, à l'exception des mesures effectuées à 10 cm du plafond.

De même que dans le cas du flux vertical, les vitesses mesurées ont permis de calculer le débit d'aspiration et de le comparer aux mesures par traçage. En l'occurrence, les deux méthodes de détermination donnent des résultats proches, l'écart entre la plus grande et la plus faible valeur moyenne est de 4 % (tableau VII).

Les débits mesurés par traçage à l'aspiration restent constants au long de la campagne d'essais (fig. 10).

2. Méthodologie

2.1. Conditions d'environnement

Chaque cabine a été testée avec des moyens d'essai et de mesure identiques dans l'environnement industriel propre à chaque site. La cabine à flux vertical était le seul poste ventilé installé dans un atelier où travaillaient trois ou quatre personnes, alors que la cabine à flux horizontal faisait partie d'un groupe de sept, situé dans un atelier plus vaste comprenant une quinzaine de personnes.

Les paramètres extérieurs aux cabines n'étaient pas contrôlés (activité autour des cabines, empoussièrement ambiant, ouvertures de portes, etc.). Néanmoins, dans la mesure du possible, certaines conditions ont été prises en compte, afin de limiter l'incidence éventuelle de biais dus à des situations trop différentes. Ainsi, les interventions se sont déroulées dans des conditions de température extérieure assez proches, sur la même période de l'année (octobre/novembre). Les ateliers étaient chauffés et les températures relevées à l'intérieur évoluaient entre 9 °C et 12 °C pour le flux horizontal et 12 °C et 15 °C pour le flux vertical. De plus, pour ce dernier, l'écart entre la température intérieure et extérieure de la cabine était maintenu, par l'intermédiaire du système de chauffage intégré, au plus faible niveau

TABLEAU VI
COMPARAISON DES DÉBITS MESURÉS PAR TRAÇAGE ET PAR CALCUL
À PARTIR DES VITESSES D'AIR MOYENNES
- COMPARISON OF THE FLOW RATES MEASURED BY TRACING AND BY CALCULATION
FROM AVERAGE AIR VELOCITIES

AXES DE MESURE (m)	POINTS	VITESSE MOYENNE (m.s ⁻¹)	ECART TYPE (m.s ⁻¹)	EC.TYP./MOY (%)
1,90	1 à 12	0,20	0,08	0,40
1,54	13 à 24	0,47	0,08	0,16
1,18	25 à 36	0,49	0,12	0,23
0,82	37 à 48	0,49	0,11	0,22
0,46	49 à 60	0,49	0,11	0,23
0,10	61 à 72	0,54	0,14	0,25
générale	1 à 72	0,45	0,15	0,34

TABLEAU VII
COMPARAISON DES DÉBITS MESURÉS
PAR TRAÇAGE ET PAR CALCUL
À PARTIR DE LA VITESSE D'AIR MOYENNE
- COMPARISON OF THE FLOW RATES MEASURED BY
TRACING AND BY CALCULATION FROM THE AVERAGE
AIR VELOCITY

DÉBIT (m ³ .h ⁻¹)	CALCUL	TRAÇAGE
Aspiration	8 300 ± 400	8 600 ± 450

possible afin de limiter les turbulences provoquées par les mouvements convectifs entre le milieu chaud et le froid.

2.2. Principe de la méthode

Les essais étaient basés sur des situations de travail réelles mettant en œuvre des tâches et des gestes professionnels couramment exécutés par les tailleurs de pierre. Néanmoins, pour atteindre l'objectif de comparaison des deux modèles de ventilation, les tâches habituelles ont été décomposées en séquences unitaires indépendantes.

Le choix des différentes modalités d'essai : situations de travail, types de pierre utilisée et outillage, a été effectué en accord avec les deux entreprises concernées. Tous les essais ont été effectués avec un opérateur unique qui a accompli les différentes séquences de travail sur les mêmes types de pierre et au moyen des mêmes outils dans les deux cabines.

Les moyens d'essai utilisés pour mener à bien les différentes mesures sont présentés en annexe.

L'opérateur placé dans la cabine avec la ventilation en service, dans une position

et une posture données, exécutait trois types de travaux sur un bloc de pierre : tronçonnage, ponçage ou burinage. Durant chaque phase de travail, d'une durée de 20 minutes, les concentrations en poussière étaient mesurées en continu et un ensemble de visualisation par vidéo (CAPTIV, cf. annexe) permettait d'associer en temps réel les mesures et les situations de travail.

2.3. Prélèvement de poussière

La poussière, prélevée à hauteur des voies respiratoires de l'opérateur puis transportée au moyen d'un circuit de prélèvement, était mesurée par un analyseur optique portable (photomètre Miniram, cf. annexe) fixé dans le dos de l'opérateur. L'appareil délivrait en continu un signal électrique, proportionnel à la concentration, transmis à distance à une centrale d'acquisition par un dispositif de télémétrie.

Le photomètre présente la particularité d'être sensible à la nature, à la forme et à la granulométrie de la poussière mesurée et nécessite, de ce fait, un étalonnage avec la poussière effectivement prélevée pour obtenir une échelle de valeurs en concentration.

Cependant, l'objectif de comparaison des deux modes de ventilation, par rapport à des situations de travail types, permet de s'affranchir de cette difficulté dans la mesure où ce n'est pas le niveau d'empoussièrement absolu dans chaque cabine qui est recherché mais une valeur relative.

Fig. 9. Grille de mesure de vitesse d'air à 0,5 m de l'entrée - Air velocity measurement grid 0.5 m from inlet

La mesure en continu de l'empoussièremment dans la zone de respiration concerne une gamme de granulométrie déterminée par la plage de mesure du photomètre et les différents composants du circuit de prélèvement. L'ensemble des éléments constituant la ligne de prélèvement se comporte comme un sélecteur de particules, dont les caractéristiques sont éloignées des qualités requises pour déterminer la concentration de poussière respirable (conduit de faible diamètre, coudes et intersections du circuit, etc.). En l'occurrence, l'appareillage capte une fraction de la poussière susceptible d'être respirée par l'opérateur. L'hypothèse est faite que, toutes conditions égales par ailleurs, la poussière captée suit les mêmes mécanismes de dépôt tout au long du circuit de prélèvement.

En l'absence d'une étude visant à déterminer la sélectivité du circuit de prélèvement avec la poussière réelle, une estimation de la granulométrie des particules mesurées par le photomètre a pu être réalisée en utilisant un modèle théorique, mis au point et validé par le CEA [7].

Ce modèle permet d'établir une courbe de dépôt des particules dans les conduits (fig. 11) en fonction des caractéristiques de la poussière et du circuit de prélèvement, notamment de la longueur des segments et de leur forme.

La mesure en continu de l'empoussièremment dans la zone de respiration de l'opérateur a été complétée par d'autres mesures effectuées à l'aide d'un appareil individuel (impacteur Marple, cf. annexe). Ce dernier était fixé à hauteur du revers gauche du vêtement de travail. Le but était de déterminer un ordre de grandeur de la granulométrie et de la concentration en poussière de pierre générée par les différentes opérations.

Fig. 11. Estimation de la granulométrie et de la proportion de particules susceptibles d'atteindre le photomètre - Estimation of the granulometry and proportion of the particles likely to reach the photometer

