

PROTECTIONS LOCALISEES PAR FLUX D'AIR PROPRE

L. Fiabane, J. Carlier, P. Georgeault, D. Heitz
Irstea, U.R. OPAALE, F-35044 Rennes Cedex, France

1. INTRODUCTION

L'air est un vecteur important de contamination (aérosols solides ou liquides, particules, gaz) qu'il peut amener à proximité de surfaces ou des produits qui s'en trouvent altérés. La solution classique au problème de contamination aéroportée consiste à transformer les zones sensibles en salles propres. Il est possible d'obtenir une bonne protection particulaire globale dans de grands volumes, même ouverts aux contaminations internes (opérateurs, matières premières, etc.). Pour autant, plus les salles sont grandes ou à géométrie complexe (avec par exemple présence d'obstacles ou de machines, ou reprises d'air mal placées), plus il est difficile d'assurer un risque de contamination minimal en tout point de la salle propre.

La maîtrise localisée des flux d'air propres peut alors permettre d'assurer des niveaux élevés de propreté d'air aux points clés des salles [1], en général autour des produits sensibles à l'aérocontamination. Si l'on s'en tient à la pollution particulaire, un type courant de maîtrise localisée comme le flux unidirectionnel permet d'obtenir localement des concentrations en particules 100 fois plus faibles que la concentration ambiante (classe ISO 5 sous le flux unidirectionnel contre classe ISO 7 dans l'ambiance selon la norme ISO 14644-1). Il faut néanmoins veiller à ce que l'interface entre le flux d'air propre et l'ambiance soit suffisamment robuste pour éviter une contamination de la zone protégée, y compris en cas d'intrusion.

L'équipe ACTA d'Irstea, de par son positionnement historique, s'est spécialisée dans les applications de l'industrie agroalimentaire (IAA). Les paramètres étudiés et les applications abordées le sont donc dans ce contexte spécifique : d'une part la contamination traitée se limite aux particules physiques de tailles micrométriques caractéristiques de celles rencontrés en IAA (bactéries, levures, moisissures, ...) ; d'autre part les applications ont été développées en fonction de contraintes spécifiques à l'IAA, en particulier celle d'apporter, en complément d'un air propre, un air froid au plus près des produits [2].

Malgré ce domaine d'application assez spécifique, les principes de la protection localisée contre les particules aéroportées sont assez génériques et peuvent être déclinés dans d'autres domaines d'application, avec des classes de propreté similaires ou supérieures.

2. PROTECTION LOCALISEE

2.1. Illustration du principe

Dans le cas d'une protection globale, en milieu confiné, on injecte de l'air purifié à l'aide de filtres à haute efficacité en grande quantité : cet air propre suralimente la salle dite propre pour, d'une part, diluer la pollution « endogène » inévitablement créée lors des phases de production (les sources de contamination étant entre autres les opérateurs, les produits eux-mêmes, les machines...) et, d'autre part, pour empêcher par surpression la pollution « exogène » de pénétrer dans la zone protégée. En plus de contraintes fortes en termes de coûts (construction et exploitation) et d'utilisation (sas d'entrée, habits spécifiques), les salles propres ne répondent pas toujours aux besoins en qualité d'air à proximité de zones sensibles : il est en effet difficile d'assurer un très haut niveau de propreté dans des volumes importants, avec une contamination faible et homogène à grande échelle.

