

→ J.P. Muller, Département
Ingénierie des procédés,
J.C. L'huillier, Département
Ingénierie des équipements de travail,
INRS, Centre de Lorraine,
Vandœuvre-Lès-Nancy

Conception de dispositifs de captage performants sur scie radiale et défonceuse à commande numérique

→ J.P. Muller, Département
Ingénierie des procédés,
J.C. L'huillier, Département
Ingénierie des équipements de travail,
INRS, Centre de Lorraine,
Vandœuvre-Lès-Nancy

Conception de dispositifs de captage performants sur scie radiale et défonceuse à commande numérique

DESIGN OF EFFICIENT EXHAUST DEVICES ON RADIAL SAWS AND NUMERICALLY CONTROLLED ROUTERS

For more than ten years, the occupational risk prevention departments of the CRAMs (French Regional Health Insurance Funds) and INRS have been contributing to the reduction of operator exposure for the most polluting woodworking machines in common use, very often by installing more efficient exhaust devices.

A design methodology developed by a CRAM/INRS working group was adopted for this new study focussing on two machines: a radial saw with manual feed and a numerically controlled router. After observation and characterisation of the dust emission, the original exhaust device of each machine was assessed. All the functions, machining configurations and constraints that the devices developed had to satisfy (mechanical protection of the operators or ergonomics) were taken into account by a multi-disciplinary team.

At the end of the study, exhaust solutions with a reasonable investment cost compared to the cost of the machines have been defined and tested, both for a simple machine and a complex machine. Several exhaust device prototypes for radial saws were constructed by INRS with a view to testing them on other existing models of machines. The pivoting device developed for the router requires case-by-case studies to allow its integration into existing machines. This principle, developed by INRS, could inspire manufacturers of new machines.

- woodworking machine
- radial saw ● router ● dust
- exhaust device ● design

Depuis plus de dix ans, les services de prévention des CRAM et l'INRS ont contribué à la réduction de l'exposition des opérateurs pour les machines à bois usuelles les plus polluantes, le plus souvent par la mise en place sur ces machines de dispositifs de captage plus efficaces.

Une méthodologie de conception élaborée par un groupe de travail CRAM/INRS a été adoptée pour cette nouvelle étude portant sur deux machines : une scie radiale à aménagement manuel et une défonceuse à commande numérique. Après observation et caractérisation des émissions de poussières, chaque machine a fait l'objet d'une évaluation des performances de son dispositif de captage d'origine. L'ensemble des fonctions, des configurations d'usinage ou des contraintes auxquelles doivent satisfaire les dispositifs mis au point (protection mécanique des opérateurs ou ergonomie) a été pris en compte par une équipe pluridisciplinaire.

Au terme de cette étude, des solutions de captage ont donc été définies et testées, tant pour une machine simple que pour une machine complexe, avec un surcoût d'investissement raisonnable comparativement au coût des machines. Plusieurs prototypes de dispositifs de captage pour scie radiale ont été confectionnés par l'INRS afin de les tester sur d'autres modèles de machines existantes. Le dispositif de captage tournant, mis au point pour la défonceuse, nécessite des études au cas par cas pour son intégration sur les machines existantes. Ce principe, développé par l'INRS, pourrait être adapté par les fabricants de machines neuves.

- machine à bois ● scie radiale ● défonceuse ● poussière ● dispositif de captage
- conception

Les CRAM et l'INRS ont entrepris depuis une dizaine d'années une série d'actions visant à évaluer les performances et à améliorer, le cas échéant, les dispositifs de captage sur les machines à bois les plus polluantes utilisées dans l'industrie de la deuxième transformation.

Une précédente étude menée à l'INRS a permis de tester différents dispositifs de captage commercialisés pour quatre machines traditionnelles : la scie circulaire à table, la scie à ruban, la toupie au guide et la toupie à l'arbre. L'amélioration de certains de ces dispositifs ou la réalisation et la mise en œuvre de solutions innovantes ont permis d'augmenter notablement l'ef-

ficacité de captage des poussières sur ces machines [1].

La directive européenne en date du 29 avril 1999 concernant la protection des travailleurs contre les risques liés à l'exposition à des agents cancérigènes au travail, considère que la carcinogénicité des poussières de chêne et de hêtre a été confirmée dans des études épidémiologiques portant sur des travailleurs exposés. Ce risque est considéré comme hautement probable pour d'autres types de poussières de bois [2]. En effet, outre les risques d'incendie et d'explosion, les poussières de bois peuvent induire un certain nombre de pathologies, dont les cancers des voies respiratoires supé-

rieures (cancer ethmoïdonasal) et des pathologies de type allergique.

Cette directive fixe la VME (valeur limite de moyenne d'exposition) à 5 mg.m⁻³. Il s'agit cependant d'une prescription minimale. La valeur indicative de 1 mg.m⁻³, au sens de la fraction inhalable, reste valable en France, quelle que soit l'essence de bois [3].

Des travaux réalisés tant en France qu'à l'étranger, et plus particulièrement en Allemagne [4], montrent que les efforts entrepris pour traiter les machines les plus polluantes ont permis de réduire de façon significative les niveaux d'exposition aux poussières de bois. Bien que les dispositifs de captage d'un certain nombre de machines restent encore à étudier et à améliorer, les résultats déjà obtenus mettent en évidence que la VME de 1 mg.m⁻³ dans les locaux de travail est un objectif réalisable.

Les deux machines retenues pour cette étude ont été choisies en fonction de l'importance des quantités de poussières générées et des médiocres performances de leurs dispositifs de captage. Il s'agit de :

- la scie radiale à aménagement manuel,
- la défonceuse à commande numérique.

Les travaux entrepris sur la défonceuse à commande numérique ont été réalisés dans le cadre d'une thèse de doctorat relative à l'intégration de la sécurité dans la phase de conception des machines semi-automatisées [5, 6].

1. Méthodologie

1.1. Conditions de fonctionnement des machines

Les machines ont été testées dans des configurations représentatives des situations d'utilisation les plus usitées. Ce choix arbitraire ne prend pas en compte toutes les configurations d'usinage possibles. Toutefois, cette option permet d'évaluer les performances des différents dispositifs de captage et de les comparer.

Pour la scie radiale, les essais ont été réalisés dans un atelier du centre de Lorraine de l'INRS et pour la défonceuse à commande numérique dans celui de l'ENSTIB (École nationale supérieure des techniques de l'industrie du bois) à Épinal. Dans ces deux ateliers, l'environnement était bien maîtrisé en l'absence de courant

d'air ou d'émission de poussières parasites.

Les précisions relatives au mode d'usinage, aux outils, aux matériaux et au système de ventilation de l'atelier sont données dans les paragraphes spécifiques à chaque machine.

Il est à noter que les nouveaux systèmes mis au point et installés n'ont pas entraîné de modifications du bâti des machines.

1.2. Paramètre d'évaluation et méthode de mesure

L'évaluation des performances des dispositifs de captage mis en place sur les deux machines a été réalisée à partir de la mesure de l'indice d'assainissement, suivant la méthode décrite dans la norme EN 1093-11 [7]. Cette technique fait appel à des mesures relatives de concentration du polluant en plusieurs points autour de la machine. L'indice d'assainissement I_a est défini comme le gain apporté par le fonctionnement du dispositif de captage (exprimé en écart de concentration de poussières) rapporté à la concentration mesurée en l'absence d'aspiration avec correction éventuelle du niveau résiduel :

$$I_a = \frac{C_a - C_m}{C_a - C_f}$$

où les différentes concentrations sont mesurées en un même point dans les conditions opératoires suivantes :

C_a : machine en fonctionnement, aspiration arrêtée (1),

C_m : machine en fonctionnement, aspiration en service,

C_f : machine et aspiration arrêtées.

Cet indice permet de comparer les performances des dispositifs de captage mis en place sur une machine donnée, mais aussi de qualifier, soit les modifications apportées à ces dispositifs, soit un nouveau prototype.

De plus, il permet de quantifier l'influence du débit d'air aspiré mis en œuvre sur la machine.

(1) La méthode ne peut pas être utilisée sur des machines pour lesquelles la fonction d'évacuation des copeaux assurée par l'aspiration est indispensable.

(2) Norme NF X 10-112 - Mesure de débit des fluides dans des conduites fermées. Méthode d'exploration du champ des vitesses pour des écoulements réguliers au moyen d'un tube de Pitot double. Paris, AFNOR, sept. 1977.

Cependant, il faut noter que les concentrations mesurées pour la détermination de l'indice ne doivent en aucun cas être utilisées en absolu pour une évaluation de l'exposition au poste de travail.

Les appareils utilisés dans cette étude pour mesurer des niveaux d'empoussièrement sont deux photomètres Hund Data® et un compteur de particules Grimm G 1.108®, placés en trois points fixes autour de la machine. Ces appareils délivrent un signal proportionnel à la concentration qui peut être cependant influencé par les variations de la granulométrie de l'aérosol. Cette influence a été déterminée lors de la précédente étude [1], et les résultats ont montré que les indices d'assainissement sont donnés par défaut à environ 1 à 2 %.

Les mesures de débit d'air ont été réalisées par exploration du champ des vitesses, dans une section du conduit d'aspiration à l'aide d'un tube de Pitot, suivant les spécifications de la norme NF X 10-112 (2).

1.3. Méthodologie de conception

Un groupe de travail constitué de spécialistes de la ventilation des CRAM et de l'INRS a œuvré sur la méthodologie de conception des dispositifs de captage sur machines à bois. La méthode élaborée présente sous la forme d'un logigramme les étapes successives de la démarche de conception [8]. Elle a été appliquée à la scie radiale et à la défonceuse à commande numérique. Les logigrammes des figures 10 et 25 (cf. § 2.3 et § 3.3) détaillent la démarche.

1.3.1. Présentation de la démarche

■ La première étape consiste à observer la source au cours d'un usinage type, et à définir les caractéristiques de l'émission de poussières : sa mobilité, la direction de projection des particules, les différentes amplitudes de projection. Cette démarche devra être renouvelée pour l'ensemble des usinages classiques pouvant être effectués sur la machine.

■ La deuxième étape consiste, à partir des différentes observations, à choisir le type et l'emplacement du ou des dispositifs de captage appropriés, qui s'adapteront aux variations des caractéristiques de l'émission.

■ La troisième étape a pour objectif de fixer les caractéristiques dimensionnelles et aérodynamiques du dispositif, afin d'obtenir l'efficacité de captage optimale.