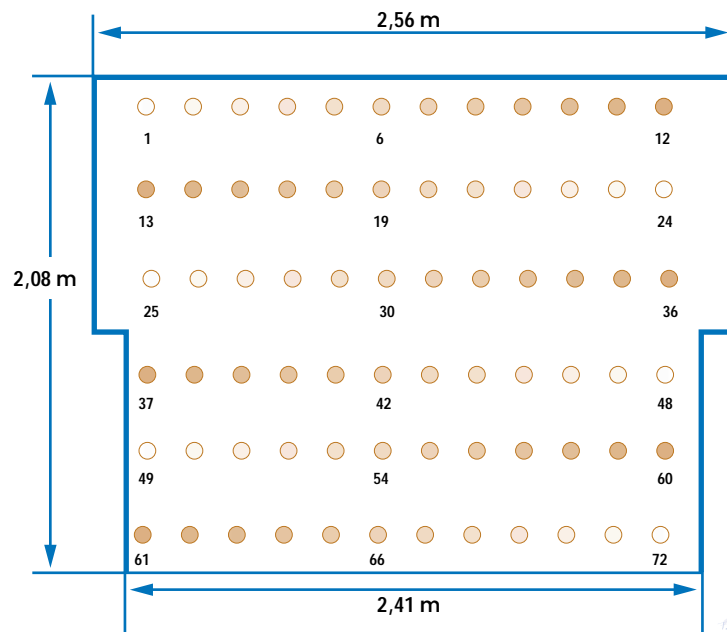
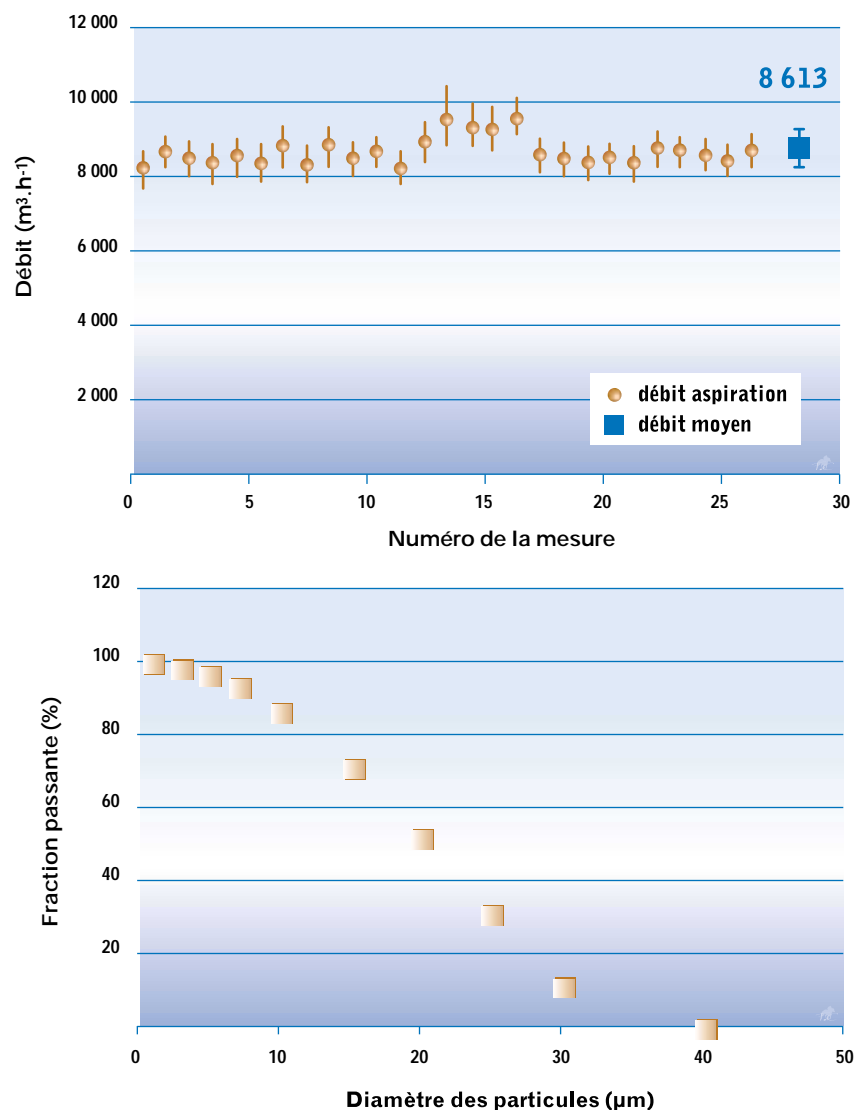


Fig. 10. Débits d'aspiration mesurés par traçage lors des différents essais - Exhaust flow rates measured by tracing during the different tests



2.4. Critère d'évaluation des configurations

Au terme de chaque séquence d'essai, la configuration testée était caractérisée par un nombre, la moyenne exprimée en unité arbitraire (ua), calculée par intégration sur la durée de l'essai de la tension mesurée par l'analyseur optique :

$$ua = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} (u - u_r) . dt$$

- u : tension délivrée pendant l'essai,
- u_r : tension résultant de l'empoussièrement ambiant,
- t₁ : temps de début d'essai,
- t₂ : temps de fin d'essai.

Pour chaque configuration, de la tension brute (u) était déduite la tension issue de l'empoussièrement résiduel (u_r) mesurée durant au moins deux minutes avant chaque essai dans la cabine. Cette valeur moyenne était ensuite intégrée par calcul sur la durée de l'essai en faisant l'hypothèse que la concentration dans l'atelier, au voisinage de la cabine, demeurait au même niveau durant la phase d'usinage.

2.5. Paramètres étudiés

2.5.1. Positions et postures de l'opérateur

Chaque cabine présente une géométrie propre et les postes de travail (fig. 12 à 14) étaient disposés de la manière habituellement adoptée en situation de travail.

Le support de pierre était placé de façon à permettre un déplacement autour de la pièce à tailler suivant quatre positions (fig. 15) :

- dos à l'ouverture,
- profil gauche,
- face à l'ouverture,
- profil droit.

En fonction du type d'outil utilisé, l'opérateur adoptait trois postures (fig. 16) :

- verticale (l'outil se trouvait entre 0,60 m et 0,65 m des voies respiratoires) ;
- inclinée à 45° (outil distant de 0,40 m à 0,45 m) ;
- attitude plus inclinée (outil entre 0,25 m et 0,30 m).

Les valeurs ci-dessus sont des minimaux déterminés de manière statique. Au cours des essais, l'opérateur manipulait son outil d'un bout à l'autre de la pierre et pouvait légèrement modifier sa posture.

Fig. 12. Cabine à flux vertical : position du poste de travail - Vertical air flow booth: position of the work station

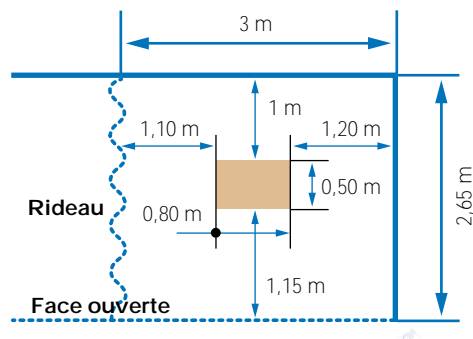


Fig. 13. Cabine à flux horizontal : position du poste de travail - Horizontal air flow booth: position of the work station

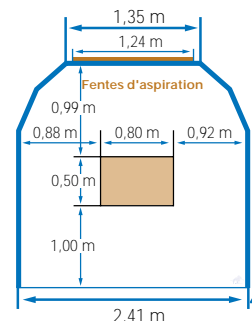


Fig. 14. Encombrement du poste de travail (dans la cabine à flux horizontal) - Space required for the work station (in the horizontal air flow booth)

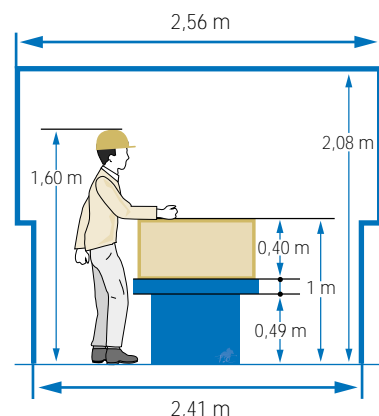


Fig. 15. Positions de l'opérateur - Position of operator

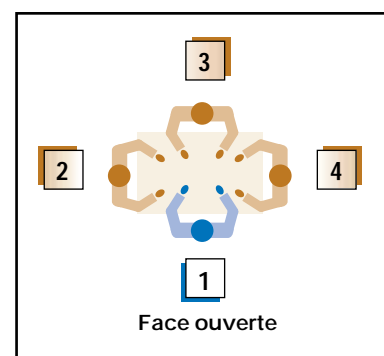


TABLEAU VIII

CARACTÉRISTIQUES TECHNIQUES DES PIERRES UTILISÉES - TECHNICAL CHARACTERISTICS OF THE TYPES OF STONE USED

	ROCHE MARBRIÈRE (ST-CORNEILLE)	PIERRE CALCAIRE (CHARENTENAY)
MASSE VOLUMIQUE APPARENTE	2 400 à 2 500 kg.m ⁻³	1 800 à 1 900 kg.m ⁻³
POROSITÉ	1 à 3 %	30 à 35 %
RÉSISTANCE A LA COMPRESSION	160 à 180 Mpa	18 à 25 Mpa
VITESSE DE PROPAGATION DU SON	5 500 à 5 600 m.s ⁻¹	2 800 à 3 000 m.s ⁻¹
DIMENSIONS (v = 0,16 m ³)	0,8 x 0,5 x 0,4 m ³	0,8 x 0,5 x 0,4 m ³
POIDS	400 kg	300 kg
NOMBRE DE PIERRES POUR LES DEUX SITES	4	6

Fig. 16. Postures de l'opérateur - Postures of operator

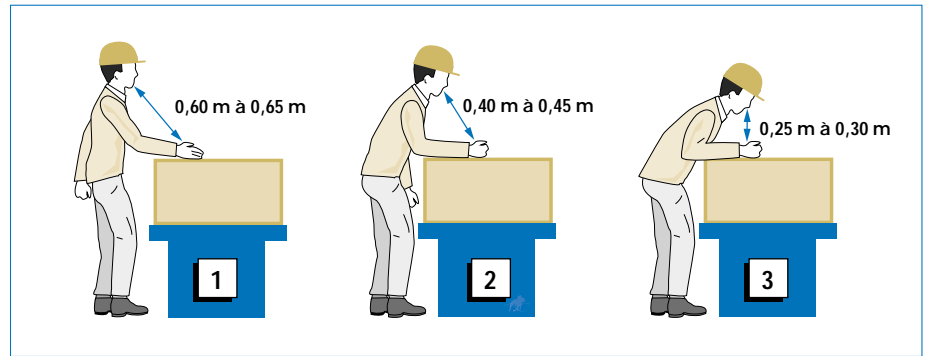


Fig. 17. Tronçonneuse à disque - Cutting-off sawing machine



2.5.2. Types d'outils

Parmi l'outillage couramment utilisé pour la taille de la pierre, trois types d'outils ont été retenus en raison de leur fréquence d'utilisation et/ou de leur capacité à produire de forts débits de poussière :

- tronçonneuse à disque équipée d'un disque diamanté de diamètre 230 mm (fig. 17) ;
- ponceuse rotative équipée d'une meule grain 36 (fig. 18) ;
- burineur doté d'un ciseau de largeur 20 mm pour le taillage courant, ou 5 mm pour le taillage fin ou la sculpture (fig. 19).



