



1.2.4. La propreté microbiologique de l'air.....	p29
1.2.5. La pureté chimique.....	p31
<b>1.3</b> l'aérocontamination : un risque à mieux évaluer.....	p32
<b>2 Les techniques opérationnelles mises en place.....</b>	<b>p35</b>
2.1 A la base de la réflexion : le produit.....	p35
2.2 Solutions techniques et organisationnelles.....	p36
2.2.1. Les types de salles propres :.....	p36
2.2.2. Spécificités aérauliques de l'utilisation de l'air pour salle propre.....	p36
2.2.2.1 La salle propre en « écoulement turbulent ».....	p37
2.2.2.2 La salle propre en écoulement « laminaire ».....	p38
2.2.2.2.1 Le régime laminaire.....	p39
2.2.2.2.2 L'écoulement laminaire en salle propre.....	p41
2.2.2.2.3 Les propriétés utiles de l'écoulement laminaire.....	p41
2.2.2.2.3.1 La maîtrise des transferts.....	p41
2.2.2.2.3.2 La rencontre d'un obstacle.....	p42
2.2.2.2.3.3. La maîtrise des sources d'émission.....	p43
2.2.2.2.3.4. Les surpressions.....	p43
<b>3 Le traitement de l'air.....</b>	<b>p45</b>
3.1 Les unités de traitement :.....	p45
3.1.1 Les batteries chaudes et froides.....	p45
3.1.2 Les humidificateurs.....	p46
3.1.3 Le caisson de mélange.....	p46
3.1.4 La filtration de l'air.....	p46

3.1.4.1	Filtres de moyenne et haute efficacité.....	p46
3.1.4.2	Filtres de très haute efficacité.....	p48
3.1.5	L'épuration chimique.....	p50
<b>3.2</b>	<b>La distribution de l'air :</b> .....	<b>p50</b>
3.2.1	Le ventilateur.....	p50
3.2.2	Le réseau de gaines.....	p50
3.2.3	Les systèmes de soufflage et de reprise.....	p50
<b>3.3</b>	<b>Application à l'industrie agro-alimentaire.....</b>	<b>p51</b>
3.3.1	Généralités.....	p51
3.3.2	Textes en vigueur.....	p51
3.3.3	Applications.....	p52
3.3.4	Spécificités du domaine agroalimentaire.....	p53
3.3.4.1	Températures.....	p53
3.3.4.2	Humidité relative.....	p53
3.3.4.3	Lavages périodiques des locaux.....	p54
3.3.4.4	Givrage de l'installation de traitement d'air.....	p54
3.3.4.5	Matériels utilisés.....	p54
<b>4</b>	<b>Métrologie de la qualité de l'air.....</b>	<b>p57</b>
4.1	Généralités.....	p57
4.2	Connaissance de l'enceinte et des systèmes de ventilation.....	p58
4.3	Paramètres de construction.....	p59
4.3.1	Visualisation des régimes d'écoulement.....	p59

4.3.2 Etanchéité des gaines et des salles.....	p61
4.3.3 Recherche des fuites sur filtres ou sur caissons de filtres installés.....	p62
4.3.4 Essai de fuite confinement.....	p62
4.3.5 Niveau sonore.....	p63
<b>4.4 Paramètres de fonctionnement.....</b>	<b>p63</b>
4.4.1 Pressions différentielles.....	p63
4.4.2 La température.....	p64
4.4.3 L'humidité relative.....	p64
4.4.4 Les débits d'air.....	p64
4.4.4.1 Mesurage du débit passant dans une gaine.....	p65
4.4.4.2 Mesurage des débits soufflés par les bouches et diffuseurs plafonniers.....	p65
4.4.5 La carte des vitesses.....	p65
4.4.6 La qualité des « écoulements laminaires ».....	p66
4.4.7 Propriétés particulières de l'air.....	p66
4.4.7.1 Le mesurage des macroparticules.....	p67
4.4.7.2 Le mesurage des microparticules.....	p67
4.4.7.3 Le mesurage des particules ultrafines.....	p67
4.4.8 Propreté microbiologique de l'air.....	p68
<b>5 L'aérocontamination: une problématique incomplètement résolue .....</b>	<b>p71</b>
5.1 De nouvelles innovations pour compléter ces techniques.....	p71
5.2 Les verrous scientifiques et technologiques.....	p71
5.3 Capteurs à mettre en place pour obtenir des variables pertinentes.....	p72

5.4 Evolution des modèles numériques pour traiter les spécificités des industries alimentaires.....	p72
---	-----

<b>CONCLUSION</b> .....	p75
-------------------------	-----

**Annexes :**

<b><u>Annexe 0</u></b> : Listing des principaux textes normatifs homologués applicables en métrologie.....	p77
--	-----

<b><u>Annexe 1</u></b> : Listing des principaux textes normatifs en voie d'homologation, applicables en métrologie.....	p79
---	-----

<b><u>Annexe 2</u></b> : Liste des figures.....	p81
---	-----

<b><u>Annexe 3</u></b> : Liste des tableaux.....	p81
--	-----

<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	p83
----------------------------	-----



# INTRODUCTION

L'objectif principal de l'hygiène alimentaire est de garantir la salubrité et l'innocuité des produits alimentaires, ainsi que leur qualité organoleptique. Il consiste donc en la prévention et le contrôle des contaminations possibles tout au long de la chaîne alimentaire.

Les sources et les vecteurs de contamination sont nombreux. Les produits peuvent être eux-mêmes intrinsèquement contaminés, mais les sources de contamination les plus fréquemment rencontrées en industrie agro-alimentaire sont le personnel, le matériel et les surfaces. Aujourd'hui les pratiques hygiéniques, liées à une bonne connaissance de ces paramètres, permettent d'obtenir d'excellents résultats et d'optimiser les propriétés et les utilisations des produits.

Les exigences de qualité allant croissantes, les recherches en hygiène alimentaire se tournent vers des domaines encore insuffisamment explorés. C'est le cas de tous les paramètres d'ambiance, en particulier, de l'air des locaux de production. L'air qui alimente les locaux de travail est, généralement, un mélange d'air recyclé et d'air neuf.

Ce dernier est prélevé à l'extérieur et doit être conditionné pour satisfaire les besoins particuliers des salles propres.

Ce cas particulier qui nous occupe se distingue de la climatisation courante par des exigences plus strictes sur le niveau acceptable de ces paramètres et leur plage de variations tolérée.

Notre première partie s'intéressera donc à décrire les différents paramètres qui caractérisent l'air des salles propres.

Le deuxième chapitre s'intéresse à l'aérodynamique, c'est à dire à la science de la mécanique des fluides appliquée aux écoulements d'air. Dans cette partie, seules les bases théoriques seront développées.

Le troisième volet traite, quant à lui, des procédés d'ingénierie mis en place dans les industries, dans le but d'appliquer les théories exposées précédemment afin d'assurer la décontamination de l'air.

Les textes normatifs traitant de la métrologie constituent l'exposé du quatrième volet. Enfin, dans une dernière partie, nous analyserons les limites de ces différents procédés.





## 1. L'aérocontamination : un risque à évaluer

Conditionner l'air c'est ici, comme ailleurs, maîtriser les paramètres suivants : La température, l'humidité relative, les caractéristiques particulières, biologiques et chimiques, les mouvements de l'air.

### 1.1. Les grandeurs physiques essentielles qui caractérisent l'air :

**1.1.1 La température** (dite sèche) n'est autre que la température habituelle que l'on peut mesurer avec un thermomètre à alcool coloré, l'instrument étant maintenu à l'abri de toute source de rayonnement thermique. Elle s'exprime en degré Celsius.

**1.1.2. L'humidité** résulte du fait que dans la plage de 0° à 100° l'eau existe à l'état liquide et donc s'évapore. On définit l'humidité relative  $h = (p/p_s) \cdot 100$  (exprimée en %) (33).

On remarquera que, si on prend de l'air à température C et à humidité relative h et si on chauffe cet air, comme la pression  $p_s$  de saturation augmente, l'humidité relative h diminue. Ainsi, humidité relative et température de l'air conditionné sont étroitement liées. Par contre, on définit une quantité qui ne présente pas (à peu de chose près) cette variation avec la température et qui est le poids de la vapeur d'eau par kilogramme d'air sec : c'est l'humidité absolue donnée par (33)

$$r = 0,623 \cdot \left( \frac{p}{P_0 - p} \right)$$

\* $P_0$  est la pression du mélange gazeux (en Pa)

\*p est la pression partielle de la vapeur d'eau (en Pa)

Les relations quantitatives entre ces paramètres et leur comportement en fonction de la température sont données par les diagrammes de Mollier (25):

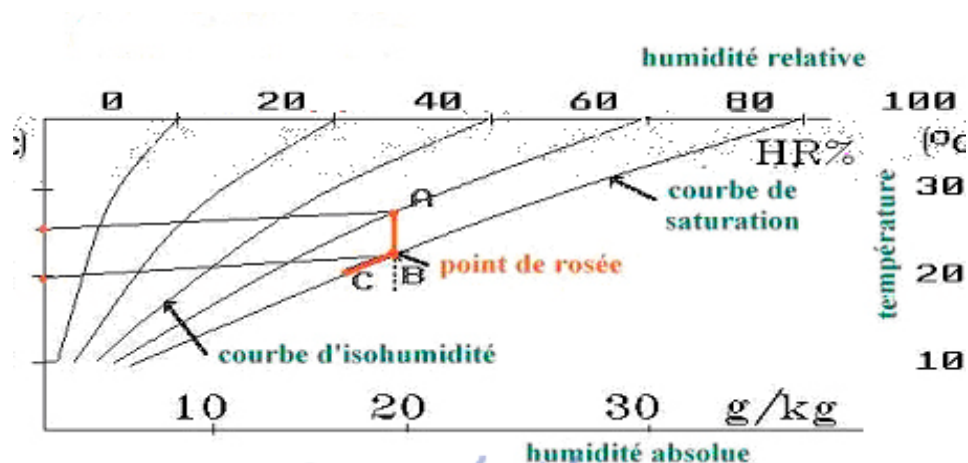


Figure 1 : diagramme de Mollier

**1.1.3. Les mouvements de l'air** sont caractérisés par la direction de la vitesse et le taux de turbulence en chaque point. Pour les écoulements auxquels on a affaire en salle propre, les définitions physiques de ces quantités sont un peu compliquées. Le taux de turbulence est un paramètre important pour au moins deux raisons :

- Il influence les sensations de confort du personnel. La norme ISO 7730 propose un modèle d'évaluation de la gêne par courant d'air. La proportion de la population exposée qui se plaint de ressentir un courant d'air (DR) est donnée par :

$$DR = (34 - t_a) (V - 0.05)^{0.62} (0.37 * V * Tu + 3.14)$$

Où :  $t_a$  est la température locale de l'air

$V$  la vitesse moyenne de l'air en m/s

$Tu$  le taux de turbulence

On voit ainsi que, pour une vitesse donnée, la sensation de courant d'air est une fonction croissante du taux de turbulence (26).

- Il caractérise les propriétés de maîtrise des sources d'émission par les écoulements unidirectionnels et définit ainsi ce que l'on nomme l'écoulement laminaire (22).

**1.1.4. La contamination particulaire** a été jusqu'à une date récente, le souci prédominant des salles propres. L'impact des poussières sur la production s'est d'abord manifestée pour des tailles supérieures à une dizaine de microns mais actuellement des particules plus fines sont devenues gênantes, en microélectronique par exemple,  $0.1\mu\text{m}$  est une taille que l'on surveille (41). C'est pourquoi quand on parle de contamination particulaire, on utilise un paramètre plus complexe qui est la distribution granulométrique de la population de particules en suspension. Toutefois, on en reste à une expression simple sous la forme de concentrations en particules de taille supérieure à des niveaux successivement croissants. (12)

**1.1.5. La contamination microbiologique** de l'air est due à la présence de micro-organismes (bactéries, virus, champignons, levures) qui sont capables de « vivre » en suspension dans l'atmosphère (du moins pendant un certain temps) (23). Le principal danger est lié à leur pouvoir de reproduction lorsqu'ils sont déposés sur un support. C'est pourquoi, on caractérise la contamination biologique de l'air par la concentration des micro-organismes en UFC (Unités Formant Colonies) lorsqu'elles sont déposées sur un milieu nutritif favorable (16). On accède ainsi aux risques présentés par les bactéries et les champignons mais la partie virale est hors d'atteinte dans le cadre des mesurages courants.

Après recueil, les micro-organismes sont cultivés sur un milieu adéquat de sorte que chacun donne lieu au développement d'une colonie, se traduisant généralement par une tache à la surface du milieu de culture. Il est possible de choisir ce dernier de sorte qu'une espèce ou un groupe pousse, à l'exclusion des autres. Par exemple, le Sabouraud sélectionne les champignons. Avec une certaine imprécision (on travaille sur le vivant), on peut ainsi accéder aux concentrations en UFC d'un micro-organisme déterminé.

**1.1.6. La contamination chimique** dite encore « moléculaire » de l'air est à l'ordre du jour dans quelques secteurs industriels dont la microélectronique. Dans l'air extérieur, on trouve la collection complète des corps de la classification de Mendeleïev, de nombreux composés minéraux et toute une population d'espèces organiques. Ce cocktail d'origine naturelle prépondérante, a été enrichi en concentration et en variété de corps chimiques par l'activité humaine. On les trouve à l'état de gaz (par exemple l'ammoniac), de vapeurs (par exemple les premiers termes de la série des alcools), sous la forme de gouttelettes (cas des hydrocarbures) ou encore adsorbés sur des particules minérales (hydrocarbures aromatiques polycycliques) (19). Leur concentration s'exprime de différentes façons, dont tout d'abord sous la forme de leur poids dans une unité de volume d'air ( $\mu\text{g} / \text{m}^3$  par exemple). Une autre façon de procéder est de ramener le poids du contaminant au poids du volume d'air dans lequel il se trouve, l'unité utilisée est alors le ppm (Part Per Million).

Mais lorsqu'il s'agit d'un gaz ou d'une vapeur, il est naturel d'exprimer sa concentration sous la forme du volume qu'il occupe dans le  $\text{m}^3$  d'air contaminé. Ainsi on définit le ppm Volume (ppmv).

Quand on connaît la concentration en volume et la nature chimique du corps en question, il est aisé de calculer sa concentration pondérale par la formule (4) :

$$A = (M * B) / 24.45$$

Où : A est la valeur de la concentration pondérale du contaminant exprimée en  $\text{mg}/\text{m}^3$

B est la valeur de la concentration du contaminant exprimée en ppmv

M est le poids moléculaire du contaminant exprimé en  $\text{Kg}/\text{Kmol}$

24.45 est la valeur du volume molaire à  $25^\circ\text{C}$  exprimée en  $\text{l}/\text{mol}$

## 1.2. Caractéristiques de l'air pour salles propres :

### 1.2.1. L'état de l'air extérieur :

En un lieu donné, la température et l'humidité relative de l'air sont variables. Ces variations ainsi que d'autres paramètres (pluviométrie, ensoleillement...) mènent à la définition de climat type. En France, on rencontre des « climats réguliers modérés », (la Pointe de Bretagne) et des climats tempérés (l'Île de France).

La composition moyenne de l'air extérieur, en phase gazeuse, est la suivante :

Gaz	Symbole	Pourcentage en volume
Azote	N <sub>2</sub>	78,3%
Oxygène	O <sub>2</sub>	20,99%
Argon	Ar	0,93%
Vapeur d'eau	H <sub>2</sub> O	0 à 4%
Anhydride carbonique	CO <sub>2</sub>	0,03%
Hydrogène	H <sub>2</sub>	0,01%
Gaz rares	Ar, Xe, Kr, Ne	0,0024%
Ozone	O <sub>3</sub>	0,00006%

Tableau 1 : Composition moyenne de l'air extérieur (28)

Cet air même conditionné en température et en hygrométrie ne permet pas d'alimenter une salle propre car il est chargé de trois types de polluant

- Particules inertes ;
- Biocontaminants (particules viables) ;
- Polluants chimiques.

L'air constitue un réservoir alimenté par trois sources : les particules et les biocontaminants arrachés au sol et à la végétation, les produits des réactions chimiques dans l'atmosphère, les polluants nombreux et variés produits par l'activité humaine.

Il est à noter qu'il n'existe aucune corrélation liant les concentrations des trois types de polluant présents dans l'air extérieur.

### 1.2.1.1. Particules inertes

Même si nous ne les visualisons pas à l'œil nu, l'air extérieur est chargé en particules inférieures à quelques dizaines de microns. Les plus fines, inférieures à 1  $\mu\text{m}$ , sont les plus nombreuses.

Le *diagramme de WHITBY* met en évidence cette distribution en nombre tout en indiquant la distribution en poids et en surface.

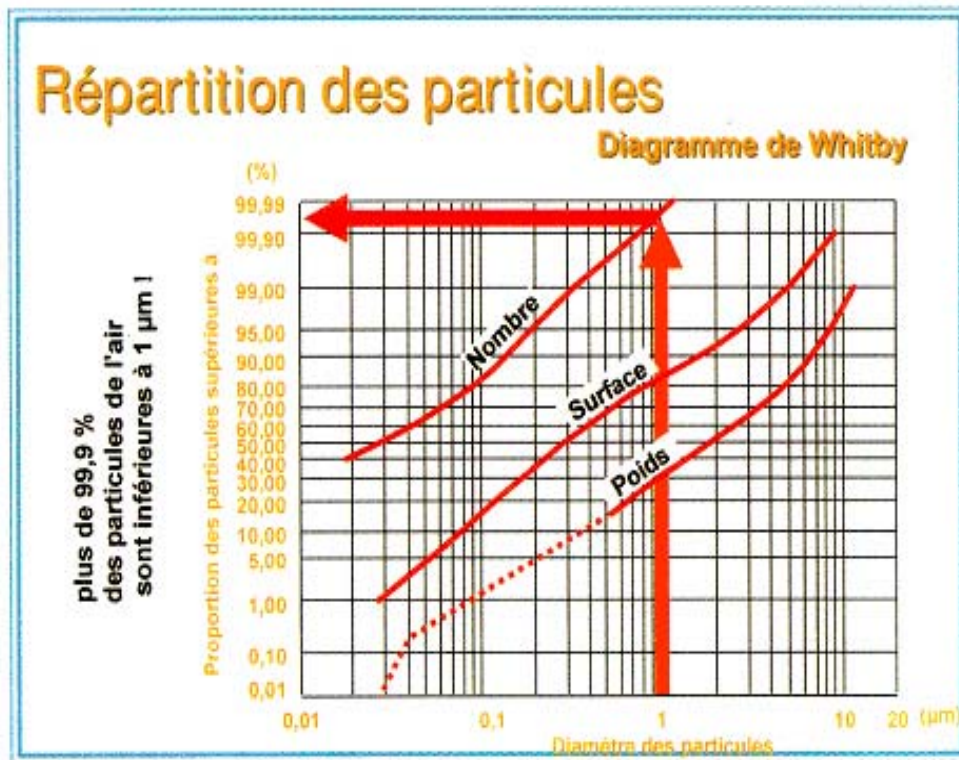


Figure 2 : diagramme de Whitby (43)

La fraction de particules de diamètre inférieur à 1 micromètre représente :

- 99,9% du nombre de particules ;
- 30% en poids de l'aérosol ;
- 85% en surface.

De ces différentes concentrations, il en résulte que l'aérosol atmosphérique est invisible à l'œil nu et qu'il est permanent dans l'atmosphère.

Une particularité importante de cet aérosol est la variabilité de sa concentration en nombre mais également en masse suivant les sites, les saisons, l'activité industrielle par exemple.

Ambiances extérieures	Ambiances intérieures	Nombre de particules par mètre cube d'air (diamètre $\geq 0,5$ mm)
Site industriel lourd		400 000 000
Centre urbain, forte activité		200 000 000
	Bureaux fumeurs	150 000 000
	Atelier de mécanique	100 000 000
	Bureaux	25 000 000
Petite ville, temps calme		20 000 000
Campagne, temps calme		10 000 000
	Salle propre	40 à 400 000

*Tableau 2 : Variabilité des concentrations particulières en nombre en fonction des milieux (19).*

### **1.2.1.2. Les Biocontaminants**

Pour qualifier la microflore de l'air, les adjectifs transitoire et accidentel sont les seuls appropriés. En effet, les micro-organismes retrouvés avec une grande fréquence sont de grande taille, n'utilisent l'air que comme vecteurs de dissémination et sédimentent ; ils sont donc transitoires. Quant aux autres germes dits accidentels comme les virus et des bactéries pathogènes, ils ont une durée de vie dans l'air très courte.