1.3.2. Caractérisation des projections

Influencées par leur poids, leur forme, leur vitesse, donc leur énergie cinétique, les particules projetées par l'outil se dispersent angulairement suivant la direction moyenne de projection. Une bonne connaissance de la dispersion de la poussière permettra au concepteur de dimensionner correctement le dispositif de captage. Cette dispersion s'effectue selon un cône caractérisé par son « *angle de dispersion* ». Sa valeur dépend :

- du type d'outil (scie circulaire, outil à profiler, etc.),
- des caractéristiques angulaires de la partie coupante, de la nature du matériau (l'hétérogénéité du matériau favorise une augmentation de l'angle de dispersion des particules),
- et/ou du type d'usinage (en opposition ou en avalant).

L'amplitude de projection dépend de l'angle de dispersion et de la distance à laquelle elle est mesurée à partir de la source. Afin de caractériser l'émission des particules, on peut définir l'amplitude instantanée dans deux plans perpendiculaires. La technique de visualisation par tomographie laser [9] mise au point par le CETIAT (Centre technique des industries aéronautiques et thermiques), utilisée sur la scie radiale et décrite au § 2.2.4, permet d'observer la dispersion des particules à partir de leur point d'émission.

Amplitude de projection radiale instantanée

Dans un plan radial (perpendiculaire à l'axe de rotation), la dispersion s'effectue suivant un angle α (fig. 1) au niveau de l'outil, à la sortie de la matière usinée. Elle dépend de la profondeur de passe.

L'amplitude « a », formée par la dispersion des particules dans le plan radial, définit l'amplitude de projection radiale instantanée ⁽³⁾.

⁽³⁾ Les amplitudes de projections radiale et axiale instantanées varient en fonction de la distance par rapport à la source.

Amplitude de projection axiale instantanée

Dans un plan axial (parallèle à l'axe de rotation), la dispersion s'effectue au niveau de l'outil à la sortie de la matière sous un angle β (fig. 2).

L'amplitude « b », formée par la dispersion des particules dans le plan axial, définit l'amplitude de projection axiale instantanée ⁽²⁾.

L'amplitude de projection axiale instantanée dépend de la hauteur travaillante de l'outil qui usine la pièce ou de la largeur de la pièce, comme indiqué figure 2.

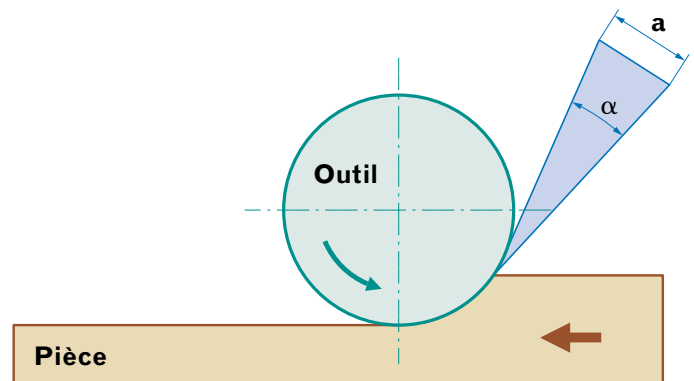


Fig.1. Exemple d'amplitude de projection radiale instantanée - *Example of the instantaneous radial projection amplitude*

Fig.2. Exemple d'amplitude de projection axiale instantanée - *Example of the instantaneous axial projection amplitude*

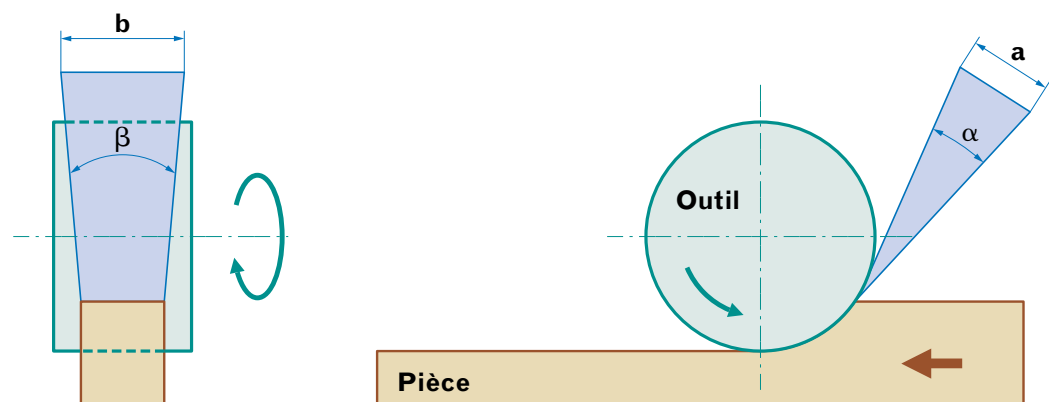




Fig. 3. Scie radiale à aménagement manuel - Radial saw with manual feed

2. La scie radiale à aménagement manuel

2.1. Caractéristiques de la machine et fonctionnement (figs 3 et 4)

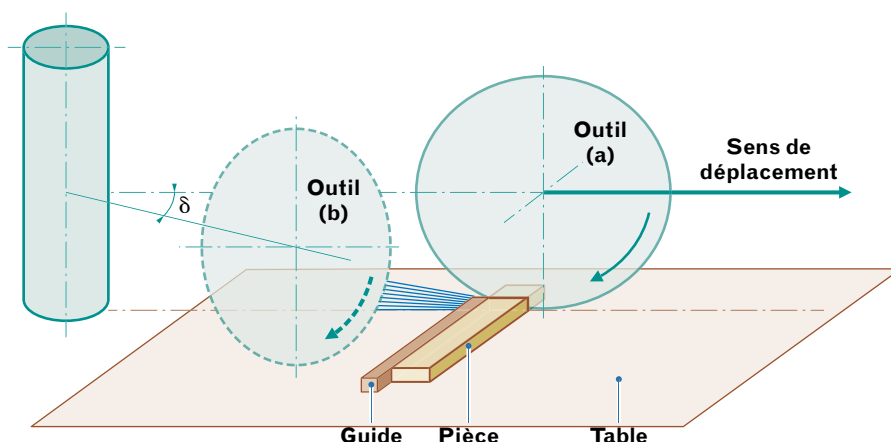
La scie radiale est utilisée pour réaliser des coupes droites ou d'onglet, sur des pièces brutes (pré-débit) ou sur des pièces usinées (corniches, charpentes...). Elle permet aussi d'effectuer des coupes à mi-bois (assemblage de charpentes, claus-tras...).

La machine utilisée pour les tests est équipée d'une lame de scie circulaire d'un diamètre de 400 mm comportant 48 dents, d'une épaisseur de 4 mm et tournant à 3 000 tr.min⁻¹. Le plan de la lame peut être orienté généralement de 90° à 45° par rapport au plan de la table et/ou de ± 60° par rapport au plan perpendiculaire au guide (angle δ , fig. 4).

Le premier trait de scie pratique dans la table, sur toute la capacité de sciage, une rainure de faible profondeur et de largeur égale à l'épaisseur de la lame.

La lame est équipée d'un carter de protection qui interdit l'accès à sa partie non travaillante. Ce carter possède généralement une buse de captage reliée au circuit

Fig. 4. Principe de fonctionnement. Lame de scie positionnée pour une coupe perpendiculaire (a) ou d'onglet (b) par rapport au guide - Principle of operation. Saw blade positioned for a perpendicular cut (a) or mitre cut (b) in relation to the guide



d'aspiration de l'atelier. Lorsque ce protecteur n'est pas aspirant, les machines sont équipées à l'arrière d'un réceptacle qui arrête les particules de bois et les collecte à sa base.

2.2. Caractéristiques de l'émission de poussières

2.2.1. Observation de la source

La source est mobile depuis le début de l'attaque de la pièce jusqu'au sciage de son épaisseur maximale (fig. 5a). Elle se déplace ensuite *pratiquement dans le plan de la table* pendant le reste de la coupe (fig. 5b).

2.2.2. Direction de projection des particules

On considère la direction des particules comme non constante dans la première phase du sciage et constante dans la deuxième.

Dans le cas de l'assemblage à mi-bois, la source se déplacera au cours de la deuxième phase *dans un autre plan parallèle, au-dessus de celui de la table*.

On traite ici une seule opération. Cependant, en fonction des possibilités de coupes (droites ou angulaires), cette émission pourra prendre des directions différentes mais toujours parallèles à la table (cf. fig. 4).

2.2.3. Amplitude de projection radiale instantanée

La poussière est toujours générée dans le plan de la lame de scie :

- dans un premier temps très court, au moment de l'attaque de la pièce, comme cela est présenté figure 5a ;

- ensuite, en plein bois, à partir de son point de tangence avec la table (cf. fig. 5b), qui limite l'ouverture de l'angle de dispersion « a » vers le bas. Sa valeur est d'une vingtaine de degrés.

2.2.4. Amplitude de projection axiale instantanée

L'observation de l'amplitude de projection axiale instantanée pour ce type d'usinage met en évidence une variation de l'angle β (fig. 6).

Au départ, cet angle se situe autour d'une vingtaine de degrés. Ensuite, en plein bois,

il va se limiter car le trait de scie dans la pièce et dans la table canalise le flux de particules. A l'arrière du guide, où seule subsiste la rainure dans la table, le flux sera en partie canalisé dans celle-ci et le reste sera dispersé suivant l'angle β .

2.2.5. Visualisation de l'émission des poussières

Pour caractériser les projections des particules émises par la lame d'une scie radiale, et notamment les angles de projection caractérisant la dispersion des poussières, plusieurs essais de visualisation par tomographie laser ont été réalisés. Cette technique consiste à générer une nappe laser positionnée dans le jet des particules (fig. 7). Cette nappe, de 1 à 2 mm d'épaisseur, est produite par une lentille reliée par l'intermédiaire d'une fibre optique à une source laser à Argon de 5 Watts. Les poussières de bois étant suffisamment réfléchissantes, la mise en œuvre de cette technique n'a pas nécessité d'ensemencement en particules pour obtenir une visualisation correcte de l'écoulement.