Fig. 18. Ponceuse - Sanding machine

Fig. 19. Ciseau burineur - Dripping tool



2.5.3. Types de pierre

Les pierres usinées étaient de deux natures, tendre et dure, afin de déterminer l'efficacité des deux systèmes de ventilation dans des conditions supposées de fort et de faible dégagement de poussière (tableau VIII). Avant les essais, les pierres avaient subi un passage en étuve de 24 heures.

2.5.4. Configurations d'essai

La combinaison des différentes positions et des outils conduit à une grille d'essai comprenant 18 configurations (tableau IX) qui ont été répétées quatre fois (pour chaque cabine et avec chacune des pierres). Cependant, toutes les positions n'ont pas été étudiées systématiquement. Il en était ainsi du tronçonnage face à l'ouverture en raison de la distance d'éjection des particules (environ 2 m) qui dépassait largement la profondeur des cabines, et des positions latérales pour le travail de sculpture en raison du faible empoussièrément.

TABLEAU IX

GRILLE D'ESSAIS - TEST GRID

Position de l'opérateur / face ouverte de la cabine	Type d'opération et posture				
	Tronçonnage	Ponçage droit	Ponçage penché	Burinage penché	Position graveur
Dos (1)	config. 1	config. 5	config. 9	config. 13	config. 17
Profil côté gauche (2)	config. 4	config. 8	config. 12	config. 16	
Face (3)	config. 2	config. 6	config. 10	config. 14	config. 18
Profil côté droit (4)	config. 3	config. 7	config. 11	config. 15	

En revanche, des tests de répétabilité ont été effectués sur certaines configurations courantes, comme par exemple la position face au plan aspirant dans le cas du flux horizontal.

Les différentes opérations visaient à produire de la poussière de manière constante, en respectant le plus possible le geste professionnel : surfacage à plat avec la ponceuse, réalisation de coupes parallèles avec la tronçonneuse à disque et dégrossissage ou réalisation de motifs de gravure avec le ciseau burineur suivant le modèle de ciseau.

2.6. Déroulement des essais

Les séquences de mesure étaient précédées de deux périodes consécutives de une à deux minutes : la première avait

pour but de déterminer le niveau d'empoussièrement résiduel dans la cabine, la seconde d'assurer une mise en régime de la cabine avant déclenchement de la séquence d'essai. Le signal délivré par l'analyseur de poussière, ainsi que les images vidéo, étaient pris en compte au moment du démarrage de l'usinage. La phase de 20 minutes destinée à caractériser la configuration était délimitée par des tops électriques enregistrés en même temps que le signal de mesure.

Les différents éléments ou appareils soumis à la poussière, susceptibles de varier au cours du temps, étaient systématiquement vérifiés (débit de la pompe de prélèvement) ou nettoyés après chaque essai (conduit de prélèvement, cellule de mesure du photomètre).

3. Résultats et discussion

Compte tenu du nombre de configurations testées, il a été possible, d'une part, de dégager des tendances principales caractérisées par le rapport des moyennes, établies sur l'ensemble des essais, entre flux vertical et horizontal et, d'autre part, dans quelques configurations d'évaluer, à l'aide d'un outil statistique, les limites des domaines d'efficacité des deux systèmes de ventilation.

Pour la plupart, les tests ont été effectués seulement une ou deux fois (hors essais de répétabilité, cf. § 3.2) avec des opérations qui, par nature, impliquent un dégagement de poussière sujet à variations.

Fig. 20. Comparaison des flux vertical et horizontal avec pierre tendre - *Comparison of vertical and horizontal air flow with soft stone*

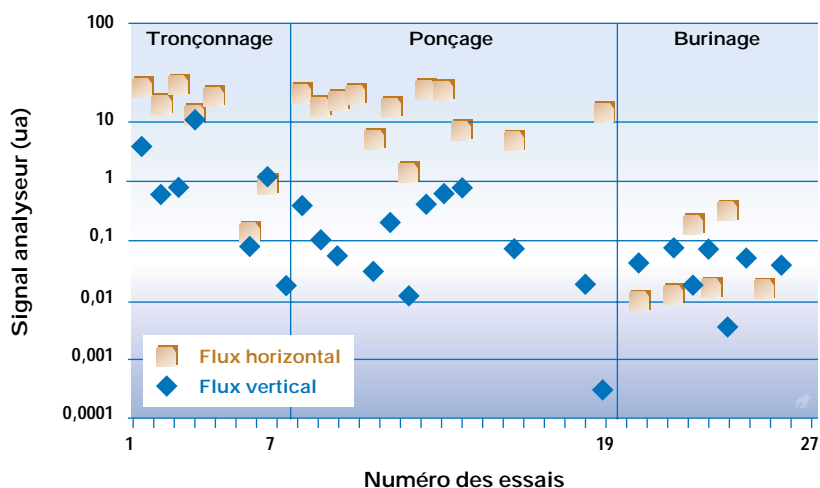
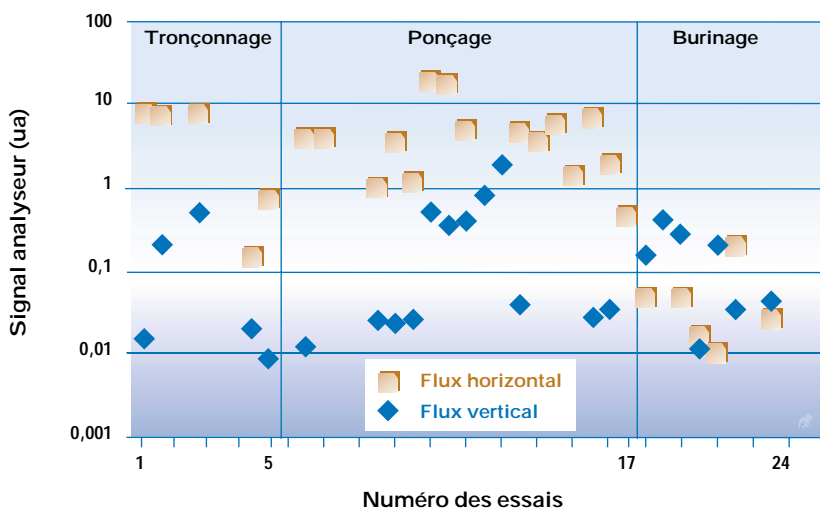


Fig. 21. Comparaison des flux vertical et horizontal avec pierre dure - *Comparison of vertical and horizontal air flow with hard stone*



Les mesures mettent en évidence un mode de génération qui se caractérise essentiellement par des pics de poussière, plus ou moins espacés, en relation avec l'intensité et la durée du contact de l'outil sur la pierre.

Dans la majorité des situations étudiées avec la cabine à flux vertical, les nombres caractéristiques (ua) calculés pour chaque configuration se situent à des niveaux faibles, assez proches de l'empoussièrement de fond. Ce résultat positif souligne néanmoins le problème de comparer sans précaution les deux systèmes, par l'intermédiaire de rapports d'efficacité. Compte tenu de l'incertitude sur les faibles valeurs, les résultats présentés sont à considérer comme des ordres de grandeur.

3.1. Évaluation globale

3.1.1. Comparaison à partir des moyennes

Un traitement global des résultats (fig. 20 et 21), permet de mettre en évidence une tendance forte de l'avantage du flux vertical pour les opérations de ponçage et de tronçonnage avec les deux types de pierre. En moyenne, toutes configurations confondues, les rapports d'efficacité entre flux vertical et horizontal indiquent une meilleure performance du flux vertical, dans des proportions de l'ordre de 15 à 19 (tableau X). Cependant, suivant les configurations, ce rapport s'échelonne d'environ 1 à plus de 100 (cf. § 3.1.2, fig. 28 et 29).

En revanche, pour l'opération de burlage, il est difficile de différencier les performances des deux modes de ventilation. Les résultats sont du même ordre de grandeur, quel que soit le type de pierre. On peut cependant noter que les niveaux d'empoussièrement aux voies respiratoires sont très inférieurs à ceux que l'on peut observer avec les outils à fort dégagement.

L'approche globale appliquée à la mesure de l'empoussièrement généré par les deux types de pierre tend à indiquer que, dans la gamme de granulométrie couverte par le photomètre (cf. § 2.3 et annexe), l'usinage de la pierre tendre

génère, en moyenne, plus de poussière que la pierre dure dans la zone respirable de l'opérateur. Les rapports 3 et 3,5 (cf. tableau X), calculés en effectuant la moyenne générale des résultats obtenus avec chacune des pierres sont, à l'instar de la comparaison flux horizontal/flux vertical, des valeurs indicatives.

