

Rédacteur  
*Juan Guasch Farrás*

### Table des matières

La régulation des environnements intérieurs: principes généraux . . . . .	<i>A. Hernández Calleja</i>	45.2
L'air intérieur: les méthodes de régulation et d'épuration . . . . .	<i>E. Adán Liébana et A. Hernández Calleja</i>	45.7
Les objectifs et les principes de la ventilation générale et de la ventilation par dilution . . . . .	<i>Emilio Castejón Vilella</i>	45.10
Les critères de ventilation des bâtiments non industriels . . . . .	<i>A. Hernández Calleja</i>	45.13
Les systèmes de chauffage et de climatisation . . . . .	<i>F. Ramos Pérez et J. Guasch Farrás</i>	45.18
L'ionisation de l'air intérieur . . . . .	<i>E. Adán Liébana et J. Guasch Farrás</i>	45.23

## ● LA RÉGULATION DES ENVIRONNEMENTS INTÉRIEURS: PRINCIPES GÉNÉRAUX

A. Hernández Calleja

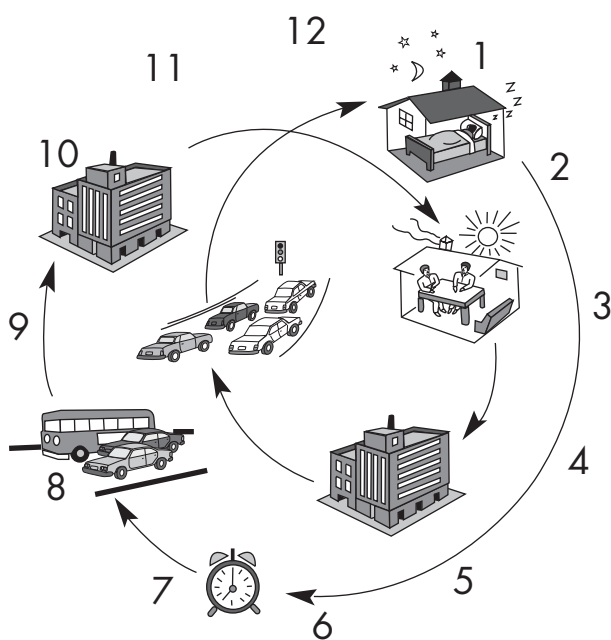
Les citoyens passent 80 à 90% de leur temps à l'intérieur, se livrant à toutes sortes d'occupations sédentaires, tant professionnelles que de loisirs (voir figure 45.1).

On a donc été amené à créer dans les locaux intérieurs un environnement plus confortable et plus homogène que l'environnement extérieur, lequel est par définition variable en fonction du climat. L'ambiance des locaux intérieurs est donc «climatisée», c'est-à-dire chauffée durant la saison froide et rafraîchie quand il fait chaud.

Pour que cette climatisation soit efficace et économique à la fois, il est nécessaire de contrôler les caractéristiques de l'air extérieur introduit dans les locaux; la plupart du temps, en effet, l'air extérieur n'a pas les caractéristiques thermiques voulues. C'est ainsi que les bâtiments sont devenus de plus en plus hermétiques, tandis qu'ils étaient dotés de systèmes destinés à contrôler d'une façon de plus en plus rigoureuse les quantités d'air atmosphérique servant à renouveler l'air intérieur stagnant.

La crise de l'énergie du début des années soixante-dix et, par conséquent, la nécessité de réaliser des économies d'énergie, ont créé un état d'esprit qui a souvent entraîné une diminution considérable des volumes d'air frais utilisés pour le renouvellement et la ventilation. La solution généralement adoptée consistait à recycler plusieurs fois de suite l'air intérieur des bâtiments dans le but de réduire les dépenses de climatisation. Cette politique a toutefois donné lieu à une autre difficulté: une très nette augmentation des doléances, de l'inconfort et des problèmes de santé des occupants, avec pour corollaire un alourdissement des coûts sociaux et financiers de l'absentéisme. Cette situation a amené les spécialistes

Figure 45.1 • Les citoyens passent 80 à 90% de leur temps à l'intérieur



à étudier l'origine de plaintes jusqu'alors jugées sans rapport avec la pollution de l'air ambiant.

Il n'a pas été nécessaire de chercher bien longtemps pour trouver les motifs de ces plaintes: les bâtiments sont construits pour être de plus en plus hermétiques, les volumes d'air traités par ventilation sont moindres, les quantités de matériaux d'isolation thermique augmentent, l'utilisation de produits chimiques et de matériaux synthétiques très divers se multiplie et la régulation individuelle du milieu ambiant, local par local, est progressivement abandonnée. Tous ces éléments aboutissent à des environnements intérieurs de plus en plus contaminés.

Les occupants des bâtiments à environnement dégradé réagissent, dans la plupart des cas, en se plaignant de tel ou tel aspect du milieu ambiant. Certains d'entre eux présentent en outre des symptômes cliniques: irritations des muqueuses (yeux, nez, gorge),

Tableau 45.1 • Nature et sources des polluants intérieurs les plus courants

	Sources d'émission	Polluants
<b>Sites extérieurs Sources fixes</b>		
	Sites industriels, production d'énergie	Dioxyde de soufre, oxydes d'azote, ozone, poussières, monoxyde de carbone, composés organiques
	Véhicules automobiles	Monoxyde de carbone, plomb, oxydes d'azote
	Sol	Radon, micro-organismes
<b>Sites intérieurs Matériaux de construction</b>		
	Pierre, béton	Radon
	Matériaux composites à base de bois, placages	Formaldéhyde, composés organiques
	Matériaux d'isolation	Formaldéhyde, fibre de verre
	Matériaux ignifuges	Amiante
	Peintures	Composés organiques, plomb
<b>Matériels et installations</b>		
	Systèmes de chauffage, cuisines	Monoxyde et dioxyde de carbone, oxydes d'azote, composés organiques, poussières
	Photocopieuses	Ozone
	Systèmes de ventilation	Fibres, micro-organismes
<b>Occupants</b>		
	Activité métabolique	Dioxyde de carbone, vapeur d'eau, odeurs
	Activité biologique	Micro-organismes
<b>Activités humaines</b>		
	Tabagisme	Monoxyde de carbone, autres composés, poussières
	Assainisseurs d'air	Fluorocarbures, odeurs
	Nettoyage	Composés organiques, odeurs
	Activités de loisirs ou artistiques	Composés organiques, odeurs

maux de tête, essoufflement, fréquence accrue des rhumes et des allergies, etc.

Toutefois, lorsqu'il s'agit de définir les facteurs possibles de déclenchement de ces plaintes, la tâche, en apparence simple, devient beaucoup plus complexe. En effet, pour établir une relation de cause à effet, il faut étudier tous les facteurs, environnementaux ou autres, pouvant influencer sur les doléances exprimées ou sur les problèmes de santé qui se manifestent.

La conclusion, après des années d'études, est que les problèmes rencontrés ont de multiples origines. En fait, on n'a réussi que très rarement à établir des relations claires de cause à effet, comme dans les cas de la maladie des légionnaires ou des cas d'irritation ou d'hypersensibilité dus à l'exposition au formaldéhyde.

Le phénomène, que l'on désigne sous le nom de *syndrome des bâtiments malsains* ou *syndrome des édifices hermétiques*, est défini par les symptômes que présentent les occupants d'un bâtiment où les doléances dues à des malaises non spécifiques sont plus fréquentes que ce que l'on peut normalement attendre.

Le tableau 45.1 donne quelques exemples de polluants courants ainsi que les sources d'émission les plus communes que l'on peut associer à une baisse de la qualité de l'air intérieur.

À part la qualité de l'air intérieur, qui dépend de la présence de polluants chimiques et biologiques, le syndrome des bâtiments malsains est attribué à bien d'autres facteurs. Certains sont physiques (chaleur, bruit, éclairage), tandis que d'autres sont d'ordre psychosocial (organisation du travail, relations professionnelles, rythme et charge de travail).

La qualité de l'air intérieur joue cependant un rôle très important dans le syndrome des bâtiments malsains et sa maîtrise pourra donc aider, la plupart du temps, à éliminer ou à atténuer les conditions qui favorisent son apparition. Il ne faut pas, pour autant, perdre de vue que la qualité de l'air n'est pas le seul facteur à considérer dans l'évaluation des environnements intérieurs.

### La régulation des environnements intérieurs

L'expérience montre que les difficultés rencontrées dans les environnements intérieurs résultent dans la plupart des cas de décisions prises au moment de la conception et de la construction du bâtiment. Certes, ces difficultés peuvent être réglées ultérieurement par des mesures correctives, mais il est plus efficace et moins onéreux de chercher à les prévenir et à les corriger durant la phase de conception.