Fig. 5. Angle de dispersion α et amplitude de projection axiale instantanée -
Angle of dispersion α and instantaneous axial projection amplitude

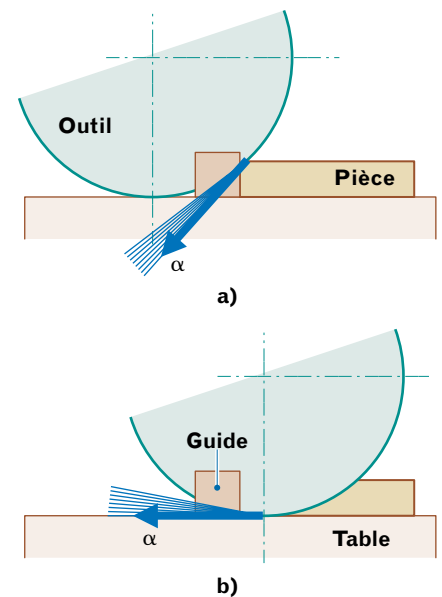


Fig. 6. Angle de dispersion β et amplitude de projection axiale instantanée -
Angle of dispersion β and instantaneous axial projection amplitude

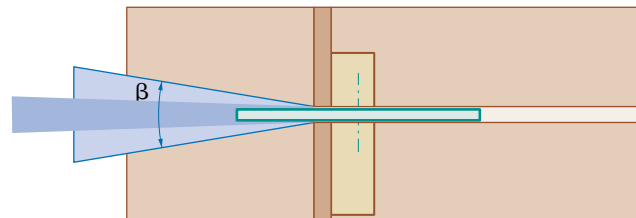
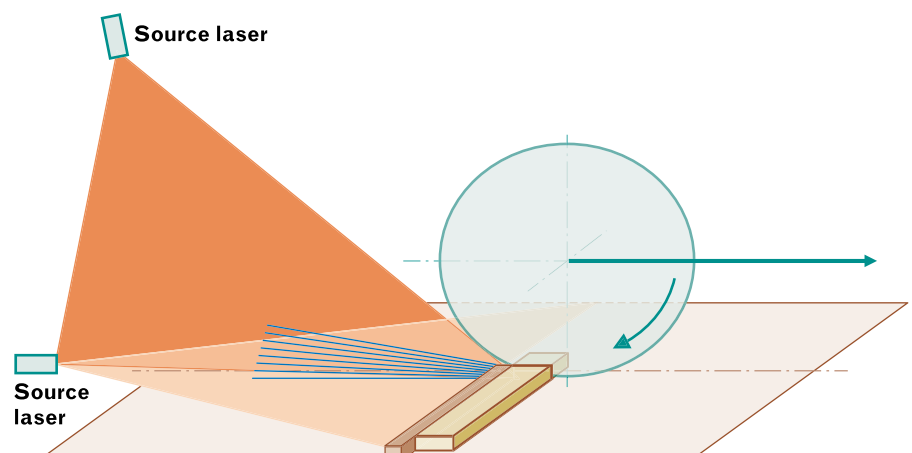


Fig. 7. Position des deux plans laser sur la scie radiale -
Position of the two laser planes on the radial saw



Les tests étant réalisés dans l'obscurité, les poussières qui passent dans ce plan sont illuminées et les angles de dispersion sont facilement visualisables.

Filmée en continu pendant toute la phase de sciage, l'émission des particules peut être traitée ensuite à partir d'un enregistrement vidéo. Cette technique permet d'avoir une meilleure connaissance des amplitudes radiale et axiale de la source d'émission des poussières.

L'observation des *figures 8 et 9* donne un aperçu des possibilités de la tomographie laser. On observe les variations des amplitudes de projections axiale et radiale instantanées suivant la position de la lame en début ou en fin de coupe de la pièce. Le jet de poussière concentré en début de coupe, dans le proche environnement du trait de scie, a tendance à s'élargir au fur et à mesure de la progression de la coupe. En champ libre, c'est-à-dire en l'absence partielle de guide et de protecteur, les angles α et β peuvent varier entre 20 et 30°. On peut noter aussi l'influence de la présence du protecteur de la lame, qui réduit l'amplitude radiale du jet de particules.

Sur la figure 9b, on remarque à l'avant de la coupe des retours de poussières piégées par les dents de la lame et projetées sur la table de la machine.

2.3. Conception du dispositif de captage

2.3.1. Choix de la solution de captage

Après la première étape du logigramme (*fig. 10*) prenant en compte les caractéristiques de l'émission (mobilité, direction) et la deuxième étape relative au choix du dispositif de captage, on aboutit à un ensemble d'exigences devant être satisfaites par le dispositif (cf. trajet, tracé en vert) :

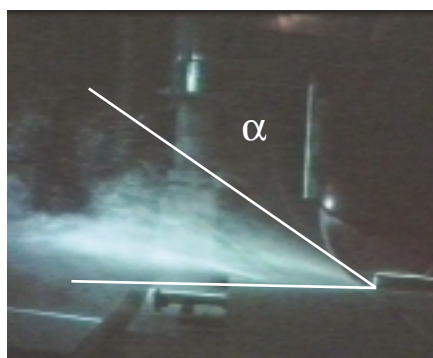
- couverture des amplitudes de projections résultantes radiale et axiale ;
- obstacles efficaces et durables permettant de dévier les particules vers l'orifice de captage et faisant chuter leur énergie cinétique ;
- vitesse suffisante pour reprendre les particules dans la zone de freinage.

Remarque

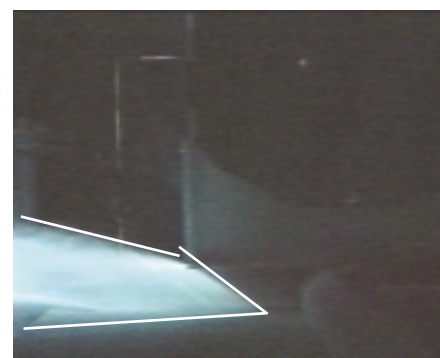
Dans la plupart des configurations de travail sur cette machine, la durée pendant laquelle la direction de projection des particules varie est très courte par rapport à la durée totale d'émission.

Considérer cette direction comme constante (cf. ligne bleue, *fig. 10*) modifie le trajet sur l'organigramme mais conduit aux mêmes recommandations in fine.

Fig. 8. Émission dans le plan vertical. Amplitude de projection radiale instantanée -
Emission in the vertical plane - Instantaneous axial projection amplitude

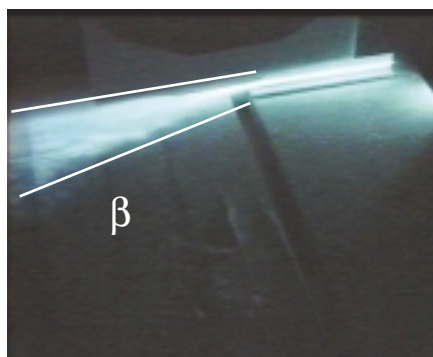


8a. Partie basse du protecteur de lame retirée

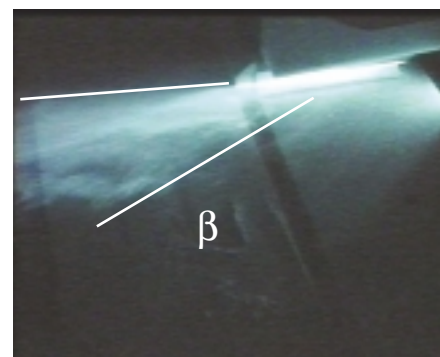


8b. Partie basse du protecteur de lame en place

Fig. 9. Émission dans le plan horizontal. Amplitude de projection axiale instantanée. Guide de la pièce retiré d'un côté. Partie basse du projecteur de lame en place -
Emission in the horizontal plane. Instantaneous axial projection amplitude. Workpiece guide withdrawn to one side. Lower part of the blade guard in place



9a. Début de coupe



9b. fin de coupe

2.3.2. Principe et description du dispositif de captage

La colonne de la machine a été choisie pour servir de fixation au dispositif (suivant les machines, cette colonne peut être fixe ou pivotante et disposer d'une latitude de montage et de baisse pour la profondeur de passe de la lame). L'adaptation réglable sur la colonne permet également la rotation du dispositif de captage nécessaire pour les différents angles de coupe.

Afin d'installer ce dispositif et d'éviter une rainure dans la table à l'arrière du guide, le plan de travail est rehaussé par une table « martyre » placée devant le guide. Ce gain de hauteur permet de

faire pénétrer la lame dans le dispositif de captage sans le couper de part en part. Sa longueur doit correspondre à la distance entre l'arrière du guide (en position arrière maximale) et la colonne. Le guide doit également être rehaussé afin de conserver une bonne tenue de la pièce à scier.

La hauteur du dispositif de captage doit correspondre à celle de l'arrière du nouveau guide afin que le protecteur de la lame, à réglage automatique ou non, puisse venir s'appuyer dessus en position de repos. Le contact permanent de la base du protecteur avec le dessus du dispositif supprime l'effort au moment du passage du guide.