On distingue dans la flore microbienne de l'air deux types : d'une part une microflore prépondérante, rencontrée très fréquemment dans les prélèvements, composée surtout de champignons microscopiques, les moisissures, et de quelques bactéries qui sont des germes saprophytes de l'environnement et du système de ventilation, et d'autre part une microflore qualifiée d'accidentelle, d'origine humaine ou hydro tellurique, qui se surajoute à la première (23).

### 1.2.1.2.1. *Champignons microscopiques et bactéries des systèmes de ventilation*

Les micro-organismes qui contaminent sont principalement des moisissures et certaines bactéries classées dans le groupe des actinomycètes. Ces dernières ressemblent fortement aux moisissures surtout dans leur mode de croissance. Les actinomycètes ont en effet le même mode de développement mycélien mais ont été classés biologiquement comme bactéries. (37)

Les moisissures sont des Eucaryotes avec des noyaux typiques entourés d'une membrane et contenant des chromosomes. Ce caractère les différencie des bactéries qui sont des Procaryotes avec un chromosome libre à l'intérieur de la cellule. Elles sont hétérotrophes. Elles doivent donc puiser dans le milieu ambiant l'eau, les substances nutritives et les éléments minéraux nécessaires à la synthèse de leur propre matière. Toutes les moisissures sont saprophytes se développant sur et au détriment de matériaux inertes très variés ; elles peuvent donc très bien coloniser les filtres et gaines textiles des ventilations.(37)

Les principaux facteurs de développement des moisissures (37) sont :

*Les éléments nutritifs* : les plus importants sont le carbone et l'azote, utilisés sous forme de composés organiques, et des ions minéraux (potassium, phosphore, magnésium) en quantités très faibles.

*Les facteurs de l'environnement* : ils sont toujours beaucoup plus abondants que ne le nécessite le développement des moisissures, les facteurs physiques de l'environnement (humidité, température, oxygène) constituent un élément déterminant.

Parmi ceux-ci, le plus important est l'humidité. La quantité d'eau disponible dans le substrat et l'ambiance environnante est très importante. Il y a échange permanent entre l'environnement et le support jusqu'à atteindre un point d'équilibre à la surface de ce dernier où pourront se développer les moisissures (pour les aliments, cette valeur est définie comme l'activité de l'eau ou  $a_w$  : elle est approximativement inverse de l'humidité relative).

L'humidité relative minimale, pour que commencent à se développer certaines moisissures peu nombreuses, dites xérophiles, est de 65-70% (*Eurotium*, *Aspergillus* du groupe *glaucus*). Au fur et à mesure que l'humidité augmente, s'installent ensuite des moisissures différentes, de plus en plus nombreuses vers 80-90%. Ainsi selon l'espèce identifiée sur un substrat, on peut approximativement définir l'évolution de l'humidité relative de celui-ci. La seule façon d'éviter le développement de contaminants fongiques est donc de bien maintenir une hygrométrie faible dans l'environnement (37).

Le deuxième facteur est la température. La plupart des champignons sont mésophiles, c'est-à-dire qu'ils se développent

autour de 20-25° C, température moyenne habituelle des aires de stockage non climatisées sous les latitudes européennes. Cependant, il peut y avoir des particularités; c'est ainsi que l'on définit des températures cardinales qui sont les températures minimales, optimales et maximales de croissance.

<b>MESOPHILES</b>	
Maximum	< 50° C
Minimum	> 0° C
Optimum	15-30° C
<b>THERMOPHILES</b>	
Maximum	50° C
Minimum	20° C
Optimum	35-40° C
<b>THERMOTOLERANTS</b>	
Maximum	50° C
Minimum	0° C
Optimum	15-40° C
<b>PSYCHROPHILES</b>	
Maximum	20° C
Minimum	< 0° C
Optimum	0-17° C

Tableau 3 : Exigences thermiques pour le développement de moisissures.  
(37)

Quant au rôle de l'oxygène, les champignons sont des organismes aérobies. Cependant certains tolèrent des quantités relativement faibles d'oxygène et peuvent même se développer en anaérobiose avec production d'éthanol et de diacides organiques. Le métabolisme des champignons peut être modifié selon la teneur en oxygène environnemental ; par exemple, la production de mycotoxines (patuline et acide pénicillinique) décroît considérablement en conditions d'oxygénation faible. (39)

Les champignons sont peu sensibles au pH du milieu. Ils se développent entre 4,5 et 8 avec un optimum entre 5,5 et 7,5. Certaines espèces (*Aspergillus niger*) peuvent se développer jusqu'à 1,7 à 2. Cette faculté de se développer en milieu acide permet de les séparer des bactéries pour l'isolement.

Les moisissures se multiplient par la production de spores, minuscules particules vivantes (3-5 µm pour la plupart) d'origine sexuée et/ou asexuée. Ce sont des cellules déshydratées, entourées de parois protectrices qui les isolent du milieu ambiant. Elles sont produites en très grand nombre. Par exemple, un sporophore de *Serpula lacrymans* (plus connue sous le nom de mэрule) peut produire en moyenne 3000 spores par mm<sup>2</sup> et *Puccinia graminis*, champignon parasite des



graminées, produit  $2,5 \times 10^7$  spores par  $m^2$  (23). Elles peuvent survivre très longtemps, plusieurs mois à plusieurs années. C'est sous cette forme qu'elles sont dispersées puis se déposent sur des supports nouveaux. Lorsque les conditions environnementales deviennent favorables (augmentation de l'humidité principalement), elles germent et donnent un mycélium qui reformera, à son tour, des spores. Certaines nécessitent un stimulus, généralement thermique, pour germer (31).

Les spores sont donc formées en grand nombre par le mycélium. L'ambiance extérieure comme celle des locaux d'habitation contient toujours des spores en suspension, en quantité plus ou moins grande selon la saison. Les principales espèces rencontrées dans l'ambiance appartiennent aux genres *Penicillium*, *Aspergillus* et *Cladosporium*.

Espèces identifiées	Atmosphère	Papiers	Peintures	Bois
<i>Aspergillus niger</i>	*	*		
<i>A. penicillioides</i>	*	*	*	*
<i>A. versicolor</i>	*			
<i>Penicillium aurantiogriseum</i>	***	*		
<i>P. brevicompactum</i>	*	*		*
<i>P. chrysogenum</i>	***	*		
<i>P. citrinum</i>	*			
<i>P. corylophilum</i>	*			
<i>P. expansum</i>	*	*		
<i>P. glabrum</i>	***			
<i>P. spinulosum</i>	*		*	
<i>P. viridicatum</i>	*	*		
<i>Alternaria tenuissima</i>	*			
<i>Cladosporium herbarum</i>	*			
<i>Cladosporium cladosporioides</i>	*			
<i>Mucor racemosus</i>	*			
<i>Trichoderma harzianum</i>	*			
<i>Acremonium strictum</i>				
<i>Chaetomium globosum</i>		*		
<i>Doratomyces</i> sp				
<i>Fusarium</i> sp				
<i>Humicola fuscoatra</i>				

(\* = présence, \*\*\* : forte présence)

Tableau 4 : Différents contaminants rencontrés dans l'atmosphère et sur les supports d'une réserve. (37)

Le mode de dispersion et de transfert des spores n'est pas le même pour toutes les espèces. Certaines spores, appelées gloeiospores, ont une paroi épaisse de consistance humide et restent collées entre elles par un mucus (*Acremonium sp*, *Exophiala sp.*) ; de ce fait, elles forment des amas plus lourds difficilement transportables par l'air. Elles sont véhiculées sur des substrats par contact, par des insectes, par l'eau, rarement par l'air (*Acremonium sp.*, *Exophiala sp.*, *Chaetomium sp.*). (24) D'autres espèces ont des spores à parois sèches (xérospores), facilement dissociables et légères. Elles peuvent être en suspension dans l'air et aisément dispersées par les courants d'air. C'est le cas des *Penicillium* et *Cladosporium* que l'on trouve en grand nombre dans l'environnement.

Lorsque cessent les mouvements d'air, les spores de l'atmosphère sédimentent à une vitesse qui dépend de leur forme, de leur ornementation, de leur taille, mais aussi du degré d'hygrométrie et de l'intensité des mouvements de l'air (1). En atmosphère calme, la décantation est très rapide, environ 35 minutes pour atteindre le niveau zéro (figure 2).

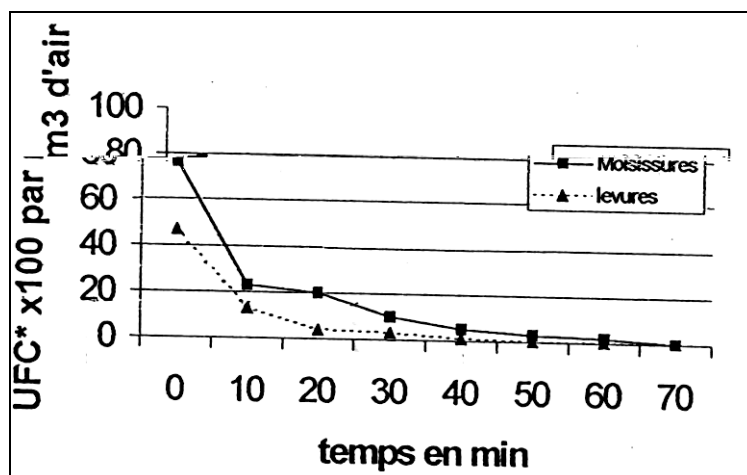


Figure 3 : Diminution du nombre de spores dispersées dans l'atmosphère en fonction du temps (isolement sur milieu DG18)  
(20)

Des prélèvements d'air effectués à 3 niveaux (0,5, 1,5 et 2m du sol) en 20 points d'une réserve de bibliothèque montrent qu'effectivement la densité la plus forte se trouve, d'une façon générale, au niveau inférieur (0,5m) et la plus faible au niveau supérieur (2m) (37). Cette observation confirme que les spores de l'atmosphère, dans une pièce calme, ont tendance à descendre verticalement et à se déposer sur les surfaces qu'elles rencontrent. Elles y constituent un inoculum important que ne détectent pas toujours les analyses d'air, mais qui est susceptible d'entrer en croissance si les facteurs environnementaux le permettent (37).

Les moisissures sont agressives et dégradantes sous leur forme mycélienne, c'est-à-dire lorsqu'elles se développent parce que les

conditions environnementales sont favorables. Sous la forme de spores, elles peuvent se disperser très largement et contaminer, mais elles sont inertes aussi longtemps que l'environnement ne permet pas leur germination.

Il y a donc lieu de bien séparer les phénomènes de contamination par des spores, qui ne causent pas de dégâts immédiats mais constituent un grand danger potentiel, de la dégradation, qui est la phase active due à du mycélium en expansion. En effet, nous avons vu que les moisissures doivent puiser dans le substrat les nutriments nécessaires à leur développement. Pour accomplir cette tâche, elles transforment, pré digèrent les aliments complexes qui les entourent, en éléments plus simples, assimilables et transférables à travers leur paroi. Cette digestion s'effectue par production et émission d'enzymes (cellulases, ligninases, pectinases, etc.) ou d'acides. Ce mécanisme de digestion, bénéfique pour la cellule fongique est néfaste pour un aliment qui devient avarié ou chargé en toxines (39). Sans atteindre un niveau de dégradation profonde qui nécessite un long temps de croissance, le simple développement de petites colonies superficielles peut causer une altération.

#### 1.2.1.2.2. Les Bactéries

Les bactéries sont des êtres unicellulaires procaryotes d'environ 1µm de diamètre. Elles possèdent une membrane cellulaire, de l'ADN et des composants subcellulaires. Elles peuvent indifféremment contaminer l'air extérieur ou intérieur. En fait, l'être humain est colonisé dès les premiers mois de sa vie par un nombre varié de bactéries avec lesquelles il entretient une relation commensale et symbiotique pour le reste de sa vie. Ainsi la plupart des bactéries sont inoffensives, voire nécessaires. Cependant, certaines peuvent provoquer des maladies mortelles. Ce n'est qu'en 1942 que Neal et coll. ont attribué pour la première fois aux bactéries, des Gram (-), présentes dans l'air une responsabilité dans l'apparition de troubles respiratoires chroniques (asthme, rhinite...) (13).

C'est l'exemple classique de *Legionella pneumophila* qui normalement colonise les environnements aquatiques et chauds, mais qui une fois portée par l'air des systèmes de ventilation peut devenir un pathogène respiratoire à l'origine d'une pneumonie mortelle dans 15 % des cas.

On distingue deux tableaux cliniques : la maladie des légionnaires et la fièvre de Pontiac. Ces deux affections sont initialement caractérisées par une asthénie, une fièvre élevée (40° C), des myalgies et des céphalées (17) :

- La maladie des légionnaires : on observe habituellement une toux initiale non productive, puis ramenant une expectoration mucoïde, parfois hémoptoïque .

L'infection peut entraîner une insuffisance respiratoire. La létalité peut atteindre 40% chez les malades hospitalisés, et plus chez les immunodéprimés.

- La fièvre de Pontiac : elle a une allure de syndrome grippal, ne s'accompagne pas de pneumonie et ne met pas le pronostic vital en jeu. La guérison est habituellement spontanée en 2 à 5 jours.

En raison du caractère bénin de la fièvre de Pontiac et la rareté de son diagnostic c'est surtout la maladie des légionnaires qui par sa pathogénicité en fait une bactérie particulièrement redoutée dans les phénomènes d'aérocontamination.

*Legionella* est un bacille Gram (-) de 0.3 à 0.9 µm de large sur 2 à 20 µm de long formant une famille de 46 espèces et 64 sérogroupes. D'origine hydrotellurique, il est présent à l'état naturel dans les eaux douces. *L. pneumophila* séro groupe 1 est responsable de 80% des cas de pathologie humaine. A partir du milieu naturel, la bactérie colonise les sites artificiels lorsque les conditions de son développement sont réunies à savoir (17) :

- Température entre 10 et 50°C avec une valeur optimale à 36°C ;
- Présence d'eau stagnante ;
- Présence d'un biofilm ce qui explique que les réseaux de canalisations anciennes soit un facteur de risque prédisposant ;
- Présence d'autres micro-organismes eucaryotes des milieux aquatiques comme les amibes (*Didasculus sp.*, *Harmanella sp.*, *Mayorella sp.*, ...) ou de protozoaires ciliés du genre *tetrahymena*.

Les légionnelles peuvent être libre mais le plus souvent elles parasitent des cellules hôtes comme les protozoaires ce qui leur confère une plus grande résistance face à des conditions d' environnement défavorables (acidité, pression osmotique, désinfectants).Elles peuvent être véhiculées par des kystes d'amibes libres.

La contamination par *Legionella* se fait essentiellement par inhalation d'eau contaminée diffusée en aérosol. Ces aérosols atteignent les alvéoles pulmonaires ; les légionelles infestent les macrophages pénètrent dans le phagosome et s' y multiplient entraînant la destruction des macrophages. La durée d'incubation varie de 2 à 10 jours. Le patient présente alors de la fièvre, une toux incoercible, une pneumonie compliquée d'abcès multifocaux (17).

Au vu des caractéristiques biochimiques de *Legionella* et de ses spécificités d'habitat on comprend l'importance de l'éradication de cette bactérie dans les systèmes de ventilation et de climatisation dans lesquels on retrouve systématiquement de l'eau stagnante

(humidificateur, tours aéroréfrigérantes,...) et qui génère de la vapeur et de la condensation.

Depuis 1987 cette maladie est devenue   déclaration obligatoire.

La présence de bactéries dans l'air n'a été réellement étudiée que depuis une dizaine d'années avec l'émergence aux Etats-Unis et dans d'autres pays occidentaux d'un syndrome respiratoire lié à la généralisation de systèmes de ventilation et climatisation des bâtiments. Les cas annuels de victimes de ce syndrome qui revêt toutes les pathologies respiratoires sont estimés à 10 ou 25 millions aux U.S.A (5). Le rôle pathogène des bactéries de l'air est encore mal connu mais il est généralement admis que les micro-organismes sont impliqués. L' tat actuel des connaissances sur la présence de bactérie dans l'air est donc le fait de pneumologues et allergologues qui ont mis en évidence un lien épidémiologique entre l'augmentation des cas d'atteinte du tractus respiratoire et la généralisation de systèmes de ventilation et de recyclage d'air.

### **1.2.1.3. Pollution chimique de l'air extérieur**

A l'état « naturel », l'air extérieur contient une variété de molécules organiques produites par l'activité biologique de l'océan ou la végétation : ainsi les terpènes issus des forêts. Mais cette composante organique de l'air s'est beaucoup enrichie ces dernières années ; des sources bien connues étant l'activité industrielle ou agricole et la circulation automobile.

L'élimination de ces composés indésirables est plus ou moins rapide et certains d'entre eux représentent un risque pour la santé des populations soit à cause de l'augmentation de leur concentration, soit par leur toxicité spécifique.

La maîtrise de cette situation relève des compétences européennes et tous les citoyens ont appris à connaître ceux déjà encadrés : « fumées noires », ozone, oxydes d'azote, anhydride sulfureux, plomb.

D'autres sont en cours de fixation de valeurs limites : benzène, monoxyde de carbone, hydrocarbures aromatiques polycycliques, composés de cadmium, d'arsenic, de nickel et du mercure.

Cette liste donne déjà une bonne idée de ce que l'on peut trouver dans l'air extérieur et l'on peut la compléter avec les corps dont, pour le moment, on se contente de recommander le mesurage : dioxyde de carbone, toluène, styrène, acrylonitrile, formaldéhyde, trichloro et tétrachloroéthylène, chlorure de vinyle, butadiène 1-3, COV etc. En tout, 22 espèces chimiques dans la directive européenne 97/101.

Malgré les efforts de réduction entrepris, la tendance générale est à l'accroissement de ces polluants anthropiques. Ils menacent déjà la santé publique, l'environnement et commencent à inquiéter les

productions en salles propres, du moins en microélectronique. C'est le cas de ceux à fonction acide ou basique et des COV (Composés Organiques Volatils) (34).

Produire propre dans un univers extérieur contaminé reste un enjeu technologique dont la maîtrise du traitement de l'air est une partie essentielle.

### **1.2.2. Température, humidité relative et mouvements d'air**

La température de l'homme doit rester entre des limites étroites. Lorsqu'il est placé dans des ambiances trop chaudes ou trop froides, l'organisme réagit pour maintenir cette température, mais cela s'accompagne (du moins initialement) d'une sensation d'inconfort.

L'habillement adapté permet de mieux maîtriser cette réaction. L'adaptation se fait par des échanges thermiques qui utilisent quatre voies essentielles pour évacuer la chaleur produite par l'organisme : conduction, convection, rayonnement, évaporation.

On conçoit alors que ces échanges dépendent : de l'activité de l'individu, de sa vêtue, de la température et de l'humidité relative de l'air, de la température des parois, de la vitesse de l'air et de son état de turbulence. On conçoit qu'une relation aussi multiparamétrique est compliquée.

Elle a été étudiée expérimentalement pour des groupes de personnes en bonne santé, placées dans des ambiances modérées. Il en a résulté la norme ISO 7730 (X35-203).

L'ambiance de confort est définie par toute combinaison des paramètres ci-dessus qui donne une ambiance dont 95% des personnes sont satisfaites et 85% d'entre elles ne sont pas incommodées par des sensations de courants d'air.

À condition d'être normalement vêtu, des conditions de confort dans la plupart de nos salles propres sont obtenues avec une température moyenne se situant entre 18 et 24°C et une humidité relative dans une fourchette de 40 à 70% (norme ISO 7730).

Mais il y a un paramètre qui, dans notre cas, revêt une importance particulière, c'est le taux de turbulence. En effet, pour combattre les sources internes ou pour maîtriser les phénomènes de transfert des contaminants, on est amené à faire passer de grandes quantités d'air dans nos enceintes. Il en résulte le risque de vitesses locales élevées avec de forts taux de turbulence. De ce point de vue, l'écoulement unidirectionnel est un système idéal qui permet des vitesses élevées (0,5 m/s) associées à des taux de turbulence faibles : c'est pourquoi, quand on est placé dans ce type d'écoulement, on ne sent aucun courant d'air. En salle propre, on constate donc que le confort du

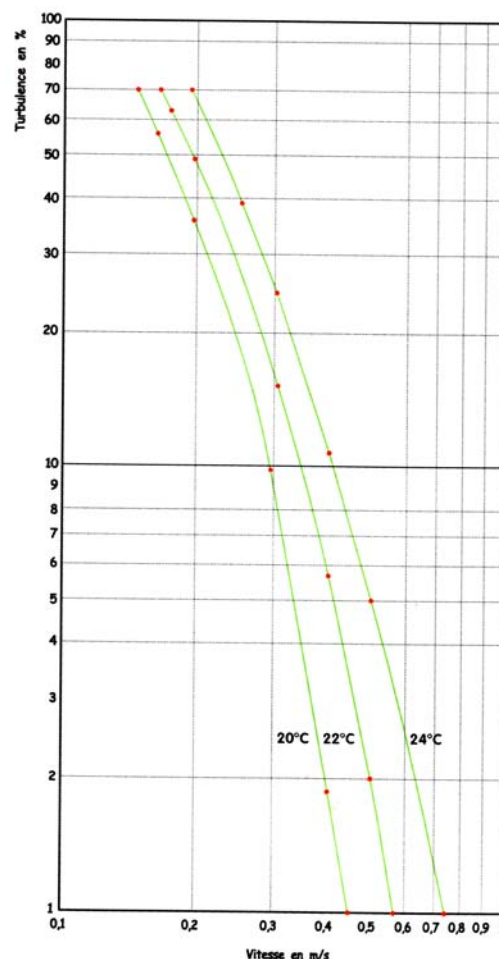
personnel est obtenu pour une température de 22°C, avec une vitesse d'air de 0,5 m/s et un taux de turbulence faible de 2%, si on admet 25% de personnes mécontentes (ISO 7730).