La grande diversité des sources possibles de pollution explique la multiplicité des mesures correctives que l'on pourra prendre. Des professionnels de différentes disciplines participent à la conception d'un bâtiment: architectes, ingénieurs, architectes d'intérieur, etc. Il est donc essentiel à ce stade de prendre en compte les différents facteurs susceptibles d'éliminer ou d'atténuer les problèmes pouvant découler d'une mauvaise qualité de l'air. Les facteurs à considérer sont:

- le choix du site;
- la conception architecturale;
- la sélection des matériaux;
- les systèmes de ventilation et de climatisation utilisés pour contrôler la qualité de l'air intérieur.

#### Le choix du site de construction

L'air d'un site peut être pollué par des sources proches ou éloignées. La pollution de l'air est due en très grande partie aux gaz organiques et inorganiques produits par la combustion (véhicules, usines ou centrales électriques se trouvant à proximité) et aux particules en suspension dans l'air provenant de diverses origines.

La pollution émanant du sol est attribuable essentiellement aux composés gazeux que dégagent les matières organiques enfouies

et au radon. Ces contaminants peuvent pénétrer dans le bâtiment par des fissures des matériaux de construction au contact du sol ou par migration à travers des matériaux semi-perméables.

Lors de la phase d'étude, les différents sites possibles devraient être évalués. La localisation la plus appropriée sera choisie en tenant compte des données ci-après:

1. Données indiquant le niveau de pollution environnementale dans la zone considérée, afin d'éviter les sources de pollution éloignées.
2. Analyse des sources de pollution voisines ou proches, en tenant compte de facteurs tels que la circulation automobile et les sources possibles de pollution industrielle, commerciale ou agricole.
3. Niveaux de pollution du sol et de l'eau et, notamment, présence de composés organiques volatils ou semi-volatils, de radon et d'autres produits radioactifs de filiation du radon. Ces informations seront utiles pour arrêter le choix d'un site ou décider des mesures à prendre pour empêcher les contaminants de pénétrer dans le futur bâtiment. Parmi les mesures que l'on peut envisager, citons l'étanchéification des voies de pénétration des contaminants et l'installation de systèmes de ventilation assurant le maintien d'une surpression à l'intérieur du bâtiment.
4. Renseignements sur les conditions climatiques et les vents dominants, ainsi que sur les variations journalières et saisonnières enregistrées dans la région. Ces données sont importantes pour décider de l'orientation à donner au bâtiment.

Il sera nécessaire, par ailleurs, de maîtriser les sources locales de pollution au moyen de diverses techniques telles que le drainage, l'assainissement, la dépressurisation du sol ou l'emploi de déflecteurs.

#### La conception architecturale

L'intégrité des ouvrages est, depuis des siècles, un impératif fondamental de la planification et de l'étude des bâtiments. Aujourd'hui comme par le passé, on doit se préoccuper de la résistance des matériaux aux dégradations produites par l'humidité, les variations de température, les mouvements de l'air, les rayonnements, les agents chimiques et biologiques et les catastrophes naturelles.

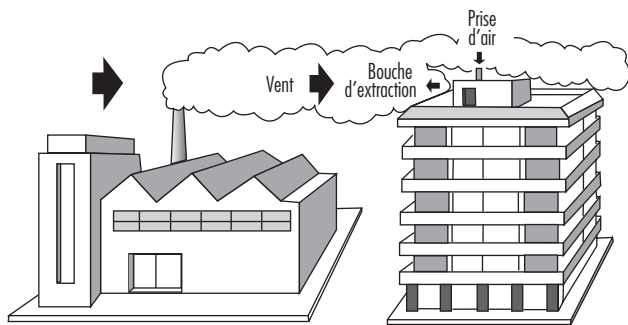
L'examen de ces facteurs, certes essentiels à la réalisation de tout projet architectural, déborde le cadre du présent article. Toutefois, il faut aussi tenir compte de la santé et du bien-être des occupants. Des décisions doivent être prises, en cours d'étude, au sujet de la conception des espaces intérieurs, du choix des matériaux, de la localisation d'éventuelles activités génératrices de pollution, des ouvertures du bâtiment vers l'extérieur, des fenêtres et du système de ventilation.

#### Les ouvertures du bâtiment

Il importe, durant la phase d'étude, de bien localiser et orienter les ouvertures de façon à minimiser la quantité de polluants pouvant pénétrer dans le bâtiment à partir des sources préalablement détectées. Les considérations ci-après sont importantes:

- Les ouvertures devraient se trouver à l'écart des sources de pollution et ne pas être exposées aux vents dominants. S'il faut, malgré tout, placer des ouvertures à proximité de sources de fumée ou de bouches d'extraction, le système de ventilation devrait être conçu de manière à créer une surpression dans cette zone afin d'éviter la réintroduction de l'air extrait, comme le montre la figure 45.2.
- Le concepteur s'attachera notamment à assurer un bon drainage et à éviter les infiltrations là où le bâtiment est en contact avec le sol (fondations, zones pavées, réseau et conduits de drainage, etc.).

Figure 45.2 • Pénétration de la pollution extérieure



- Les accès aux quais de chargement et aux garages devraient se trouver à l'écart des prises d'air et des entrées principales de l'édifice.

### Les fenêtres

On a assisté, ces dernières années, à un renversement de la tendance qui régnait dans les années soixante-dix et quatre-vingt: de plus en plus, les nouveaux projets architecturaux comportent maintenant des fenêtres ouvrantes, ce qui assure plusieurs avantages. Tout d'abord, il devient possible d'introduire de l'air frais supplémentaire dans les zones (peu nombreuses, il faut l'espérer) qui en ont besoin, pourvu que le système de ventilation soit doté dans ces zones de capteurs permettant d'éviter une dégradation de la qualité de l'air ambiant. Rappelons que la possibilité d'ouvrir une fenêtre ne garantit pas toujours que de l'air frais sera admis à l'intérieur du local; en effet, si le système de ventilation est pressurisé, l'ouverture d'une fenêtre ne permettra pas l'entrée d'air extérieur. D'autres avantages sont d'ordre purement psychosocial, comme la possibilité pour les occupants d'agir dans une certaine mesure sur leur environnement et d'avoir un accès direct sur l'extérieur.

### La protection contre l'humidité

Le principal moyen d'action est de réduire l'humidité dans les fondations du bâtiment où des micro-organismes, notamment des champignons, peuvent souvent se développer et se propager.

La déshumidification de la zone et la pressurisation du sol peuvent empêcher l'apparition d'agents biologiques et prévenir la pénétration des polluants chimiques présents dans le sol.

L'étanchéification et le contrôle des parties fermées du bâtiment qui sont les plus exposées à l'humidité de l'air sont d'autres mesures à envisager, étant donné que l'humidité peut endommager les matériaux de parement de l'immeuble, ceux-ci devenant à leur tour une source de contamination microbiologique.

### L'aménagement des espaces intérieurs

Il est important de savoir, au stade de la planification, à quel usage et à quelles activités le bâtiment est destiné. Le plus important est de se renseigner sur les activités susceptibles de générer des contaminations, cette connaissance pouvant être mise à profit pour limiter et neutraliser les sources potentielles de pollution. Citons, comme exemples de telles activités, la préparation d'aliments, l'impression et les arts graphiques, l'usage du tabac et l'exploitation d'équipements de reprographie.

Il conviendra de localiser ces activités dans des zones particulières, isolées et à l'écart des autres opérations, afin de minimiser leurs effets sur les occupants.

Il est recommandé, pour ces activités, de prévoir un système d'extraction localisé ou de doter le système de ventilation générale

de caractéristiques particulières. La première option consiste à capter les contaminants à la source. La seconde, applicable lorsque les sources sont multiples, qu'elles sont dispersées dans un espace donné ou que l'agent polluant est extrêmement dangereux, devrait répondre aux exigences suivantes: le système devrait fournir des volumes d'air frais en quantités conformes aux normes définies pour l'activité en question, il ne devrait pas recycler l'air en le mélangeant au flux général de ventilation du bâtiment et il devrait comporter une extraction forcée supplémentaire aux endroits nécessaires. Dans ces cas, il convient d'étudier soigneusement le réseau d'extraction de façon à éviter le transfert de polluants vers des locaux contigus grâce, par exemple, à la création de zones de surpression.

Il est parfois possible d'éliminer les polluants ou d'en réduire la concentration dans l'air par filtration ou par épuration chimique. Si l'on opte pour ces méthodes, il ne faut pas perdre de vue les caractéristiques physiques et chimiques des polluants. Ainsi, les systèmes de filtration permettent de dépoussiérer l'air (pourvu que le filtre soit adapté à la taille des particules à retenir), mais ils n'arrêtent pas les gaz et les vapeurs.

L'élimination de la source polluante est le meilleur moyen de lutter contre la pollution dans les espaces intérieurs. Les restrictions et interdictions s'appliquant à l'usage du tabac dans les lieux de travail en sont un bon exemple. En effet, dans les bâtiments où il est permis de fumer, on ne peut en général le faire que dans des zones réservées à cet usage, équipées de systèmes de ventilation spéciaux.