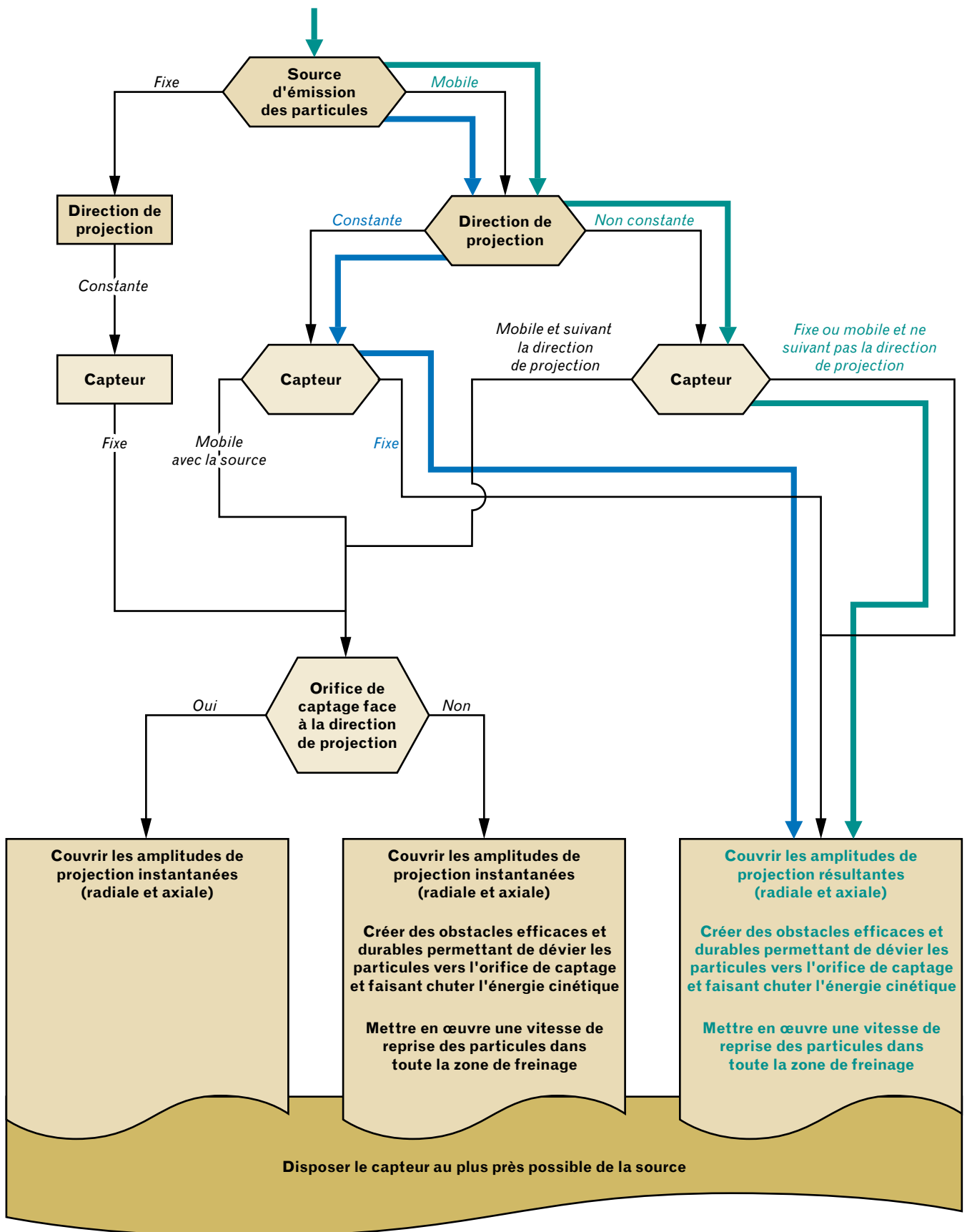


Fig. 10. Logigramme appliqué à la scie radiale - Logic diagram applied to the radial saw

Suivant les différents angles de coupe, la lame de scie doit toujours pénétrer dans le dispositif qui est déplacé et orienté en conséquence. Le flux de poussière éjecté dans l'axe de la lame peut ainsi être capté

aisément. Dans la configuration de coupe à onglet, inclinée ou non, les deux cornières réglables permettent de prolonger le captage jusqu'à l'arrière du guide et de garder une efficacité optimale (fig. 11).

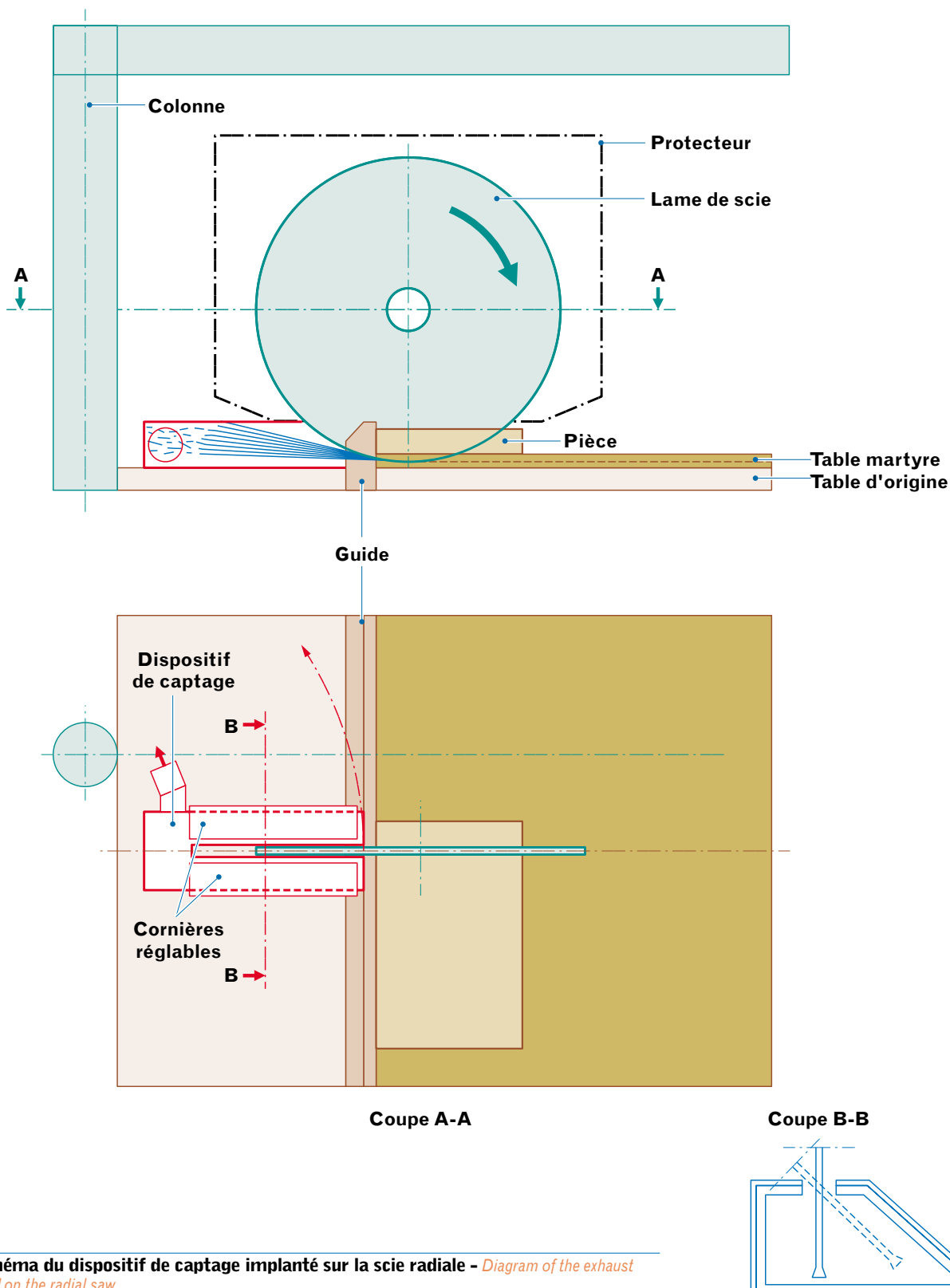


Fig. 11. Schéma du dispositif de captage implanté sur la scie radiale - Diagram of the exhaust device installed on the radial saw

2.4. Conditions d'essai

Dans un premier temps, la machine a été testée dans sa configuration initiale équipée de son protecteur aspirant d'origine. Des essais ont ensuite été réalisés avec deux autres protecteurs aspirants, conçus et commercialisés pour ce type de machine (figs. 12 et 13). Enfin, le prototype de dispositif de captage mis au point par l'INRS (fig. 14), associé à un protecteur classique non aspirant, a été testé.

Compte tenu de la perte de charge importante du dispositif, le débit d'air d'essai n'a pas dépassé $650 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$.

Chaque configuration a fait l'objet de trois essais consécutifs.

Fig. 12 à 14. Essais avec différents types de protecteurs aspirants - Tests using different types of suction guards



Fig. 12.



Fig. 13.



Fig. 14.

2.4.1. Disposition des appareils de mesure

La détermination de l'indice d'assainissement a été effectuée en trois points sur la table de la machine comme indiqué figure 15.

2.4.2. Caractéristiques de l'échantillon à usiner

- Nature du bois : hêtre.
- Humidité : 10 à 12 %.
- Section de la coupe : $200 \text{ mm} \times 40 \text{ mm}$.
- Largeur de la coupe : 15 mm.
- Une coupe toutes les 6 secondes.

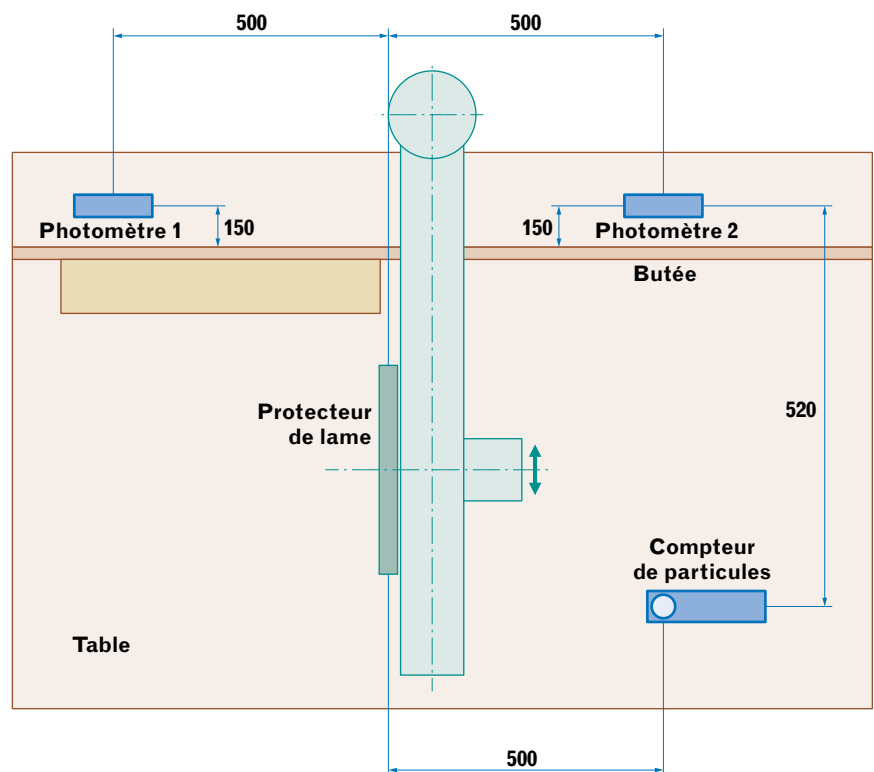


Fig. 15. Emplacement des photomètres sur la machine - Location of the photometers on the machine

2.5. Résultats

Les courbes de la *figure 16* présentent l'ensemble des résultats pour les trois protecteurs aspirants et le prototype INRS.

2.6. Analyse des résultats et perspectives de développement

Les indices d'assainissement (*fig. 16*), obtenus avec le prototype montrent qu'il est possible d'améliorer très nettement les performances du captage sur la scie radiale. La mise en œuvre de ce principe permet d'atteindre un indice d'assainissement supérieur à 95 % pour un débit d'air d'environ 700 m³.h⁻¹. Cet indice est très nettement supérieur aux indices obtenus avec les protecteurs ayant un dispositif d'aspiration intégré. L'utilisation d'un tel système doit permettre une réduction notable de l'empoussièrement moyen au poste de travail.

Les *figures 17 à 21* présentent le prototype de dispositif de captage dans les positions de coupe les plus courantes.