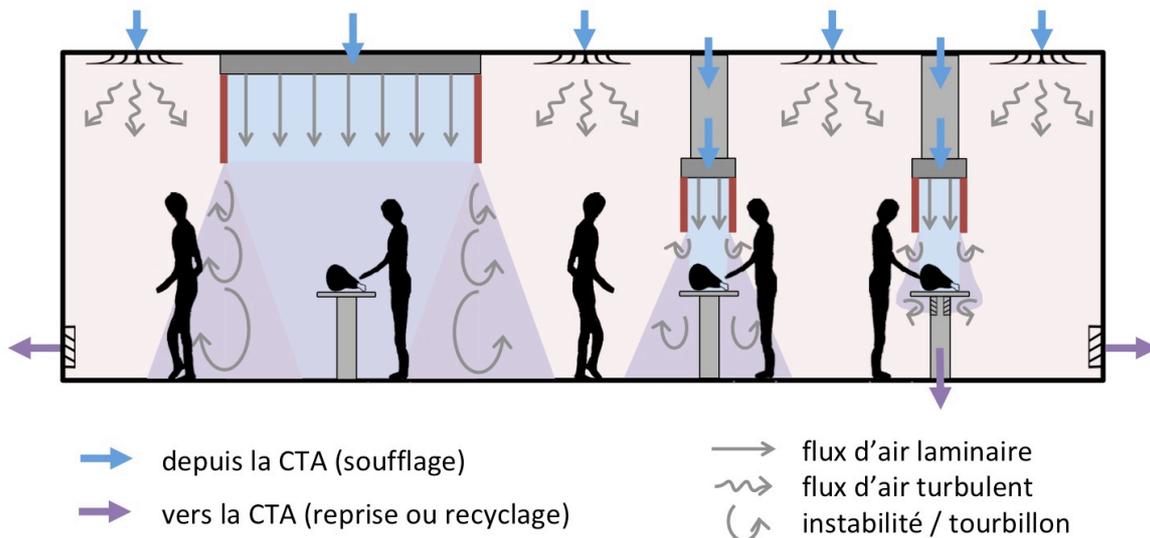


Figure 1 - Protection localisée par flux d'air propre englobant les opérateurs (gauche), centrée sur le produit sans recyclage (centre) ou centrée sur le produit avec recyclage d'air (droite)

Une méthode de protection alternative consiste à apporter un flux d'air propre au plus près des produits, englobant ou non les opérateurs (voir Figure 1). On s'affranchit ainsi de la difficulté de rendre la contamination homogène dans un grand volume, puisque le niveau de contamination ne doit être absolument maintenu que dans la zone localisée.

Historiquement, une des premières technologies utilisées pour tenter de cibler la protection particulière sur une zone précise est le flux dit laminaire : des dispositifs autonomes de soufflage équipés de filtres HEPA généralement installés au-dessus ou sur le côté de la zone sensible à protéger. Dans les faits, les flux laminaires deviennent très rapidement turbulents, en se mélangeant avec l'ambiance ou dès qu'un obstacle se trouve dans le flux crée un sillage : on retombe dans la difficulté de la maîtrise de la contamination d'un grand volume avec une contamination hétérogène.

Afin d'assurer une réelle protection localisée, il est possible d'ajouter des guidages au flux laminaire afin d'obtenir un flux d'air unidirectionnel (ou flux dirigé). De cette manière, on donne au flux d'air propre une direction définie et on réduit la longueur de l'interface entre l'ambiance à protéger et l'ambiance moins maîtrisée en termes de propreté. Le maintien de la protection lors du passage d'un opérateur peut être optimisé en rendant l'interface entre les flux d'air plus robuste, mais la présence de l'opérateur, source de contamination, au sein du flux d'air "propre" peut être problématique.

Il est alors possible de reprendre le principe des flux d'air unidirectionnels et de l'appliquer à des zones plus ciblées en proposant des solutions optimisées et adaptées à différents contextes ou configurations. La vitesse de soufflage dans l'air ambiant, l'inclinaison et la longueur des guidages ou des déflecteurs, ou encore le positionnement d'éventuelles reprises d'air sont autant d'éléments variables dont le réglage nécessite des notions dans les domaines de la physique des écoulements et du transport particulaire afin d'assurer une bonne protection en toute condition. Il en résulte des solutions modulaires et facilement implantables dans des structures préexistantes, ce qui les rend à la fois efficaces et économiques [3] (moins d'équipements et moins d'air à traiter et à faire circuler).

2.2. Méthodes de mesure

Deux types de mesures sont en général effectués autour des dispositifs de protection localisée :

- des mesures de vélocimétries afin de déterminer les flux d'air, les régimes aux interfaces et la robustesse de celles-ci ;
- du comptage particulaire afin de déterminer l'efficacité de la protection localisée.