### La sélection des matériaux

Pour éviter au départ les problèmes de pollution dans un bâtiment, il convient de choisir soigneusement les matériaux de construction et de décoration et les mobiliers en fonction des activités professionnelles qui y seront exercées ainsi que des méthodes envisagées pour nettoyer, désinfecter et déparasiter les locaux. Il sera également possible de réduire, par exemple, les niveaux de composés organiques volatils en sélectionnant dans un premier tri les matériaux et mobiliers dont les taux d'émission de ces composés sont connus, et en retenant ensuite ceux dont les taux sont les plus faibles.

Aujourd'hui, bien que divers organismes et laboratoires aient procédé à des études sur les émissions de ce type, les renseignements sur les taux d'émission des matériaux de construction sont rares. Il ne faut pas oublier non plus que le nombre de ces matériaux augmente rapidement et que beaucoup ont des caractéristiques variables dans le temps.

Malgré cette difficulté, certains fournisseurs ont commencé à étudier leurs produits et à inclure, généralement à la demande de l'utilisateur ou du professionnel de la construction, des informations sur les recherches effectuées. De plus, les produits portent de plus en plus des désignations telles que *sans danger pour l'environnement* ou *non toxique*.

Il reste cependant de nombreux écueils à cet égard, liés notamment au coût et à la durée des analyses nécessaires ainsi qu'à l'absence de normes quant aux méthodes d'essai des échantillons. Il faut ajouter à cela la difficulté d'interpréter les résultats obtenus du fait que les effets sur la santé de certains contaminants sont mal connus et les désaccords entre chercheurs sur le choix à faire lorsqu'on se trouve en face de matériaux dont les émissions sont fortes, mais de courte durée et, en même temps, de matériaux qui ont de faibles niveaux d'émission, mais pendant une longue période.

On peut s'attendre, toutefois, dans les années à venir, à une intensification de la concurrence sur le marché des matériaux de construction et de décoration ainsi qu'à des interventions législatives plus strictes. Ces facteurs entraîneront la disparition de certains matériaux ou leur remplacement par des produits à plus

faible taux d'émission. Des tendances de ce genre se manifestent déjà dans le cas des adhésifs entrant dans la fabrication des moquettes de tapisserie et dans celui des peintures, qui sont maintenant exemptes de composés dangereux comme le mercure et le pentachlorophénol.

Jusqu'à ce que l'on en sache davantage et que la législation dans ce domaine produise ses effets, les décisions quant au choix des matériaux et des produits à employer dans les constructions nouvelles seront laissées aux professionnels. Voici quelques considérations qui pourront les guider dans leurs choix:

- Il faudrait disposer de renseignements fiables sur la composition chimique des produits et les taux d'émission des polluants, ainsi que sur les effets qu'ils pourraient avoir sur la sécurité, la santé et le confort des occupants. Ces renseignements devraient être fournis par les fabricants.
- On devrait sélectionner les produits dont les taux d'émission sont les plus faibles, en portant une attention particulière à la présence éventuelle de composés cancérigènes ou tératogènes, d'irritants, de substances toxiques systémiques, de composants odorants, etc. Toute utilisation d'adhésifs et de matériaux présentant de grandes surfaces d'émission ou d'absorption (matières poreuses, textiles, fibres non revêtues, etc.) devrait être notée et, dans la mesure du possible, limitée.
- Des mesures préventives devraient être prises dans la manipulation et la mise en œuvre de ces matériaux ou produits. Pendant et après leur mise en place, les locaux devraient être soigneusement ventilés et un processus de *cuisson* (voir ci-après) utilisé pour traiter certains produits. Des mesures d'hygiène adéquates devraient également être appliquées.
- L'une des méthodes recommandées pour minimiser l'exposition aux émissions de matériaux neufs durant les phases de pose et de finition ainsi que lors de la première occupation des locaux consiste à ventiler le bâtiment pendant 24 heures avec 100% d'air extérieur. Cette technique permet d'éliminer les composés organiques et d'empêcher leur rétention dans les matériaux poreux, qui pourraient autrement devenir des réservoirs et des sources ultérieures de pollution en libérant dans l'environnement les composés qu'ils auraient absorbés.
- On peut également pousser au maximum la ventilation dans les premières heures de la journée qui suit une période d'interruption du système de climatisation, en cas, par exemple, de fermeture du bâtiment ou après les fins de semaine et les vacances.
- Une technique spéciale de préconditionnement thermique ou de *cuisson* a été utilisée dans certains bâtiments pour «assainir» les matériaux neufs. Cette procédure consiste à élever la température du bâtiment pendant 48 heures ou davantage en réduisant le plus possible la circulation de l'air. La température élevée favorise la libération de composés organiques volatils, qui sont ensuite évacués par ventilation. D'après les résultats obtenus jusqu'ici, cette méthode peut être efficace dans certaines situations.

### Les systèmes de ventilation et de régulation des ambiances intérieures

La ventilation est l'un des moyens de régulation les plus efficaces pour agir sur la qualité de l'air dans les espaces clos. On dénombre tellement de sources de pollution dans ces espaces et les caractéristiques des polluants présents sont tellement diverses qu'il est pratiquement impossible de gérer tous ces paramètres dans la phase de conception du bâtiment. La pollution engendrée par les occupants eux-mêmes (du fait de leurs activités et des produits qu'ils utilisent pour leur hygiène personnelle) en est un bon exemple. En règle générale, ces sources de pollution échappent à la volonté du concepteur.

Tableau 45.2 • Caractéristiques de base d'un système de ventilation par dilution

Composante ou fonction	Caractéristiques et mesures à prendre
Dilution par l'air extérieur	Assurer un volume d'air minimal par occupant et par heure. Assurer un nombre minimal de renouvellements de l'air intérieur par heure. Accroître l'apport d'air extérieur en fonction de l'intensité des sources de pollution. Assurer l'extraction directe vers l'extérieur de l'air des locaux où ont lieu des activités génératrices de pollution.
Emplacement des prises d'air	Eviter de placer les prises d'air à proximité des émanations de sources de pollution connues. Eviter les zones proches d'eaux stagnantes ou d'aérosols émis par des tours de refroidissement. Protéger les prises d'air contre la pénétration d'animaux et empêcher les oiseaux de se percher ou de faire leur nid à proximité.
Emplacement des bouches d'extraction d'air	Placer les bouches d'extraction des prises d'air le plus loin et le plus haut possible. Les orienter en sens contraire des prises d'air.
Filtration et épuration	Prévoir une filtration mécanique et électrique des poussières. Prévoir l'élimination chimique des polluants.
Prévention de la contamination microbologique	Eviter de placer des matériaux poreux en contact direct avec des courants d'air, notamment dans les canalisations de distribution. Eviter que la condensation ne forme des flaques d'eau stagnante dans les climatiseurs. Etablir un programme d'entretien préventif et prévoir le nettoyage périodique des humidificateurs et des tours de refroidissement.
Distribution de l'air	Prévenir la formation de zones mortes (non balayées par la ventilation) et la stratification de l'air. Mélanger, de préférence, l'air là où il est respiré par les occupants. Maintenir dans chaque local une pression adaptée aux activités qui s'y déroulent. Réguler les systèmes de ventilation et d'extraction de façon à maintenir l'équilibre entre les deux.

La ventilation constitue donc la méthode normalement utilisée pour diluer et éliminer les contaminants des locaux pollués. Elle peut se faire avec de l'air extérieur propre ou avec de l'air recyclé convenablement épuré.

De nombreux facteurs interviennent dans la conception d'un système de ventilation pouvant agir efficacement contre la pollution. Citons notamment la qualité de l'air extérieur devant être utilisé, les exigences spéciales qu'imposent certains polluants ou leurs sources d'émission, l'entretien préventif du système de ventilation (qui doit lui-même être considéré comme une source possible de contamination) et la distribution de l'air à l'intérieur du bâtiment.

Le tableau 45.2 résume les principaux points à considérer dans la conception d'un système de ventilation pouvant assurer une ambiance intérieure de qualité.

Dans un système typique de ventilation et de climatisation, l'air prélevé à l'extérieur et mélangé dans une certaine proportion à l'air recyclé subit plusieurs phases de conditionnement: il est généralement filtré, puis chauffé ou refroidi suivant la saison, et enfin humidifié ou déshumidifié selon les besoins.

Une fois traité, l'air est amené par des conduits dans toutes les parties du bâtiment et distribué par des grilles de diffusion. Il se mélange à l'air présent dans les locaux, échangeant de la chaleur et renouvelant l'atmosphère intérieure avant d'être aspiré, dans chaque local, par les conduits de retour ou d'extractions.

La quantité d'air extérieur à utiliser pour diluer et éliminer les polluants fait encore l'objet de nombreuses études et controverses. Ces dernières années, les recommandations concernant l'apport d'air extérieur et les normes de ventilation publiées ont évolué, le plus souvent dans le sens d'une augmentation des volumes d'air extérieur introduits. On a constaté cependant que ces mesures ne suffisent pas pour contrôler efficacement toutes les sources de pollution. La raison en est que les normes définies se fondent sur une occupation donnée des locaux et négligent d'autres sources importantes de pollution, telles que les matériaux de construction, les mobiliers et la qualité de l'air prélevé à l'extérieur.