L'équation, citée au paragraphe 1.1.3 définissant DR (proportion de la population exposée qui se plaint de ressentir un courant d'air), nous permet alors de fixer les conditions ( $t_a$ ,  $V$ ,  $T_u$ ) que l'on ne doit pas dépasser si on veut conserver le confort du personnel : l'application se trouve principalement en salle à écoulement turbulent et dans les écoulements unidirectionnels qui ne sont pas « laminaires ».

Toutefois, cette équation vise surtout des personnels de bureau et, en salle propre, les opérateurs sont dans des conditions où la sensation de courant d'air apparaît dans des conditions de vitesse et de turbulence qui donneraient plus d'insatisfaits dans les bureaux. On l'a donc exploité, à titre d'illustration pour un « DR » fixé à 25%.

La figure 3 donne, pour 3 températures, les zones de combinaisons  $V$ ,  $T_u$  acceptables (sous les courbes limites).

Figure 4 : Turbulence acceptable en fonction de la vitesse de l'air selon la norme ISO 7730.



On remarquera la diminution rapide des vitesses maximales avec l'augmentation du taux de turbulence dans les zones 0 à 10%.

Dans toute la mesure du possible, le traitement de l'air doit contribuer au confort du personnel, mais il arrive que pour des raisons techniques, voire réglementaires, on doive réaliser des ambiances qui, à la limite, impose le port d'équipements de protection individuelle (exemple des basses températures).

Des exemples sont : en agroalimentaire les locaux de découpe et de salaison qui doivent être maintenus à une température ne dépassant pas 12°C (21).

En pharmacie, la manipulation des poudres sèches peut réclamer des ambiances à humidité relative inférieure à 20% (10).

### 1.2.3. La propreté particulière

Dès que l'on a su filtrer les particules microniques avec une efficacité raisonnable et qu'on a été capable de mesurer leur concentration dans l'air, on a cherché à définir des classes de propreté de l'air.

Dès 1963, à partir d'études menées par « l'US Air Force », les américains publient la « Federal Standard 209 » (18).

Deux tailles sont prises en compte =  $0,5\mu\text{m}$  ;  $5\mu\text{m}$ . Sur ces deux niveaux granulométriques, on définit 3 classes de propreté à partir des concentrations par pied cube :

- Classe 100 (100 particules  $\geq 0,5\mu\text{m}$  par pied cube),
- Classe 10000 (10000 particules  $\geq 0,5\mu\text{m}$  par pied cube),
- Classe 100000 (100000 particules  $\geq 0,5\mu\text{m}$  par pied cube),

Mais, dès cette époque, une hypothèse sous-jacente est que la distribution granulométrique de référence (bien entendu elle ne correspond qu'exceptionnellement à ce que l'on peut trouver sur le terrain) est une fonction puissance soit  $c = Kd$ , avec  $d$ , diamètre particulaire,  $c$ , concentration des particules de taille supérieure ou égale à  $d$  et  $k$  une constante expérimentale.

Au fur et à mesure que les technologies progressent et que l'usage des salles propres s'impose à toutes les industries, on prend en compte des niveaux granulométriques plus petits et des concentrations de plus en plus faibles. Ainsi le Federal standard 209 va connaître des versions successives jusqu'à la version 209 E. Il y avait cependant un problème récurrent parce que l'unité choisie était la concentration par pied cube. Le CEN (Centre Européen de Normalisation) bientôt suivi par l'ISO (International Standard Organisation) prend en main l'élaboration d'une norme internationale l'ISO 14 644-1 (X 44-101) qui remplace les normes existantes et s'impose à tous depuis l'année 1999.

Cette norme repose sur l'hypothèse que la distribution granulométrique de référence est donnée par :



$$C = 10^N [0,1 / d]^{2,08} \quad \text{avec } d \geq 0,1\mu\text{m}$$

ISO 14 644-1

- \* d est le diamètre particulaire en  $\mu\text{m}$
- \* C est la concentration en nombre par  $\text{m}^3$  d'air
- \* N est un paramètre compris entre 1 et 9

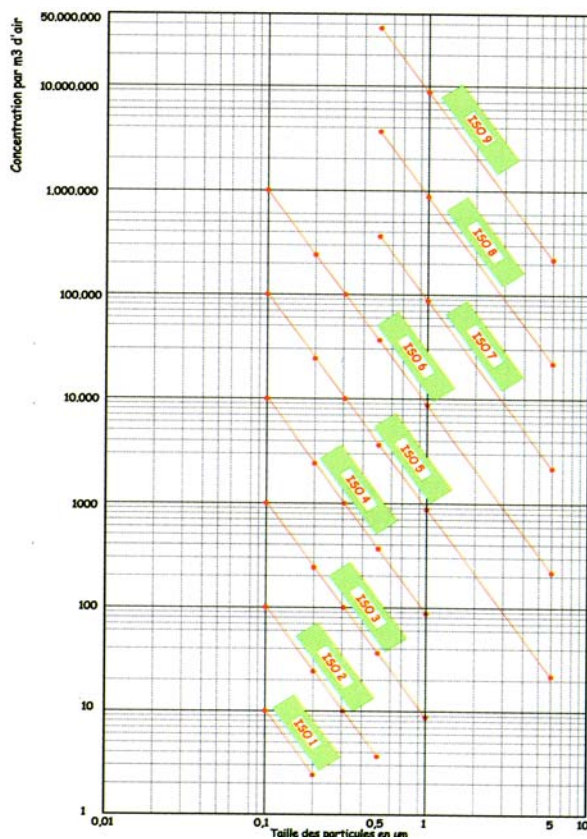


Figure 5 : Classes d'empoussièrément  
norme NF  
EN ISO 14 644-1

On voit que les fonctions  $C = F(d)$ , reportées sur du papier bilogarithmique, sont des droites parallèles de « pente » N. La figure ci-contre montre un tel réseau. La valeur de N peut être choisie entre 1 et 9 ; cependant la norme propose d'utiliser couramment des valeurs entières de N. Ainsi apparaissent, suivant la valeur N, les classes ISO 1 à 9.

Le graphique peut être utilisé pour une classification rapide à partir des résultats de mesurage. On peut reporter les concentrations mesurées en fonction des diamètres.

La « courbe » ainsi obtenue est rarement une droite, mais la classe est donnée par la première droite du réseau qui est au-dessus de tous les points expérimentaux.

Mais la classification à partir des résultats expérimentaux peut être une opération compliquée et on doit alors travailler sur des valeurs numériques. D'où le tableau suivant que propose la norme.

N° de la classification  ISO	Concentrations maximales admissibles (particules/m <sup>3</sup> d'air) en particules de taille égale ou supérieure à celle donnée ci-dessous					
	0,1 µm	0,2 µm	0,3 µm	0,5 µm	1 µm	5 µm
Classe ISO 1	10	2				
Classe ISO 2	100	24	10	4		
Classe ISO 3	1 000	237	102	35	8	
Classe ISO 4	10 000	2 370	10 200	3 520	832	29
Classe ISO 5	100 000	23 700	102 000	35 200	8 320	293
Classe ISO 6	1 000 000	237 000	102 000	35 200	8 320	293
Classe ISO 7				352 000	83 200	2 930
Classe ISO 8				3 520 000	832 000	29 300
Classe ISO 9				35 200 000	8 320 000	293 000

*Tableau 5 : Classes types de propreté particulaire de l'air des salles et zones propres*

Les valeurs du tableau sont reportées dans d'autres textes normatifs ou réglementaires. Ainsi les BPF (Bonnes Pratiques de Fabrication) européennes concernant la fabrication des produits stériles utilisent les classes ISO 5, 7 et 8.

La norme AFNOR NF S 90 351, dans sa prochaine version, mentionnera les classes ISO 5, 7 et 8.

*Nota : pendant des années, la référence a été le Fédéral Standard 209. Les classes étaient mémotechniquement commodes (ordonnées à l'origine) et on trouve dans les textes (et les habitudes) antérieurs les classes 10, 100, etc....*

Il n'y a pas une équivalence rigoureuse entre ces classes et celles de l'ISO car la loi de distribution granulométrique est légèrement différente :

$$C = \left[ N_c * \frac{0,5}{d} \right]^{2,2} \quad \text{FS 209}$$

\* d est le diamètre particulaire en µm

\* C est la concentration en nombre par m<sup>3</sup> d'air

\* N est un paramètre compris entre 1 et 9

Cependant, dans la plupart des cas et compte tenu de l'incertitude sur les mesurages, on pourra passer de l'une à l'autre classification de la façon simple suivante :

ISO vers Federal Standard :

ISO N → 10<sup>N</sup> → 10<sup>N-3</sup> → Fed 1<sup>N-3 zéro</sup> .....

ISO 6 → 10<sup>6</sup> → 10<sup>6-3</sup> → classe 1000

Federal Standard vers ISO ; l'inverse, exemple :

Classe 10.000 → 10<sup>4</sup> → 10<sup>4+3</sup> = 10<sup>7</sup> → ISO 7.

#### 1.2.4. La propreté microbiologique de l'air

À ce jour, les textes de référence disponibles concernent les Etablissements de Santé et l'industrie pharmaceutique, pour la ligne directrice particulière : Fabrication de médicaments stériles.

*L'édition 98/05 bis du Bulletin Officiel des Bonnes Pratiques de Production et de Fabrication Pharmaceutiques* propose quatre classes de propreté bactériologique, accompagnées de classes de propreté particulière. Il est important de préciser que les différents niveaux de propreté bactériologique s'imposent pour des prélèvements réalisés dans des salles propres en activité.

Il convient de rappeler que la surveillance microbiologique de l'air, par prélèvement actif (aspiration d'air par un bio collecteur) et/ou passif (sédimentation sur boîte de Pétri), est généralement associée à des contrôles de surface (par géloses de contact). Dans le cadre des contrôles microbiologiques de routine, les recherches portent sur l'analyse quantitative de la flore aérobie mésophile totale.

Classe	Echantillon d'air en UFC/m <sup>3</sup>	Boîtes de Pétri (diamètre 90mm) en UFC / 4heures	Géloses de contact (diamètre : 55mm) en UFC / plaque	Empreintes de gant (5 doigts) en UFC / gant
<b>A</b>	< 1	< 1	< 1	< 1
<b>B</b>	10	5	5	5
<b>C</b>	100	50	25	/
<b>D</b>	200	100	50	/

Tableau 6 : Valeurs limites recommandées de contamination microbiologique.

Pour les établissements de santé, les niveaux de propreté bactériologique sont définis dans la norme AFNOR NF 90 351 et dans un guide technique ASPEC (Association pour la Prévention et l'Etude de la Contamination) « *Contrôles de l'environnement dans les zones à hauts et très hauts risques infectieux édition 1999* ».

La norme AFNOR définit 3 classes de propreté microbiologique, à réception d'une nouvelle installation.

Classe bactériologique	Concentration maximale en nombre de particules viables par mètre cube d'air
<b>B 100</b>	100
<b>B 10</b>	10
<b>B</b>	1

Tableau 7 : Classes de propreté bactériologique définies dans NF S 90 351

Le guide ASPEC propose une autre classification de la propreté microbiologique de l'air, qui distingue plusieurs paramètres :

- Niveau de risque de la zone : hauts risques infectieux et très hauts risques infectieux ;
- Activité / non activité de la zone ;
- Bactéries / moisissures ;
- 3 niveaux : niveau cible, niveau d'alerte, niveau d'action.

	Zones à hauts risques infectieux		Zones à très hauts risques infectieux	
	Bactéries en UFC / m <sup>3</sup>	Moisissures en UFC / m <sup>3</sup>	Bactéries en UFC / m <sup>3</sup>	Moisissures en UFC / m <sup>3</sup>
<b>Niveau d'action</b>	500	1	10	1
<b>Niveau d'alerte</b>	100	1	5	1
<b>Niveau cible :</b>				
• hors activité	10	< 1	1	< 1
• en activité	100	< 1	10	< 1

Tableau 8 : Recommandations ASPEC de surveillance microbiologique de l'air dans les établissements de santé.

Les autres industries telles que l'industrie agroalimentaire, l'industrie cosmétique sont également confrontées à la maîtrise des contaminants microbiologiques.

Ne disposant pas de textes spécifiques les concernant, ces industries mettent en place des démarches HACCP (Hazard Analysis Critical Control Point) qui leur permettent de définir leurs propres niveaux cibles ainsi que la fréquence optimale des contrôles microbiologiques.

### 1.2.5. La pureté chimique

Le problème de la contamination chimique des fabrications est connu depuis longtemps lorsque l'on travaille en milieu aqueux ou en milieu solvant.

Pour le maîtriser, on a développé des spécifications de pureté des liquides qui placent au-delà de la qualité analytique à laquelle on était habitué.

Plus récemment, l'air est apparu comme un vecteur de « contamination moléculaire ».

En effet, l'air extérieur étant chargé (naturellement ou par pollution) de nombreux composés chimiques, des risques d'attaque physico-chimique peuvent concerner les fabrications exposées.

Actuellement, c'est l'expérience industrielle qui, petit à petit, met en évidence les espèces contaminantes et évalue les concentrations résiduelles acceptables en salle propre.

Ainsi la définition de l'air pur sera, à terme, plus compliquée que celle de l'air propre pour lequel la classification ISO s'applique à tous les secteurs industriels.

Il est vraisemblable que l'on arrivera à une définition par type de production avec des espèces chimiques prises en compte individuellement ou par fonction chimique.

Le standard SEMI F 21-95 publié en 1995 illustre bien cette dernière tendance dans le cas de la microélectronique (14).

Les classes de contaminants « moléculaires » sont au nombre de quatre : les acides, les bases, les condensables et les dopants avec les définitions suivantes :

- Acide : produit corrosif dont les réactions chimiques sont celles d'un accepteur d'électrons ;
- Base : produit corrosif dont les réactions chimiques sont celles d'un donneur d'électrons ;
- Condensable : une substance dont le point d'ébullition est supérieur à la température de la salle à la pression atmosphérique (exemple : les silicones, les hydrocarbures, etc....) ;
- Dopant : élément chimique qui modifie les propriétés électriques d'un matériau semi-conducteur (exemple l'arsenic ou le bore).

Le standard SEMI définit les classes en affectant la même valeur limite à ces quatre contaminants. La plus pure est celle où l'on ne dépasse par 1 ppt et l'on ne peut aller au-delà de 10 000 ppt.

### **1.3. L'aérocontamination : un risque qui doit être mieux évalué**

Le risque de biocontamination aéroportée est difficile à quantifier en tant que tel. Volatil et instable par définition, il échappe plus facilement au contrôle que le risque de transmission de contaminants par les instruments ou les surfaces. Pourtant, il est évident que dans le contexte particulier des ateliers de transformation et de conditionnement de l'alimentaire, la présence de sources internes de contamination et les paramètres physiques de l'air ambiant font que la transmission des micro-organismes par les particules constitue un des modes de contamination ou de recontamination des produits alimentaires.

Pour évaluer de risque, on dispose de moyens assez indirects, basés sur les mesures de concentration en particules dans l'air avec une possibilité, grâce aux bio collecteurs, de quantifier en moyenne la présence de germes aéroportés dans un atelier.

Des progrès importants peuvent encore être réalisés dans l'analyse des

modes de transmission de la contamination par l'air. Pour cela, il faut mieux connaître :

- Les mécanismes du passage vers l'air d'une contamination, à partir des différents types de sources, personnes, surfaces ou opérations générant des particules ;
- Les modes de transport et de maintien en suspension des particules contaminantes, en fonction de leurs caractéristiques physiques et en relation avec les paramètres aérodynamiques de l'air en mouvement dans l'atelier ;
- La viabilité des micro-organismes contaminants en situation d'aérosol ;
- Les risques de dépôt et d'attachement des particules sur les produits sensibles ou les surfaces entrant en contact avec eux.

Pour avancer dans cette connaissance, il faut combiner les mesures sur sites industriels avec les essais en condition maîtrisée, dans les laboratoires et sur des sites expér

à-5( )T2cève[ d'ure[r[ plai





## 2. Les techniques opérationnelles mises en place

L'évaluation insuffisante du risque n'empêche pas d'agir pour sa réduction, voire son annulation. Depuis longtemps maintenant, les industriels de l'alimentaire ont intégré dans leurs usines des techniques de maîtrise de la qualité de l'air. Ils ont été amenés à intégrer les principes de marche en avant, conception et gestion des salles propres, respect des cascades de pression et implantation de sas pour les personnels et pour les matières et matériels.

### 2.1. À la base de la réflexion : le produit

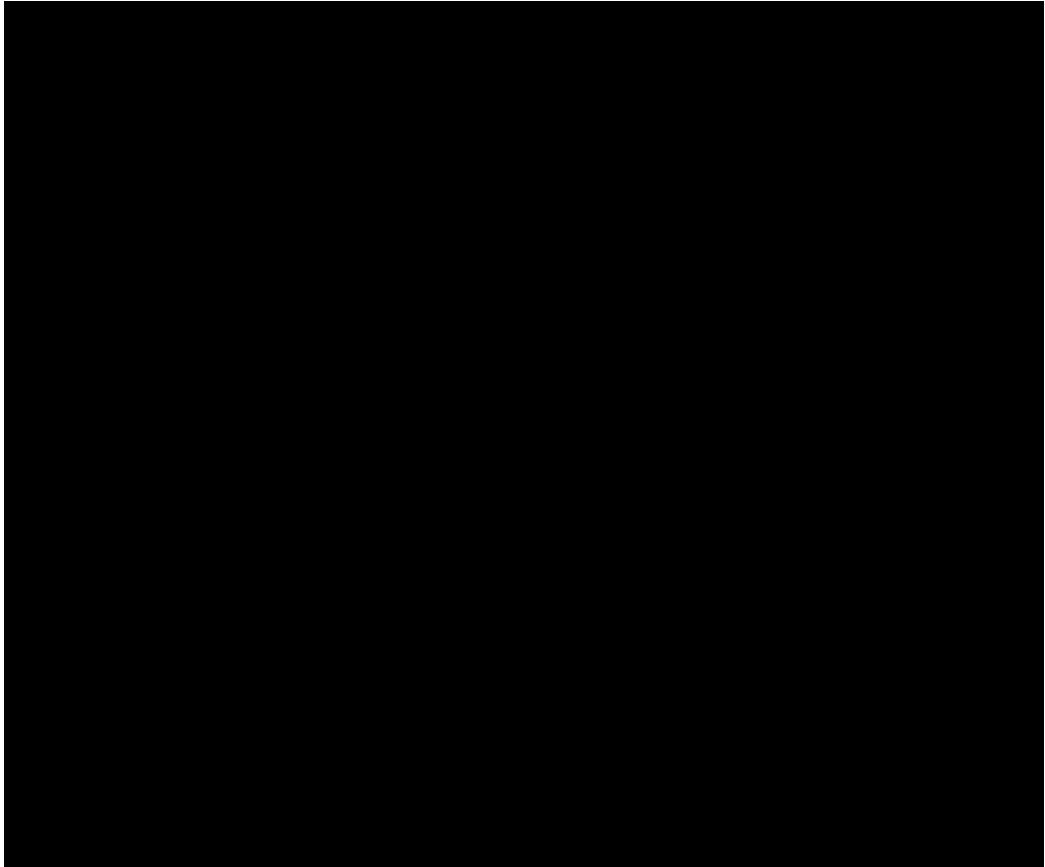
La prévention de la contamination est actuellement dans l'industrie un important facteur de succès ; un coup d'œil aux produits fabriqués sous conditions ultrapropropres convainc de leur diversité.