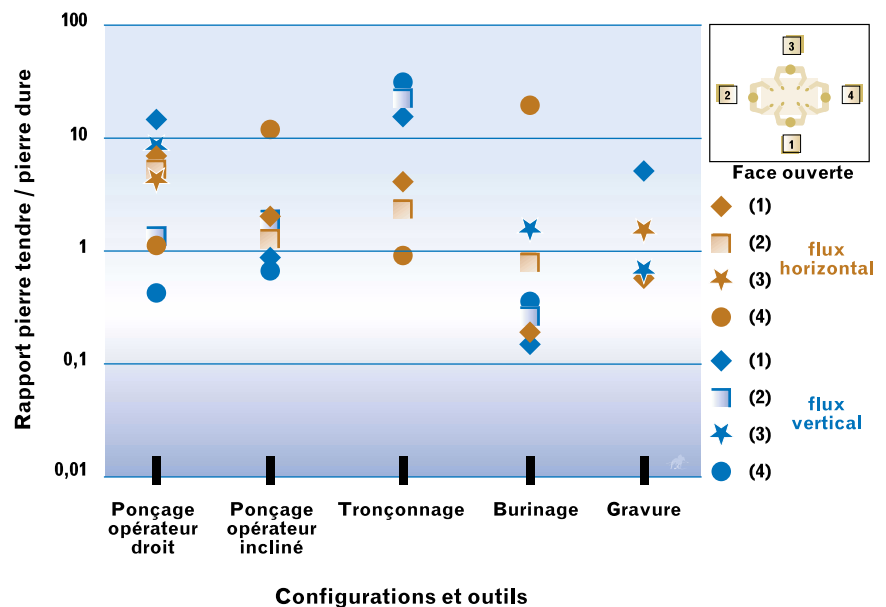
Ceci apparaît plus nettement lorsque l'on effectue, pour chaque opération, les rapports pierre tendre/pierre dure (fig. 22). Les différences observées entre ces rapports rendent difficile une interprétation mettant uniquement en cause l'incidence du paramètre dureté.

TABLEAU X

COMPARAISON GLOBALE DES DEUX MODES DE VENTILATION (100 ESSAIS)
- GLOBAL COMPARISON OF THE TWO VENTILATION MODES (100 TESTS)

	VERTICAL	HORIZONTAL	RAPPORT
	moyenne (ua)	moyenne (ua)	horizontal/vertical
PIERRE DURE	0,26	4	15
PIERRE TENDRE	0,74	14	19
TENDRE / DURE	3	3,5	

Fig. 22. Comparaison des quantités de poussières émises à hauteur des voies respiratoires par les deux types de pierre
- Comparison of the quantities of dust emitted at airways level with both stone types



3.1.2. Comparaison par configuration

L'observation détaillée des résultats (fig. 23 à 27) permet de distinguer des tendances par rapport à l'outil utilisé et aux positions et postures de l'opérateur.

La comparaison par type d'outil montre que la supériorité du flux vertical est systématique dans le cas du ponçage et dans une moindre mesure, du tronçonnage.

Avec la ponceuse, dans les deux postures testées (opérateur droit ou incliné), les rapports flux horizontal/flux vertical se situent dans la même fourchette, quels que soient la position de travail et le type de pierre. Le flux vertical peut atteindre des efficacités de 10 à 100 fois plus élevées que l'horizontal, voire plus pour certaines positions comme celle de l'opérateur droit dans le cas du ponçage (fig. 28 et 29).

La tronçonneuse a des résultats plus dispersés qui sont différents suivant la position de l'opérateur et le type de pierre (cf. fig. 28 et 29).

Lorsque l'opérateur est dos à l'ouverture, l'efficacité est favorable au flux vertical, avec les deux types de pierre, dans un rapport de 20 à 80. La situation est différente avec les positions latérales où, suivant le type de pierre usiné, les résultats sont contradictoires. Dans ces deux positions, le tronçonnage de la pierre dure entraîne des rapports d'efficacité en faveur du flux vertical (20 à 50 fois plus élevée que le flux horizontal), alors que le tronçonnage de la pierre tendre se caractérise par des rapports voisins de 1 (cf. fig. 28).

Pour les opérations de burinage, les niveaux d'empoussièrement mesurés étaient faibles (cf. fig. 26 et 27).

De ce fait, l'analyse détaillée n'apporte pas plus d'éléments de comparaison que la tendance globale et, dans les conditions de cette étude, il est difficile de conclure à la supériorité de l'un ou l'autre mode de ventilation pour ce type de travaux.

Fig. 23. Ponçage opérateur en position verticale. Comparaison des flux vertical et horizontal avec pierre tendre et dure - Sanding, operator standing upright. Comparison of vertical and horizontal air flow with soft and hard stone

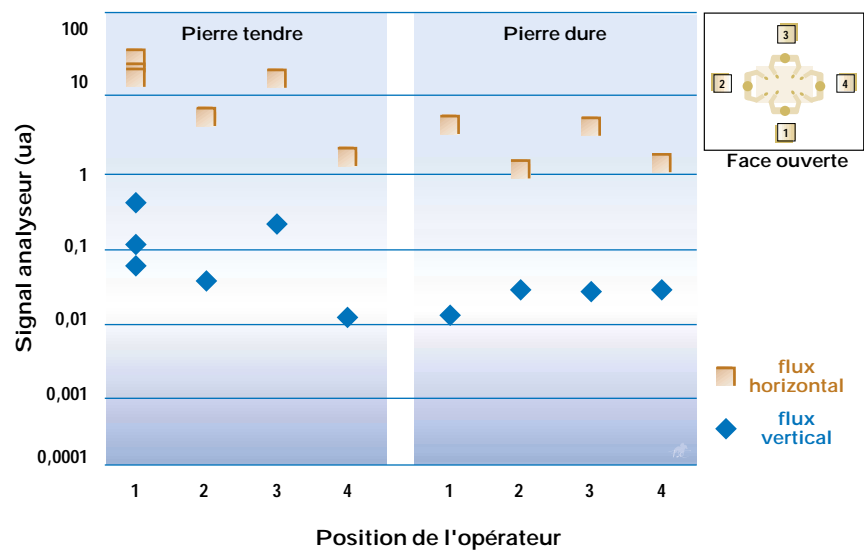


Fig. 24. Ponçage opérateur en position inclinée. Comparaison des flux vertical et horizontal avec pierre tendre et dure - Sanding, operator bending. Comparison of vertical and horizontal air flow with soft and hard stone

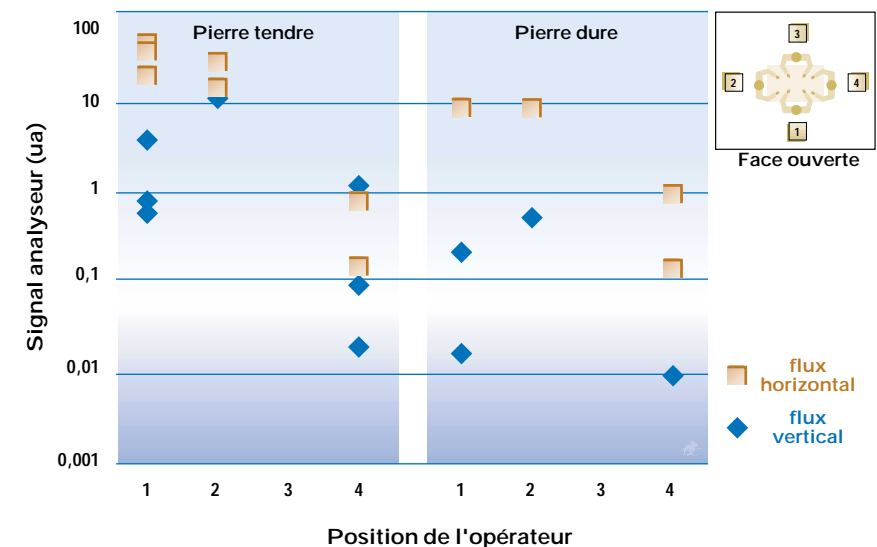
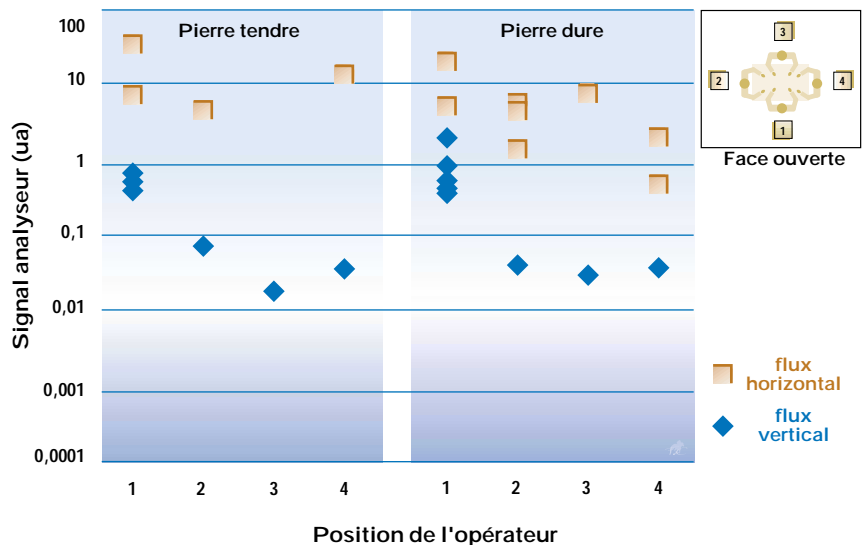


Fig. 25. Tronçonnage. Comparaison des flux vertical et horizontal avec pierre tendre et dure - Cutting-off. Comparison of vertical and horizontal air flow with soft and hard stone

Fig. 26. Burinage. Comparaison des flux vertical et horizontal avec pierre tendre et dure - Chipping. Comparison of vertical and horizontal air flow with soft and hard stone