Le principe développé avec ce dispositif devrait être repris et adapté aux différents modèles de machines en service utilisées dans les ateliers de la deuxième transformation du bois. Cette adaptation pourrait être réalisée soit par les organismes chargés de la mise en conformité ou de la rénovation des machines en service, soit par les constructeurs eux-mêmes.

Dans le cas des machines neuves, un tel principe de captage devrait être pris en compte dès la conception de la machine.

Fig. 16. Évolution de l'indice d'assainissement pour les trois protecteurs aspirants et le prototype de dispositif de captage INRS en fonction du débit d'air aspiré -

Change in the air cleaning index for the three suction guards and the INRS exhaust device prototype as a function of the exhaust air flow rate

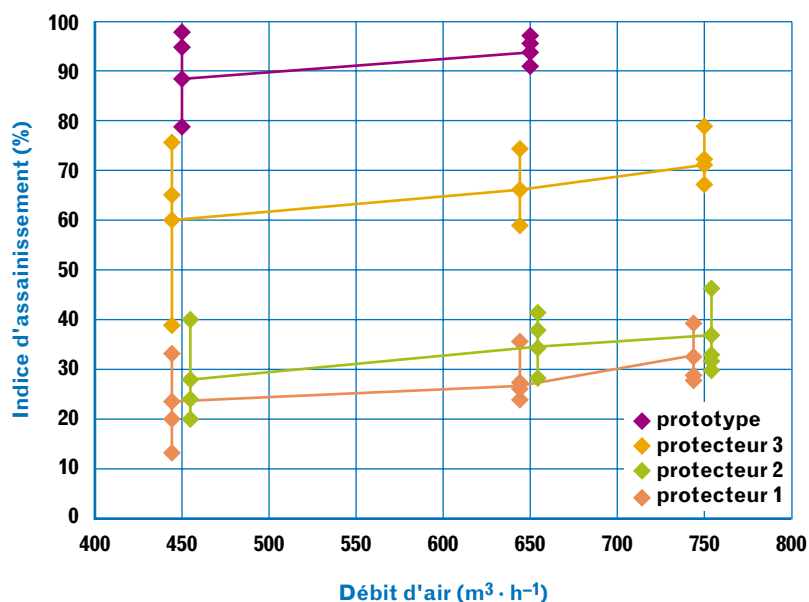


Fig. 17. Sciage perpendiculaire au guide -

Sawing perpendicular to the guide

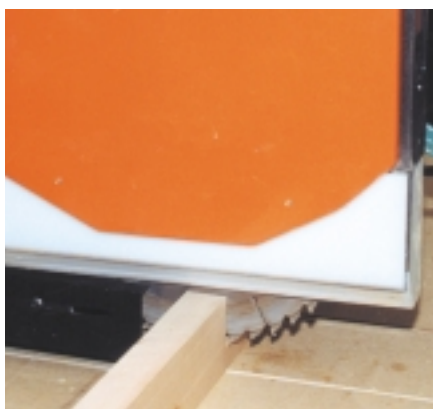


Fig. 18. Sciage incliné et à onglet -

Inclined sawing and mitring



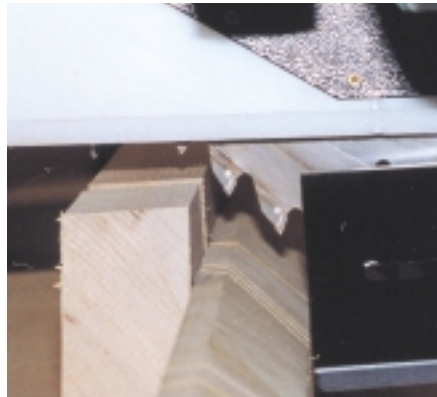
Fig. 19. Sciage incliné à 45° - *45° inclined sawing*



Fig. 20. Sciage à onglet à 45° - *45° mitring*



Fig. 21. Sciage à mi-bois - *Mid-wood sawing*



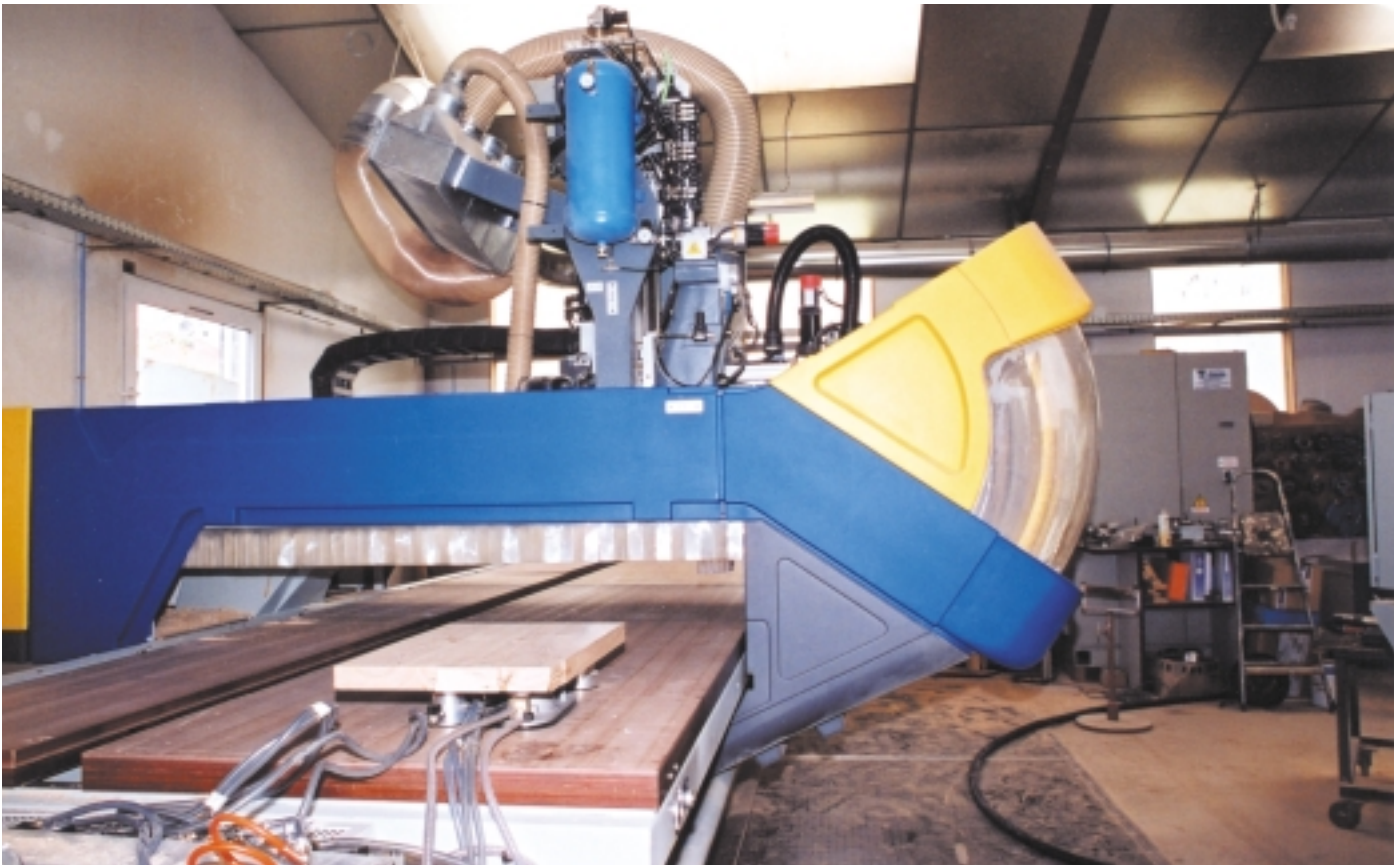


Fig. 22. Exemple de défonceuse à commande numérique - Example of numerically controlled router

3. Défonceuse à commande numérique

3.1. Caractéristiques de la machine et fonctionnement (fig. 22)

La défonceuse à commande numérique est une machine de plus en plus utilisée dans les ateliers de la seconde transformation du bois. Équipée d'outils variés, elle permet de réaliser à grande vitesse des usinages très précis et très divers. La *figure 23* montre un exemple de pièce réalisée avec cette machine.

La machine peut comporter :

- des unités de sciage, ponçage, etc.,
- un support de pièce fixe ou mobile,
- un bridage mécanique, hydraulique ou à dépression de pièces,
- une possibilité de changement automatique des outils.

La défonceuse à commande numérique utilisée pour les essais est de type à *por-*

tique fixe et table mobile selon l'axe X. La tête d'usinage est mobile selon les axes Y et Z. Elle possède un magasin d'outils en partie arrière de la table pouvant accueillir jusqu'à 10 outils.

La vitesse de rotation des outils est limitée à 18 000 tr.min⁻¹ et les vitesses de déplacement à 12 m.min⁻¹. La tête d'usinage est équipée d'un dispositif de captage fixe prolongé par un système de balais,

Sens de déplacement

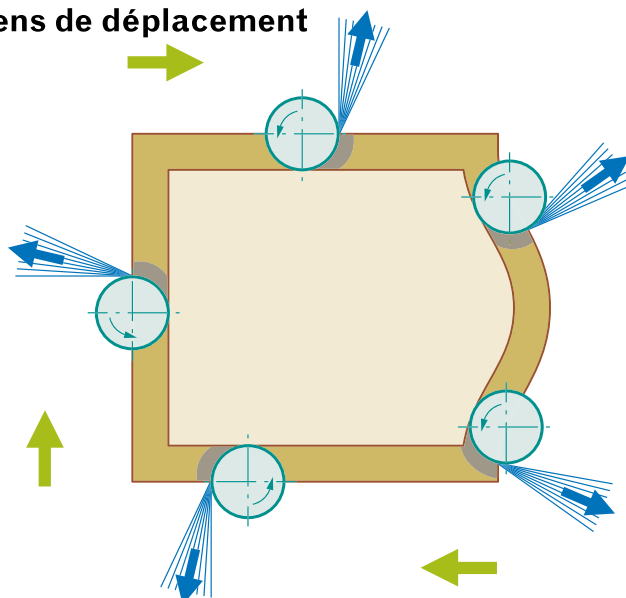


Fig. 23. Exemple d'usinage - Example of machining

devant limiter le domaine d'aspiration et freiner les jets de poussières. La machine est reliée à un groupe autonome d'aspiration filtration.

3.2. Caractéristiques de l'émission de poussières

3.2.1. Observation de la source

La source est mobile et peut se déplacer dans toutes les directions en fonction des différents travaux ou formes à réaliser.