Les salles propres peuvent, dans un sens général, être définies comme des zones de l'espace dans lesquelles les contaminants – particulaires, microbiologiques ou moléculaires – sont présents en quantité connue et maîtrisée. Selon les branches, plusieurs normes et législations définissent les salles propres plus précisément ; dans l'agro-alimentaire, ISO 14644, ISO 14698, US Federal Standard 209E et les Bonnes Pratiques de Fabrication pour les médicaments à usage humain de l'Union Européenne (figure 6) sont particulièrement utiles.

L'intérêt des salles propres pour l'industrie alimentaire peut être mieux compris en considérant le produit comme un système au sein duquel les influences des microorganismes (favorables ou néfastes) doivent être optimisées (figure 7). En contrôlant précisément les sources de contamination, la nature et l'importance de la microflore du produit peuvent être maîtrisés au mieux, ce qui le plus souvent diminue les exigences en matière de décontamination et de formulation ou d'emballages antimicrobiens.

Il existe schématiquement deux motivations pour utiliser les salles propres : il s'agit, en premier lieu, d'agir de manière responsable envers le consommateur en améliorant l'hygiène : d'autre part, des retombées économiques favorables peuvent être envisagées : diminution des rejets de produits finis par manque de qualité microbiologique ; nouveaux produits aux caractéristiques sensorielles et nutritionnelles et de praticité améliorées ; extension géographique de la zone de commercialisation grâce à une plus longue durée de vie.

Cependant, il doit être noté que les avantages cités ne peuvent être tous atteints simultanément pour un produit particulier. Il n'est pas possible par exemple, que le consommateur et la logistique profitent simultanément d'un allongement de la durée de conservation. De plus, la technologie des salles propres peut uniquement influencer l'évolution microbiologique d'un produit. Les phénomènes physico-chimiques restent inchangés et peuvent être limitants.



## **2.2. Solutions techniques et organisationnelles**

### *2.2.1. Les types de salles propres :*

Deux catégories de salles propres peuvent être distinguées : d'une part, le concept dit ballroom avec lequel les opérateurs sont présents dans la zone propre : de l'autre, les systèmes plus limités spatialement, nommés enhanced clean devices dans la norme ISO 14644, et dont l'opérateur est physiquement exclu (il peut éventuellement interagir avec l'intérieur de la zone propre par l'intermédiaire de manchettes ou d'un demi scaphandre).

Il y a inévitablement une émission de contaminants particulaires (9). Le risque pour les produits sensibles est alors proportionnel à la concentration locale des particules. Le rôle global de la ventilation est de conduire ces particules hors de la salle propre, soit vers les étages de filtration, soit vers l'extérieur. Mais dans cette difficile lutte contre la contamination, la ventilation va avoir une efficacité supplémentaire à partir du moment où on saura maîtriser le comportement aérodynamique de l'air à l'intérieur de la salle propre, à savoir :

- dans les enceintes en écoulement turbulent, l'effet de dilution et la chasse aux zones stationnaires,
- l'utilisation de « l'écoulement laminaire » pour neutraliser les mécanismes de transfert (29).

### 2.2.2.1. La salle propre en « écoulement turbulent »

Considérons une pièce dans laquelle l'air est introduit en partie haute, par exemple par des diffuseurs plafonniers, et sort en partie basse. Les mouvements généraux de l'air sont ceux schématisés par la *figure 8*.

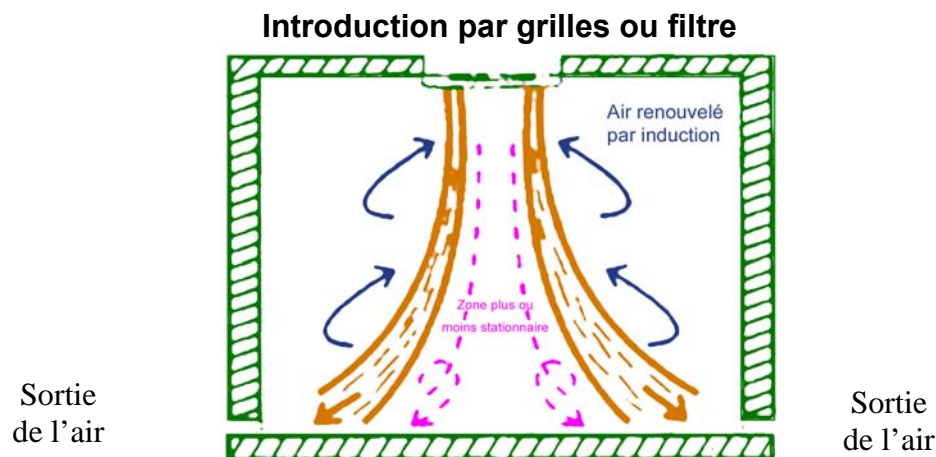


Figure 8 : Mouvements généraux de l'air dans une salle en écoulement turbulent (11)

De façon plus générale, dans une enceinte de volume  $V$  où une source émet en particules / seconde, si on souffle un débit  $Q$  en  $m^3/s$  d'air propre, la concentration d'équilibre est obtenue en écrivant que ce qui sort ( $C \cdot Q$ ) est égal à ce qui est produit  $e$  d'où :

$$C = e / Q$$

Cette équation indique clairement que face à une source d'aérosol, on peut diminuer le risque (proportionnel à la concentration  $C$ ) en augmentant le débit d'air propre soufflé (35). C'est ce que l'on fait pratiquement mais les problèmes internes de courant d'air ressentis par le personnel limitent les débits à des valeurs qui correspondent à environ 50 renouvellements horaires (ISO 7730).

Mais la description ci-dessus doit être complétée pour se rapprocher de la réalité qui est que, dans une salle en écoulement turbulent, on note la présence de zones où le renouvellement de l'air se fait plus ou moins vite mais où, quand même, toute source locale d'aérosols finit par polluer l'ensemble du volume au bout d'un temps variable : on parle alors de diffusion turbulente.

Il est intéressant de cartographier les mouvements de l'air dans l'enceinte pour localiser les zones « mortes » et prendre des mesures pour les atténuer. On peut le faire par l'injection locale de fumées dont on suit visuellement le comportement.

On trouve sur le marché des outils mathématiques sous la forme de logiciels 3D qui visent à modéliser les flux d'air.

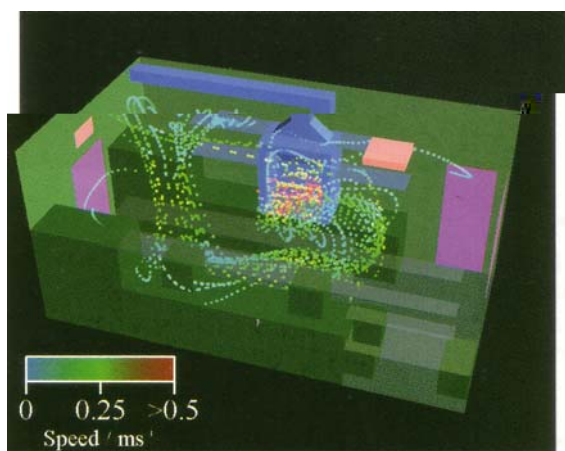


Figure 9 : Visualisation de l'écoulement dans une salle (3)

Ces techniques de visualisation sont essentielles dans de grands espaces où la structure de l'écoulement est loin d'être parfaitement laminaire. Elles permettent de bien appréhender la circulation de l'air et d'identifier des zones à risque, comme par exemple les recirculations d'air où le contaminant va rester piégé.

Elles permettent de comparer entre elles différentes solutions de ventilation, et de retenir les plus prometteuses. L'installation pourra ainsi être optimisée.

Notons que l'introduction des équipements peut bouleverser complètement le régime des écoulements, généralement en altérant l'efficacité de l'installation du point de vue de la maîtrise des sources de pollution. Ces phénomènes vont être modélisés par l'outil de simulation.

#### **2.2.2.2. La salle propre en écoulement « laminaire »**

La mise au point du système dit à « écoulement laminaire » a été un progrès notable dans l'utilisation des propriétés aérauliques de l'air pour maîtriser les risques de contamination.

Une salle en écoulement laminaire mur – mur est construite en constituant un mur d'entrée par une paroi filtrante qui occupe toute sa superficie et en reprenant par une grille qui occupe tout le mur qui lui fait face. Globalement, on a affaire à un écoulement « piston » propre à évacuer rapidement et complètement toute pollution libérée à l'intérieur.

### 2.2.2.2.1. Le régime laminaire

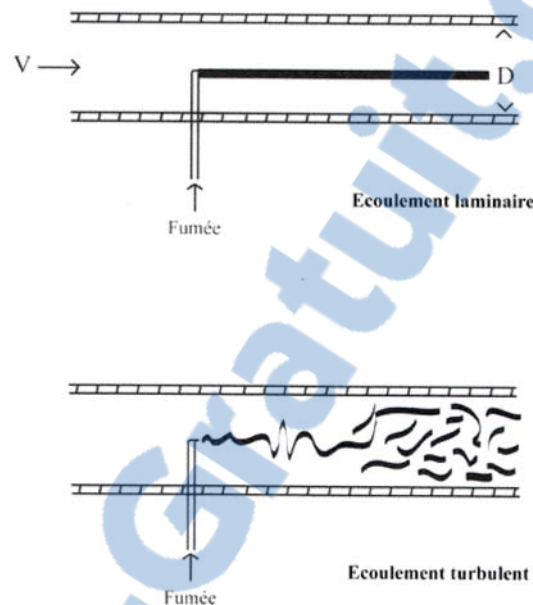


Figure 10 : Les deux régimes d'écoulement en conduite (38)

La vitesse de l'écoulement est décrite par la formule :

$$V = Q / \pi r^2$$

\* r est le rayon du tuyau

\* V est la vitesse moyenne de l'écoulement.

On vient donc d'observer deux « régimes » d'écoulement. Le premier est dit laminaire et le second turbulent. Une définition commune de laminaire (voir le Robert) est : « composée de lamelles parallèles » et, pour turbulent, « agité de façon désordonnée ». On voit qu'ici la terminologie recouvre de façon imagée la réalité physique.

Ces deux régimes de comportement des fluides (à l'état stationnaire) sont fondamentaux en aérodynamique comme en hydraulique. Leurs propriétés physiques dépendent beaucoup d'un paramètre sans dimension appelé nombre de Reynolds (32). Il s'exprime simplement par :

$$Re = VD/v$$

Où,

\*V est la vitesse moyenne dans le tuyau

\*D est le diamètre du tuyau ( $D=2r$ )

\* $\nu$  est la viscosité cinématique du fluide ( $\nu = \mu/\rho$ , avec  $\mu$ , viscosité dynamique et  $\rho$ , masse volumique)

Pour l'air et en travaillant en unités CGSn Re devient :

$$\boxed{Re = VD/0,15}$$

**Dans un tuyau on passe du régime laminaire au régime turbulent, lorsque Re devient supérieur à environ 2000 (32).**

Prenons l'exemple où  $D = 15$  cm,

$$Re = 100V$$

Et, pour  $Re = 2000$ ,  $V = 20$  cm/s

**On voit aussi d'après la formule  $Re = VD/0,15$ , que plus le tuyau est large et plus la turbulence apparaît pour une vitesse faible. Ainsi, pour un tuyau de 30 cm de diamètre, la limite de vitesse est vers 10 cm/s.**

**Une propriété importante de l'écoulement laminaire.**

Reprenons notre expérience de la *figure 10* à son début (faible vitesse) et plaçons un obstacle (profilé) sur la trajectoire de la fumée (voir *figure 11*). On observe que le filet de fumée contourne l'obstacle sans être modifié. **En aval de l'obstacle l'écoulement, un moment perturbé, est redevenu laminaire.** Toutefois, pour un obstacle de grande taille au point d'occuper la majeure partie de la section droite (*figure 11*), la perturbation introduite entraîne une dispersion de la fumée dans tout le tuyau. Plus en aval, la laminarité se rétablit.

Cette tendance naturelle de l'écoulement laminaire à se rétablir spontanément est utile pour le faire apparaître dans une conduite ; il suffit de souffler l'air en bout de tuyau et, après un parcours d'environ 20 fois de diamètre, la laminarité est établie.

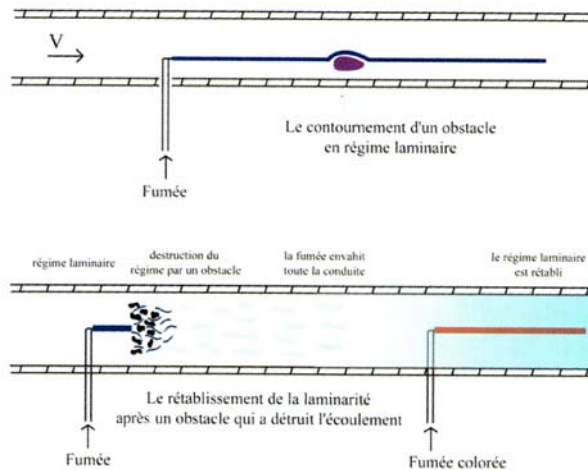


Figure 11 : La stabilité de l'écoulement laminaire (29).

#### 2.2.2.2. L'écoulement laminaire en salle propre

Considérons une enceinte en écoulement horizontal mur à mur. Sur une face dans le sens de la largeur, le mur est entièrement constitué par une surface filtrante composée de cellules carrées juxtaposées. Le mur opposé est une grille de reprise occupant toute la surface. On souffle, par le mur filtrant, un débit d'air  $D$  de  $0.5\text{m/s}$ . On est en présence d'un écoulement « canalisé », du type « écoulement piston ». Sachant qu'au delà de  $2000$ , le nombre de Reynolds  $Re$  caractérise une salle non plus en écoulement laminaire mais turbulent.

**On est donc, et ce quelques soient les dimensions de la salle pour  $D$  inférieur à  $0.8\text{ m/s}$ , en régime turbulent** mais ici, l'originalité est qu'il n'est pas établi. En effet, au niveau des filtres, l'air passe dans de minuscules canaux où il adopte un régime laminaire. Ainsi le flux d'air sortant résulte de la coalescence d'un grand nombre de petits jets en écoulement laminaire. Le résultat est un écoulement faiblement turbulent et non établi. Ce flux va donc progresser vers la sortie en changeant graduellement ses propriétés de façon à acquérir celles que lui impose son  $Re$ , soit un régime totalement turbulent atteint après un parcours d'environ  $50$  mètres (29).

**Cet écoulement en voie d'établissement, a été baptisé « laminaire » parce qu'il présente certaines propriétés voisines de celles que l'on a décrites précédemment pour l'écoulement laminaire vrai.**

#### 2.2.2.2.3. Les propriétés utiles de l'écoulement laminaire:

##### 2.2.2.2.3.1. La maîtrise des transferts :

Lorsque l'on injecte ponctuellement une fumée dans un écoulement laminaire, on constate qu'elle s'évacue vers la grille de reprise, dans un panache dont l'angle d'ouverture est d'autant plus important que le taux

de turbulence au point d'injection est élevé. Ainsi, une source d'émission ne pollue qu'un volume conique défini de l'espace de la salle propre. Pratiquement, cet angle facile à mesurer avec un compteur optique de particules et un générateur d'aérosol, doit être inférieur à  $30^\circ$  pour que l'on puisse parler d'écoulement « laminaire » et donc exploiter les propriétés correspondantes. Au-delà, on peut employer le terme plus vague de flux unidirectionnel (29).

Dans une salle propre où se manifeste une source de contamination, le transport aérien par le phénomène de diffusion turbulente peut amener une particule au voisinage de l'objet à protéger et, par ce mécanisme de transfert, la faire passer de statut potentiellement contaminant à celui de contaminant effectif (voir figure 12). La propriété la plus utile de l'écoulement « laminaire » est de maîtriser ce transfert qui ne se fera pas puisque toutes les émissions sont prisonnières d'un panache qui est éloigné de la surface sensible (voir figure 12).

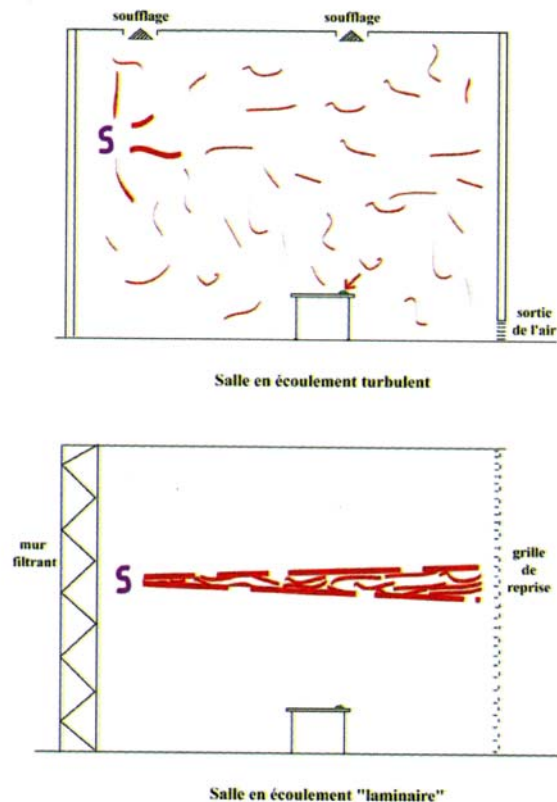


Figure 12 : Neutralisation du transfert air-surface par un écoulement "laminaire" horizontal (29).

#### 2.2.2.2.3.2. La rencontre d'un obstacle :

Une propriété originale de ces flux laminaires est leur rétablissement après qu'ils aient été perturbés par un obstacle. Il est une des raisons de l'utilisation industrielle de cette technique. La vitesse de ce rétablissement comme la qualité de la restauration de la laminarité de l'écoulement dépendent du taux de turbulence locale. Plus ce dernier est élevé et plus l'écoulement a du mal à se reformer ; dans tous les cas, son nouveau taux de turbulence est supérieur à celui qu'il aurait eu en l'absence d'obstacle.



Ainsi, toute rencontre avec un obstacle, dégrade les propriétés de l'écoulement.

D'autre part, on ne doit pas descendre à des vitesses trop basses : en présence de sources thermiques, 0,2m/s sera souvent une limite inférieure au-dessous de laquelle les propriétés de l'écoulement se dégradent. Le rétablissement de la « laminarité » derrière un obstacle se fait plus difficilement ; il y a risque d'apparition de zones stationnaires et de remontée de contaminants vers l'amont (29).

#### *2.2.2.2.3.3. La maîtrise des sources d'émission :*

Généralement, les écoulements « laminaires » sont verticaux ou horizontaux. La maîtrise des sources d'émission est différente dans chacun de ces deux cas (44).

- Dans un écoulement vertical, les sources d'émission sont généralement situées dans un plan horizontal qui correspond à la zone de travail. L'évacuation par le panache se fait par en dessous. Il y a donc indépendance, dans une direction horizontale quelconque, des sources. Aucun autre point du plan de travail ne peut être contaminé par l'une de ces sources.

- Dans un écoulement horizontal, toujours en considérant un plan de travail horizontal, toute source a un panache qui couvre une partie du plan de travail, cette zone devenant éventuellement inutilisable. Il y a bien indépendance des sources dans une direction verticale, mais pas dans le plan horizontal où elles peuvent cumuler leurs effets.

C'est cette différence de propriété qui permet, la plupart du temps, de choisir entre les deux types d'écoulement.

#### *2.2.2.2.3.4. Les surpressions :*

Après avoir maîtrisé l'air entrant et l'air à l'intérieur de l'atelier considéré, il convient d'éviter qu'il se recontamine par l'entrée d'air des ateliers adjacents notamment de la part d'ateliers où la contamination est plus élevée. Pour cela la création de barrières par la mise en place de pressions différentielles entre les ateliers permet de protéger les acquis de la filtration et de la ventilation. On appelle surpression d'une enceinte l'écart de pression existant entre l'intérieur de celle-ci et les locaux adjacents. La surpression est donc une valeur relative dont le gradient est variable suivant le local mitoyen considéré. La surpression permet de diriger les flux de contamination de la partie la plus propre vers la partie la plus sale. Il s'agit de l'application directe du concept de la marche en avant. En pratique la différence de pression entre 2ateliers est de 10 Pa (»1 mm CE). La méthode pour mettre une salle en surpression est simple, il suffit de souffler de l'air en excès par rapport à son volume. Cela étant, l'étanchéité des locaux est une condition préalable (36).