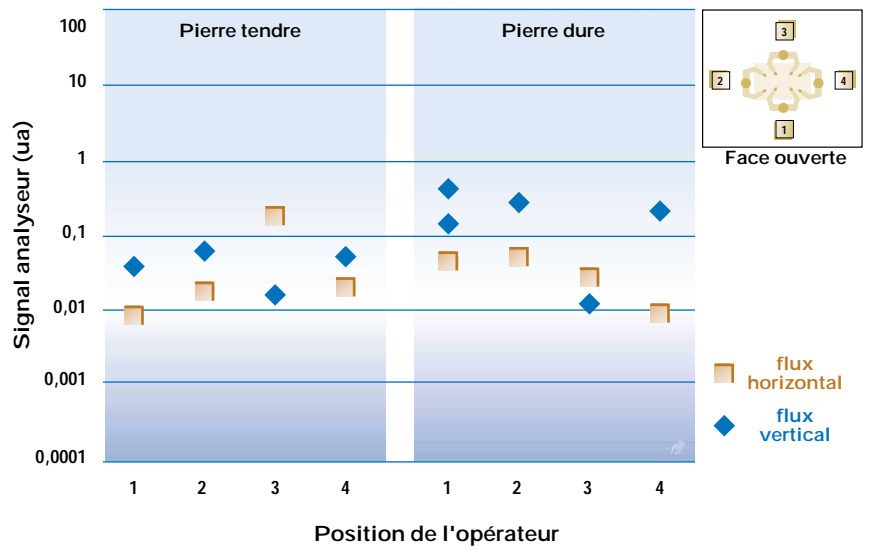


Fig. 27. Burinage fin (gravure). Comparaison des flux vertical et horizontal avec pierre tendre et dure - Fine chipping (engraving). Comparison of vertical and horizontal air flow with soft and hard stone

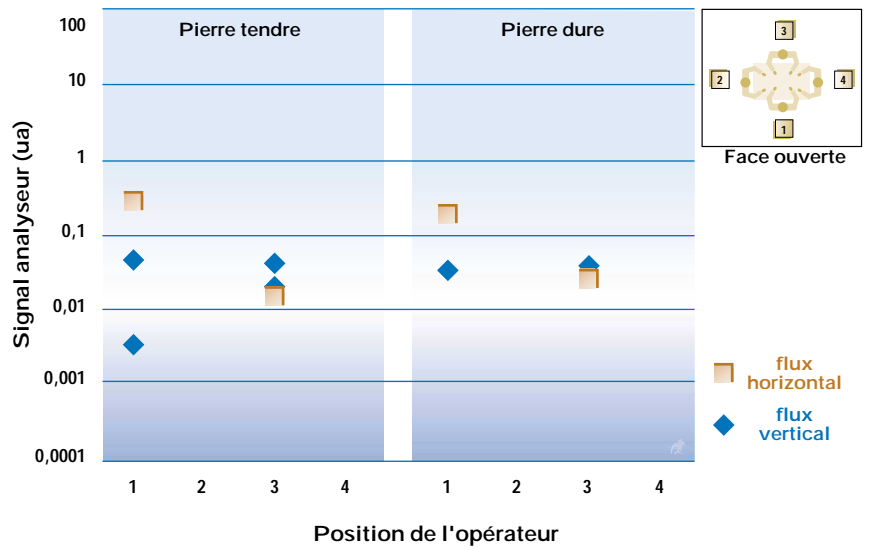


Fig. 28. Comparaison par outils et positions des flux vertical et horizontal avec pierre tendre - Comparison by tools and positions of vertical and horizontal air flow with soft stone

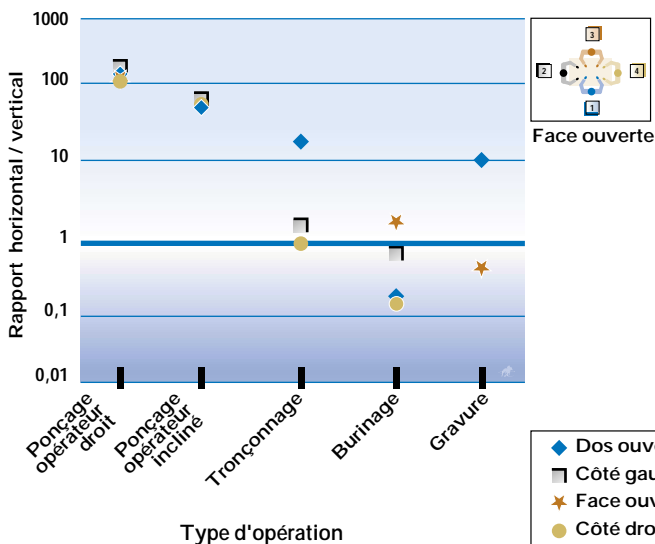
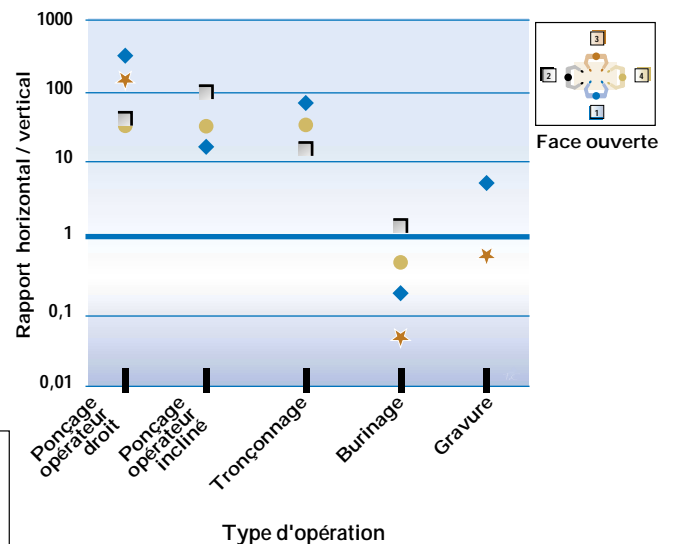


Fig. 29. Comparaison par outils et positions des flux vertical et horizontal avec pierre dure - Comparison by tools and positions of vertical and horizontal air flow with hard stone



3.2. Évaluation statistique

3.2.1. Variabilité des mesures

Cette variabilité a pu être évaluée, dans une certaine mesure, en effectuant plusieurs répétitions à des moments différents tout au long de la campagne sur quelques configurations choisies (*tableau XI*). Ce choix était basé sur l'intérêt que les configurations présentaient, par rapport aux positions courantes, en particulier dos à l'ouverture et au type d'outil, essentiellement ceux produisant de forts débits de poussière (les résultats sont regroupés *figures 30 à 33*).

Fig. 30. Répétabilité. Tronçonnage, dos à l'ouverture

- Repeatability. Cutting-off with back to inlet

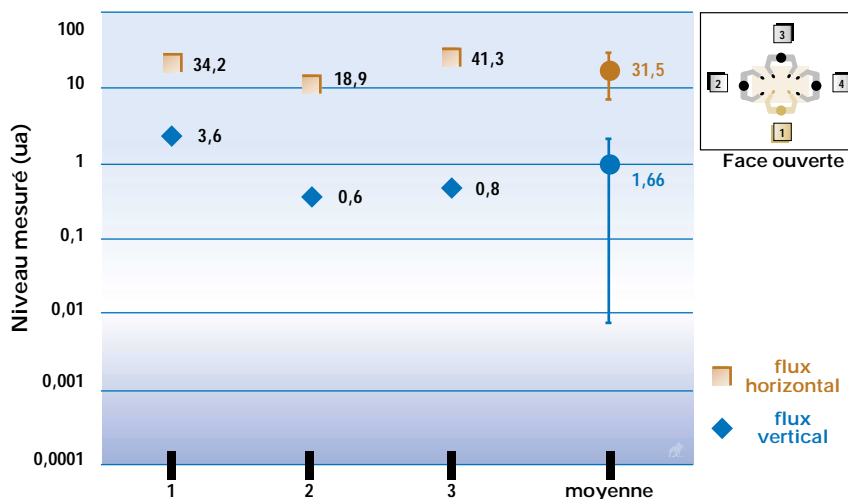


TABLEAU XI

RÉPÉTIBILITÉ SUR QUELQUES CONFIGURATIONS PARMI LES PLUS COURANTES

- REPEATABILITY FOR SOME OF THE MOST COMMONLY USED CONFIGURATIONS

CONFIGURATIONS					NOMBRE DE RÉPÉTITIONS					MOYENNE (ua)	COEF. DE VARIATION (%)
OPÉRATION	TYPE DE FLUX	POSITION	POSTURE	PIERRE	1 (ua)	2 (ua)	3 (ua)	4 (ua)	5 (ua)		
Tronçonnage	vertical	Dos à l'ouverture	droit	tendre	3,6	0,6	0,8			1,66	102
				dure	0,017	0,2			0,11		
		Côté droit	droit	tendre	0,088	1,14	0,018		0,415	152	
				dure	0,02	0,01		0,015			
	horizontal	Dos à l'ouverture	droit	tendre	34,2	18,9	41,3		31,5	36	
				dure	8,02	7,7		7,9			
		Côté droit	droit	dure	0,145	0,76		0,45			
				tendre	0,14	0,89		0,51			
Côté gauche	droit	tendre	12,98	25,8		19,4					
Ponçage	vertical	Dos à l'ouverture	droit	tendre	0,39	0,11	0,055			0,18	98
				dure	0,39	0,61	0,75		0,59		
		Côté droit	incliné	tendre	0,523	0,36	0,41	0,81	1,92	0,81	80
				dure	0,035	0,00		0			
	horizontal	Dos à l'ouverture	droit	tendre	28,7	17,8	21,6	28,1	24,1	22	
				dure	4,03	4,1		4,1			
			incliné	tendre	34,2	33,4	6,72		24,8	63	
				dure	19,4	18,8	5,12		14,4		
		Côté droit	incliné	dure	1,92	0,46			1,19		
				dure	4,76	5,62	1,37		3,92	58	