Les mesures de comptage particulaire sont effectuées à l'aide de compteur du commerce (*TSI Aero Trak 9310* et *Grimm 1108*), sur toutes les gammes de tailles de la norme ISO 14644-1 ou seulement sur les tailles supérieures à $0.5 \mu\text{m}$ selon les cas. Les mesures de vélocimétries peuvent être effectués à l'aide de fils chaud développés en interne, à l'aide de sondes commerciales à fil chaud ou hélice (*KIMO diam*), ou à l'aide de méthodes optiques de type flot optique ou vélocimétrie par image de particules (*PIV LaVision*).

Des mesures de température, d'hygrométrie et de pression peuvent être réalisées simultanément selon les besoins.

3. RESULTATS

3.1.1. Étude de l'interface entre air propre et air ambiant

Les flux d'air sortant d'une bouche de ventilation, d'un plafond soufflant ou d'un dispositif de protection localisée peuvent tous être considérés comme des jets d'un point de vue mécanique des fluides. De ce fait, il existe un entraînement de l'air ambiant par ces flux d'air propre, qui aboutit à un mélange important entre les deux types d'air à une certaine distance du jet [4]. Il est possible de limiter les mélanges entre le flux d'air propre et l'air ambiant :

- l'ajout de guidages permet de situer l'impact entre le jet plan et la zone à protéger dans la région initiale du jet, ce qui limite les échanges entre l'ambiance et l'air propre (a contrario un plafond soufflant sans guidage met la zone de travail dans la zone de mélange maximal) ;
- un guidage de jonction entre le caisson de soufflage et la zone de travail d'un côté, allié à un guidage à mi-hauteur de l'autre côté permet la création d'un jet plus énergétique, donc plus stable et favorisant une meilleure protection (Figure 2).

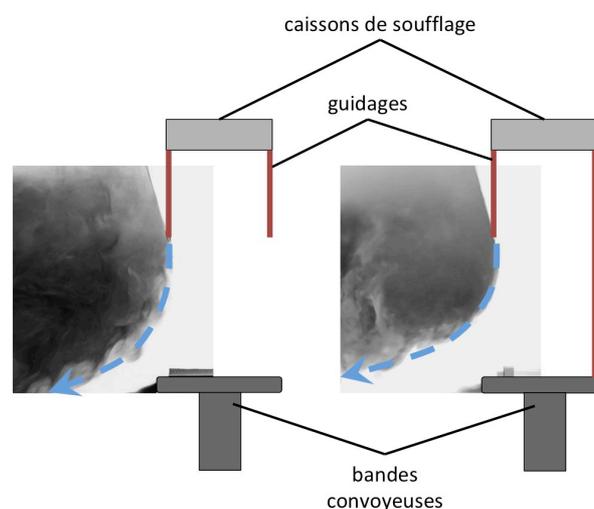


Figure 2 - Visualisation de l'interface entre le flux d'air propre et l'ambiance selon la configuration des guidages arrière : à mi-hauteur ou sur toute la hauteur

Lorsqu'il n'est pas possible de bloquer tout un côté de la zone de travail, il est possible d'améliorer l'interface entre le flux d'air propre et l'ambiance en donnant un angle au flux d'air propre au niveau de son guidage, ou en ré-aspirant l'air propre au niveau de l'impact (Figure 3). Dans ce dernier cas, on parle alors de protection localisée par flux d'air recyclé.

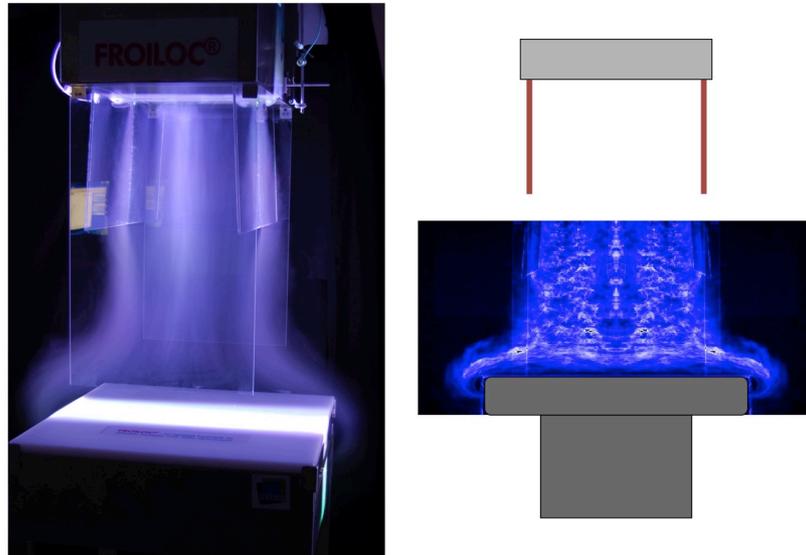


Figure 3 - Visions moyenne (gauche) et instantanée (droite) du flux d'air propre dans le cas du dispositif FOILOC®