D'autre part, les usinages étant effectués à des vitesses de coupe élevées (40 à 60 ms.⁻¹), les particules sont générées à grande vitesse. Si l'on représente le déplacement de l'outil sur le pourtour d'une pièce, la variation de la direction de projection et la position du dispositif de captage existant, on perçoit très rapidement les limites de ce dispositif (fig. 24).

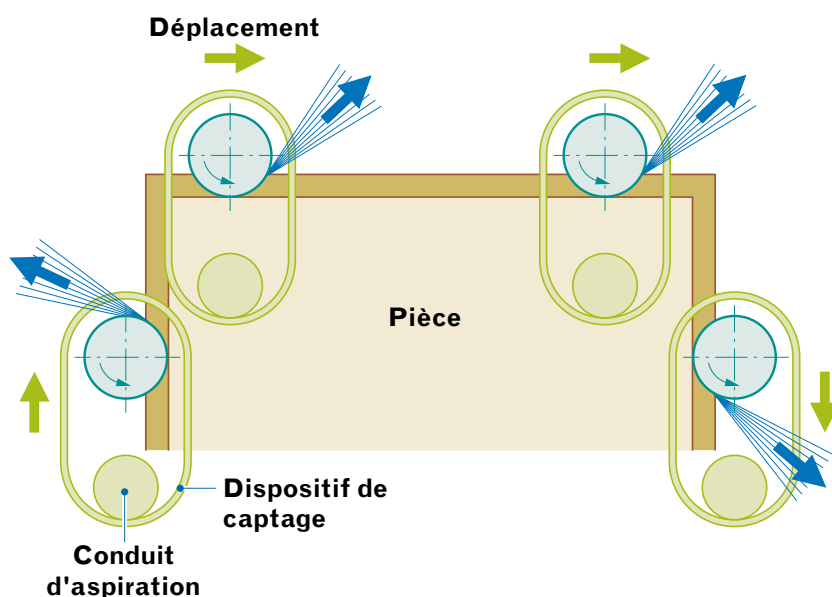


Fig. 24. Variation de la direction de projection et position de captage existant -
Variation in the direction of projection and position of existing exhaust device

3.2.2. Amplitude de projection radiale instantanée

L'amplitude de projection radiale instantanée dépend de la profondeur de passe.

3.2.3. Amplitude de projection axiale instantanée

L'amplitude de projection axiale instantanée dépend essentiellement du profil de l'usinage à réaliser et de la hauteur travaillante de l'outil.

3.2.4. Direction de projection

Les multiples possibilités d'usinage de cette machine peuvent conduire, au cours d'une même opération, à une variation de la direction de projection dans tout le plan. L'amplitude de projection radiale résultante, correspondant à l'ensemble de toutes les amplitudes de projection radiale instantanée, peut couvrir 360°.

3.3. Conception du dispositif de captage

3.3.1. Choix de la solution de captage

La source d'émission des particules est mobile, et la direction de projection est non constante. Le logigramme montre deux possibilités pour la mise en œuvre du capteur :

■ Un dispositif de captage mobile avec la source mais ne suivant pas la direction

de projection. C'est le cas du dispositif existant. Il doit couvrir les amplitudes résultantes et donc assurer une aspiration sur 360°. En outre, des obstacles sont nécessaires pour faire chuter l'énergie cinétique des particules.

■ Un dispositif de captage mobile avec la source, suivant en permanence la direction de projection des particules sur 360°, ayant des obstacles pour faire chuter l'énergie cinétique des particules et une vitesse d'air de reprise suffisante.

La première solution consiste à augmenter la surface de captage autour de l'outil pour couvrir totalement les amplitudes résultantes.

Cette solution ne nécessite plus un nettoyage systématique des pièces après usinage, mais, pour obtenir une vitesse d'air suffisante permettant d'évacuer les particules, il est nécessaire de mettre en œuvre un débit très important, proportionnel à la surface de captage. Ce type de configuration exige des débits d'air couramment supérieurs à 5 000 m³.h⁻¹.

La deuxième solution a été retenue par un groupe de travail constitué dans le cadre d'une thèse [5] visant à proposer une démarche méthodologique aux concepteurs de machines à bois semi-automatisées, afin d'intégrer, au plus tôt dans le

cycle de développement du produit, les principes d'hygiène, de sécurité et d'ergonomie (Méthode de conception distribuée (MCD)).

La validation pratique de cette démarche a été réalisée à partir de l'objectif particulier d'améliorer l'efficacité des dispositifs de captage sur les défonceuses à commande numérique.

L'utilisation du logigramme a permis au groupe de travail d'adopter une solution de captage qui s'est révélée être comparable à celle développée par la CRAM des Pays-de-Loire [10].

Le principe a été adapté à ce type de machine.

Le logigramme de la figure 25 présente les différentes phases de la démarche de conception prenant en compte les paramètres de la source d'émission qui permettent d'aboutir à un dispositif de captage spécifique.

3.3.2. Principe et description

La solution mise en œuvre consiste à asservir en permanence la rotation du dispositif de captage au sens et à la vitesse de déplacement de l'outil de façon à ce que l'aspiration soit toujours placée face à la direction de projection des poussières et

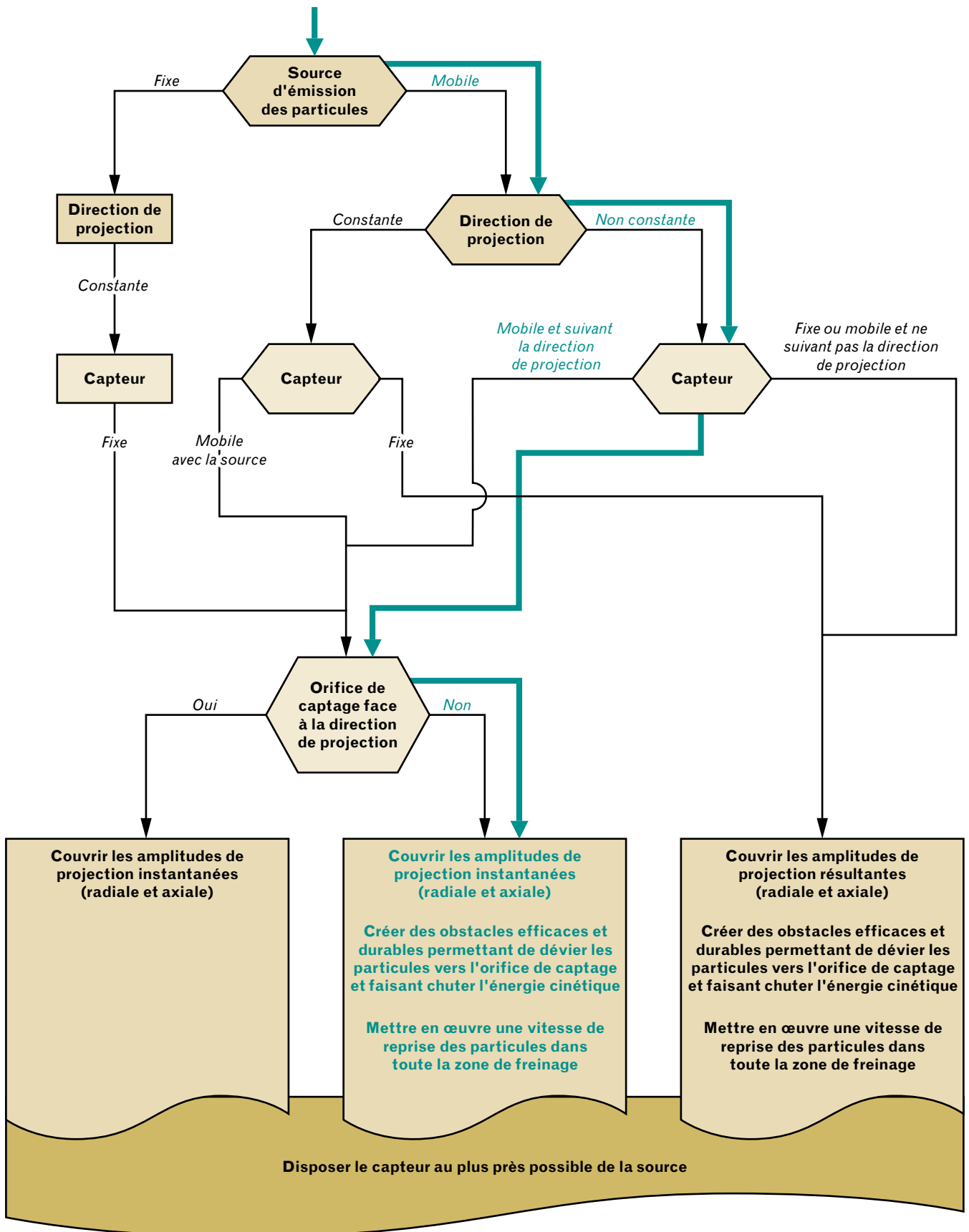


Fig. 25. Logigramme appliqué à la défonceuse à commande numérique - Logic diagram applied to the numerically controlled router

au plus près de la source d'émission. Les figures 26 et 27 montrent les différentes positions du dispositif tournant en fonction du déplacement de l'outil et de son mode de récupération des particules.

L'asservissement en rotation du déflecteur sur 360°, en fonction du déplacement de l'outil, de son diamètre et de la hauteur de passe, peut aisément être intégré à la conception des machines neuves. Quel que soit le type de déplacement de l'outil (rectiligne ou curviligne), le déflecteur doit s'orienter en permanence pour être toujours face à la direction de projection des particules. Il faut donc que l'asservissement de la vitesse de rotation de ce déflecteur puisse lui assurer un positionnement toujours correct au cours des usinages, et notamment avec différents rayons de courbure.

En ajoutant un pilotage d'axe, la définition des fonctions, soit à partir du programme d'usinage (logiciel), soit depuis l'automate (matériel), permet de commander la rotation du déflecteur suivant toutes les phases du travail à effectuer par l'outil.