En conséquence, l'étude de la ventilation devrait se baser sur trois considérations fondamentales: la qualité de l'air que l'on veut obtenir, la qualité de l'air extérieur et la charge totale de pollution dans le local à ventiler. C'est le point de départ des travaux menés par le professeur P.O. Fanger et son équipe (Fanger, 1988, 1989) en vue d'établir de nouvelles normes de ventilation répondant aux exigences de qualité de l'air et assurant un niveau de confort jugé acceptable par les occupants.

L'un des facteurs qui déterminent la qualité de l'air intérieur est la qualité de l'air extérieur. Par leur nature, les sources extérieures de pollution (circulation automobile, activités industrielles ou agricoles, etc.) sont indépendantes de la volonté des concepteurs, des propriétaires et des occupants du bâtiment. C'est là que les autorités responsables de la protection de l'environnement doivent intervenir pour définir des règles et veiller à leur application. Il

existe cependant de nombreux moyens d'action pouvant contribuer à éliminer ou à réduire la pollution atmosphérique.

Comme nous l'avons déjà mentionné, il importe d'étudier soigneusement la localisation et l'orientation des prises d'air et des bouches d'extraction, afin d'éviter la réintroduction de la pollution provenant du bâtiment lui-même et de ses installations (tours de refroidissement, bouches d'extraction des cuisines et des toilettes, etc.), ou encore des constructions situées dans son voisinage immédiat.

Si l'on constate que l'air extérieur ou l'air recyclé est pollué, les mesures préconisées sont le filtrage et l'épuration. La méthode la plus efficace d'élimination des poussières est l'emploi de filtres électrostatiques et mécaniques; ceux-ci seront d'autant plus efficaces qu'ils seront bien adaptés à la taille des particules à éliminer.

L'emploi de systèmes d'élimination des gaz et des vapeurs par absorption ou adsorption chimique est rare hors des établissements industriels. Toutefois, il est courant de recourir dans les bâtiments ordinaires à des systèmes qui masquent le problème, en particulier celui des odeurs, au moyen de désodorisants.

L'ionisation et l'ozonisation sont d'autres techniques possibles d'épuration et d'amélioration de la qualité de l'air, auxquelles il ne faudrait cependant faire appel qu'avec la plus grande prudence, tant qu'on ne connaîtra pas mieux leurs propriétés réelles et leurs éventuels effets négatifs sur la santé.

Une fois que l'air a été traité et refroidi ou chauffé, il est introduit dans les espaces intérieurs. La qualité de la distribution dépendra en grande partie du modèle, du nombre et de l'emplacement des grilles de diffusion.

Compte tenu des divergences d'opinion qui subsistent quant à l'efficacité des différentes méthodes de mélange de l'air, il s'est trouvé des concepteurs pour installer dans certains cas des systèmes de distribution d'air dont les grilles de diffusion sont logées dans le plancher ou les murs au lieu du plafond. De toute façon, l'emplacement des registres de retour d'air devrait être étudié avec soin afin d'éviter de reprendre de l'air frais plutôt que de l'air usé et d'assurer un mélange complet de l'air (figure 45.3).

La distribution de l'air peut poser des problèmes très différents, selon le cloisonnement et l'agencement des espaces de travail. Par exemple, dans les locaux paysagers où les grilles de diffusion sont au plafond, le mélange de l'air peut être incomplet. Le problème tend à se compliquer quand le système de ventilation utilisé est d'un type à débit variable. Dans ce cas, les conduits de distribution sont dotés à leurs extrémités de dispositifs pouvant modifier le débit de l'air en fonction des informations fournies par les thermostats de zone.

Des difficultés peuvent également surgir quand l'air circule à faible débit à travers un certain nombre de ces dispositifs: dès que le local a atteint la température de consigne du thermostat, la puissance du ventilateur qui souffle l'air est automatiquement réduite. Le débit total de l'air dans les conduits peut alors diminuer suffisamment pour que l'introduction d'air frais extérieur soit totalement interrompue. On peut éviter cette situation et maintenir en permanence un débit minimal d'air frais en plaçant des détecteurs qui commandent le volume introduit au niveau des prises d'air.

Le cloisonnement total ou partiel des locaux occasionne souvent des blocages du flux d'air. Il existe différents moyens de corriger cette situation. Le premier consiste à séparer les cellules individuelles par des panneaux comportant une ouverture à leur partie inférieure. On peut également installer des souffleries supplémentaires et poser des grilles de diffusion au niveau du plancher. L'utilisation de ventilo-convecteurs d'appoint favorise le mélange de l'air et permet un contrôle individualisé de la température d'un local donné. Sans sous-estimer l'importance de la qualité de l'air en soi et des moyens de la maîtriser, rappelons qu'un environnement intérieur confortable est en dernière analyse

Figure 45.3 • Exemple montrant comment la distribution d'air frais peut être court-circuitée dans un local

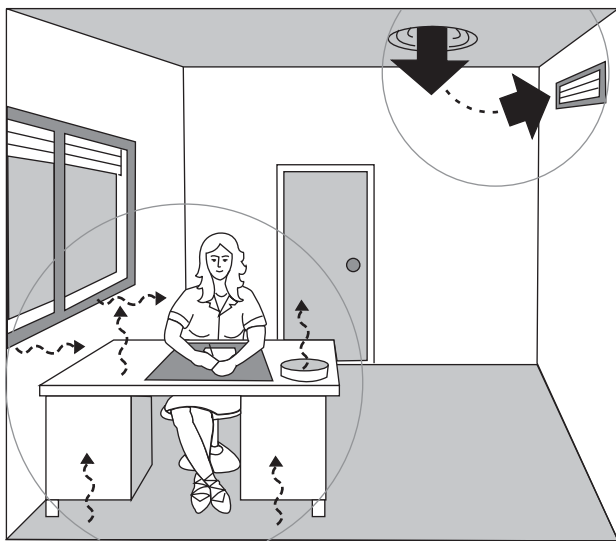


Tableau 45.3 • Mesures de contrôle de la qualité de l'air intérieur et effets sur le milieu ambiant

Mesures	Effets
<b>Ambiance thermique</b>	
Augmentation du volume d'air frais	Augmentation des courants d'air
Réduction de l'humidité relative pour prévenir la pollution microbiologique	Air trop sec
<b>Ambiance acoustique</b>	
Apport intermittent d'air extérieur pour économiser l'énergie	Exposition intermittente au bruit
<b>Ambiance visuelle</b>	
Réduction de l'éclairage fluorescent afin d'abaisser la contamination photochimique	Eclairage insuffisant
<b>Ambiance psychosociale</b>	
Locaux paysagers	Manque d'intimité, absence d'un espace de travail personnel

obtenu par un bon équilibre entre les différents éléments qui le déterminent. Toute action, positive ou négative, qui modifie un élément sans tenir compte des autres peut compromettre leur équilibre et susciter de nouvelles plaintes des occupants. Les tableaux 45.3 et 45.4 montrent comment certaines mesures visant à améliorer la qualité de l'air intérieur peuvent avoir des répercussions négatives sur d'autres éléments et de quelle façon la modification de l'environnement de travail peut influencer sur la qualité de l'air intérieur.

Tableau 45.4 • Modifications de l'environnement de travail et leurs effets sur la qualité de l'air ambiant

Mesures	Effets
<b>Ambiance thermique</b>	
Détermination de l'apport d'air extérieur en fonction de considérations thermiques	Volumes insuffisants d'air frais
Utilisation d'humidificateurs	Risques microbiologiques
<b>Ambiance acoustique</b>	
Emploi accru de matériaux insonorisants	Risque de dégagement de polluants
<b>Ambiance visuelle</b>	
Eclairage strictement artificiel	Insatisfaction des occupants, dépérissement des plantes, développement d'agents microbiologiques
<b>Ambiance psychosociale</b>	
Emploi de matériels tels que photocopieuses et imprimantes dans les locaux de travail	Augmentation du niveau de pollution

Au stade de la conception, la qualité de l'environnement global d'un bâtiment dépend, dans une large mesure, de la manière de gérer ce problème, mais beaucoup aussi d'une attitude positive envers les occupants. Ceux-ci sont les meilleurs «détecteurs» dont les exploitants puissent se servir pour juger le fonctionnement des installations destinées à assurer la qualité de l'environnement intérieur.

Les systèmes complètement automatisés, qui régissent toutes les conditions de l'ambiance intérieure — éclairage, température, ventilation, etc. — en fonction de critères strictement objectifs tendent à avoir un effet négatif sur le bien-être psychologique et sociologique des occupants, qui ont alors l'impression d'être plus ou moins privés de la possibilité d'agir pour créer des conditions d'ambiance répondant à leurs besoins. En outre, il est parfois impossible d'adapter les systèmes de ce type aux exigences environnementales nouvelles résultant d'un changement des activités exercées dans un local donné, du nombre de personnes qui y travaillent ou de l'aménagement des locaux.