Fig. 31. Répétabilité. Ponçage opérateur incliné, dos à l'ouverture (pierre tendre) - Repeatability - Sanding, operator bending with back to inlet - Soft stone

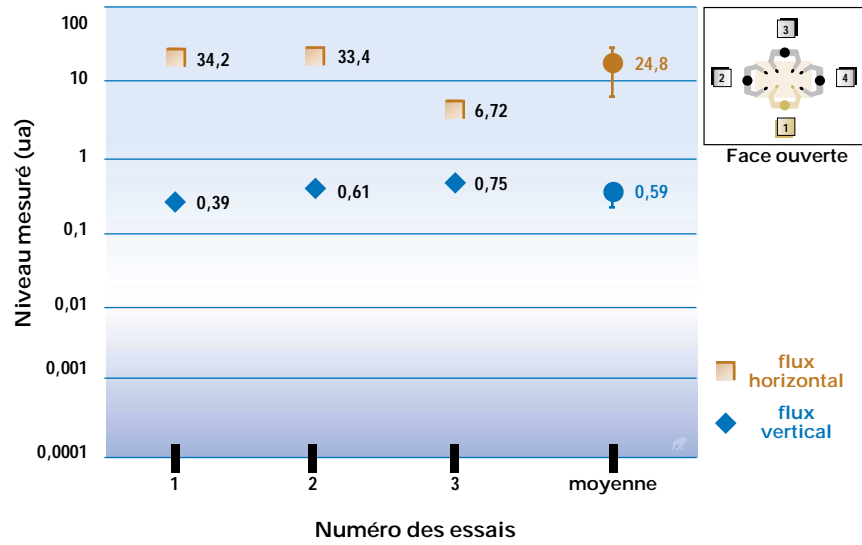


Fig. 32. Répétabilité. Ponçage opérateur droit, dos à l'ouverture (pierre tendre) - Repeatability - Sanding, operator standing upright with back to inlet - Soft stone

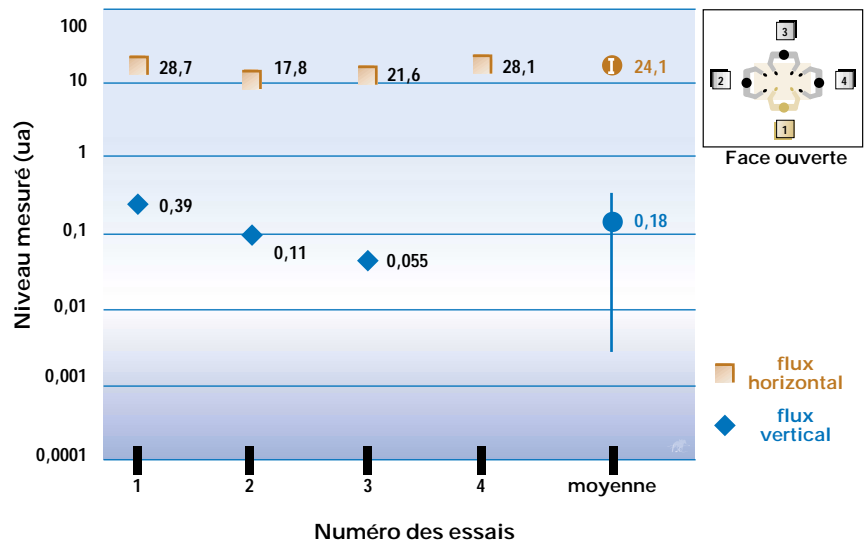
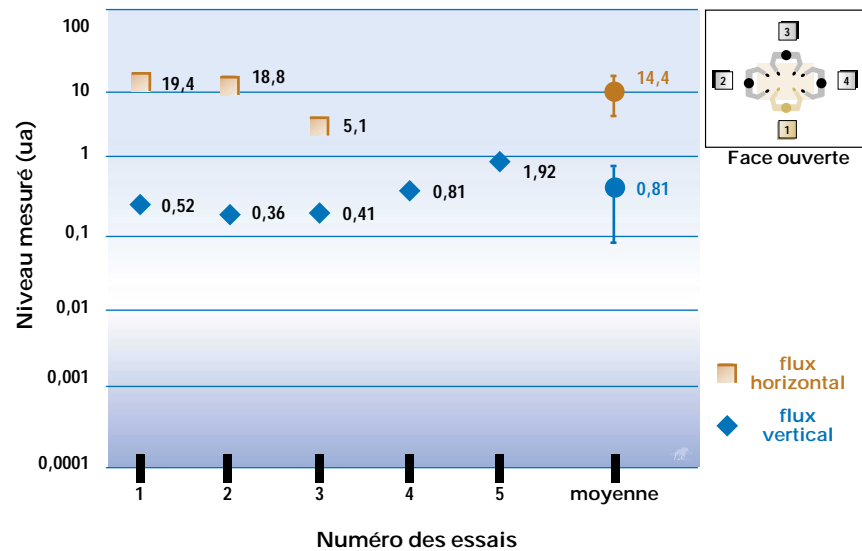


Fig. 33. Répétabilité. Ponçage opérateur incliné, dos à l'ouverture (pierre dure) - Repeatability - Sanding, operator bending with back to inlet - Hard stone



3.2.2. Comparaison statistique

Les données disponibles (cf. tableau XI) ont permis de comparer plusieurs configurations à partir d'une analyse de la variance. Les configurations et le nombre d'essais effectués avec les deux outils n'étant pas identiques, les deux opérations de tronçonnage et de ponçage ont été analysées indépendamment, en considérant deux plans d'expérience distincts :

■ Tronçonnage : trois paramètres principaux à deux niveaux :

- le type de flux de ventilation (vertical et horizontal),
- la position de l'opérateur (dos à l'ouverture et côté droit),
- le type de pierre (dure et tendre).

■ Ponçage : quatre paramètres principaux à deux niveaux :

- les trois paramètres précédents,
- la posture de l'opérateur (droit et incliné).

L'analyse permet de distinguer, pour chaque type d'outil, la contribution de chaque paramètre ou combinaison de paramètres au niveau d'empoussièrement mesuré, en termes d'effets principaux et d'interactions.

Les *tableaux XII et XIII* regroupent respectivement les classements obtenus pour le tronçonnage et le ponçage.

Pour chaque opération on distingue, pour les couples de paramètres analysés :

- un coefficient moyen, qui indique le niveau de la contribution du premier paramètre par rapport au second ;
- l'intervalle de confiance, dans lequel on peut s'attendre à voir évoluer la contribution du premier paramètre par rapport au second, avec un risque de 5 % d'être à l'extérieur.

L'analyse statistique renforce les observations effectuées à partir des moyennes générales de toutes les mesures pour chaque type d'opération (cf. § 3.1), à savoir la supériorité du flux vertical sur le flux horizontal. Dans cette analyse, seuls les effets principaux apparaissent significatifs. Les interactions semblent avoir peu d'influence sur l'empoussièrement.

Ceci peut vouloir dire qu'effectivement, les interactions influent peu, mais également que les effets ne peuvent pas être mis en évidence, en raison du nombre insuffisant et de la grande variabilité des mesures.

En moyenne, toutes configurations confondues, les niveaux d'empoussièrement mesurés avec le flux horizontal peu-

TABLEAU XII

ESTIMATION STATISTIQUE DE L'INCIDENCE DES PARAMÈTRES DU TRONÇONNAGE
- STATISTICAL ESTIMATION OF THE INCIDENCE OF THE CUTTING-OFF PARAMETERS

ANALYSE	PARAMÈTRE	COEFFICIENT MOYEN ESTIMÉ	INTERVALLE DE CONFIANCE AU SEUIL DE 5 % (*)
EFFETS PRINCIPAUX	Flux horizontal / vertical	20	6,5 - 75
	Position dos à l'ouverture / côté droit	16,5	5 - 56
	Pierre tendre / dure	5	1,5 - 17
INTERACTIONS	Flux x position	2,7	0,81 - 9,2 (ns)
	Flux x pierre	2,6	0,79 - 8,9 (ns)
	Position x pierre	1,7	0,5 - 6 (ns)

(*) ns : statistiquement non significatif au seuil de 5 %.