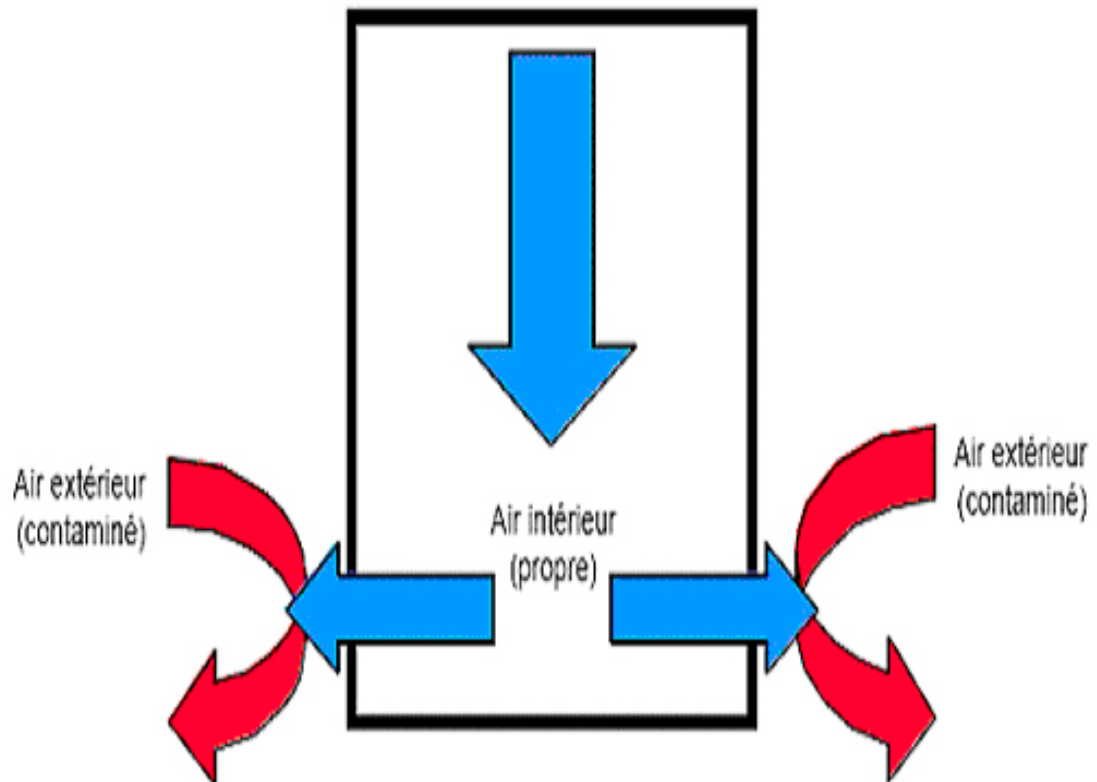


Figure 13: Schéma de principe de la mise en surpression (36)

### 3. Le traitement de l'air

Entre l'extérieur du bâtiment et l'intérieur de la salle propre, ou lors de son recyclage, l'air va subir des traitements destinés à ajuster ses paramètres ou à le purifier. Il sera ensuite conduit et distribué par des dispositifs propres à maîtriser ses caractéristiques aérauliques. Les unités de traitement élémentaires sont les batteries froides et chaudes, l'humidificateur, le caisson de mélange, les filtres, l'étage d'épuration chimique.

La partie conduite et distribution de l'air comprend les ventilateurs, les pièges à son, les gaines, les registres, les organes de régulation, les sécurités incendies, les diffuseurs, les grilles, les murs filtrants.

Sur tous ces matériels et les assemblages qu'on peut en réaliser, pèsent « les contraintes salles propres ». Ils ne doivent pas être émetteurs de poussières ou de contaminants chimiques susceptibles de se retrouver dans l'air traité ; il faut que toutes les parties en contact avec l'air propre soient et puissent être montées propres et qu'ensuite leur nettoyage et leur désinfection, si nécessaires, puissent se faire commodément et efficacement.

#### 3.1. Les unités de traitement

L'air, pris dans le milieu extérieur, va subir des traitements destinés à ajuster ses paramètres ou à le purifier. Il sera ensuite distribué et conduit par des dispositifs propres à maîtriser ses caractéristiques aérauliques. Les unités de traitement élémentaires sont les batteries froides et chaudes, les humidificateurs, le caisson de mélange, les filtres et l'étage d'épuration chimique (27). La partie conduite et distribution comprend les ventilateurs, les pièges à son, les gaines, les registres les organes de régulation, les diffuseurs, les grilles et les murs filtrants (27).

**3.1.1. Les batteries chaudes et froides**, toujours présentes dans les installations, permettent d'échanger de la chaleur entre fluide chauffant ou refroidissant et l'air. Ce sont généralement des tubes en cuivre munis d'ailettes en cuivre ou en aluminium.

La batterie froide est alimentée en fluide frigorigène ou en eau glacée par une machine frigorifique. Elle refroidit l'air et peut faire descendre sa température au-dessous du point de rosée, auquel cas l'eau excédentaire recondense et doit être évacuée via un bac de récupération. Lorsqu'un contrôle de l'humidité relative est imposé (cas général en salle propre), la technique consiste à retirer l'eau contenue dans l'air et ensuite à rajouter la quantité nécessaire pour arriver à la valeur finale imposée.

Dans ce cas, la batterie froide sert à déshumidifier l'air en descendant à un point de rosée de l'ordre de 7° à 12°C ; elle est alors construite pour tenir compte de cette fonction supplémentaire.

La batterie chaude est alimentée en eau chaude, en eau surchauffée ou en vapeur d'eau. Dans certains cas, on peut se contenter de faibles puissances (batteries de préchauffage, batterie terminale) ; on utilise des

batteries à chauffage électrique. Les batteries chaudes ont pour fonction d'élever la température de l'air refroidi par la batterie froide pour l'amener à la valeur imposée de l'air soufflé. Suivant la position qu'elle occupe, on peut être amené à protéger la batterie chaude des phénomènes d'encrassement des ailettes en montant en amont un filtre à air à moyenne efficacité.

**3.1.2. Les humidificateurs** reçoivent l'air sec venant des batteries et doivent injecter la quantité d'eau nécessaire pour arriver à l'humidité relative finale imposée. C'est une partie délicate du point de vue contamination ou sanitaire.

L'eau peut être introduite sous forme de vapeur ou d'un nuage de gouttelettes. Dans le cas des salles propres, l'usage a permis de sélectionner des moyens de production de vapeur ou de gouttelettes parmi les systèmes utilisables en conditionnement d'air général.

La production de vapeur est obtenue à partir d'eau que l'on chauffe avec une résistance chauffante immergée ou en faisant passer du courant électrique, entre deux électrodes immergées dans l'eau. La vapeur est conduite vers une rampe de distribution installée dans la gaine d'air dont la turbulence assure le mélange.

**3.1.3. Le caisson de mélange** reçoit l'air neuf et l'air recyclé et doit produire, en sortie, une phase homogène. Il travaille par mélange en milieu turbulent, un compartimentage favorisant l'apparition des turbulences nécessaires.

**3.1.4. La filtration de l'air** permet d'éliminer des particules en suspension. On utilise à cette fin une cellule filtrante à travers laquelle l'air est débarrassé des aérosols dont les dimensions vont de 0,01 µm à une centaine de microns.

L'efficacité d'un filtre vis-à-vis d'un aérosol peut s'exprimer de 3 manières différentes (30) :

- Efficacité (%)  $E = ((A-B)/A)*100$
- Pénétration (%)  $P = (B/A)*100$
- Coefficient d'épuration (sans dimension)  $CE = A/B$

**Avec : A = concentration AMONT ; B = concentration AVAL.**

#### **3.1.4.1. Filtres de moyenne et haute efficacité**

Ces filtres sont, en règle générale, montés en caisson de traitement d'air. Les étages de préfiltration sont destinés à retenir une partie de la contamination particulaire en vue de :

- Protéger les composants du caisson (batteries d'échange thermique, ventilateur, sondes de mesure...) d'un encrassement préjudiciable à leur bon fonctionnement.
- Augmenter la durée de vie des filtres finisseurs.

Les principaux critères de sélections de ces filtres, dans le cadre de l'exploitation d'une salle propre, sont les suivants :

- L'efficacité globale du filtre (selon la norme EN 779),
- La capacité de colmatage du filtre (exprimée en gramme de poussière par filtre et déterminée lors du test de classification du filtre suivant la norme EN 779),
- La perte de charge du filtre à l'état neuf (exprimée en Pa et déterminée lors du test de classification du filtre suivant la norme EN 779).

Le classement des filtres de moyenne et haute efficacité selon la norme EN 779 est indiqué par le *tableau 9*. L'efficacité des filtres est déterminée selon une méthode de mesure gravimétrique pour les filtres de moyenne efficacité (exprimée en terme d'« Arrestance moyenne ») et selon une méthode de mesure opacimétrique pour les filtres de haute efficacité (exprimée en terme d' « Efficacité moyenne »).

La norme EN 779 fait état d'une mesure de l'efficacité des filtres de haute efficacité par comptage particulaire substituée à la méthode de mesure opacimétrique actuelle.

Caractéristiques		Rendement gravimétrique moyen $A_m$ (%)	Rendement opacimétrique moyen $E_m$ (%)
<b>Groupe de filtre</b>	<b>Classe de filtre</b>	<b>Limites des classes</b>	
MOYENNE EFFICACITÉ	G1	$A_m < 65$	
	G2	$65 \leq A_m < 80$	
	G3	$80 \leq A_m < 90$	
	G4	$90 \leq A_m$	
	F5		$40 \leq E_m < 60$
	F6		$60 \leq E_m < 80$
	F7		$80 \leq E_m < 90$
	F8		$90 \leq E_m < 95$
	F9		$95 \leq E_m$
RENDEMENT OPACIMETRIQUE INITIAL A LA TACHE $E_i$		$E_i < 20 \%$	$E_i \geq 20 \%$

Classe suivant EN 779	Perte de charge finale en Pa	A <sub>m</sub> en % Poussières synthétiques	E <sub>m</sub> % Particules de 0,4 µm
G1	250	50 ≤ A <sub>m</sub> < 65	
G2	250	65 ≤ A <sub>m</sub> < 80	
G3	250	80 ≤ A <sub>m</sub> < 90	
G4	250	90 ≤ A <sub>m</sub>	
F5	F5		40 ≤ E <sub>m</sub> < 60
F6	F6		60 ≤ E <sub>m</sub> < 80
F7	F7		80 ≤ E <sub>m</sub> < 90
F8	F8		90 ≤ E <sub>m</sub> < 95
F9	F9		95 ≤ E <sub>m</sub>

Tableau 9 : Classification des filtres de moyenne et haute efficacité selon la norme EN 779

### 3.1.4.2. Filtres de très haute efficacité

Egalement qualifiés par les termes anglo-saxons « HEPA filters » (High Efficiency Particulate Air filters- Filtres d'efficacité supérieure à 99,97% sur des particules de 0,3 µm selon la définition de l'IES-RP-CC001.3) et « ULPA filters » (Ultra Low Penetration Air Filters – Filtres d'efficacité supérieure à 99,999% sur des particules de taille comprise entre 0,1 et 0,2 µm selon IES-RP-CC001.3), les filtres de Très Haute Efficacité (T.H.E) ont pour objet de filtrer l'air :

- destiné à l'alimentation en air ultra-propre de la salle propre ;
- destiné à assurer la protection du réseau de recirculation de l'air d'une contamination générée à l'intérieur de la zone ;
- destiné à la protection du milieu extérieur d'une contamination générée à l'intérieur de la zone.

Ces filtres sont toujours mis en œuvre en aval d'un ou de plusieurs étages de pré filtration. Dans ces conditions de fonctionnement optimales, l'évolution de la perte de charge d'un filtre de très haute efficacité est sensiblement plus lente au cours du temps que celle des préfiltres.

Les filtres de très haute efficacité se sélectionnent en fonction notamment des critères suivants :

- l'efficacité globale et locale du filtre (selon la norme EN 1822),

- la perte de charge du filtre à l'état neuf (exprimée en Pa et déterminée lors du test de classification du filtre suivant la norme *EN 1882*),
- la qualité des matériaux constitutifs du filtre au regard de critères tels que l'homogénéité du plissage du média filtrant, le classement au feu du média filtrant, la nature et la finition du cadre et du joint d'étanchéité du filtre, etc.

Conformément à la norme *EN 1822*, les filtres de très haute efficacité disposent d'une marque d'identification individuelle mentionnant :

- le nom, la marque et tout autre moyen d'identification du fabricant,
- le numéro de série et le type du filtre,
- la référence à la norme *EN 1822*,
- la classe du filtre,
- le débit d'air dit débit volume d'air nominal correspondant au classement du filtre.

La classe d'un filtre de très haute efficacité, suivant la norme *EN 1822*, se définit à partir de la mesure de l'efficacité locale et de l'efficacité globale du filtre vis-à-vis d'un aérosol test (DEHS, huile de paraffine...) dont le diamètre correspond à celui de la particule la plus pénétrante (M.P.P.S. : Most Penetrating Particle Size) à travers le filtre. Ce diamètre de particule varie d'une fabrication à l'autre, les efficacités sont ainsi exprimées en fonction de la « M.P.P.S. » (et non associées à une dimension de particule précise). La classification est résumée par le *tableau 10*. La dimension de la particule la plus pénétrante se situe entre 0.1 et 0.2  $\mu\text{m}$  pour la plupart des panneaux filtres de très haute efficacité du marché, au débit nominal d'utilisation de ces filtres.

Classe du Filtre THE	Efficacité globale. / . MPPS	Efficacité locale. / . MPPS
<b>H10</b>	85%	
<b>H11</b>	95%	
<b>H12</b>	99,5%	
<b>H13</b>	99,95%	99,75%
<b>H14</b>	99,995%	99,975%
<b>U15</b>	99,9995%	99,9975%
<b>U16</b>	99,99995%	99,99975%
<b>U17</b>	99,999995%	99,9999%

*Tableau 10 : Classification des filtres de très haute efficacité selon la norme EN 1822*

**3.1.5. L'épuration chimique** consiste à faire passer l'air à travers un milieu poreux spécial qui, au passage, retiendra le ou les corps indésirables en touchant le moins possible aux autres constituants de l'air.

Les propriétés ci-dessus sont mises en œuvre industriellement, avec principalement, pour surface solide, le carbone, sous forme de charbon préalablement activé. Cette adsorption ou absorption a des limites et lorsque la « capacité d'adsorption » est atteinte, la fixation cesse et on dit que le charbon est saturé.

## **3.2. La distribution de l'air**

**3.2.1. Le ventilateur** est une pièce essentielle de toute installation de traitement de l'air. C'est une turbomachine qui met l'air en mouvement et lui communique la pression nécessaire pour qu'il circule dans les gaines, et assure la cascade des surpressions dans les salles propres qu'il dessert.

### **3.2.2. Le réseau de gaines**

Entre la centrale de climatisation et les salles propres, l'air est acheminé par des conduits, appelés gaines, qui sont munis de volets, de clapets, de registres, c'est-à-dire d'accessoires permettant de répartir les débits dans les différentes branches du système.

Les gaines, en matériaux non générateurs de poussières éventuellement munies de trappes de visite, doivent être facilement nettoyables et, éventuellement, désinfectables ; l'acier galvanisé ou l'acier laqué sont très employés pour les construire. Les gaines peuvent avoir une section circulaire ou plus fréquemment rectangulaire.

**3.2.3. Les systèmes de soufflage et de reprise** permettent d'introduire l'air dans les salles propres et de le faire sortir dans des conditions telles qu'on ne perde pas le bénéfice des efforts directement dans une reprise). Deux objectifs sont visés :

- éliminer les charges thermiques internes
- maîtriser les émissions de contaminants en les diluant et en les entraînant vers une reprise.

De plus, il faut éviter les courants d'air gênants pour le personnel.

On arrive à atteindre du mieux possible ces objectifs en choisissant le type des diffuseurs introduisant l'air, la vitesse de l'air dans les bouches de reprise et en positionnant judicieusement ces appareils dans les parois de la salle.



### **3.3. Application à l'industrie agro-alimentaire**

#### **3.3.1. Généralités**

Les produits alimentaires sont, à l'exception des produits stérilisés (conserves...) et des produits secs (saucissons secs, jambons secs) par définition, des produits à « hauts risques ». En effet, ils constituent des apports nutritifs pour les biocontaminants.

Pour obtenir des aliments sains, il est essentiel :

- d'avoir des matières premières les moins contaminées possible (rédaction d'un cahier des charges matières premières, contrôles à réception...),
- d'éviter les contaminations pendant la fabrication et la conservation (respect des bonnes pratiques de fabrication, application de la méthode HACCP...),
- de limiter le développement des biocontaminants pendant la fabrication et la conservation (respect de la chaîne du froid, utilisation d'ingrédients bactériostatiques...).

Il convient de rappeler que la dégradation contamination d'un aliment peut avoir des conséquences économiques (flore d'altération) et épidémiologiques (flore pathogène) importantes.

Les salles « propres » ou autres dispositifs comme les protections rapprochées, font partie des moyens qui permettent d'éviter les aérocontaminations pendant les fabrications dans la mesure où les particules vivantes sont souvent transportées dans l'ambiance par des particules inertes.

#### **3.3.2. Textes en vigueur**

Il n'existe pas de normes spécifiques à l'agroalimentaire en matière de traitement de l'air. Seuls des textes généraux existent.

Cependant, les produits mis sur le marché doivent répondre aux critères microbiologiques de l'arrêté du 27 juin 2001 (référence DGAL/SDHA/N°2001-8090) « relatif aux critères microbiologiques auxquels doivent satisfaire certaines denrées animales ou d'origine animale » ou des arrêtés le modifiant. Cet arrêté impose des critères microbiologiques à respecter, entre autres vis-à-vis de germes pathogènes. Ce texte n'impose aucun moyen à mettre en œuvre pour pouvoir respecter ces critères.

Néanmoins, en matière de locaux, les entreprises fabriquant des produits à base de viandes, doivent satisfaire aux exigences de l'arrêté du 23 janvier 1993 « relatif aux conditions hygiéniques et sanitaires de production, de mise sur le marché et d'échanges de produits à base de viande ». En matière de

traitement de l'air, ce texte indique simplement que « les établissements doivent comporter au moins :

- *une ventilation suffisante et, le cas échéant, une bonne évacuation des buées afin d'éliminer autant que possible la condensation sur les surfaces telles que les murs et les plafonds.* » (Titre II Art. 11 e).
- « *des locaux adéquats suffisamment vastes pour l'entreposage séparé :*
  - *sous régime du froid, des matières premières, d'une part, et*
  - *à température ambiante ou, le cas échéant, en fonction de leur nature, sous régime du froid, des produits à base de viande, d'autre part* » (Titre IV Art. 19 a).

Cet arrêté précise par ailleurs que : « *Les températures des locaux, ou d'une partie des locaux, dans lesquels il est procédé au travail des viandes, des viandes hachées utilisées comme matières premières, des produits à base de viande et des préparations de viande, doivent garantir une production hygiénique ; si nécessaire ces locaux ou parties de locaux doivent être munis d'un dispositif de conditionnement d'air.*

*Quand les opérations de découpe et de salaison y sont effectuées, les locaux de découpe et de salaison doivent être maintenus à une température ne dépassant pas 12°C »* (Titre IV Art. 24).

### 3.3.3. Applications

Les industries agroalimentaires utilisant des salles « propres » travaillent essentiellement dans les secteurs suivants (7) :

- Produits carnés ;
- Produits de la mer ;
- Laiteries / Fromageries ;
- Viennoiseries / Brioqueries ;
- Cuisines centrales ;
- Plats cuisinés.

Les salles propres trouvent leur application au niveau des fabrications et des conditionnements. Selon le domaine d'activité, la décontamination du système de traitement d'air va différer ; on peut définir deux catégories d'installation :

- **Installations dans lesquelles il est nécessaire de favoriser le développement de certains micro-organismes qui interviennent dans des fabrications** : avant chaque cycle de fabrication, les locaux et le matériel sont lavés et désinfectés. Le local est maintenu en surpression dans les conditions climatiques fixées. Les produits sont ensuiteensemencés avec les micro-organismes nécessaires à la fabrication. Le développement de ces micro-organismes doit se faire sans être altéré par

d'autres micro-organismes gênants ; les produits peuvent alors être introduits.

Ces types d'installation sont utilisés essentiellement pour la fabrication des fromages.

- **Installations dans lesquelles il est toléré peu de micro-organismes, voire aucun micro-organisme, dans l'ambiance.** Le matériel installé vise alors à protéger le produit des micro-organismes.

Dans la plupart des cas, le produit a subi une biodécontamination (par exemple une cuisson). Il s'agit alors de protéger ce produit des micro-organismes qui peuvent être apportés par l'air ambiant et le personnel.