La solution pourrait consister à installer un système de gestion centralisé doté de commandes locales que les occupants puissent régler. Ce concept, très souvent appliqué en matière d'environnement visuel (éclairage général complété par des éclairages localisés), devrait être étendu à d'autres domaines, par exemple, à la gestion à la fois centrale et locale du chauffage et de la climatisation, de l'apport d'air frais, etc.

Bref, on peut dire, dans chaque cas, qu'il faudrait qu'une partie des conditions d'ambiance soit optimisée au moyen d'une gestion centralisée fondée sur des considérations de sécurité, de santé et d'économie, et que le réglage des conditions locales soit laissé aux utilisateurs des locaux, qui peuvent avoir des réactions et des besoins différents face à des conditions données. Des compromis de ce genre auraient sans nul doute des effets bénéfiques sur la satisfaction, le bien-être et la productivité des occupants.

## L'AIR INTÉRIEUR: LES MÉTHODES DE RÉGULATION ET D'ÉPURATION

*E. Adán Liébana et A. Hernández Calleja*

La qualité de l'air à l'intérieur d'un bâtiment dépend d'une série de facteurs et, notamment, de la qualité de l'air extérieur, de la conception du système de ventilation et de climatisation, des conditions de fonctionnement et de maintenance de ce système et des sources intérieures de contamination. D'une manière générale, la concentration d'un contaminant dans un espace intérieur est déterminée par la différence entre ses taux de production et d'élimination.

En ce qui concerne la production de polluants, les sources peuvent être, comme on l'a vu, externes ou internes. Les sources externes comprennent la pollution atmosphérique due aux processus de combustion industriels, à la circulation automobile, aux centrales électriques, etc., ainsi que les sources de pollution proches des prises d'air (tours de refroidissement ou air rejeté par les systèmes d'extraction d'autres bâtiments) et les émanations des sols contaminés (radon, fuites de réservoirs de carburant, pesticides).

Parmi les sources de pollution interne, il convient de citer les systèmes mêmes de ventilation et de climatisation du bâtiment (principalement la contamination microbiologique de toute partie de ces systèmes), les matériaux utilisés pour la construction et la décoration du bâtiment et les occupants. Plus précisément, les sources de contamination intérieure peuvent comprendre la fumée de tabac, les laboratoires de photographie et autres, les photocopieuses, les presses d'imprimerie, les gymnases, les salons

de beauté, les cuisines et cafétérias, les locaux sanitaires, les garages et les chaufferies. Les locaux abritant ces sources devraient être équipés d'un système de ventilation générale, mais l'air qui en est extrait ne devrait pas être recyclé dans le bâtiment. Si la situation l'exige, ils devraient également être dotés d'un système de ventilation localisée fonctionnant par extraction.

L'évaluation de la qualité de l'air intérieur comprend notamment le mesurage et l'examen des contaminants pouvant être présents dans le bâtiment. Plusieurs indicateurs permettent d'estimer cette qualité, par exemple la concentration en monoxyde et en dioxyde de carbone, les concentrations totales en composés organiques volatils et en particules en suspension, ainsi que le taux de renouvellement de l'air. Différents critères ou valeurs cibles ont été définis pour l'évaluation de certaines des substances présentes dans les espaces intérieurs. On peut les trouver dans diverses normes et recommandations, telles que les principes directeurs pour la qualité de l'air intérieur publiés par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et les normes de la Société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)).

Toutefois, comme beaucoup d'autres substances n'ont encore fait l'objet d'aucune norme, il est recommandé pour l'instant d'appliquer les valeurs et critères établis pour les environnements industriels par la Conférence américaine des hygiénistes gouvernementaux du travail (American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) (ACGIH, 1992), après application de marges de sécurité ou de facteurs de correction de l'ordre d'un demi, d'un dixième ou d'un centième des valeurs prescrites, selon les cas.

Les moyens de régulation de la qualité de l'air intérieur peuvent se subdiviser en deux grands groupes: les mesures de contrôle des sources de pollution et les mesures de contrôle de l'ambiance par ventilation et par épuration de l'air.

### Les mesures de contrôle des sources de pollution

Différents moyens peuvent servir à maîtriser les sources de pollution. Les principaux sont les suivants:

5. *Suppression.* La suppression de la source est le moyen idéal pour maîtriser la qualité de l'air intérieur puisque ses résultats sont définitifs et ne nécessitent aucune autre mesure de maintenance. On y fait appel lorsque la source de pollution est connue, comme dans le cas de la fumée du tabac, et qu'il n'y a pas lieu de trouver un produit pouvant être substitué à l'agent contaminant.
6. *Substitution.* On peut, dans certains cas, remplacer le produit qui est à l'origine de la contamination (produit servant au nettoyage, à la décoration ou à d'autres fins) par un autre qui assure la même fonction sans être aussi toxique ou sans présenter autant de risques pour les utilisateurs.
7. *Isolement ou confinement spatial.* Les mesures prises, dans ce cas, visent à réduire l'exposition en limitant l'accès à la source de pollution. Elles consistent à placer des barrières (partielles ou totales) ou des enceintes de confinement autour de la source pour abaisser au minimum la contamination de l'air ambiant et réglementer l'accès des occupants à la zone environnante. Les espaces ainsi confinés devraient être équipés de systèmes de ventilation supplémentaires pouvant extraire l'air contaminé et établir, en cas de besoin, des flux d'air dirigés. Citons en exemple les fours fermés, les salles de chaudières et les locaux de photocopie.
8. *Scellement de la source.* Cette méthode consiste à employer des matériaux qui arrêtent ou minimisent les émissions de contaminants. Elle a été proposée pour empêcher la dispersion des fibres d'amiante contenues dans les matériaux isolants utilisés

à une certaine époque ou pour inhiber l'émission de formaldéhyde par les cloisons traitées aux résines. Dans les bâtiments contaminés par des émanations de radon, cette technique est utilisée pour sceller les briques de mâchefer et boucher les fissures dans le plancher et les murs des sous-sols au moyen de polymères qui empêchent la pénétration de ce gaz émis par le sol. On peut également se servir d'une peinture époxy et d'un mastic polymère à base de polyéthylène ou de polyamide pour empêcher la contamination par infiltration à travers les murs et le plancher.

9. *Ventilation par extraction localisée.* Les systèmes de ventilation localisée sont basés sur le captage du polluant à la source même ou aussi près que possible de la source. Le captage est réalisé au moyen d'une hotte qui aspire le polluant dans un courant d'air qu'une soufflerie et des canalisations acheminent ensuite vers un épurateur. Si l'air extrait ne peut pas être épuré ou filtré, il devrait être rejeté à l'extérieur et non recyclé à l'intérieur du bâtiment.

### Les mesures de contrôle de l'ambiance

L'environnement intérieur des bâtiments non industriels comporte en général de nombreuses sources de pollution qui sont souvent très dispersées. Le système auquel on recourt le plus couramment pour empêcher la pollution intérieure ou la prévenir est donc la ventilation, générale ou par dilution. La ventilation consiste à déplacer et à diriger l'air de manière à capter les polluants à la source, à les contenir et à les déplacer dans un réseau de canalisations. De plus, la ventilation générale permet de réguler les caractéristiques thermiques de l'ambiance intérieure par conditionnement et recirculation de l'air (voir l'article «Les objectifs et les principes de la ventilation générale et de la ventilation par dilution», plus loin dans le présent chapitre).

Pour diluer la pollution intérieure, une augmentation du débit d'air extérieur n'est conseillée que si le système de ventilation a une capacité suffisante. Si ce n'est pas le cas, elle pourrait provoquer une chute de pression dans d'autres parties du système ou empêcher un conditionnement satisfaisant de l'air intérieur. Pour assurer un maximum d'efficacité, les mesures suivantes sont recommandées: installer des extracteurs localisés à proximité des sources de pollution; éviter de recycler l'air chargé de polluants; placer les occupants près des diffuseurs d'air et placer les sources polluantes près des bouches d'extraction; expulser les polluants par le plus court chemin possible; maintenir les espaces contenant des sources localisées de pollution à une pression inférieure à la pression atmosphérique extérieure.

Ces nombreux problèmes liés à la ventilation semblent être dus à un volume insuffisant d'air extérieur. Toutefois, une mauvaise distribution de l'air peut également influencer sur la qualité de l'ambiance intérieure. Ainsi, dans les locaux très hauts de plafond où l'air chaud (moins dense) arrive par le haut, il se produit une stratification thermique qui peut empêcher la ventilation de diluer la pollution présente. La localisation des grilles de diffusion et d'extraction par rapport aux occupants et aux sources de contamination appelle donc une attention particulière lors de la conception du système de ventilation.

### Les techniques d'épuration de l'air

Les systèmes d'épuration de l'air devraient être conçus strictement pour des types bien précis de polluants. Une fois le système installé, un entretien régulier empêchera qu'il ne devienne lui-même source de contamination. Six méthodes utilisées pour éliminer les polluants sont exposées ci-après.