TABLEAU XIII

ESTIMATION STATISTIQUE DE L'INCIDENCE DES PARAMÈTRES DU PONÇAGE
- STATISTICAL ESTIMATION OF THE INCIDENCE OF SANDING PARAMETERS

ANALYSE	PARAMÈTRE	COEFFICIENT MOYEN ESTIMÉ	INTERVALLE DE CONFIANCE AU SEUIL DE 5 % (*)
EFFETS PRINCIPAUX	Flux horizontal / vertical	204	43 - 972
	Position dos à l'ouverture / côté droit	46,5	12 - 186
	Posture incliné / droit	3,6	1 - 13
	Pierre tendre / dure	2,2	0,7 - 7,6 (ns)
INTERACTIONS	Flux x position	3,5	0,9 - 1,4 (ns)
	Flux x pierre	2,3	0,7 - 7,6 (ns)
	Flux x posture	1,4	0,4 - 4,4 (ns)
	Position x pierre	1,9	0,5 - 7 (ns)

(*) ns : statistiquement non significatif au seuil de 5 %.

vent être entre 20 et 200 fois supérieurs à ceux du flux vertical, suivant l'opération exécutée. On peut également noter que, dans les conditions de l'étude, le classement des paramètres par ordre d'importance situe le mode de ventilation comme élément le plus déterminant pour le niveau d'empoussièrement.

Les essais ont permis également de confirmer un état de fait maintes fois observé par les préventeurs, à savoir que la position dos à l'ouverture est plus défavorable que la position latérale, en particulier pour le flux horizontal. En l'occurrence, le flux vertical montre un comportement similaire qui s'explique en partie par une orientation du flux légèrement oblique (cf. § 1.1.2). Toutes configurations égales par ailleurs, la position latérale est, en moyenne, entre 16 et 46 fois plus favorable que dos à l'ouverture.

En ce qui concerne le type de pierre, il semble que celui-ci ait une incidence très inférieure aux autres paramètres testés, surtout significative pour le tronçonnage où la pierre tendre produit 5 fois plus de poussière que la pierre dure, une valeur à rapprocher des valeurs moyennes 3 et 3,5 obtenues sur l'ensemble des résultats.

3.3. Caractéristiques des poussières

Dans cette phase de l'étude, il s'agissait de caractériser l'aérosol produit par les opérations d'usinage de la pierre dans la zone de respiration de l'opérateur. Le photomètre utilisé pour comparer les deux modes de ventilation ne prend en compte qu'une fraction du spectre granulométrique (cf. § 2.3 et annexe) et des mesures plus globales ont été effectuées à l'aide d'un impacteur Marple.

Ces mesures n'ont pu avoir lieu que dans la cabine à flux horizontal sur quelques configurations impliquant la ponceuse, la tronçonneuse à disque et les deux types de pierre. Néanmoins, en première approximation, on peut faire l'hypothèse que l'empoussièrément serait plus faible avec la cabine à flux vertical en appliquant aux concentrations mesurées à l'aide de l'impacteur les rapports d'efficacité obtenus avec le photomètre.

3.3.1. Granulométrie des poussières

Les mesures permettent d'établir, pour chaque opération, une courbe théorique de distribution gaussienne, en masse, qui définit un domaine de granulométrie. Ce domaine est borné de part et d'autre du diamètre médian par un diamètre maximal et un diamètre minimal calculés à partir de l'écart type géométrique. Les calculs sont effectués de sorte que 99,7 % ($3\sigma_g$) de la masse de poussière prélevée se situe entre les deux bornes (*tableau XIV*).

3.3.2. Concentrations de poussière

Les quelques configurations testées mettent en évidence de très fortes concentrations en dépit de l'action de la ventilation (*fig. 34*). Il faut cependant tenir compte du fait que ces valeurs très élevées résultent d'un protocole d'essai conventionnel, dont les modalités visaient précisément à produire en continu de la poussière en grande quantité et avec des postures de l'opérateur maintenues durant des laps de temps assez longs. Ces conditions sont quelque peu éloignées de celles rencontrées dans les opérations de taillage habituelles où la production de poussière peut être moins régulière, les niveaux de pointe de plus courte durée et les postures maintenues plus brièvement.

Les concentrations mesurées au cours de l'étude peuvent être comparées dans une certaine mesure à celles obtenues dans de nombreuses situations lors de contrôles effectués sur des installations ou des postes de travail dans le domaine de la pierre ou de matériaux similaires (béton, céramique, etc.) (*tableau XV*).

Depuis 1987, les valeurs obtenues par les laboratoires de chimie des CRAM sont regroupées dans la base de données COLCHIC sous différentes rubriques. Cependant, les rubriques recouvrent des notions assez larges qui ne permettent pas de distinguer très finement les conditions de détermination des concentrations, notamment les données précises concer-

TABLEAU XIV

CARACTÉRISTIQUES DES DISTRIBUTIONS GRANULOMÉTRIQUES - CHARACTERISTICS OF PARTICLE SIZE DISTRIBUTIONS

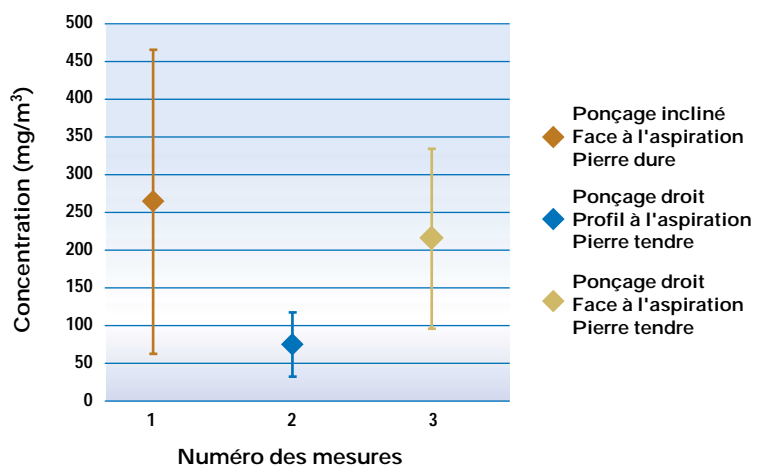
		D ₅₀ (µM)	σ _g (µM)	D _{MAX} (µM)	D _{MIN} (µM)
PIERRE DURE	PONÇAGE	24,4	2,3	296	2
		22,9	2,06	200	2,6
		14,8	1,92	104	2
	TRONÇONNAGE	9,3	2,2	99	0,9
PIERRE TENDRE	PONÇAGE	20,3	2,2	216	1,9
		16,8	2	134	2
		16,7	2,13	161	1,7
	TRONÇONNAGE	9,3	2,23	103	0,8

TABLEAU XV

DONNÉES D'EMPOUSSIÈREMENT ISSUES DE LA BASE COLCHIC - DUST GENERATION DATA FROM THE COLCHIC DATABASE

RUBRIQUE DE LA BASE DE DONNÉES	NOMBRE DE RÉSULTATS	MOYENNE ARITHMÉTIQUE (mg.m ⁻³)	ÉTENDUE (mg.m ⁻³)	RAPPORT SANS/AVEC CAPTAGE
Tous types de poste sans captage localisé	152	32,5	0,14 - 571	
Tous types de poste avec captage localisé enveloppant	56	9,8	0,1 - 60	3,3
Machine à scier ou à tronçonner sans captage localisé	14	18	1,9 - 46	
Machine à scier ou à tronçonner avec captage localisé ou non	35	6,3	0,02 - 28	2,9
Machine à meuler sans captage localisé	14	33,1	0,3 - 98	
Machine à meuler avec captage localisé	31	10,8	0,2 - 48	3,1

Fig. 34. Concentrations mesurées à l'aide de l'impacteur Marple - Concentrations measured with the Marple impactor



nant le type de dispositif de captage ou de ventilation, la nature du matériau usiné (pierre calcaire ou autre), l'activité et la position de l'opérateur etc.. Cette approche rend difficile la comparaison directe entre les opérations répertoriées et les conditions d'essais de l'étude. Elle permet néanmoins de situer la différence entre un niveau d'empoussièrement issu d'une méthodologie spécifique et les conditions courantes.

En moyenne, les concentrations extraites de la base de données sont nettement inférieures aux valeurs mesurées au cours de l'étude, en particulier en présence d'un dispositif de captage. On peut néanmoins noter que les bornes supérieures des étendues se situent à des niveaux (entre 28 et 60 mg.m⁻³) qui s'inscrivent dans le domaine de variation, très large, des concentrations mesurées durant l'étude (cf. fig. 34).

Ces données concernent les poussières inhalables prélevées sur filtre et quantifiées par gravimétrie. La plus grande partie des mesures (84 %) a été effectuée pendant des durées comprises entre 120 et 480 minutes. La dénomination « captage localisé enveloppant » englobe tout dispositif susceptible d'aspirer la poussière et, par conséquent, inclut les cabines ouvertes ventilées.

CONCLUSION

Des deux cabines ouvertes, de caractéristiques données, étudiées dans le domaine particulier de l'usinage de la pierre, celle équipée du flux vertical présente un net avantage sur le modèle utilisant le flux horizontal dans nombre de situations, et cela malgré quelques imperfections struc-

turelles (non-verticalité du flux) ou conjoncturelles (débit d'aspiration légèrement réduit entre début et fin de campagne). L'étude réalisée permet de situer l'ordre de grandeur des gains d'efficacité susceptibles d'être atteints dans le cas d'opérations à forts dégagements de poussière, comme il peut s'en produire lors du ponçage et tronçonnage de la pierre. Dans la gamme de mesure utilisée (poussière en majorité de diamètre inférieur à 10 µm), la cabine à flux vertical est plus efficace que la cabine à flux horizontal dans des proportions variables, qui s'échelonnent en moyenne entre 20 et 200 fois.