Par exemple, le tranchage du jambon est une opération qui s'effectue après une cuisson, opération qui décontamine, et un raidissage à  $-2^{\circ}\text{C}$  environ (21). Durant ces deux opérations, le jambon reste enveloppé et donc protégé des contaminations. Les opérations suivantes consistent à enlever l'enveloppe du jambon, à le trancher et à le conditionner. Le produit a donc perdu sa protection et il est, de plus, fragilisé par le process puisque la surface de contact ambiance / produit a fortement augmenté. Le produit ne subissant ensuite plus aucune étape de décontamination, sa DLC (Date Limite de Consommation) sera directement liée au niveau de biocontamination au moment du conditionnement (21).

L'utilisation d'environnements maîtrisés permet alors d'éviter avant emballage une recontamination du produit par l'air ambiant ou le personnel.

Ces environnements impliquent l'utilisation de salles propres et de systèmes de protection rapprochée.

### 3.3.4. Spécificités du domaine agroalimentaire

#### 3.3.4.1. *Températures*

Pour éviter la prolifération bactérienne, il est courant de conserver les ambiances à  $3^{\circ}\text{C}$ , température qui correspond à l'arrêt ou à un fort ralentissement du développement de la plupart des germes pathogènes (42).

La diffusion de l'air par gaines textiles poreuses ou à fentes permet alors de conserver des conditions de travail acceptables pour le personnel ; ces gaines présentent de plus l'avantage d'être facilement lavables.

#### 3.3.4.2. *Humidité relative*

Elle est, en général, importante et difficile à réduire puisque les températures ambiantes sont basses.

Dans le domaine du tranchage du jambon, la température du produit avant le tranchage est de l'ordre de  $-2^{\circ}\text{C}$  ; si l'on veut éviter les condensations en surface qui fragiliseraient le jambon, il faut alors

travailler à des températures de rosée inférieures à  $-2^{\circ}\text{C}$ , ce qui amène des problèmes de givrage sur les batteries froides (21).

En règle générale, afin d'éviter des périodes de travail sans dégivrage de moins de 8 heures, il est préférable :

- soit de déshumidifier l'air le plus possible en phase liquide sur les batteries froides de système de pré-traitement d'air neuf,
- soit d'utiliser des déshydrateurs par voie chimique (6).

#### 3.3.4.3. *Lavages périodiques des locaux*

En général, les locaux sont lavés et désinfectés quotidiennement avec de l'eau à  $40^{\circ}\text{C}$  environ, des détergents et des désinfectants. Pour éviter des zones de rétention d'eau propices au développement des bactéries et plus particulièrement de *Listeria monocytogenes*, il est nécessaire de sécher les locaux (7).

Cette opération de séchage et de retour aux conditions nominales doit se faire le plus rapidement possible pour permettre le travail des équipes de production.

Le temps généralement accepté pour le retour aux conditions de production est de 30 minutes (2).

#### 3.3.4.4. *Givrage de l'installation de traitement d'air*

Ce problème est dû à la conjugaison de plusieurs facteurs : température ambiante basse, température de rosée très basse, lavage et maintien de la surpression des locaux.

Des séquences de dégivrage seront donc nécessaires.

Elles doivent s'effectuer en dehors des périodes de production pendant les périodes de lavage pour éviter de désorganiser la production.

#### 3.3.4.5. *Matériels utilisés*

Du fait des conditions de fonctionnement, il est nécessaire d'installer des matériels spécifiques (27) en particulier pour :

- Les caissons de traitement d'air qui doivent être lavables avec fond étanche et angles arrondis. La carrosserie sans pont thermique est généralement en panneau double peau polyuréthane avec des parements en polyester ou en inox.
- Les gaines sont monoblocs et constitués d'un panneau double peau polyester. Elles sont lavables et les ponts thermiques sont inacceptables.
- Les batteries froides sont adaptées au problème du givrage en particulier au niveau des surfaces d'échange, des pas d'ailettes et des stations de vannes.

- Les soufflages se font par gaines en textile monofil pour les salles à flux turbulent.
- Les filtres des flux laminaires doivent être protégés pendant les séquences de lavage où l'air est complètement saturé en humidité.





















	Registre motorisé		Ventilateur centrifuge
	Registre manuel		Ventilateur à roue libre
	Registre antigel		Roue axiale
	G4 Filtre grossier		Batterie froide
	F7 et F8 Filtre fin		Batterie chaude
	F9 Filtre fin		Batterie chaude électrique
	H10 à H13 Filtre THE (en CTA)		Humidificateur
	H10 à U 17 Filtre THE (en salle)		Séparateur de gouttelettes
	CA Charbon actif		Trappe d'entretien
	Piège à sons		Trappe d'entretien

Figure 15 : principaux symboles utilisés en traitement de l'air (40)

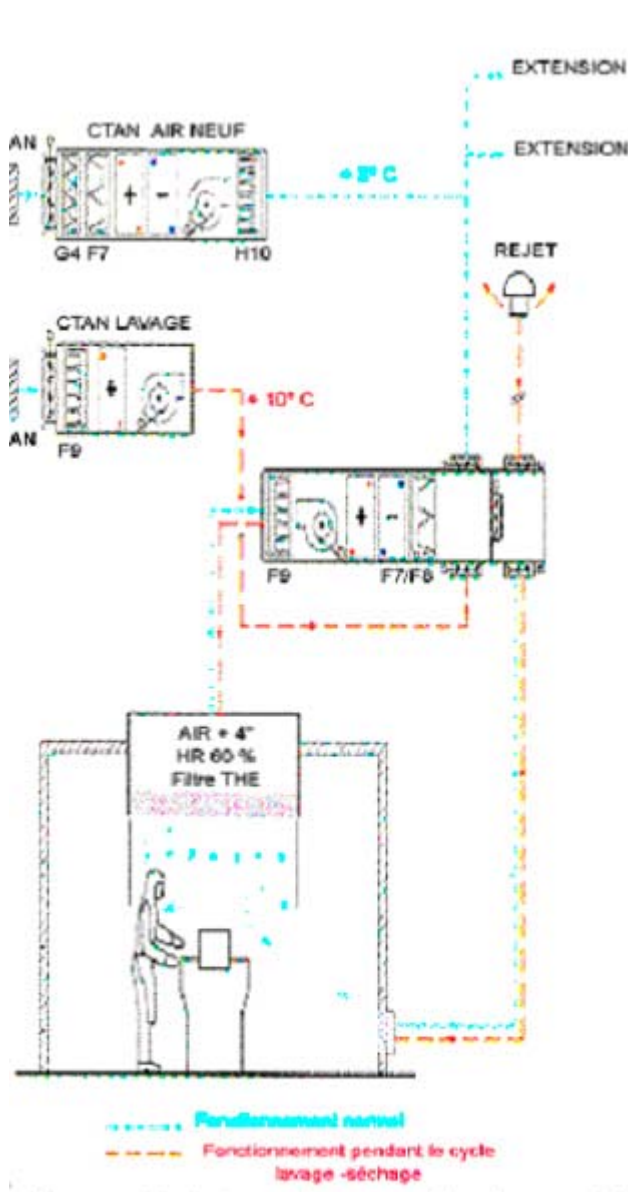


Figure 14.1: tranchage du jambon traitement en salle propre (40)

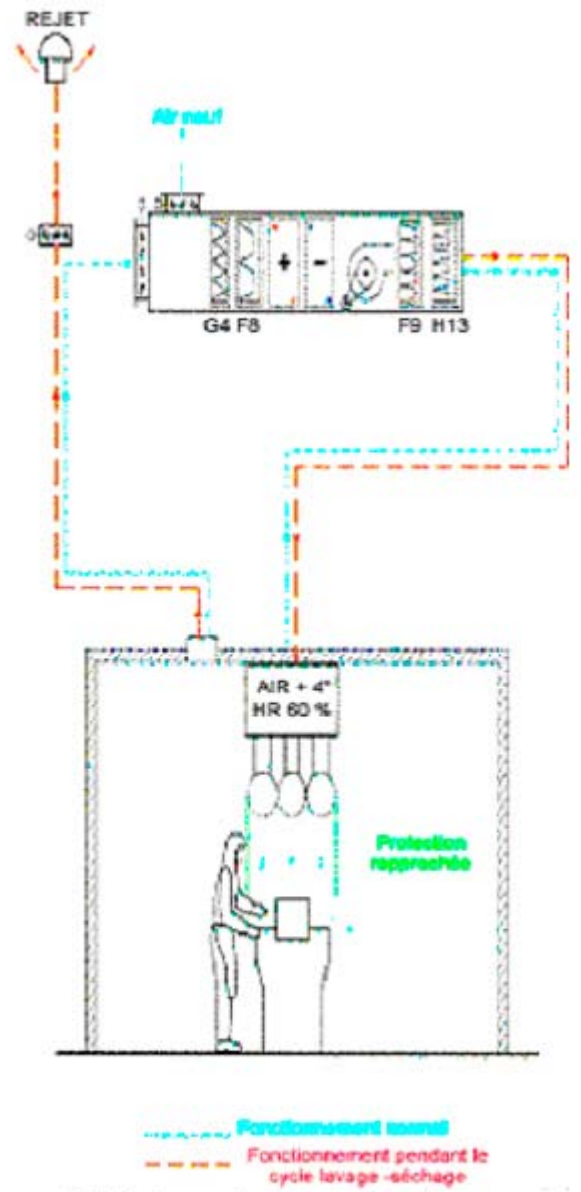


Figure 14.2: tranchage du jambon traitement par protection rapprochée (40)

## 4. Métrologie de la qualité de l'air

Les techniques et méthodes qui sont décrites dans ce chapitre ne sont pas spécifiques de l'agroalimentaire et sont définies et décrites par des normes dont la liste figure en annexe 0 « Listing des principaux textes normatifs applicables en métrologie ».

### 4.1. Généralités

Une salle propre est une réalisation techniquement évoluée ; en faire bon usage passe obligatoirement par une métrologie qui vise à vérifier ses performances lors de la mise en route et, ensuite, leur maintien au cours du temps. Ces deux aspects sont largement pris en compte par la normalisation avec la norme *ISO 14644 partie 3* qui définit la métrologie applicable aux salles propres et la norme *ISO 14644 partie 2* qui impose des vérifications périodiques si l'on veut pouvoir annoncer que l'on est conforme à l'*ISO 14644*. Dans certains cas, on pourra aller au-delà de ce que demandent les normes, en mettant en place un monitoring permanent de certains paramètres (par exemple, mesurage au compteur optique de la propreté de l'air). Ce sera aussi le cas lorsqu'on utilise un matériel de régulation informatisé.

Comme, dans une salle propre, tout est en interaction, on notera qu'on est naturellement amené à se soucier de paramètres autres que ceux qui concernent strictement la partie air.

Voici la liste des paramètres couramment retenus en métrologie des salles propres :

#### **Paramètres de construction**

- Visualisation des régimes aérauliques dans l'installation ;
- Etanchéité des gaines et des salles ;
- Recherche des fuites sur filtres ou sur caissons de filtres installés ;
- Essais de fuite de confinement ;
- Niveau sonore.

#### **Paramètres de fonctionnement**

- Pressions différentielles ;
- Température de l'air ;
- Humidité relative de l'air ;
- Débits de ventilation ;
- Carte des vitesses ;
- Qualité des « écoulements laminaires » ;

- Propreté particulaire de l'air ;
- Propreté microbiologique de l'air ;
- Essai de sédimentation des particules.

Pour chacun de ces paramètres, les normes ISO et AFNOR peuvent donner des informations sur leur définition, les moyens de mesurage à utiliser, de façon de procéder, la comparaison des résultats expérimentaux aux performances attendues, etc...

Il faut mentionner ici une évolution qui n'a pas encore complètement abouti au plan de la normalisation mais dont on doit tenir compte. Cette évolution est sous-tendue par deux règles impératives :

- tout résultat de mesurage doit être accompagné de sa fourchette d'incertitude globale ;
- la comparaison d'un résultat avec une valeur limite n'est possible que si on connaît l'incertitude globale associée.

L'opération de mesurage proprement dite passe par différentes étapes qui sont :

- connaissance du type d'enceinte et des systèmes de ventilation qu'on y rencontre ;
- objectif des mesurages, choix des paramètres, chronologie des interventions ;
- stratégie de mesurage ;
- rédaction du rapport d'essai avec les conclusions.

Les référentiels qui aideront à franchir ces différentes étapes sont le cahier des charges de l'installation, un référentiel spécifique à la métrologie de l'installation, les normes correspondantes ou tout autre texte pertinent.

#### **4.2. Connaissance de l'enceinte et des systèmes de ventilation**

Le type d'enceinte peut avoir une influence à la fois, sur la nature des essais, sur les méthodes mises en œuvre et sur les valeurs limites à respecter. Nous distinguons les installations fixes (locaux) des équipements transportables comme les enceintes séparatives.



Type d'équipement	Filières utilisatrices	Textes de référence
Isolateur	Pharmacie industrielle, Pharmacie hospitalière, & D, IAA (Jus de fruits, produits carnés, produits laitiers)	ISO 14 644-7
Boîte à gants	Industrie nucléaire	Série de normes NF M 62 200
Poste de sécurité microbiologique	Etablissements de santé, Industrie pharmaceutique, R & D	

Tableau 11 : Exemples d'enceintes séparatives

Les paramètres et les méthodes de mesurage associées peuvent être très différents suivant que l'on a affaire à un écoulement unidirectionnel ou non unidirectionnel.

### 4.3. Paramètres de construction

#### 4.3.1. Visualisation des régimes d'écoulement

Différentes méthodes sont proposées dans la norme ISO 14 644-3 et sont présentées dans le *tableau 12*.

Il est à noter que ces techniques, à l'exception de la carte des vitesses donnent un résultat qualitatif. Lors de la conception d'une installation ou de la modification d'une installation, la simulation numérique peut être un outil complémentaire (voir paragraphe 2.2.2.1. : la salle propre en « écoulement turbulent »).

	<b>Méthode des fibres</b>	<b>Méthode avec injection d'un traceur</b>	<b>Etablissement de la carte des vitesses</b>
Moyens	Fils de soie, filaments de nylon, minces rubans de films (audio par ex) fixés à l'extrémité de bâtonnets ou aux intersections d'un grillage de fils métalliques	Fumée d'un tube DRÄGER Ou fumée issue de la sublimation de carboglace	Anémomètre
Enregistrement	Caméra vidéo Œil + croquis papier		Carte des vitesses instantanées en plusieurs points
Remarques	Aide d'une lampe souhaitable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• introduction d'un contaminant</li> <li>• absence de réglage du débit de génération</li> </ul>	
Exemple d'applications	Microélectronique (zones à flux unidirectionnel)	Etablissements de santé, Pharmacie IAA	

Tableau 12 : Méthodes de visualisation des régimes d'écoulement d'air (ISO 14 644-3)

### *Cas de la génération d'un aérosol :*

A l'aide d'une poire à fumée ou d'un générateur de fumée (par exemple), on peut produire un aérosol traceur au niveau de chaque dispositif de soufflage et suivre le trajet de ce traceur.

Il est nécessaire de réémettre régulièrement l'aérosol pour parfaitement matérialiser le trajet jusqu'aux reprises / extractions. La difficulté est d'émettre la bonne quantité car les appareils commercialisés ne sont pas équipés d'un régulateur de débit.

Le générateur à carboglace présente l'avantage d'émettre de plus gros débits que la poire à fumée. Dans le cas d'un enregistrement vidéo de fumée blanche, il faut faire attention à l'interprétation parfois difficile, lorsque les murs des salles sont eux-mêmes blancs.

#### **4.3.2. Etanchéité des gaines et des salles**

Un manque d'étanchéité peut avoir des conséquences néfastes en ce qui concerne les risques de contamination particulaire et les consommations énergétiques. C'est pourquoi on se fixe habituellement comme performances à atteindre :

- pour le réseau de gaines, un débit d'infiltration ou d'exfiltration inférieur à 6% du débit total ;
- pour une salle propre, une fuite dont le débit horaire soit inférieur à une fois le volume de la salle (ISO 14644).

La méthode la plus généralement utilisée consiste à isoler le tronçon de gaine ou la salle à tester. On souffle dans le cul-de-sac ainsi constitué de façon à obtenir la pression de service. Le débit de soufflage est alors le débit de fuite recherché. Dans le cas d'une salle propre, l'installation de mesurage est plus complexe, mais de tels dispositifs peuvent être proposés par les ensembliers.

Pour les postes de sécurité microbiologique, on emploie la méthode de la chute de pression qui consiste à gonfler l'équipement à la pression ou la dépression de service, à fermer toutes les issues et à observer le comportement de la pression au cours du temps.

Enfin, pour la recherche des fuites, la méthode courante consiste à pulvériser localement de l'eau savonneuse ou à disposer des tissus révélateurs imprégnés d'ammoniac (dans le cas particulier des isolateurs après utilisation d'un agent stérilisant de surface).

#### **4.3.3. Recherche des fuites sur filtres ou sur caissons de filtres installés**

Pour une installation neuve ou dans le cas d'un changement de filtre, le test a pour objectif de vérifier que le montage des filtres dans les caissons terminaux des salles ou en sortie de centrale de traitement d'air s'est effectué sans endommager le média filtrant ou toute autre partie du filtre. En situation de routine pour une installation opérationnelle, ce test a pour objectif de vérifier l'absence de fuites.

Il convient de différencier et de ne pas confondre les tests d'étanchéité du constructeur avec les tests d'intégrité.

#### **Deux méthodes sont couramment employées (ISO 14644) :**

- a) Emission d'un aérosol d'essai (souvent chauffé) en amont du filtre. La détection d'éventuelles fuites se fait en aval du filtre par balayage à l'aide d'une sonde raccordée à un photomètre.
- b) Balayage du média filtrant à l'aide d'un compteur de particules. Le rapport des concentrations amont et aval donne la pénétration réelle du filtre à comparer avec la pénétration nominale.

#### **4.3.4. Essai de fuite confinement**

Il s'agit de déterminer s'il y a entrée de l'air d'une classe moins performante dans une salle propre. Cet air peut pénétrer à travers des joints, des portes, des huisseries, etc....

Le principe consiste à mesurer au compteur optique la concentration particulaire à l'extérieur et à l'intérieur de la salle, au droit de la zone suspecte. La condition de mise en œuvre du test est une concentration à l'extérieur, supérieure à celle caractérisant la salle propre, d'un facteur de 104. On sera souvent obligé de produire, à l'extérieur, un aérosol d'essai (comme celui utilisé pour la détection des fuites sur filtre installé) de façon à satisfaire cette condition.

Pour rechercher des fuites à travers des joints ou des fissures, la sonde est positionnée dans la zone étudiée, à une distance de 5 à 10 cm, et on balaye à une vitesse de 3 m / min.

La constatation d'un rapport concentration extérieure sur concentration intérieure inférieure à 1000 oriente vers l'existence d'une fuite de confinement.

#### 4.3.5. Niveau sonore

On s'intéresse au niveau sonore d'abord parce que c'est un facteur d'ambiance qui agit sur le confort et la productivité du personnel. Dans les enceintes propres où les opérateurs font souvent un travail minutieux, le niveau sonore doit être maintenu le plus faible possible pour faciliter leurs conditions de travail.

Lors d'une réception de salle propre ou lors de sa vérification périodique, on n'entrera pas dans une analyse détaillée du bruit ambiant, mais on se contentera de vérifier qu'une prescription cible est atteinte. Par exemple, moins de 65 dB (A) en tout point. Le mesurage se fait avec un sonomètre qui est essentiellement un microphone très sensible relié à une unité d'exploitation qui, globalement ou en fonction de la fréquence, traduit le signal en puissance acoustique ou en décibels.

La mesure se fait généralement avec un sonomètre réalisant des mesures en pondération mais il est plutôt recommandé de faire des vérifications sur tout le spectre, en utilisant un sonomètre fonctionnant par bande d'octave.

### 4.4. Paramètres de fonctionnement

#### 4.4.1. Pressions différentielles

L'objectif est de vérifier que les cascades de pression sont conformes aux valeurs spécifiées lors de la conception de l'installation. Avant de procéder à ce constat, on vérifie que les débits de la ventilation sont conformes aux valeurs prescrites par le cahier des charges.

Les appareils sont regroupés en 3 grandes familles :

- Les manomètres à colonne de liquide, modèle à tube incliné, qui donnent une incertitude maximale de  $\pm 3$  Pa sur l'étendue 0 à 300 Pa.
- Les micromanomètres mécaniques dont les plus sensibles couvrent l'étendue 0 à 50 Pa. L'incertitude maximale est de 2,5 Pa pour les appareils 0 à 50 Pa et 1,5% de l'échelle totale pour ceux couvrant une plage plus étendue.
- Les micromanomètres électroniques, par exemple à capteur à couche mince, sont des appareils sensibles et précis. L'incertitude est de 0,75 Pa pour un appareil couvrant la plage 0 à 50 Pa. Ils ont l'avantage d'être facilement transportables et peu encombrants.