#### La filtration des particules

La filtration permet de retenir les liquides et les solides en suspension, mais non les gaz et les vapeurs présents dans l'air. Les filtres

piègent les particules par obstruction, impact, interception, diffusion ou attraction électrostatique. La filtration est indispensable dans un système de climatisation intérieure pour plusieurs raisons: empêcher l'accumulation d'impuretés pouvant réduire l'efficacité du chauffage ou du refroidissement; prévenir la corrosion du système par certaines particules (acide sulfurique, chlorures); éviter les déséquilibres de pression provoqués par les dépôts de poussières sur les pales des ventilateurs; prévenir la transmission de fausses informations aux dispositifs de commande automatique du système par suite de l'encrassement des capteurs.

Les systèmes de filtration intérieurs devraient de préférence comprendre au moins deux filtres disposés en série. Le premier, appelé préfiltre, est censé retenir uniquement les particules de plus gros calibre. Il est en général remplacé fréquemment afin de prolonger la durée utile du filtre secondaire. Plus efficace que le premier, celui-ci peut capter les spores fongiques, les fibres synthétiques et, d'une façon générale, des poussières plus fines que celles que retient le préfiltre. Les filtres utilisés devraient être suffisamment fins pour capter les particules irritantes ou toxiques.

Les filtres sont choisis d'après leur rendement, leur capacité d'accumulation de poussières, la chute de pression (perte de charge) qu'ils provoquent et le degré de pureté de l'air recherché. Le rendement d'un filtre se mesure selon les normes ASHRAE 52-76 et Eurovent 4/5 (ASHRAE, 1992; CEN, 1979). Le pouvoir de *rétenion* exprime la masse de poussières retenue par volume d'air filtré; il est utilisé pour caractériser les filtres qui n'arrêtent que les grosses particules (filtres dits à faible et moyen rendement). Le pouvoir de rétention se mesure en faisant passer à travers le filtre un aérosol de poussière synthétique dont la concentration et la granulométrie sont connues. La partie retenue est mesurée par gravimétrie.

L'*efficacité* d'un filtre s'exprime par le nombre de particules retenues par unité de volume d'air filtré. C'est le paramètre employé pour caractériser les filtres qui arrêtent les particules fines. Pour calculer l'efficacité, on fait passer à travers le filtre un aérosol de particules d'un diamètre moyen compris entre 0,5 et 1 µm. On se sert ensuite d'un opacimètre pour déterminer, d'après l'opacité causée par le sédiment, la quantité de particules captées.

Les filtres dits «à haute efficacité pour les particules d'air», ou filtres HEPA, sont caractérisés par l'indice DOP, déterminé au moyen d'un aérosol obtenu par vaporisation et condensation de dioctylphthalate (DOP), opération qui donne des particules de 0,3 µm de diamètre. Cette méthode se fonde sur la diffusion de la lumière par les gouttelettes de dioctylphthalate: l'intensité de la lumière diffusée captée en aval du filtre est proportionnelle à la concentration superficielle du dioctylphthalate. L'efficacité du filtre se mesure par l'intensité relative de la lumière diffusée avant et après filtration de l'aérosol. Pour qu'un filtre puisse avoir la désignation HEPA, son efficacité doit être supérieure à 95 ou à 99,97%, respectivement.

Bien qu'il y ait une relation directe entre les trois méthodes de mesure du rendement d'un filtre, les résultats qu'elles donnent ne sont pas directement comparables. Par ailleurs, l'efficacité d'un filtre diminue avec l'encrassement, et l'appareil peut devenir lui-même une source d'odeurs et de contamination. La durée utile d'un filtre haute efficacité peut être considérablement prolongée en installant un ou plusieurs filtres de moindre efficacité en amont. Le tableau 45.5 indique l'efficacité initiale, finale et médiane de différents filtres suivant les critères définis par la norme ASHRAE 52-76 pour des particules de 0,3 µm de diamètre.

#### La précipitation électrostatique

Cette méthode permet également de retenir les matières particulaires. Dans un filtre électrostatique, les particules contenues dans le flux d'air sont ionisées, puis captées par une électrode collectrice. L'ionisation se produit quand l'effluent contaminé traverse

Tableau 45.5 • Efficacité des filtres (selon la norme ASHRAE 52-76) pour des particules de 0,3 µm de diamètre

Type de filtre	Test d'efficacité ASHRAE 52-76		Efficacité (%)		
	Test optique («dust spot») (%)	Test pondéral («arrestance») (%)	Initiale	Finale	Médiane
Efficacité moyenne	20-30	92	1	25	15
Efficacité moyenne	40-45	96	5	55	34
Haute efficacité	60-65	97	19	70	50
Haute efficacité	80-85	98	50	86	68
Haute efficacité	90-95	99	75	99	87
HEPA 95%	—	—	95	99,5	99,1
HEPA 99,97%	—	—	99,97	99,7	99,97

le champ électrique engendré par la haute tension appliquée entre une électrode collectrice et une électrode de décharge. L'électrode collectrice présente une grande surface qui porte habituellement une charge positive, l'électrode de décharge portant une charge négative.

Les principaux facteurs influant sur l'ionisation des particules sont l'état et le débit de l'effluent, ainsi que les caractéristiques des particules (taille, concentration, résistance, etc.). L'efficacité de captage augmente avec l'humidité, la taille et la densité des particules et diminue lorsque la viscosité de l'effluent augmente.

Les filtres électrostatiques sont très efficaces pour arrêter les particules solides et liquides, même lorsque leur calibre est très fin. Ils sont en outre utilisables en présence de débits élevés et de hautes températures. La perte de charge qu'ils occasionnent est minimale. Ils présentent certains inconvénients: leur coût, leur encombrement et les risques associés aux très hautes tensions de fonctionnement, en particulier dans les applications industrielles.

Ces filtres sont utilisés tant en milieu industriel, pour réduire les émissions de particules, qu'en milieu résidentiel, pour améliorer la qualité de l'air intérieur. Il s'agit dans ce cas de petits appareils fonctionnant à des tensions de 10 000 à 15 000 volts. Ils sont équipés d'ordinaire d'un système de régulation automatique assurant en permanence le maintien d'une tension suffisante pour produire l'ionisation, mais pas assez élevée pour provoquer une décharge entre les deux électrodes.

#### La production d'ions négatifs

Cette méthode permet également d'éliminer les particules en suspension dans l'air. Certains auteurs la préconisent pour créer des environnements plus sains. Toutefois, son efficacité est encore à l'étude, de même que ses effets sur la santé et le confort.

#### L'épuration par adsorption

Cette méthode permet de capter les polluants gazeux ou à l'état de vapeur tels que le formaldéhyde, le dioxyde de soufre, l'ozone, les oxydes d'azote et les vapeurs organiques. L'adsorption est un phénomène physique dans lequel des molécules de gaz sont

piégées par un adsorbant, c'est-à-dire un solide poreux présentant une très grande surface spécifique. Pour débarrasser l'air de ses contaminants gazeux, on le fait passer dans une cartouche remplie d'adsorbant, le plus souvent du charbon actif, qui retient toute une série de gaz inorganiques et de composés organiques, tels que les hydrocarbures aliphatiques, chlorés et aromatiques, les cétones, les alcools et les esters.

Le gel de silice, autre adsorbant inorganique, sert à retenir les composés polaires tels que les amines et l'eau. Il existe aussi des adsorbants organiques formés de polymères poreux. Précisons que les adsorbants ne peuvent retenir qu'une fraction des polluants qui les traversent et qu'une fois saturés ils doivent être régénérés ou remplacés. On se sert également d'adsorbants solides formés d'un mélange d'alumine et de charbon activés imprégnés de réactifs spécifiques. Certains oxydes métalliques, par exemple, retiennent les vapeurs de mercure, le sulfure d'hydrogène et l'éthylène. Il faut rappeler que le dioxyde de carbone n'est pas retenu par adsorption.

### L'épuration par absorption

L'élimination des gaz et des vapeurs par absorption fait appel à une réaction chimique entre les molécules polluantes et la solution absorbante qu'elles traversent. C'est un processus sélectif qui utilise des réactifs très spécifiques choisis en fonction des polluants à capturer.

Le réactif est généralement dissous dans de l'eau et doit être, comme dans le cas des adsorbants, remplacé ou régénéré avant son épuisement. Etant donné que l'absorption est fondée sur le passage du polluant d'une phase gazeuse à une phase liquide, les propriétés physiques et chimiques du réactif, notamment sa solubilité et sa réactivité, revêtent une grande importance. D'autres aspects ont également des effets sensibles sur le changement de phase: le pH, la température et la surface de contact entre gaz et liquide. Lorsque le polluant est très soluble, il suffit de le faire barboter dans la solution pour le fixer. S'il ne l'est pas, on se sert de systèmes présentant une grande surface de contact entre gaz et liquide. Une liste de quelques réactifs et des contaminants qu'ils peuvent absorber figure dans le tableau 45.6.