Fig. 26. Principe du dispositif de captage asservi en rotation - Principle of the exhaust device rotation according to tool position

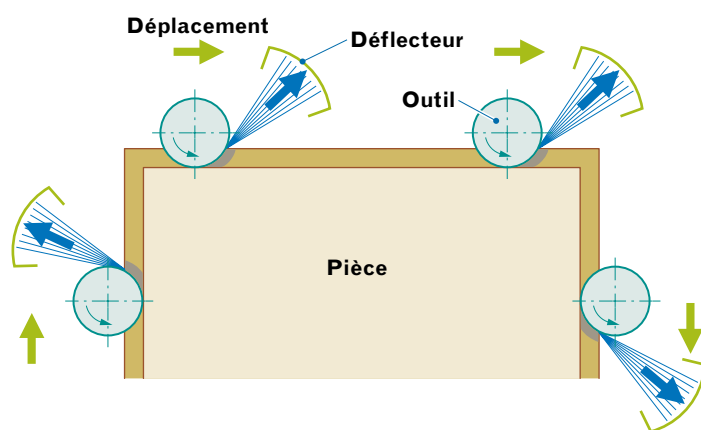


Fig. 27. Schéma de principe du dispositif de captage des poussières - Diagram of the principle of the dust exhaust device

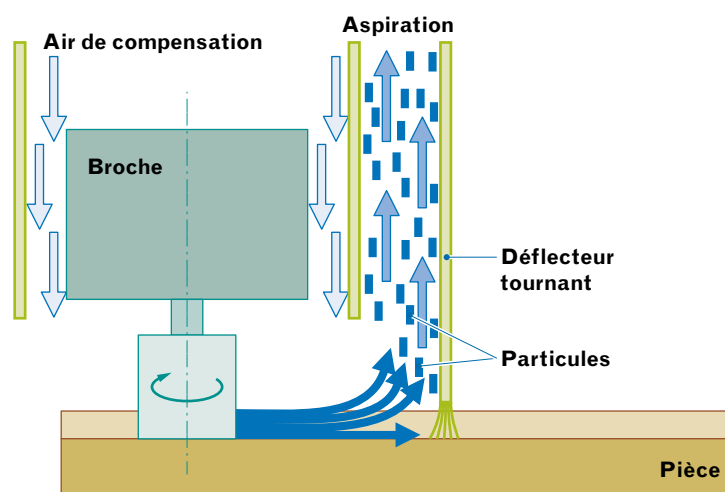


Fig. 28. Vue d'ensemble du dispositif de captage (volet en façade relevé) - Overview of the exhaust device (flap on the front panel lifted up)

Les parois entourant le déflecteur sont prolongées par des balais permettant de confiner les particules qui auraient pu échapper au dispositif de captage tournant. Ces parois sont en matière plastique transparente permettant à l'opérateur de voir l'outil en cours d'usinage.

De plus, afin de mieux voir l'outil, notamment dans les phases de réglages ou de mise au point de nouveaux programmes, l'opérateur peut escamoter une de ces parois par l'intermédiaire d'un électro-aimant commandé à distance par action maintenue. Les parois réalisent également une protection mécanique contre les risques d'éclatement des outils en cours d'usinage.

La figure 28 présente l'ensemble du dispositif monté sur la tête d'usinage.

3.4. Conditions d'essais

Deux campagnes de mesures successives ont été effectuées afin de pouvoir évaluer les performances du dispositif existant, puis du dispositif conçu et réalisé par l'INRS.

Les conditions d'essais ont été reproduites au mieux entre les deux campagnes d'essais et chaque configuration a fait l'objet de trois essais consécutifs.

L'outil utilisé est une fraise à défoncer hélicoïdale de diamètre 20 mm et de longueur utile 60 mm en acier rapide, tournant à 18 000 tr.min⁻¹.

Toutes les pièces ont été usinées selon le même programme, reproduisant les principaux usinages possibles avec une défonceuse sur une pièce en deux dimensions.

Les figures 29 et 30 présentent le dispositif de captage existant et le nouveau dispositif en phase d'usinage.

3.4.1. Disposition des appareils de mesure

La détermination de l'indice d'assainissement a été effectuée en trois points autour de la machine, comme indiqué figure 31.

3.4.2. Caractéristiques de l'échantillon à usiner

Les essais ont été effectués sur des panneaux en MDF (Medium Density Fiberboard). Ce matériau a été retenu en raison de son homogénéité, de sa facilité de travail ainsi que de sa faculté de générer de grandes quantités de poussières.

Chaque panneau mesurait 900 x 740 mm et 30 mm d'épaisseur (fig. 32). Chaque essai a été effectué suivant une passe de 8 mm. Il a été ainsi possible d'effectuer trois passes d'égale épaisseur.



Fig. 29. Dispositif de captage existant - Existing exhaust device

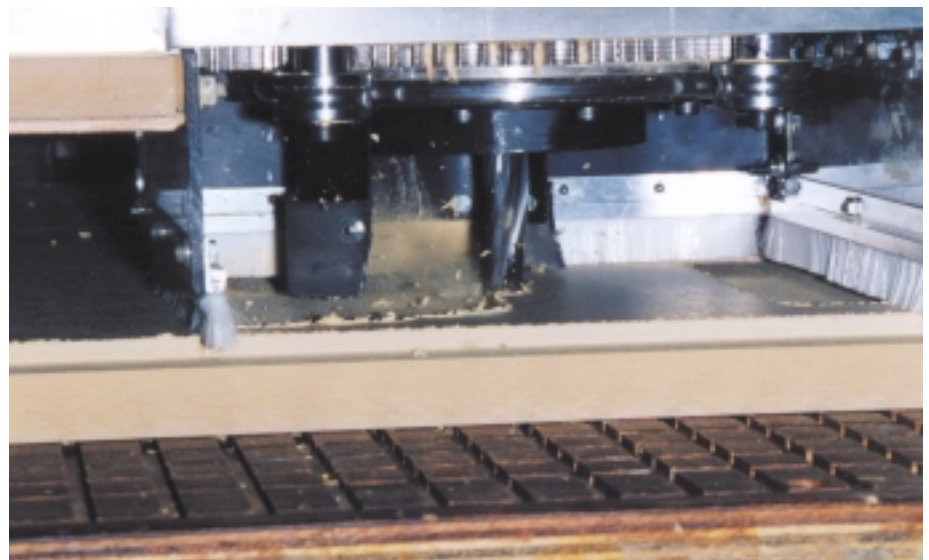


Fig. 30. Détail du nouveau dispositif de captage - Detail of the new exhaust device

Fig. 31. Emplacement des appareils de mesure - Location of the measurement apparatus

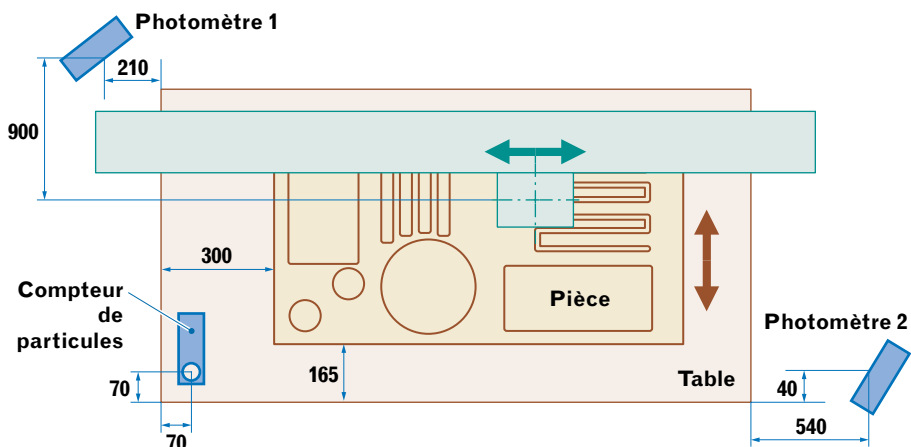
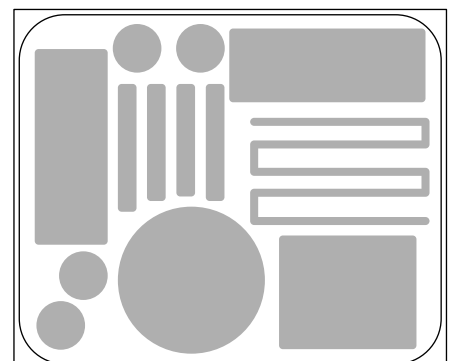


Fig. 32. Usinage (en gris) effectué sur le panneau de MDF - Machining (in grey) carried out on a medium-density fibreboard (MDF) panel



3.5. Résultats

Les courbes de la *figure 33* présentent les résultats d'indices d'assainissement mesurés avec le dispositif de captage existant et le nouveau dispositif, pour deux débits d'aspiration.

Les courbes de la *figure 34* montrent l'évolution de l'indice d'assainissement pour les deux dispositifs de captage et trois profondeurs de passe.

3.6. Analyse des résultats et perspectives de développement

Les courbes des figures 33 et 34 mettent en évidence, à débit égal, le gain obtenu avec le prototype à déflecteur tournant. On remarque que, contrairement au dispositif d'origine, les indices d'assainissement mesurés avec le prototype sont moins dispersés pour les trois profondeurs de passe testées.

Le débit généralement mis en œuvre sur ces machines se situe autour de $5\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ pour un dispositif fixe captant sur 360° . Avec ce dispositif de captage tournant dont le secteur aspirant est d'environ 70° , le débit d'air mis en œuvre peut être réduit à moins de $1\,000\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$. Lors des essais, on a pu observer une diminution considérable des dépôts de poussières sur la pièce usinée. La visibilité du travail en cours et la qualité de l'usinage sont ainsi améliorées et le temps de nettoyage final est très nettement réduit.

Le principe de captage développé et mis en œuvre sur ce prototype montre la faisabilité technique d'une telle solution, qui devrait être reprise par les constructeurs et intégrée à la conception d'une nouvelle machine. Plusieurs améliorations pourraient être apportées au système, notamment en ce qui concerne l'optimisation des entrées d'air et la prise en compte de l'utilisation d'outils de plus grand diamètre entraînant des vitesses de projection des particules plus élevées.

Il conviendra, dans le cas des machines existantes, d'examiner pour chaque modèle l'adaptation de ce principe de captage.

Le surcoût relatif à la conception et à l'asservissement d'un tel dispositif de captage devrait rester modique en regard d'un coût de machine dépassant 150 000 euros. D'autre part, le faible débit d'aspiration nécessaire pour ce dispositif de captage (comparativement à un dispositif de captage couvrant 360°) induit un moindre coût d'aménagement et de raccordement au réseau d'aspiration.

Enfin, les coûts de fonctionnement liés à la puissance absorbée et au chauffage de l'air de compensation s'en trouveront diminués.