La méthodologie consiste à mesurer par étape les cascades de pression entre les différents locaux, depuis le local le plus propre vers le moins performant.

#### **4.4.2. *La température***

Cet essai a pour objectif de montrer la capacité des systèmes de régulation à maintenir la température de l'air dans une plage plus ou moins étroite à l'intérieur de laquelle on observe des variations périodiques de ce paramètre. Lors de la réception de l'installation, le mesurage de la température nécessite des moyens à temps de réponse court vis-à-vis de la période des cycles de variation. Un système d'acquisition de données ou des enregistrements peuvent être demandés.

Outre les classiques thermomètres à dilatation de liquide (alcool...) dont le temps de réponse est généralement trop long, on emploie des sondes dont la résistance est fonction de la température. La sonde de référence est celle à résistance de platine. Les appareils courants sont à thermistance dont l'incertitude de mesure, dépendant du modèle, est d'au moins  $\pm 0,2^{\circ}\text{C}$ .

#### **4.4.3. *L'humidité relative***

L'objectif est le même que pour la température.

L'appareil de référence est le psychromètre. Mais comme on doit généralement enregistrer les résultats, on lui préfère les hygromètres à chlorure de lithium, à capacitance ou à point de rosée. L'entretien de ces appareils peut se révéler délicat et ils sont généralement accompagnés de cellules à solution saturée permettant de vérifier leur calibrage in situ.

La connaissance de l'humidité relative et de la température permet de remonter à l'humidité absolue, c'est à dire à la pression partielle de la vapeur d'eau.

#### **4.4.4. *Les débits d'air***

On est confronté à trois cas distincts :

- Mesurage du débit passant dans une gaine ;
- Mesurage du débit soufflé par une bouche ou un filtre ;
- Mesurage du débit d'un écoulement laminaire.

#### 4.4.4.1. Mesurage du débit passant dans une gaine

La méthode de référence consiste à faire passer la totalité du débit dans un organe déprimogène installé dans le plan de mesurage de la section de mesurage.

Les organes habituellement utilisés sont les débitmètres à diaphragmes, les tuyères et les tubes de Venturi. Ils sont décrits dans la norme NF X 10 102. Une valeur de référence est ainsi déduite et son incertitude est calculable suivant la norme NF S 10 106.

#### 4.4.4.2. Mesurage des débits soufflés par les bouches et les diffuseurs plafonniers

**L'anémomètre à ailettes** est utilisable sur les bouches munies d'une grille (ou d'un filtre) qui régularise le débit. On place l'appareil près de la grille et on le déplace lentement.

**Le balomètre** est un appareil qui mesure le débit transitant par une section canalisée à l'intérieur de laquelle il peut y avoir des variations d'écoulement. L'appareil est équipé de jupes ou manchons de différentes tailles de forme carrée ou rectangulaire et adaptés à la plupart des diffuseurs rencontrés. A défaut d'avoir une longueur droite suffisante, on force l'écoulement à se répartir de manière homogène. Cet appareil donne directement la valeur du débit. L'avantage d'un tel appareil est de s'affranchir des problèmes de sections et d'induction et d'offrir une meilleure répétabilité des mesures.

Le balomètre est le meilleur appareil pour mesurer les débits soufflés par les diffuseurs plafonniers.

#### 4.4.5. *La carte des vitesses*

La carte des vitesses d'un écoulement aéraulique canalisé peut être utilisée à plusieurs fins dont l'accès au débit de l'écoulement ou à la qualité d'un écoulement unidirectionnel.

Pour les appareils de mesure, la norme ISO 14611-3 retient le tube de Pitot, l'anémomètre à hélice, l'anémomètre thermique et celui à ultrasons.

Méthode de mesurage	Avantages	Inconvénients
Tube de Pitot double	- vitesses d'écoulement élevées - facile à nettoyer - robuste	- forte dépendance à la direction de l'écoulement - sensible à la turbulence - faibles vitesses non mesurables
Thermoanémométrie	- accès aux faibles valeurs de vitesse - facile à employer	- capteur sensible aux sollicitations mécaniques et à la salissure - sensible à la turbulence fragile
Anémomètre à hélice ou à moulinet	- peu sensible à la turbulence de l'écoulement - commode d'emploi	- inutilisable pour les faibles vitesses

Tableau 13 : Principales propriétés d'usage de ces trois catégories d'appareils

#### 4.4.6. La qualité des « écoulements laminaires »

En l'absence d'une norme de terminologie à venir (ISO 14 644-6), on trouve les définitions suivantes dans l'ISO 14 644.

- **Flux d'air unidirectionnel** : un régime d'écoulement de l'air dans lequel l'air s'écoule dans une seule direction, et où la vitesse mesurée en un point quelconque se situe à l'intérieur d'une tolérance spécifiée par rapport à la vitesse moyenne de l'air sur toute la surface d'une zone de travail à flux unidirectionnel.
- **Flux d'air unidirectionnel** : flux d'air maîtrisé traversant l'ensemble d'un plan de coupe d'une zone propre, possédant une vitesse régulière et des filets à peu près parallèles.
- **Flux d'air uniforme** un régime d'écoulement unidirectionnel de l'air dans lequel les vitesses mesurées à des points différents se situent dans une fourchette de pourcentage définie de la vitesse moyenne.

#### 4.4.7. Propreté particulières de l'air

On se trouve dans une situation que reconnaît la norme ISO 14 644-3 en découpant l'étendue granulométrique en trois zones :

- Les macroparticules de taille supérieure à 5 µm pour lesquelles les



utilisateurs sont invités à établir la classification qui leur convient en utilisant le « descripteur M ».

- Les particules de la zone 0,12 à 5  $\mu\text{m}$  qui, elles, font l'objet de la classification ISO ;
- Les particules ultra-fines, inférieures à 0,1  $\mu\text{m}$  pour lesquelles les utilisateurs choisissent la classification qui leur convient en utilisant le « descripteur U ».

Dans chacune de ces zones, des appareillages différents sont mis en œuvre dont certains commencent juste à s'adapter aux exigences du terrain.

#### **4.4.7.1. Le mesurage des macroparticules**

On utilise des appareils et des connaissances qui sont classiques en physique des aérosols. Le choix de la norme s'est porté sur les moyens suivants :

- prélèvement sur filtre suivi d'un comptage au microscope optique ;
- prélèvement à l'impacteur en cascade suivi, suivant les cas, d'un examen au microscope ou d'une détermination du poids recueilli ;
- mesurage direct avec un compteur optique adapté ;
- mesurage avec un compteur à temps de vol.

#### **4.4.7.2. Le mesurage des microparticules**

Le compteur optique aspire les particules de façon à ce qu'elles passent une à une dans une petite cellule éclairée. Les éclairs lumineux qui en résultent sont transformés en impulsions électriques qu'une électronique appropriée va mesurer et classer. On obtient ainsi la concentration des particules supérieures à des niveaux dimensionnels qui peuvent être ceux retenus par la classification internationale. En lumière « blanche » les appareils travaillent généralement à partir de 0,3  $\mu\text{m}$  ; il est possible, en particulier en utilisant une source « laser », de descendre de 0,12  $\mu\text{m}$ .

#### **4.4.7.3. Le mesurage des particules ultrafines**

Au dessous de 0,1  $\mu\text{m}$ , dans l'air normal, on trouve toute une variété de particules de plus en plus petites allant jusqu'à des « clusters » d'une dizaine de molécules. On les appelle noyaux de condensation (nuageuse) car elles ont un rôle important dans l'apparition des nuages dont les gouttelettes se forment sur eux, par hétéronucléation de la vapeur d'eau.

#### 4.4.8. Propreté microbiologique de l'air

Quand on parle de propreté microbiologique de l'air, les entités visées sont : (norme ISO 14 698-1).

**Particule viable** : microorganismes isolés, d'origine naturelle, ou agglomérés, capables de se multiplier pour produire une croissance dénombrable.

**Unité viable** : une particule viable, ou plusieurs particules viables agglomérées, que l'on dénombre comme une seule unité. Lorsque l'on dénombre des unités viables sur un milieu gélosé, il est d'usage de les appeler UFC.

Les particules viables sont généralement fixées sur un support particulaire inerte et plus rarement à l'état brut. Dans l'air normal, elles appartiennent à différents groupes taxonomiques, avec des propriétés biologiques différentes en ce qui concerne leur survie lors des opérations de prélèvement et leur possibilité ultérieure de culture. La concentration aérienne en unité viable, mesurée par culture, n'est généralement pas égale à la concentration en particules viables ; elle peut être très inférieure.

Du point de vue physique, les particules viables se comportent comme des particules inertes. Pour les recueillir on a donc puisé dans les moyens utilisés en physique des aérosols. Mais leurs propriétés microbiologiques ont obligé à respecter des contraintes spécifiques avec, comme conséquence, le développement d'appareillages spéciaux appelés biocollecteurs. Les principales de ces contraintes sont :

- recueil des particules viables sur un milieu gélosé, ou autre milieu propre à assurer leur survie ;
- méthode de séparation d'avec le courant d'air porteur – par impaction ou par filtration – qui minimise les chocs sur le milieu de recueil, et les forces de torsion développées par le champ aérodynamique. Il y a en effet là une cause majeure de décès ;
- conditions de prélèvement et méthodes de culture qui évitent de briser les agglomérats ;
- dans l'application salle propre, il est indispensable de prélever un grand volume d'air, mais dans un temps court, car les microorganismes déjà fixés se dessèchent et meurent sous l'effet du courant d'air ;
- l'appareil doit être stérilisable ;
- les conditions de transport de l'échantillon ou de l'appareil doivent éviter les pertes de UFC.

On définit, pour chaque appareil, les quantités suivantes (norme EN ISO 13 098).

**Efficacité d'échantillonnage physique** : capacité de l'échantillonneur à

recueillir des particules de tailles spécifiques en suspension dans l'air.

**Efficacité de conservation** : capacité de l'échantillonneur à conserver la viabilité des microorganismes en suspension dans l'air pendant la collecte et à conserver les produits microbiens intact.

**Efficacité totale d'échantillonnage** : produit de l'efficacité d'échantillonnage physique par l'efficacité de conservation.

La mise en œuvre des biocollecteurs est généralement simple et les notices explicites des constructeurs sont à suivre strictement. Beaucoup plus que pour les particules inertes, il est délicat de tirer des conclusions des résultats obtenus. C'est pourquoi une norme ISO 14 698-2 est consacrée à ce problème.

La classique boîte de Pétri (supposée stérile) que l'on dispose ouverte sur une surface horizontale, ne peut en aucun cas être un moyen de mesurage de la propreté microbiologique de l'air. Elle donne des informations qualitatives :

- si après mise en culture il y a développement de colonies, c'est que des microorganismes sont présents dans l'air de la salle ;
- si rien ne pousse, on ne peut pas conclure et surtout pas croire qu'il n'y a pas de biocontaminants dans l'air de la salle.



## **5. L'aérocontamination : une problématique incomplètement résolue**

### **5.1. De nouvelles innovations pour compléter ces techniques**

Malgré l'existence d'une panoplie maintenant assez large de techniques de protection par flux d'air ultra propre, il reste des situations encore mal couvertes. C'est le cas en particulier des zones ouvertes autour des machines et des postes de travail. En complément des salles propres et des systèmes de protection rapprochée, il est maintenant nécessaire de créer des techniques économiques et modulables pour couvrir, par des flux ultrapropres ouverts mais stables, des zones plus larges qu'une fraction de plan de travail ou de bande convoyeuse, en allant jusqu'au maintien d'une haute protection dans des régions d'ateliers ouvertes aux circulations (personnes et produits), sans cloisonnement et sans sas. Cela nécessite la mise au point de systèmes aéraulique générant des flux à larges noyaux stables, dont la réaction aux perturbations aérodynamiques soit systématiquement anticipée pour le maintien de la protection du noyau sous contrôle. Cela demande une recherche spécifique en mécanique des fluides.

### **5.2. Les verrous scientifiques et technologiques**

Ces évolutions scientifiques et technologiques nous confrontent à la nécessité de mieux comprendre et maîtriser les phénomènes aérauliques mis en jeu. Nous trouvons des verrous scientifiques communs aux procédés et à la maîtrise de l'ambiance.

Dans les procédés aérauliques, il faut trouver de nouveaux moyens pour traiter les produits, soit de manière totalement homogène, soit de manière différenciée selon les caractéristiques souhaitées. Il s'agit de créer en continu les conditions favorables aux échanges à l'interface des produits. La connaissance de ces conditions favorables requiert le couplage des phénomènes convectifs et diffusifs à la surface, au voisinage ainsi qu'à l'intérieur du produit.

La maîtrise de l'écoulement d'air au sein d'un atelier demeure difficile, il s'agit en effet de maîtriser les variables locales de la qualité de l'air (vitesse, turbulence, température, humidité,...) en fonction de l'orientation des flux d'air. La réalisation dans une même salle de zones à différents niveaux de propreté requiert une connaissance précise de ces flux d'air. Des verrous subsistent également dans la génération d'air propre ou maîtrisé en température et hygrométrie. La création de systèmes de filtration et de diffusion supportant les conditions des ateliers (humidité, condensation, lavage,...) serait un progrès important.

Bien que les protections rapprochées ouvertes se soient fortement développées, il reste de nombreux verrous technologiques à lever. Il s'agit notamment de bien maîtriser la stabilité des flux d'air propre de portée importante dans des atmosphères plus ou moins turbulentes en dehors des géométries simples de plans de travail. Ces environnements

demandent également de pouvoir, d'une part, mesurer et maîtriser les échanges aux interfaces entre flux propres et environnements pollués et, d'autre part, maîtriser les accidents créés par les obstacles fixes ou en mouvement, dans l'objectif de proposer des préventions ou des corrections de ces accidents.

### **5.3. Capteurs à mettre en place pour obtenir des variables pertinentes**

Les conditions de mesures nécessaires à la maîtrise de l'aérodynamique dans les IAA sont très particulières. Des difficultés sont rencontrées pour les mesures de vitesses, températures, humidité en milieu spécifique (hautes humidités, faibles vitesses, milieux chargés en particules...). La solution à ces problèmes passe par le développement de nouveaux capteurs ou par la définition de nouvelles variables comme par exemple l'utilisation de la DTS (Distribution des Temps de Séjour) (8). De plus, le contrôle des procédés et la régulation des paramètres d'une ambiance soulèvent la problématique de l'emplacement des capteurs (ex. : chambre froide, séchoir, hâloir).

La mesure de la biocontamination soulève aussi les interrogations. En effet, les préleveurs d'air sont d'un usage délicat car ils perturbent l'écoulement qu'ils cherchent à caractériser. Cette remarque est d'autant plus vraie dans le cas des micro-environnements qui sont en plein essor. Ceci met à nouveau en évidence la problématique de la relation entre empoussièrement et contamination aéroportée. Il faut améliorer les outils de mesure de la contamination réellement portée par l'air par le comptage à faible débit des particules viables.

En amont de la maîtrise dans les ateliers, la mise au point de procédés spécifiques nécessite la mise en œuvre de nouveaux moyens expérimentaux (laser, PIV...) au sein des laboratoires.

### **5.4 Evolution des modèles numériques pour traiter les spécificités des industries alimentaires**

L'étude des procédés aérodynamiques nécessite de prendre en compte le mieux possible des configurations spécifiques aux IA : rayonnage, palettes, produits suspendus telles que les carcasses ou encore remplissage d'un appareil par plusieurs centaines de produits. Ces écoulements autour d'obstacles complexes et multiples ne peuvent être actuellement correctement traités. Une méthodologie pour modéliser numériquement de telles configurations apparaît nécessaire (l'utilisation de macromodèles est en effet prometteuse).

L'utilisation de la CFD (Computational Fluid Dynamics) pour obtenir un modèle simplifié est également une voie à étudier pour incorporer ces modèles à un système spécifique comme une boucle de régulation.

D'autre part, il faut désormais développer des outils de modélisation

numérique pertinents pour avoir une meilleure représentation des couches limites et mieux modéliser les échanges air-produit. La connaissance des coefficients de transfert de chaleur et de matière externe produit/atmosphère, mais également interne au produit, ainsi que leur évolution au cours du procédé est en effet fondamentale pour maîtriser la qualité du produit.

Enfin, l'analyse fine de la diffusion d'air doit passer par une meilleure représentation des organes de soufflage (ventilateurs, buses et gaines textiles) et une meilleure prise en compte des écoulements à faibles vitesses ou de convection naturelle.

L'analyse du caractère tridimensionnel et instationnaire des jets turbulents requiert l'utilisation d'outils numériques de pointe telles que la LES et la simulation directe de la turbulence. Il faudra bien sûr coupler ces simulations à des mesures fines par LDV (Laser Doppler Velocimetry), PIV (Particle Image Velocimetry) et développer les méthodes basées sur l'analyse d'image. Ceci passe par des recherches communes entre des laboratoires de recherche appliquée au génie des procédés alimentaires et des laboratoires de recherche fondamentale en mécanique des fluides.





## CONCLUSION

L'air constitue avec le sol, les surfaces et l'eau, un des facteurs d'environnement pouvant être à l'origine d'une contamination des produits agro-alimentaires. L'aérobiocontamination se définit comme la contamination des produits et des hommes par l'air, véhicule qui transporte, sur des particules de différentes tailles, des micro-organismes indésirables, dangereux ou nuisibles.

Quand les valeurs atteintes sont critiques, le traitement de l'air, opération qui consiste à apporter un air neuf propre et à extraire l'air vicié des ateliers, doit être remis en question. Les éléments clés de ce traitement sont la filtration de l'air prélevé à l'extérieur, la maintenance du système de ventilation et des installations des ateliers. L'emploi du flux laminaire est réservé aux zones particulièrement sensibles.

Il est à noter, que si le traitement des surfaces ainsi que leur conception sont aujourd'hui bien normalisés en agroalimentaire, l'environnement volumétrique et sa maîtrise, autrefois une préoccupation des industries de pointe (électronique, aérospatiale), s'est imposé comme une évidence aux entreprises du secteur agroalimentaire mais il s'agit encore d'un procédé fastidieux que les professionnels du secteur commencent à peine à maîtriser.



## ANNEXES

### ANNEXE 0 : LISTING DES PRINCIPAUX TEXTES NORMATIFS APPLICABLES EN METROLOGIE

**NF EN 60 751 (C 42 330)** : Capteurs industriels à résistance thermoélectrique de platine (novembre 1995).

**NF C 42 710** : Luxmètres – Détermination des caractéristiques métrologiques, classification selon ces dernières, étalonnage, contrôle des caractéristiques principales susceptibles d'évoluer dans le temps (février 1988).

**NF C 71 121** : Méthode simplifiée de prédétermination des éclairagements dans les espaces clos et classification correspondante des luminaires (mai 1993).

**NF C 93 271** : Thermistances à coefficient de température négatif à chauffage direct. Prescriptions générales (juillet 1974).

**NF E 51 701** : Composant de VMC – Code d'essais aérauliques et acoustiques des bouches d'extraction (juin 1992).

**NF EN ISO 266 (S 30 002)** : Acoustique – Fréquences normales (juin 1997).

**NF S 30 004** : Expression des caractéristiques physiques et des caractéristiques psycho physiologiques d'un son ou d'un bruit (juin 1966).

**NF S 30 101** : Vocabulaire de l'acoustique – Définitions générales (septembre 1973).

**NF EN ISO 3746 (S 31 027)** : Détermination des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit à partir de la pression acoustique – Méthode de contrôle employant une surface de mesure enveloppante au-dessus d'un plan réfléchissant (mai 1996).

**NF EN ISO 3744** : Acoustique – Détermination des niveaux de puissance acoustique émis par les sources de bruit à partir de la pression acoustique- Méthode d'expertise dans des conditions approchant celles du champ libre sur plan réfléchissant (novembre 1995).

**NF EN ISO 11 201** : Acoustique – Bruit émis par les machines et équipements – Mesurage des niveaux de pression acoustique d'émission au poste de travail et en d'autres positions spécifiées – Méthode d'expertise dans des conditions approchant celles du champ libre sur plan réfléchissant (juin 1996).

**NF X 01 001** : Nombres normaux (décembre 1967).

**NF X 01 002** : Guide pour le choix des séries de nombres normaux et des séries comportant des valeurs plus arrondies de nombres normaux (décembre 1967).

**NF ISO 3534-1 (NF X 06 002-1)** : Statistique – Vocabulaire et symboles – Partie 1 : probabilité et termes statistiques généraux (décembre 1993).