### L'ozonisation

Cette méthode d'amélioration de la qualité de l'air intérieur se base sur l'utilisation de l'ozone pour retenir les contaminants en suspension dans l'air. L'ozone s'obtient en soumettant de l'oxygène à un rayonnement ultraviolet ou à une décharge électrique. En raison de son grand pouvoir oxydant, l'ozone est indiqué comme agent bactéricide, désodorisant et désinfectant, ainsi que pour la neutralisation des gaz et vapeurs nocifs. Il sert également à assainir des locaux contenant de fortes concentrations de monoxyde de carbone. En milieu industriel, on l'utilise pour traiter l'air des cuisines, des cafétérias, des usines de conditionnement des aliments et du poisson, des usines de produits chimiques, des installations de traitement d'eaux usées, des usines de caoutchouc,

des installations frigorifiques, etc. Dans les bureaux, il est employé dans les installations de climatisation pour améliorer la qualité de l'air intérieur.

L'ozone est un gaz bleuâtre d'une odeur pénétrante caractéristique à concentration élevée; il est toxique, voire mortel, pour l'humain. Il est produit par l'action d'un rayonnement ultraviolet ou d'une décharge électrique sur l'oxygène. Il convient de distinguer entre la production délibérée, accidentelle et naturelle d'ozone. C'est un gaz extrêmement toxique et irritant, même en cas d'exposition de courte durée. Compte tenu de son mécanisme d'action sur l'organisme, il n'y a pas de niveaux connus auxquels il est dépourvu d'effet biologique. On trouvera un exposé plus détaillé de ces questions dans le chapitre n° 104, «Aide-mémoire des substances chimiques», de la présente *Encyclopédie*.

Les procédés qui font appel à l'ozone devraient être confinés dans des espaces fermés ou comporter une aspiration localisée pour capter tout dégagement de gaz à la source. Les bouteilles d'ozone devraient être stockées dans des endroits réfrigérés, à l'écart d'agents réducteurs, de matières inflammables ou de produits pouvant catalyser sa décomposition. On peut minimiser les risques de fuite en faisant fonctionner les ozoniseurs sous dépression et en les dotant de dispositifs assurant leur arrêt automatique en cas de dérèglement.

L'équipement électrique des installations utilisant de l'ozone devrait être parfaitement isolé et entretenu par du personnel expérimenté. Les conduits et accessoires devraient comporter des dispositifs arrêtant immédiatement la marche des ozoniseurs en cas de détection d'une fuite, d'une chute d'efficacité de la ventilation, de la déshumidification ou de la réfrigération, ou encore lors d'une surpression ou d'une dépression (suivant le système utilisé) ou lorsque le débit des ozoniseurs est soit excessif, soit insuffisant.

Si des ozoniseurs sont installés, les locaux devraient être équipés de détecteurs spécifiques d'ozone. On ne peut se fier au sens de l'odorat des occupants, que l'ozone peut saturer. Les fuites d'ozone peuvent être détectées au moyen de papier réactif à l'iode de potassium, qui vire au bleu. Néanmoins, cette méthode n'est pas spécifique, car la réaction est positive pour la plupart des oxydants. Il est préférable de disposer d'un système continu de détection des fuites par cellules électrochimiques, photométrie en ultraviolet ou chimiluminescence. Le détecteur choisi devrait être relié directement à un système d'alarme activé dès qu'une certaine concentration est atteinte.

## LES OBJECTIFS ET LES PRINCIPES DE LA VENTILATION GÉNÉRALE ET DE LA VENTILATION PAR DILUTION

Emilio Castejón Vilella

On parle de *ventilation générale* quand le contrôle des polluants générés dans un lieu de travail se fait par ventilation de l'ensemble du local. Le recours à cette forme de ventilation suppose que l'on accepte que les polluants soient répartis dans une certaine mesure dans la totalité du lieu de travail et qu'ils risquent, par conséquent, d'atteindre des travailleurs qui se trouvent à l'écart de la source de contamination. La ventilation générale est donc une stratégie à l'opposé de l'*extraction localisée*, qui vise à éliminer les polluants en les interceptant aussi près que possible de leur point d'émission (voir l'article «L'air intérieur: les méthodes de régulation et d'épuration», dans le présent chapitre).

L'un des principaux objectifs de la ventilation générale est d'éliminer les odeurs corporelles. Il faut à cet effet insuffler au

Tableau 45.6 • Réactifs utilisés pour absorber certains contaminants

Absorbant	Contaminant
Diéthylhydroxamine	Sulfure d'hydrogène
Permanganate de potassium	Gaz odorants
Acide chlorhydrique, acide sulfurique	Amines
Sulfure de sodium	Aldéhydes
Hydroxyde de sodium	Formaldéhyde

moins 0,45 m<sup>3</sup> d'air frais par minute et par occupant. Si l'usage du tabac est fréquent ou si le travail est physiquement ardu, le débit nécessaire devrait être plus important, pouvant alors dépasser 0,9 m<sup>3</sup>/min par personne.

Si les seuls problèmes d'ambiance que la ventilation doit régler sont ceux que l'on vient de décrire, il est utile de prendre en compte le fait que tout local a un certain niveau «naturel» de renouvellement de l'air en raison des infiltrations qui se produisent à travers les portes et les fenêtres, même fermées, et par d'autres voies possibles de pénétration à travers les murs. Les manuels de climatisation donnent en général tous les renseignements nécessaires à ce sujet, mais on peut dire qu'au minimum la ventilation due à ces apports naturels se situe entre 0,25 et 0,50 renouvellements par heure. En milieu industriel, ce chiffre se situe généralement entre 0,5 et 3 renouvellements par heure.

S'il faut éliminer des polluants chimiques, l'emploi de la ventilation générale doit être limité exclusivement aux situations où les quantités de polluants générées sont faibles, où leur toxicité n'est pas très élevée et où les travailleurs ne se tiennent pas ordinairement dans le voisinage immédiat des sources de contamination. Si ces restrictions ne sont pas respectées, le niveau de ventilation requis sera difficilement acceptable, d'abord parce qu'il faudra un régime de renouvellement d'air tellement élevé que la ventilation créera des courants d'air probablement désagréables, ensuite parce que le maintien d'un taux de renouvellement élevé peut être coûteux. Il est donc inhabituel qu'un système de ventilation générale soit recommandé en présence de produits chimiques, si l'on excepte le cas des solvants dont la concentration admissible est supérieure à 100 ppm.

En revanche, si le but de la ventilation générale est de maintenir dans un lieu de travail des conditions thermiques conformes aux limites réglementaires ou aux normes techniques d'organismes tels que l'Organisation internationale de normalisation (ISO), la méthode présente moins d'inconvénients. La ventilation générale sert donc plus souvent à réguler l'ambiance thermique qu'à combattre la pollution chimique, mais il ne faut pas négliger son utilisation comme complément des techniques d'extraction localisée.

Les expressions *ventilation générale* et *ventilation par dilution* ont longtemps été considérées comme synonymes, mais ce n'est plus le cas aujourd'hui par suite de la mise au point d'une nouvelle stratégie de ventilation générale dite *ventilation par déplacement*. Bien que la ventilation par dilution et la ventilation par déplacement s'inscrivent toutes deux dans la définition de la ventilation générale donnée plus haut, elles diffèrent sensiblement par la stratégie mise en œuvre pour maîtriser la contamination.

La *ventilation par dilution* a pour but de mélanger l'air introduit par des moyens mécaniques de la manière la plus complète possible à l'air déjà présent dans le local, de façon que la concentration d'un polluant donné (ou la température ambiante, si la régulation thermique est le but recherché) soit aussi uniforme que possible dans l'ensemble du local. Pour réaliser ce mélange uniforme, de l'air est injecté par le plafond à une vitesse relativement grande, engendrant une forte circulation. Le résultat est un mélange intime d'air frais et d'air intérieur.

La *ventilation par déplacement*, dans sa forme idéale, consiste à injecter de l'air frais dans un local de telle façon qu'il déplace l'air intérieur sans se mélanger à lui. Ce type de ventilation est réalisé par injection de l'air frais à faible vitesse à proximité du plancher, et par extraction de l'air usé au voisinage du plafond. En régulation thermique, cette méthode présente l'avantage de tirer parti du mouvement naturel de l'air engendré par les variations de densité dues aux différences de température. Bien que la ventilation par déplacement soit déjà largement utilisée en milieu industriel, les travaux scientifiques publiés sur le sujet sont encore peu nombreux et il est difficile, pour l'instant, d'en évaluer l'efficacité.

### La ventilation par dilution

La conception d'un système de ventilation par dilution est basée sur l'hypothèse que la concentration du polluant est la même dans tout l'espace considéré. On peut l'assimiler à ce que l'on appelle souvent en chimie le modèle de la «cuve à agitateur».

En supposant que l'air frais insufflé dans le local soit exempt de polluant et que, au temps zéro, la concentration de polluant dans le local soit nulle, il faut connaître deux grandeurs pour calculer le débit de renouvellement requis: la quantité de polluant générée dans le local et la concentration souhaitée (qui devrait être en théorie la même partout).