Le concept breveté Froiloc® est ainsi un dispositif de protection localisée par flux d'air propre et froid recyclé. Il a été étudié de façon à apporter des améliorations substantielles par rapport à l'état de l'art sur au moins trois aspects : (i) la qualité sanitaire des produits, en assurant une propreté de niveau ISO 5 au niveau du produit ; (ii) le confort des opérateurs, en séparant les ambiances en température grâce au recyclage du flux propre et froid, ce qui a pour effet de réduire sensiblement le risque de troubles musculo-squelettiques (TMS), et apporte une meilleure attractivité au poste de travail ; enfin (iii) la consommation énergétique, puisqu'en permettant de réduire le volume réfrigéré et en recyclant la majeure partie de l'air froid soufflé, la consommation d'énergie induite par le diffuseur d'air ultra-propre est inférieure de 50% à celle d'une salle froide complète en air ultra-propre, ou identique à celle d'un atelier classique.

Comme dans le cas de soufflages simples, il est nécessaire d'ajouter des guidages en sortie de caisson afin de situer la zone d'impact dans la région initiale du jet plan, et donc de limiter le mélange avec l'ambiance. Ensuite, l'aspiration de l'air propre impactant la zone protégée, à proximité de cette zone, permet d'accroître cette stabilité. La Figure 3 permet d'illustrer le caractère laminaire du flux lorsqu'il est observé sur des temps longs, mais son caractère intimement turbulent dès lors qu'il est observé sur des temps courts. Du point de vue de la contamination particulaire, des essais ont été effectués sur des prototypes réalistes (thermoformeuse, Figure 4) ; le niveau de propreté atteint au niveau des produits est bien meilleur que celui de l'air ambiant (résultats du comptage particulaire en vue du dessus de la thermoformeuse, à 20 cm du plan de travail, Figure 5).



Figure 4 - Thermoformeuse équipée du système de protection localisée Froiloc®

Classification de zones selon la norme ISO 14644-1 ,
calculée à partir des mesures de concentration de particules > à 0,3 µm /CF et > à 0,5 µm /CF

		Axe Z en mm (Longueur)																								
		-1168	-1101	-1000	-900	-800	-700	-600	-500	-400	-300	-200	-99	0	101	200	300	400	500	602	700	800	900	1000	1104	1204
A	299	iso7	iso7				iso7					iso7	iso7	iso7					iso7						iso7	iso8
	250	iso7	iso7				iso7					iso7	iso7	iso7					iso7						iso7	iso7
	198	iso2	iso3				iso2					iso3	iso5	iso2					iso3						iso3	iso6
X	99	iso2	iso2			iso2					iso2	iso2	iso2					iso2						iso2	iso2	
	-1	iso2	iso3			iso2					iso2	iso2	iso2					iso2						iso3	iso2	
e	-102	iso2	iso2			iso2					iso2	iso3	iso2					iso2						iso2	iso2	
	-201	iso2	iso2			iso2					iso5	iso5	iso5					iso2						iso2	iso2	
m	-250	iso7	iso7			iso7					iso7	iso7	iso7					iso6						iso6	iso7	
	-300	iso7	iso7			iso7					iso7	iso7	iso8					iso7						iso7	iso8	

Calcul effectué à partir du nombre maximal de particules admises par taille et par classe de particule

Figure 5 - Classe de propreté en différents points du prototype (vue de dessus, prélèvements situés à 20 cm du plan de travail)