**NF ISO 3534-2 (NF X 06 002-2)** : Statistique – Vocabulaire et symboles – Partie 2 : maîtrise statistique de la qualité (décembre 1993).

**X 07 010** : Métrologie – La fonction métrologie dans l'entreprise (octobre 2001).

**NF EN ISO 5167-1 (X 10 102/A1)** : Mesure de débit des fluides au moyen d'appareils déprimogènes – partie 1 ; Diaphragmes, tuyères et tubes de Venturi insérés dans des conduites en charge de section circulaire (octobre 1998).

**NF X 10 106** : Mesure de débit des fluides. Calcul de l'erreur limite sur une mesure de débit (septembre 1983).

**NF X 10 112** : Méthode du débit des fluides dans des conduites fermées. Méthode d'exploration du champ des vitesses pour des écoulements réguliers au moyen de tubes de Pitot doubles (septembre 1977).

**NF X 10 113** : Détermination du débit des fluides dans les conduites fermées de section circulaire. Méthode par mesure de la vitesse en un seul point (novembre 1982).

**NF ISO 7194 (X 10 114)** : Mesure du débit des fluides dans les conduites fermées. Mesure de débit dans les conduites circulaires dans le cas d'un écoulement giratoire ou dissymétrique par exploration du champ des vitesses au moyen de moulinets ou de tubes de Pitot doubles (novembre 1993).

**NF X 10 141** : Mesure du débit de gaz dans les conduites fermées. Méthode par traceurs – Partie 1 : Généralités (novembre 1982).

**X 10 231** : Distribution et diffusion d'air. Technique de mesure du débit d'air dans un conduit aéraulique (avril 1985).

**X 10 236** : Distribution d'air – Degré d'étanchéité à l'air dans les réseaux de distribution d'air en tôle (novembre 1985).

**NF X 15 110** : Mesure de l'humidité de l'air. Paramètres hygrométriques (juillet 1994).

**NF X 15 112** : Mesure de l'humidité relative des gaz – Hygromètre à condensation – Caractéristiques (décembre 1994).

**NF X 15 113** : Mesure de l'humidité relative de l'air – Hygromètre à variation d'impédance capacitif et résistif (décembre 1997).

**NF X 15 118** : Mesure de l'humidité de l'air – Psychromètres – Caractéristiques (décembre 1996).

**NF X 15 203** : Equipement de protection collective. Sorbonne de laboratoire. Généralité, classification, spécifications et méthodes d'essai (septembre 1996).

**NF X 35 103** : Principes d'ergonomie visuelle applicables à l'éclairage des lieux de travail (octobre 1990).

**NF EN 7726 (X 35 202)** : Ergonomie des ambiances thermiques. Appareils de mesure des grandeurs physiques (janvier 2002).

**NF EN ISO 7730 (NF X 35 203)** : Ambiances thermiques modérées – Détermination des indices PMV et PDD et spécifications des conditions de confort thermique (décembre 1995).

**NF X 15 111** : Mesure de l'humidité de l'air – Généralités sur les instruments de mesure – guide de choix (décembre 1993).

**NF EN 12 469 (NF X 42 136)** : Biotechnologie – Critères de performance pour les postes de sécurité microbiologique (juillet 2000).

**NF EN 13 098 (NF X 43 247)** : Atmosphères des lieux de travail. Règles pour le

mesurage de micro-organismes et d'endotoxine en suspension dans l'air (décembre 2000).

**NF EN 1822-4 (X 44 014-4)** : Filtres à air à très haute efficacité et filtres à air à très faible pénétration (HEPA et ULPA) – Partie 4 : essais d'étanchéité de l'élément filtrant (méthode d'exploration) (octobre 2000).

**NF X 44 052** : Emissions de sources fixes – Détermination de fortes concentrations massiques de poussières – Méthode gravimétrique manuelle (mai 2002).

**NF EN ISO 14 644-1 (X 44 101)** : Salles propres et environnements maîtrisés apparentés – Partie 1 : Classification de la propreté particulaire de l'air (juillet 1999).

**NF EN ISO 14 644-12 (X 44 102)** : Salles propres et environnements maîtrisés apparentés – Partie 2 : Spécifications pour les essais et le contrôle afin de prouver la conformité avec l'ISO 14 644-1 (novembre 2000).

**NF EN ISO 14 644-4 (X 44 104)** : Salles propres et environnements maîtrisés apparentés – Partie 4 : Conception, Construction et mise en fonctionnement (juillet 2001).

**ISO 10648-1** : Enceintes de confinement. Partie 1 : principes de conception (mai 1997).

**ISO 10648-2** : Enceintes de confinement. Partie 2 : classification selon leur étanchéité et méthodes de contrôle associées (décembre 1994).

## **ANNEXE 1** : LISTING DES PRINCIPAUX TEXTES NORMATIFS, EN VOIE D'HOMOLOGATION, APPLICABLES EN METROLOGIE

**ISO 14 644-3 (X 44 103)** : Salles propres et environnements maîtrisés apparentés – Partie 3 : Métrologie et méthodes d'essai.

**ISO 14 644-5 (X 44 105)** : Salles propres et environnements maîtrisés apparentés – Partie 5 : Exploitation.

**ISO 14644-6** : Salles propres et environnements maîtrisés apparentés – Partie 6 : Terminologie.

**ISO 14644-7** : Salles propres et environnements maîtrisés apparentés – Partie 7 : Enceintes séparatives (postes à air propre, boîtes à gants, isolateurs, mini environnements).

**ISO 14698-1** : Salles propres et environnements maîtrisés apparentés – Maîtrise de la biocontamination – Partie 1 : Principes généraux.



## **ANNEXE 2 : LISTE DES FIGURES**

- Figure 1 : Diagramme de Mollier  
Figure 2 : Diagramme de Whitby  
Figure 3 : Diminution du nombre de spores dispersées dans l'atmosphère en fonction du temps  
Figure 4 : Turbulence acceptable en fonction de la vitesse de l'air selon la norme ISO 7730  
Figure 5 : Classes d'empoussièrement norme NF en ISO 14644-1  
Figure 6 : Classes de salles propres  
Figure 7 : Concept général de produit  
Figure 8 : Mouvements généraux de l'air dans une salle en écoulement turbulent  
Figure 9 : visualisation de l'écoulement dans une salle  
Figure 10 : Les deux régimes d'écoulement en conduite  
Figure 11 : La stabilité de l'écoulement laminaire  
Figure 12 : Neutralisation du transfert air-surface par un écoulement laminaire horizontal  
Figure 13 : Schéma de principe de la mise en surpression  
Figure 14.1 : Tranchage du jambon ; traitement en salle propre  
Figure 14.2 : Tranchage du jambon ; traitement par protection rapprochée  
Figure 15 : Principaux symboles utilisés en traitement de l'air

## **ANNEXE 3 : LISTE DES TABLEAUX**

- Tableau 1 : Composition moyenne de l'air extérieur  
Tableau 2 : Variabilité des concentrations particulières  
Tableau 3 : Exigences thermiques pour le développement de moisissures  
*Tableau 4 : Différents contaminants rencontrés dans l'atmosphère et sur les supports d'une réserve.*  
*Tableau 5 : Classes types de propreté particulière de l'air des salles et zones propres*  
Tableau 6 : Valeurs limites recommandées de contamination microbiologique  
Tableau 7 : Classes de propreté bactériologique définies dans NF S 90 351  
Tableau 8 : Recommandations ASPEC de surveillance microbiologique de l'air dans les établissements de santé.  
Tableau 9 : Classification des filtres de moyenne et haute efficacité selon la norme EN 779  
Tableau 10 : Classification des filtres de très haute efficacité selon la norme EN 1822  
Tableau 11 : Exemples d'enceintes séparatives  
Tableau 12 : Méthodes de visualisation des régimes d'écoulement d'air (ISO 14 644)  
Tableau 13 : Principales propriétés d'usage de ces trois catégories d'appareils





## **BIBLIOGRAPHIE**

1. Al-Doory, Y. Domson, J. F. (1984). *Mould Allergy*, Edition Lea and Febiger, Philadelphia, 287 p.
2. Amgar A. (1998) *Nettoyage et désinfection dans les entreprises alimentaires*. Edition ASEPT, chapitre 6, 240 p
3. *Application of CFD to Naturally Ventilated Buildings: a Guide for Practitioners* <http://www.flovent.com/applications/hga/hga.jsp> (consulté en mai 2003).
4. *Basic facts regarding chemical exposure standards and guidelines* (mis à jour en janvier 2003) [http://www.osha.gov/SLTC/emergencypreparedness/chemical/pdf/tier\\_2\\_chemical\\_standards\\_and\\_guidelines\\_usachppm1\\_03.pdf](http://www.osha.gov/SLTC/emergencypreparedness/chemical/pdf/tier_2_chemical_standards_and_guidelines_usachppm1_03.pdf) (consulté en mars 2003).
5. Bellander T. (2001) *Public health and air pollution*. Edition Lancet , p69.
6. Bellon–Fontaine M.N. (1989) *Nettoyage et désinfection dans les industries alimentaires*. Edition Actualités scientifiques et techniques en IAA,. 130 p
7. Beudon D. *Concept de protections rapprochées pour l'industrie alimentaire développé par le programme UNIR* (mis à jour en octobre 2001) [http://www.a3p.asso.fr/frhtml/user/pdf/24\\_r17h3.pdf](http://www.a3p.asso.fr/frhtml/user/pdf/24_r17h3.pdf) (consulté en mars 2003).
8. Bonthoux F., Aubertin G., Dessagne J-M. and Serieys J-C.(1998) *Ventilation d'une aire industrielle. Modélisation par distribution des temps de séjour (DTS). Récents progrès en génie des procédés, Traceurs et méthodes de traçage*. Vol.12, N°61, p 309-315
9. Bridenne Pierre et Coffiner Pascal. *Le premier conditionnement d'un produit c'est l'air qui l'entoure*. Revue des Industries Agro-alimentaires n°501 (mis à jour avril 2003) <http://www.airstrategie.com/publicat.html> (consulté en avril 2003).
10. CBK. Site de CBK, l'air sec. *Déshumidification et déshydratation industrielle : préservation des matières hygroscopiques* <http://www.cbk.fr/prestation.htm> (consulté en juin 2003).
11. Chen P.P. and Crowe C.T (1984). *On the Monte-Carlo Method for Modelling Particle Dispersion in Turbulence, Gas-Solid Flows*. Edition ASME-FED 10, p 37- 42.
12. COTTE H. (1), WALTER C. (1), COLLIN F. (2), (1) PSA Peugeot Citroën, (2) *Caractérisation granulométrique et chimique de la pollution particulaire : étude de quelques médias de collecte*. Université Paris VI/Ecole polytechnique DCMR 15e Congrès français sur les aérosols C F A 99 8 et 9 décembre 1999 Paris ; A.S.F.E.R.A.

13. De Blay F. *Bulletin de veille scientifique du RSEIN info santé environnement intérieur* n°3 septembre 2002 [http://www.ineris.fr/actualites/download/rsein\\_3.pdf](http://www.ineris.fr/actualites/download/rsein_3.pdf). (consulté en avril 2003).
14. Diberardinis L.J. (1995) *ANSI-AIHA Z9.5 Standard for laboratory ventilation*. Edition American Industrial Hygiene Assn, New York
15. Direction de l'hygiène du milieu Santé Canada Pré Tunney Ottawa (Ontario). (1995) *Contamination fongique dans les immeubles publics. Guide facilitant la détermination et la gestion des problèmes* [http://www.hc-sc.gc.ca/hecs-sesc/qualite\\_air/pdf/fongique.pdf](http://www.hc-sc.gc.ca/hecs-sesc/qualite_air/pdf/fongique.pdf) (consulté en juin 2003).
16. Dubois-brissonnet F., Leveau J.Y. *Les biofilms et leurs conséquences en hygiène dans les industries agro-alimentaires* La Bretagne Agro-alimentaire. Septembre/octobre 1994.5, p 4-12.
17. Euzeby J.P. *Légionella. Dictionnaire de bactériologie vétérinaire* (mis à jour le 19 août 2002). <http://www.bactério.cictfr/bacterio/II/legionella.html> (consulté en juin 2003).
18. Federal standard 209 [http://www.aeg-idea.com/Federal\\_Standard\\_209.pdf](http://www.aeg-idea.com/Federal_Standard_209.pdf) (consulté en juin 2003)
19. Festy B. (1997) *La pollution atmosphérique urbaine : sources, polluants, et évolution* énergie santé 1997 ; Vol 8, p 231-241.
20. Flannigan B. Samson R et al. (1994). *Health Implications of Fungi in Indoor Environments*. Edition Elsevier, Amsterdam. p 28
21. Frentz J.C (1990) *La Fabrication du jambon cuit : nouvelles orientations*. Edition CRDA : 198 p.
22. GEPEA (GEnie des Procédés Environnement Agroalimentaire) *résultat 2001* [http://www.sciences.univnantes.fr/physique/recherche/GEPEA/eco\\_tran.html](http://www.sciences.univnantes.fr/physique/recherche/GEPEA/eco_tran.html) (consulté en janvier 2003).
23. Gregory P.H.(1973) *Microbiology of the atmosphere* .Edition Aylesbury: Leonard Hill 2<sup>ème</sup> edition volume 8. 377 p
24. Heinemann S., Beguin H., Nolard N. (1994). *Biocontamination in air-conditioning. Health implications of fungi in indoor environments*. Edition R. A. Samson. Amsterdam, Elsevier. 179 p
25. Hubin M. *Capteur de l'humidité 1ère partie : humidité et psychrométrie* [http://perso.wanadoo.fr/michel.hubin/capteurs/chimi/chap\\_h1.htm](http://perso.wanadoo.fr/michel.hubin/capteurs/chimi/chap_h1.htm) (consulté en juillet 2003).
26. Hutcheon N.B. (1973) *Le problème fondamental du conditionnement de l'air* <http://irc.nrc-cnrc.gc.ca/cbd/cbd106f.html> (consulté en avril 2003).

27. Kalechits, V. I., A.A.Kirsch, V.I.Kulibaba, O.Y.Maslakov and Y.V.Pavlov (1994) *Aerosol control and monitoring system LADA..* Journal of Aerosol Science 25(S1): p 207-239.
28. Kuster Y. *Environnement global : La dynamique des masses atmosphériques* <http://www.educnet.education.fr/obter/appliped/circula/theme/atmos22.htm> (consulté en juin 2003).
29. Lagerstrom P.A.(1996) *Laminar flow theory..* Chapitre 1 p 3-43.
30. Leveau J.Y. du département de microbiologie de l'ENSIA. *Maîtrise et gestion de la qualité de l'air* (mis à jour en novembre 2000) <http://www.a3p.asso.fr/even/pdf/leveau.pdf>. (consulté en avril 2003)
31. Madelin M.F.(1966) *The fungus spore*. Edition Butterworths London. 181p
32. Matteoli. *Notion de viscosité d'un fluide.Ecoulements visqueux, nombre de Reynolds, exemples simples.* (mise à jour le 31 août 2002) <http://www.crans.ens-cachan.fr/~matteoli/LPhys/LP12.pdf> (consulté en avril 2003).
33. Maulaurent P. Brunet J. Conservation et protection de l'art préhistorique : Lascaux victime de ses aménagements, les conditions climatiques à respectées. (mis à jour en mars 2002) <http://www.culture.gouv.fr/culture/conservation/fr/grottes/Pageshtm/humidite.htm> (consulté en juin 2003)
34. Ministère de l'environnement du gouvernement fédéral canadien *Mesures futures au Canada pour réduire les émissions de composés organiques volatils (COV) des produits de consommation et commerciaux* (mis à jour le 14 juillet 2003). [http://www.ec.gc.ca/air/agenda/VOC2003\\_f.html](http://www.ec.gc.ca/air/agenda/VOC2003_f.html) (consulté en juillet 2003).
35. Regard M (1996). *Contribution à l'étude des mouvements d'air dans le bâtiment à l'aide d'un code de champ : application à la ventilation naturelle d'un local par une ou deux grandes ouvertures* (mis à jour le 15 septembre 2000) <http://www.csidoc.insalyon.fr/these/1996/regard/chapitr1.pdf> (consulté en mars 2003)
36. Rondouin O. *Le concept de l'atelier ultrapropre dans ses aspects aérauliques* . Résumé de l'intervention présentée dans le cadre du Colloque organisé par l'ACIA et la SFPG Aéraulique et Industries alimentaires, Paris 17 et 18 janvier 2001. [http://www.asept.fr/concept\\_atelier.pdf](http://www.asept.fr/concept_atelier.pdf) (consulté en mai 2003).
37. Roquebert M.F. *Les moisissures: nature, biologie et contamination* (mis à jour en juin 1997) <http://www.culture.gouv.fr/culture/conservation/fr/cours/roqueber.htm#&4> (consulté en mars 2003)
38. Roques M., Carbonnet J. *Expérience de Reynolds ; les différents types d'écoulement.* <http://www.ac-nancy-metz.fr/enseign/physique/tp-phys/term/Reynolds/Reynolds3.htm> (Consulté en avril 2003).

39. Samson R.A. and Hoekstra E.S. (1988). *Introduction to food-born fungi* Baam, Hollande. Edition CBS, p251-260
40. Schémas types issu du logiciel de simulation SIMUL-CTA version 2.1 démo (mis à jour janvier 2002) [http://www.e2ltd.com/educ/soft/simul\\_cta.html](http://www.e2ltd.com/educ/soft/simul_cta.html) (consulté en juin 2003).
- 41 Tardif F. *le laboratoire LETI au sein du CEA de Grenoble* (mis à jour avril 2001) jour <http://www.gazettelabo.tm.fr/2002archives/publics/2001/57CEALETI.htm> (consulté en février 2003).
42. Vandeputte J. *Le monde invisible : initiation à la microbiologie* (mis à jour février 2002) <http://substancediet.free.fr/Microbiologie.html>. (consulté en avril 2003)
43. Whitby K.T. and Clark W.E. (1966) *Electrical Aerosol particle Counting and Size Distribution Measuring System for the 0.015 to 1 micron Size Range*, Tellus 18(2).
44. Zumofen M, Haxhe J.J. Site UCL faculté de médecine. *Architecture et hygiène hospitalière* (mis à jour en juin 2003) [http://www.md.ucl.ac.be/didac/hosp/architec/V.Ab\\_Les\\_flux\\_laminaires.pdf](http://www.md.ucl.ac.be/didac/hosp/architec/V.Ab_Les_flux_laminaires.pdf). (consulté en juin 2003)



## GESTION DES AEROCONTAMINATION DANS LES INDUSTRIES AGROALIMENTAIRES

NOM et Prénom :

MASOUNABE-PUYANNE Etienne

RESUME :

L'air constitue avec le sol, les surfaces et l'eau l'un des principaux facteurs de contamination des denrées alimentaires. L'aérocontamination se définit comme la contamination des produits par l'ensemble des composants de l'air qu'ils soient physiques, chimiques ou biologiques.

Le contrôle de cette contamination passe donc par la mise en place de systèmes de ventilation qui visent à maintenir au contact du produit alimentaire un air « sain » mais également par l'élaboration de normes et de mesures qui assurent à ces différents procédés un fonctionnement optimal.

Développée depuis plusieurs dizaines d'années dans le secteur des industries de pointe, ces procédés demeurent encore, pour les industriels de l'agroalimentaire, une charge financière importante et une technologie difficile à maîtriser.

Mots-clés : aérocontamination, qualité, industrie alimentaire, ventilation, flux laminaire, normes

JURY :

Président Pr

Directeur Pr Vincent CARLIER

Assesseur Dr Nicolas NUDELMANN

Adresse de l'auteur :

M MASOUNABE-PUYANNE Etienne 71 Avenue du Général De Gaulle 92130  
ISSY LES MOULINEAUX

## AEROCONTAMINATIONS MANAGEMENT IN FOOD INDUSTRY

SURNAME and Given Name:

MASOUNABE-PUYANNE Etienne

SUMMARY:

Air made with soil, surfaces and water one of the principal factor of food stuff contamination. The aerocontamination correspond to the contamination of products by the whole air components which they are physical, chemical or biological.

This contamination control goes through ventilation systeme placing aiming at uphold on contact with food stuff « healthy » air but also through norms and measures elaboration whose ensure an optimal working to this process.

Expand since several ten years in top industries sector, these process still stay, for food industries, a weighty financial cost and a technolgy hard to control

Key words: aerocontamination, quality, industry, food, ventilation, flow laminar, norms

JURY :

President Pr  
Director Pr Vincent CARLIER  
Assessor Dr Nicolas NUDELMANN

Author's adress :

M MASOUNABE-PUYANNE Etienne 71 Avenue du Général De Gaulle 92130  
ISSY LES MOULINEAUX