Fig. 33. Évolution de l'indice d'assainissement pour les deux dispositifs de captage en fonction du débit d'air aspiré - Change in the air cleaning index for the two exhaust devices as a function of the exhaust air flow rate

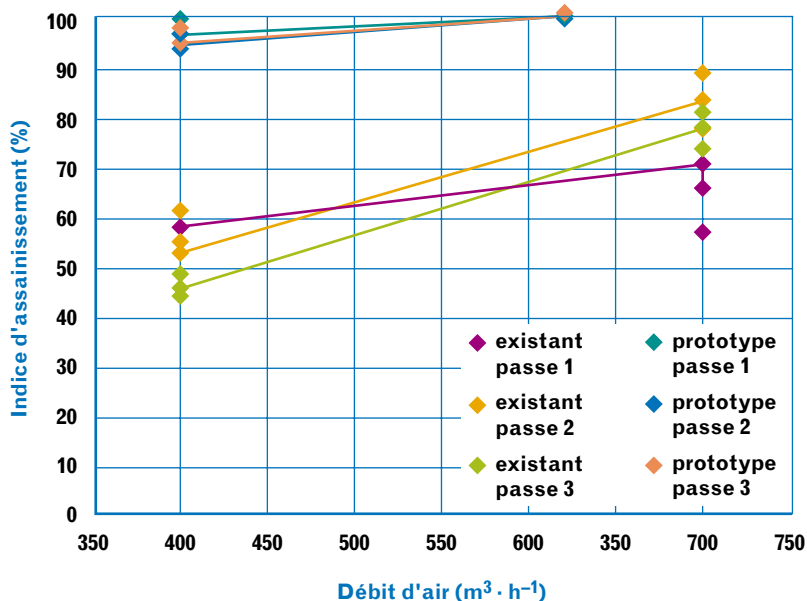
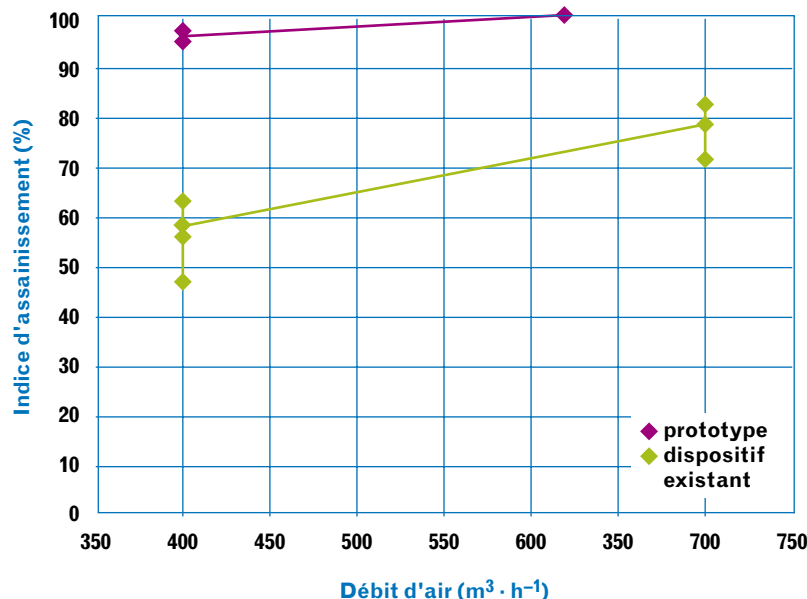


Fig. 34. Évolution de l'indice d'assainissement pour trois profondeurs de passe - Change in the air cleaning index for three depths of cut

CONCLUSION

Le risque lié à l'inhalation des poussières de bois dans les ateliers de la deuxième transformation du bois est une préoccupation forte des préventeurs. Depuis plus de dix ans, les services de prévention des CRAM et l'INRS ont contribué à la réduction de l'exposition des opérateurs pour les machines usuelles les plus polluantes, qui par leurs actions sur le terrain, qui par une série d'études. Cette réduction a généralement été obtenue par la mise en place sur les machines de dispositifs de captage plus efficaces.

La conception de tels dispositifs nécessite de faire appel à de solides compétences en dynamique des fluides et des particules. Afin d'aider les constructeurs ou les rénovateurs de machines qui ne maîtrisent pas forcément ces domaines, une méthodologie de conception a été élaborée par un groupe de travail CRAM/INRS [8]. Elle a été adoptée pour cette nouvelle étude de l'INRS portant sur deux machines : une scie radiale à aménagement manuel et une défonceuse à commande numérique. Lors de la première étape de la démarche consistant à observer la source et à caractériser la projection de poussières de bois en fonction des conditions d'usinage, une technique de visualisation par source laser a été adaptée avec succès au cas de la scie radiale. En effet, les poussières de bois émises fluorescent naturellement, évitant ainsi le recours à un ensemencement par marqueur. Différentes configurations d'usinage ont été examinées quant à leur incidence sur la conception du captage. De plus, grâce à son caractère pluridisciplinaire,

l'équipe chargée de l'étude a pris en compte l'ensemble des fonctions ou des contraintes auxquelles doivent satisfaire les dispositifs mis au point, telles que la protection mécanique des opérateurs ou l'ergonomie.

L'évaluation des performances de captage constitue une étape indispensable, car « il n'y a progrès que s'il y a mesure ». Pour les types de machines retenues dans cette étude, le paramètre d'évaluation adopté a été l'indice d'assainissement. Sa méthode de mesurage, décrite dans une norme européenne récemment publiée, est de mise en œuvre simple puisque des détecteurs de type photomètre peuvent convenir pour mesurer les concentrations en poussières. Outre la validation des choix de conception, elle permet de déterminer l'évolution des performances de captage en fonction du débit d'aspiration.

On constate une fois encore que les efforts déployés lors de la phase de conception conduisent à une réduction des débits par rapport aux solutions existantes pour des performances nettement améliorées dans les deux cas étudiés. Ceci a pour conséquence une réduction des coûts d'investissement de l'installation de ventilation et des coûts d'exploitation de chauffage de l'air de compensation.

Au terme de cette étude, des solutions de captage ont donc été définies et testées tant pour une machine simple que pour une machine complexe. Le surcoût d'investissement du dispositif de captage reste raisonnable comparativement au coût des machines. Certes, les coûts de conception et de mise au point peuvent ne pas être négligeables, cependant ils seront d'autant

plus faibles que l'intégration du dispositif aura été réalisée en amont dans le processus de fabrication de la machine. Ces solutions sont décrites dans deux des fiches montrant l'application de la méthode de conception à des machines spécifiques dans la brochure évoquée ci-dessus. Dans les deux cas, les caractères « récepteur » et « enveloppant » des dispositifs de captage ont été privilégiés. Le dispositif se trouve constamment placé face à la direction principale de projection, grâce à un réglage manuel en fonction des angles de coupe pour la scie, ou grâce à sa rotation programmée par la commande numérique pour la défonceuse.

Plusieurs prototypes de dispositifs de captage pour scie radiale ont été conçus par l'INRS afin de les tester sur d'autres modèles de machines existantes. Pour les machines neuves, la conception peut largement déborder le cadre du captage et conduire à des solutions innovantes et bien adaptées. Le dispositif pivotant mis au point pour la défonceuse nécessite des études au cas par cas pour son intégration sur les machines existantes. Ce principe, développé par l'INRS, pourrait être adapté par les fabricants de machines neuves.

Une nouvelle étude est en cours concernant deux autres machines (ponceuse à bande étroite, tour), et deux dispositifs de protection et de captage (cape sur scie circulaire à table, protecteur pivotant pour travail à l'arbre sur toupie). La méthodologie de conception sera utilisée ainsi que, lorsque cela s'avérera pertinent, la technique de visualisation de l'émission de poussières.

BIBLIOGRAPHIE

[1] MULLER J.P., LAMOUREUX P. - Amélioration des dispositifs d'aspiration localisée. Étude sur quatre machines à bois traditionnelles. *Cahiers de Notes Documentaires - Hygiène et Sécurité du Travail*, 1996, 163, ND 2019, 18 p.

[2] Directive 99/38/CE du Conseil du 29 avril 1999 modifiant la directive 90/394/CEE et concernant la protection des travailleurs contre les risques liés à l'exposition à des agents cancérigènes au travail, et l'étendant à des agents mutagènes. *Journal Officiel des Communautés Européennes*, n° L 138 du 1^{er} juin 1999, pp. L66-L69.

[3] Circulaire du 5 juillet 1991 complétant les valeurs indicatives des concentrations dans l'atmosphère des lieux de travail. *Bulletin Officiel du Ministère du Travail*, n° 91-14 du 5 juillet 1991, p. 19.

[4] MÖCKLINGHOFF K., FRICKE H.H., WERMER W. - Holzstaub messen, bewerten und vermindern. Ein

Erfahrungsbericht. *Gefahrstoffe-Reinhaltung der Luft*, 1999, 7-8, pp. 273-280.

[5] JOUFFROY D. - Vers une démarche d'intégration de la sécurité à la conception des machines à bois semi-automatisées. Application au développement d'un système de captage des poussières pour une défonceuse à commande numérique (thèse de doctorat à l'Université Nancy-I). *Vandœuvre*, 1999, INRS, Coll. Notes Scientifiques et Techniques, NS 177, 182 p.

[6] CICCOTELLI J., L'HUILLIER J.C., MULLER J.P. - Dispositif de captage des poussières pour défonceuses à commande numérique. *Le Bois National*, juil. 1999, pp. 14-15.

[7] NF EN 1093-11 - Sécurité des machines. Évaluation de l'émission des substances dangereuses véhiculées par l'air. Partie 11 - Mesure de l'indice d'assainissement. Paris, AFNOR, sept. 2001, 13 p.

[8] Conception des dispositifs de captage sur machine à bois. Paris, INRS, 2001, ED 841, 72 p.

[9] DESSAGNE J.M., MULLER J.P., L'HUILLIER J.C., VIALLE P.J., ATANGANA X. - Visualization of Wood Dust Emission from a Circular Saw Using a Laser Sheet. In : *Ventilation 2000, 6th International Symposium on Ventilation for Contaminant Control*. Helsinki, FIOH, 2002, pp. 171-174.

[10] REGNIER J.L. - Poussières de bois. Note technique d'aide à la conception des dispositifs de captage des copeaux et poussières lors des opérations d'usinage dans la deuxième transformation du bois. Nantes, CRAM des Pays-de-Loire, nov. 1995, 62 p.

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

Tiré à part des Cahiers de notes documentaires - Hygiène et sécurité du travail, 3^e trimestre 2002, n° 188 - ND 2177 - 1000 ex.
N° CPPAP 804/AD/PC/DC du 14-03-85. Directeur de la publication : J.-L. MARIÉ. ISSN 0007-9952 - ISBN 2-7389-1132-3

Imprimerie de Montligeon - 61400 La Chapelle Montligeon