3.1.2. Étude des intrusions

La protection localisée a pour avantage de laisser un accès physique libre entre les opérateurs et la zone de travail. L'interface entre les flux d'air peut en revanche générer une contamination de la zone protégée, en particulier à l'occasion d'effractions. Il est alors nécessaire de savoir si la protection peut être maintenue lorsque l'opérateur intervient sur le produit. La Figure 6 illustre une situation de remplissage manuel de petits récipients avec un liquide stérile sous un flux d'air ultra-propre horizontal. Dans ce cas il est important de savoir si le dispositif assure une protection optimale y compris lorsque la main de l'opérateur passe au-dessus des récipients, par exemple quand il remplit la dernière rangée. L'intrusion d'obstacles au travers de l'interface entre l'air propre soufflé et l'air ambiant est une problématique centrale à considérer pour concevoir un dispositif de protection ouvert fiable.

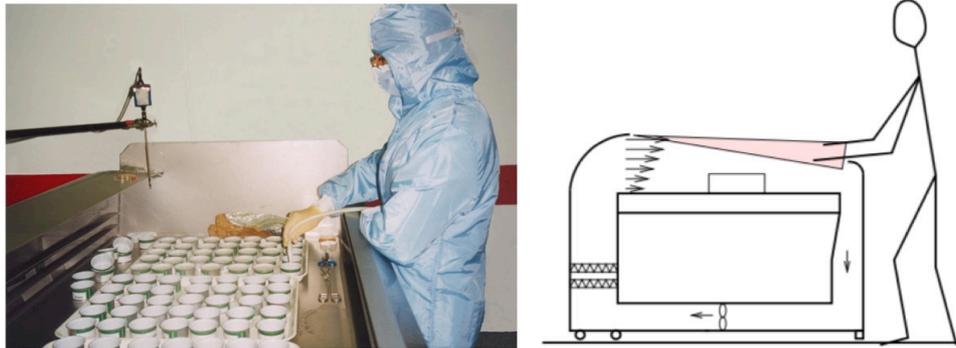


Figure 6 - Situation d'effraction au sein d'un dispositif de protection localisée par flux d'air horizontal recyclé de type Flux Progressif [5] : (A gauche), remplissage de récipients ; (A droite), schéma de principe du Flux Progressif.

La situation d'effraction a été modélisée et étudiée comme l'interaction entre un obstacle cylindrique, représentant un bras pénétrant l'air ultra-propre, et la couche de mélange entre le flux d'air soufflé et son environnement [6]. Pour un angle d'effraction de 90° entre la direction du flux d'air protecteur et l'obstacle, un écoulement instationnaire a été observé au culot du cylindre allant des basses vitesses (air ambiant) vers les hautes vitesses (air ultra-propre).

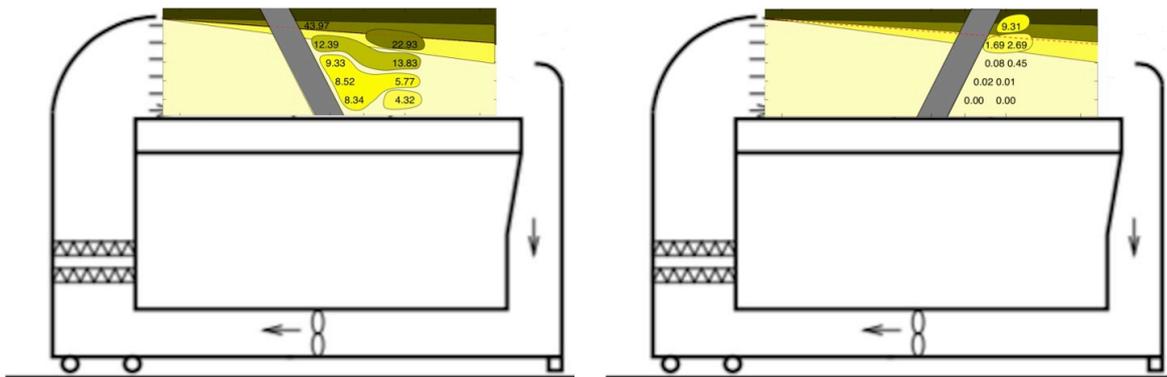


Figure 7 - Pourcentage de pollution particulaire extérieure introduite dans le volume protégé par Flux Progressif [5] lors d'une effraction. Gauche : avec un angle d'effraction de 60° par rapport à la direction du flux ; droite : avec un angle d'effraction de 120° par rapport à la direction du flux.