Les conditions d'usinage adoptées pour la présente étude, production de poussière continue et en grande quantité, ont révélé les difficultés de réduire l'empoussièrement dans la zone de respiration d'un opérateur avec la cabine à flux horizontal.

Les mesures partielles effectuées dans cette cabine situent la granulométrie des poussières produites par les deux types de pierre avec les deux outils rotatifs (ponceuse, tronçonneuse à disque) dans une gamme de diamètre médian compris entre 9 µm et 25 µm.

Le type d'outil, la dureté de la pierre, la position et la posture de travail jouent un grand rôle dans le niveau d'exposition de l'opérateur, mais il est difficile de déterminer distinctement l'incidence relative de ces quatre paramètres dans les conditions de mesure industrielles de l'étude et avec un nombre d'essais limité. Cette étude permet, néanmoins, de dégager des tendances et de fixer des repères sur les niveaux d'empoussièrement relatifs aux nombreuses configurations testées.

Les auteurs remercient M. Grzebyk, statisticien du Département « Métrologie des polluants », ainsi que F. Bonthoux, V. Collé, D. Courtois, P. Ferrari, M. Jailler, P. Martin, R. Wrobel et les personnes du Département « Ingénierie des procédés », ayant apporté leur aide lors des campagnes de mesures en entreprises.

BIBLIOGRAPHIE

1. 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.
2. KIM T., FLYNN M.R. - The effect of contaminant source momentum on a worker's breathing zone concentration in a uniform freestream. *American Industrial Hygiene Association Journal*, 1992, 53, pp. 757-766.
3. DAVIS J.W., ANDERSON G.W., KANTER M. - Evaluation of a grinding booth for medium-size castings. *Journal of Metals*, juin 1983, pp. 66-73.
4. Guide pratique de ventilation n° 9.1. - Ventilation des cabines d'application par pulvérisation de produits liquides. Paris, INRS, 1999, ED 839, 24 p.
5. CHARUAU J. - Etude du dépôt des particules dans les conduits - Optimisation des tubes de prélèvement des aérosols radioactifs. *Rapport CEA R-5158*, mars 1982.
6. DESSAGNE J.M., LEFÈVRE A., MULLER J.P. - Synthesis of results obtained using the tracer gas technique. In : *Ventilation'91*, pp. 505-514.
7. GORNER P., FABRIÈS J.F. - Techniques de mesure automatique des aérosols atmosphériques. *Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail*, 1990, ND 1794, 32 p.
8. MARTIN P., BRABD F., SERVAIS M. - Correlation of the exposure to a pollutant with a task-related action or workplace : the CAPTIV System. *Annals of Occupational Hygiene*, 1999, 43, 4, pp. 221-233.

ANNEXE I

MOYENS D'ESSAI

MESURE DE VITESSE D'AIR

L'ensemble des mesures de vitesses d'air a été effectué en utilisant deux types d'anémomètre thermique dotés de capteurs de nature différente : l'un, partiellement directionnel, était un ensemble de 18 capteurs scrutés en séquence par un boîtier de mesure relié à un micro-ordinateur, capable de mesurer des vitesses dans un angle solide de $\pm 30^\circ$ (système FVA multivoies à thermistances) ; l'autre était un capteur unique omnidirectionnel (sphère à film chaud DISA 54 N50).

Suivant les conditions de mesure, l'un ou l'autre des appareils a été utilisé : l'ensemble multivoies avec la cabine à flux horizontal et dans deux plans horizontaux sur quatre dans la cabine à flux vertical (à 1,5 m et 2,5 m du sol) et la sphère chaude dans les deux autres plans plus proches du sol (0,17 m et 0,65 m).

MESURE DE DÉBIT D'AIR

Les débits ont été déterminés au moyen d'un ensemble de mesure par gaz traceur (He) [4] comprenant un spectromètre de masse et un boîtier de gestion des points de génération et de mesure de traceur. Cet appareillage est complété par un logiciel de visualisation et de traitement des concentrations d'hélium (PRE-E-VENT).

MESURE DE CONCENTRATION DE POUSSIÈRE

Deux appareils ont été utilisés :

- ◆ Un impacteur de type Marple équipé d'une pompe de prélèvement Gillian réglée à 2 l.min⁻¹. L'ensemble de mesure de 9 étages couvre une gamme de diamètre de 0,01 μm à 50 μm . La poussière était prélevée sur 8 disques d'impaction en Mylar préalablement enduits d'un film de graisse de silicone et un disque terminal d'acétate de cellulose. La concentration est déterminée par le quotient de la somme des masses collectées sur chacun des étages au volume d'air prélevé.

- ◆ Un analyseur optique Miniram [5] utilisant le principe de rétrodiffusion de la lumière, incorporé à un circuit de prélèvement comprenant une pompe et une membrane filtrante (fig. A1). L'air chargé de poussière, capté à hauteur des voies respiratoires de l'opérateur (fig. A2), circule sur le détecteur de l'analyseur avant d'être retenu sur une membrane filtrante. Dans cette campagne d'essais, la membrane avait uniquement pour fonction de protéger la pompe.

Le principe de mesure du Miniram est basé sur la réflexion de la lumière émise par une diode GaAlAs dont la longueur d'onde est centrée sur 880 nm. La lumière diffusée est collectée par un photodétecteur sous un angle compris entre 45° et 90°. L'appareil est étalonné par le fabricant à la « poussière, dite standard, constituée de poussière de route de l'Arizona ». La gamme de mesure s'étend de 0,1 à 100 mg.m⁻³ avec une résolution de 0,1 mg.m⁻³. L'appareil est étalonné pour une réponse optimale avec des particules comprises entre 0,1 et 10 μm . Une sortie analogique 0 - 1,5 V permet de mesurer en continu le signal instantané délivré.

Fig. A1. Ligne de prélèvement de poussière (les courbes du schéma suivent approximativement la réalité) - Dust sampling system (the curves of the diagram are close to reality)

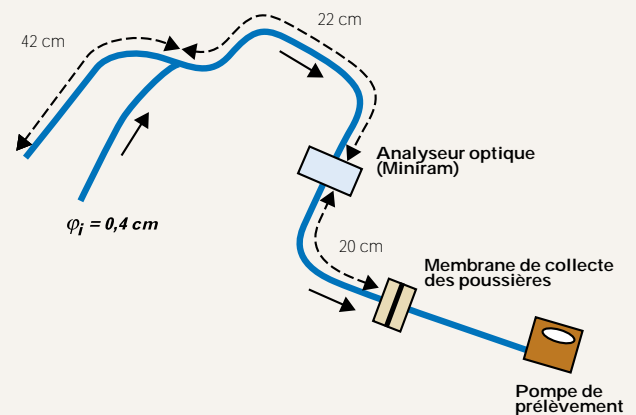
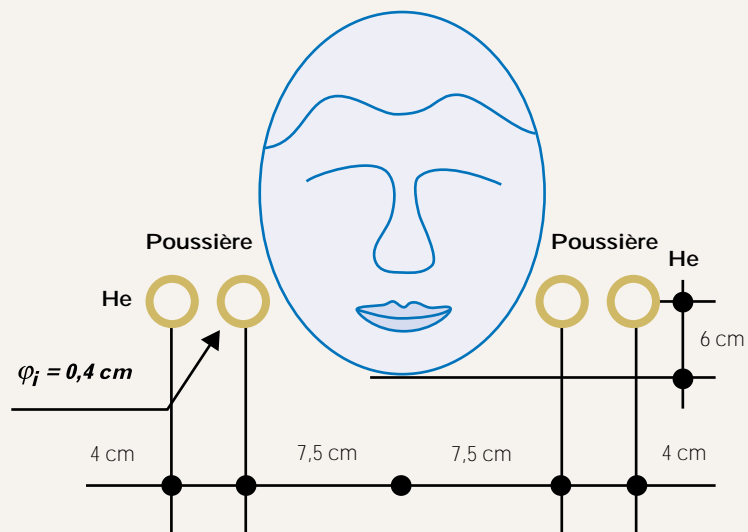


Fig. A2. Position des points de prélèvement - Position of the sampling points



DISPOSITIF D'ACQUISITION ET DE VISUALISATION

Tous les essais ont été effectués avec un même scénario et suivi à l'aide de l'ensemble CAPTIV [6]. Cet équipement permet d'associer aux images relatives à chaque situation de travail (mouvement de l'opérateur ou autres événements) un signal électrique d'intensité variable représentatif de la quantité de poussière captée.

Le poste de travail était filmé en continu par l'intermédiaire de deux caméras vidéo reliées à un micro-ordinateur. Un module d'acquisition et de gestion des images permettait de suivre en temps réel l'opération en cours d'essai et le signal d'empoussièrement correspondant. Les informations collectées durant la période de mesure étaient ensuite stockées sur un support informatique séparé (disque dur extractible) en vue d'un traitement ultérieur.

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

Tiré à part de *Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail*, 4^e trimestre 2001, n° 185 - ND 2160 - 1200 ex.
N° CPPAP 804/AD/PC/DC du 14-03-85. Directeur de la publication : J.-L. MARIÉ. ISSN 0007-9952 - ISBN 2-7389-1055-6

Imprimerie de Montligeon - 61400 La Chapelle Montligeon