Une manière de s'affranchir de cette injection négative d'air pollué est d'augmenter l'angle de pénétration de l'obstacle dans le flux [6]. Cet effet est illustré sur la Figure 7 par l'observation du pourcentage de pollution particulaire extérieure introduite dans le volume protégé par Flux Progressif lors d'une effraction. Quand l'angle d'effraction est inférieur à 90° la protection est remise en cause avec un pourcentage de particules pouvant atteindre 10% de la pollution extérieure, observé au niveau de la surface de travail juste derrière l'obstacle. Plus en aval, cette pollution s'estompe. Quand l'angle d'effraction est supérieur à 90° le niveau de propreté est le même que celui observé sans effraction, ceci à la fois juste derrière l'obstacle et plus en aval.

4. CONCLUSION

La protection localisée d'ambiance par flux d'air consiste à placer des zones de travail dans de meilleures conditions de propreté particulaire lorsque l'usage de barrières solides n'est pas envisageable. Les dispositifs de protection localisée par flux d'air propre permettent d'assurer un niveau de protection particulaire équivalent voire supérieur à celui des salles propres au niveau des produits, tout en améliorant les performances énergétiques et le confort des opérateurs. Le point déterminant dans une protection localisée est d'assurer un bon niveau de protection y compris lorsque des perturbations extérieures - courantes ou exceptionnelles - déstabilisent le rideau d'air. Il faut alors étudier deux effets :

- l'effraction : lorsqu'un obstacle (par exemple le bras d'un opérateur) traverse l'interface entre la zone ambiante et la zone protégée, et génère à cette occasion un sillage ;
- la stabilité de l'interface : la capacité de la zone de mélange entre le flux d'air propre et l'air ambiant à avoir un comportement attendu et borné lorsque surviennent des perturbations extérieures (courants d'air dans l'atelier, passage d'opérateurs à proximité) et lorsque ces perturbations cessent.

La géométrie des dispositifs et notamment des guidages, ainsi que l'utilisation de reprise d'air et de flux d'air de densités différentes peuvent permettre d'assurer un rideau robuste, même en cas d'effractions. La protection est économique à l'installation (pas de modification d'atelier aussi importante que pour l'installation d'une salle propre entière, adaptation sur lignes préexistantes, modulable au gré des changements de production) et à l'utilisation (énergie plus faible, remplacement des filtres moins courant).

La protection localisée par flux d'air dispose ainsi des qualités pour contribuer à l'usine du futur. Elle s'intègre dans la production de biens de façon économe, responsable et compétitive : gain d'énergie ; meilleure production sanitaire et réduction des TMS ; hausse de la valeur ajoutée par une production ultrapropre. On peut d'ailleurs noter que les performances globales en terme d'énergie et de protection peuvent être optimisées lorsque les solutions sont pensées conjointement dès la conception d'un atelier. Les fonctions d'usage des équipements peuvent être augmentées par l'ajout des éléments nécessaires à la mise en place de la protection localisée, et celle-ci offre alors une opportunité pour instrumenter, connecter et piloter de manière intelligente une ligne de production.

5. REFERENCES

- [1] Burfoot, Brown, Xu, Reavell & Hall (2000), Localised air delivery systems in the food industry. Trends in Food Science & Technology 11, 410-418
- [2] Carlier, Fiabane & Heitz (2018), Protection localisée par flux d'air. Techniques de l'ingénieur G1791
- [3] Vandriessche & Rignac (2016), Performance énergétique en ambiances propres. ASPEC Paris
- [4] Lee & Chu (2003), Turbulent Jets and Plumes: A Lagrangian Approach. Kluwer Dordrecht
- [5] Arroyo, Marchal & Heitz (1997), Protection localisée par flux d'air propre. L'exemple du Flux Progressif. In Symposium national Qualité de l'air dans l'industrie agro-alimentaire, Rennes, France
- [6] Heitz, Arroyo, Delville, Garem, Marchal & Bonnet (1997), Flux localisé d'air propre avec pénétration d'obstacles. Etude en soufflerie. In Symposium national Qualité de l'air dans l'industrie agro-alimentaire, Rennes, France