Dans ces conditions, les calculs aboutissent à l'équation ci-après:

$$c(t) = \frac{a}{Q} \left( 1 - e^{-\frac{Qt}{V}} \right)$$

dans laquelle

- $c(t)$  = concentration du contaminant dans le local au temps  $t$
- $a$  = quantité de polluant produite (masse par unité de temps)
- $Q$  = débit d'air frais (volume par unité de temps)
- $V$  = volume du local considéré.

Cette équation indique que la concentration tend vers une valeur d'équilibre égale à  $a/Q$ , valeur qu'elle atteindra d'autant plus vite que le quotient  $Q/V$ , fréquemment appelé «nombre de renouvellements par unité de temps», sera plus faible. Bien que l'indice de qualité de la ventilation soit parfois confondu avec cette valeur, l'équation ci-dessus montre clairement que son influence s'exerce uniquement sur la *vitesse de stabilisation* des conditions ambiantes et non sur la concentration d'équilibre, laquelle dépend *uniquement* de la quantité de polluant produite  $a$  et du débit  $Q$ .

Quand l'air d'un espace donné est contaminé, mais qu'aucune nouvelle quantité de polluant n'est générée, la variation de la concentration dans le temps est donnée par l'équation ci-après:

$$c_2 = c_1 e^{-\frac{Q(t_2-t_1)}{V}}$$

dans laquelle  $Q$  et  $V$  représentent les grandeurs définies ci-dessus,  $t_1$  et  $t_2$ , respectivement, les temps de début et de fin, et  $c_1$  et  $c_2$ , la concentration initiale et la concentration finale.

D'autres formules s'appliquent si la concentration initiale n'est pas nulle (Constance, 1983; ACGIH, 1992), si l'air frais insufflé n'est pas totalement exempt de polluant (parce qu'une partie de l'air est recyclée pour réduire les frais de chauffage en hiver, par exemple) ou si les quantités de polluant produites varient dans le temps.

Si l'on néglige la phase de transition et que l'on suppose que l'état d'équilibre a été atteint, l'équation indique que le taux de renouvellement de l'air est égal à  $a/c_{\text{lim}}$ ,  $c_{\text{lim}}$  étant la concentration à maintenir dans l'espace considéré. Cette valeur peut être définie soit par voie réglementaire, soit en tant que norme auxiliaire par des recommandations techniques telles que les valeurs limites d'exposition (TLV) de la Conférence américaine des hygiénistes gouvernementaux du travail (American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH)), qui recommande de calculer le débit de renouvellement à l'aide de la formule ci-après:

$$Q = \frac{a}{c_{\text{lim}}} K$$

dans laquelle  $a$  et  $c_{\text{lim}}$  représentent les mêmes grandeurs que ci-dessus et  $K$  est un facteur de sécurité. On attribue à  $K$  une valeur comprise entre 1 et 10, selon l'efficacité du mélange réalisé dans l'espace considéré, la toxicité du polluant (plus  $c_{\text{lim}}$  est petit, plus la valeur de  $K$  doit être grande) et tout autre facteur jugé pertinent. L'ACGIH cite notamment, comme autres critères déterminants, la durée du processus, le cycle des opérations, la proximité du lieu où se tiennent les travailleurs par rapport aux

sources d'émission du polluant, le nombre et l'emplacement de ces sources, les variations saisonnières de la ventilation naturelle et la perte de rendement prévisible de l'installation de ventilation.

En tout état de cause, l'emploi de la formule ci-dessus nécessite une connaissance raisonnablement précise des valeurs de  $a$  et de  $K$  à utiliser. Voici quelques indications à cet égard.

La quantité de polluant produite peut très souvent être estimée d'après la consommation de certaines substances entrant dans le processus générateur du polluant. Ainsi, dans le cas d'un solvant, la consommation constitue une bonne indication de la quantité maximale de polluant présente dans l'air ambiant.

Comme nous l'avons déjà dit, la valeur de  $K$  est déterminée en fonction de l'efficacité de l'action de mélange. Cette valeur sera donc d'autant plus petite que la concentration du polluant sera uniforme, ce qui dépend de la façon dont l'air est distribué dans l'espace ventilé.

Suivant ces critères, des valeurs minimales de  $K$  peuvent être utilisées lorsque l'air injecté est bien réparti (grâce, par exemple, à l'utilisation d'un plénum ou d'un caisson de distribution) et que l'injection et l'extraction se font à des extrémités opposées de l'espace considéré. Par contre, des valeurs élevées de  $K$  seront nécessaires si l'apport d'air frais est intermittent ou si les bouches d'extraction sont proches des diffuseurs d'entrée (voir figure 45.4).

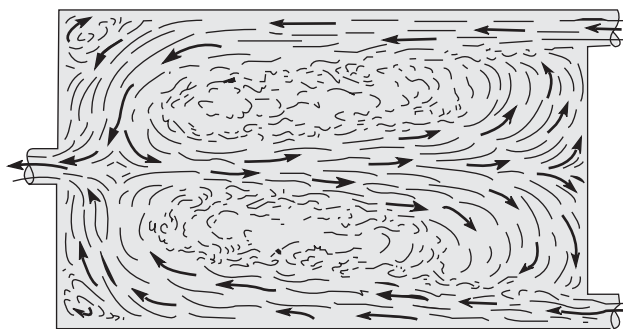
Il y a lieu de noter que lorsque de l'air est insufflé dans un espace donné, surtout si c'est à grande vitesse, le courant d'air provoque une importante chute de pression dans l'air ambiant, qui se mélange alors au courant et le ralentit, créant une turbulence sensible. De ce fait, il se produit entre l'air déjà présent et l'air frais un brassage intense qui génère des courants d'air internes. Une bonne dose d'expérience est nécessaire pour tenir compte de ces courants, ne serait-ce que d'une façon très générale (voir figure 45.5).

Afin d'éviter que les travailleurs ne soient soumis à des courants d'air relativement rapides, l'air est en général injecté par des grilles de diffusion conçues pour favoriser un mélange rapide de l'air frais et de l'air déjà présent dans le local. On limite ainsi l'étendue de la zone parcourue par des courants d'air désagréables.

L'effet de courant d'air que nous venons de décrire ne se produit pas à proximité des bouches d'extraction ou des points par où l'air s'échappe (portes, fenêtres et autres orifices). L'air parvient aux grilles d'extraction de toutes les directions, de sorte que même à peu de distance de ces grilles, son mouvement n'est pas assez rapide pour être perçu comme un courant d'air.

Il est toujours préférable de disposer les postes de travail de façon que l'air frais atteigne les travailleurs avant d'avoir été en contact avec des sources de contamination.

Figure 45.4 • Schéma de circulation de l'air dans un local comportant deux orifices d'admission



Source: Baturin, 1972.

Lorsque d'importantes sources de chaleur existent dans le local, le mouvement de l'air dépendra dans une grande mesure des courants de convection produits par les différences de densité entre l'air froid, qui tend à descendre, et l'air chaud, qui tend à monter. Dans ce cas, le concepteur du système de distribution d'air devra évidemment tenir compte de ces sources de chaleur, faute de quoi le mouvement de l'air pourra être très différent de ce qu'il aura prévu.

Par contre, la présence d'un contaminant chimique n'a pas d'effet sensible sur la densité de l'air. Bien qu'un polluant puisse, à l'état pur, avoir une densité très différente de celle de l'air (généralement beaucoup plus élevée), la densité du mélange air-polluant sera le plus souvent très proche de celle de l'air pur, compte tenu de la concentration réelle du polluant dans le local.

L'une des erreurs les plus communes, lors de l'installation de systèmes de ventilation de ce type, consiste à prévoir uniquement des bouches d'extraction, sans se préoccuper des entrées d'air. Dans ce cas, les ventilateurs d'extraction ne pourront pas fonctionner à plein rendement, ce qui aboutira à des débits réels d'extraction très inférieurs à ceux prévus et à des concentrations ambiantes de polluants sensiblement plus élevées que celles initialement calculées.

Pour éviter cette situation, il faut réfléchir à la façon dont l'air sera introduit dans le local considéré. Il est recommandé d'utiliser des ventilateurs tant pour l'insufflation d'air frais que pour le refoulement de l'air usé. Normalement, le débit d'extraction doit être plus élevé que le débit d'injection afin de tenir compte des fuites par les fenêtres et autres ouvertures. En outre, il est conseillé de garder le local en légère dépression afin d'éviter que la contamination pouvant exister sur place ne puisse être entraînée vers des zones non polluées.

### La ventilation par déplacement

Ainsi qu'on l'a déjà dit, la ventilation par déplacement tend à minimiser le mélange de l'air frais à l'air existant, le mouvement de l'air se faisant selon le modèle dit de l'écoulement à bouchons. Dans ce mode de ventilation, l'air est habituellement introduit à petite vitesse au niveau du plancher, ou légèrement au-dessus, et extrait à proximité du plafond. Cette technique présente deux avantages par rapport à la ventilation par dilution.

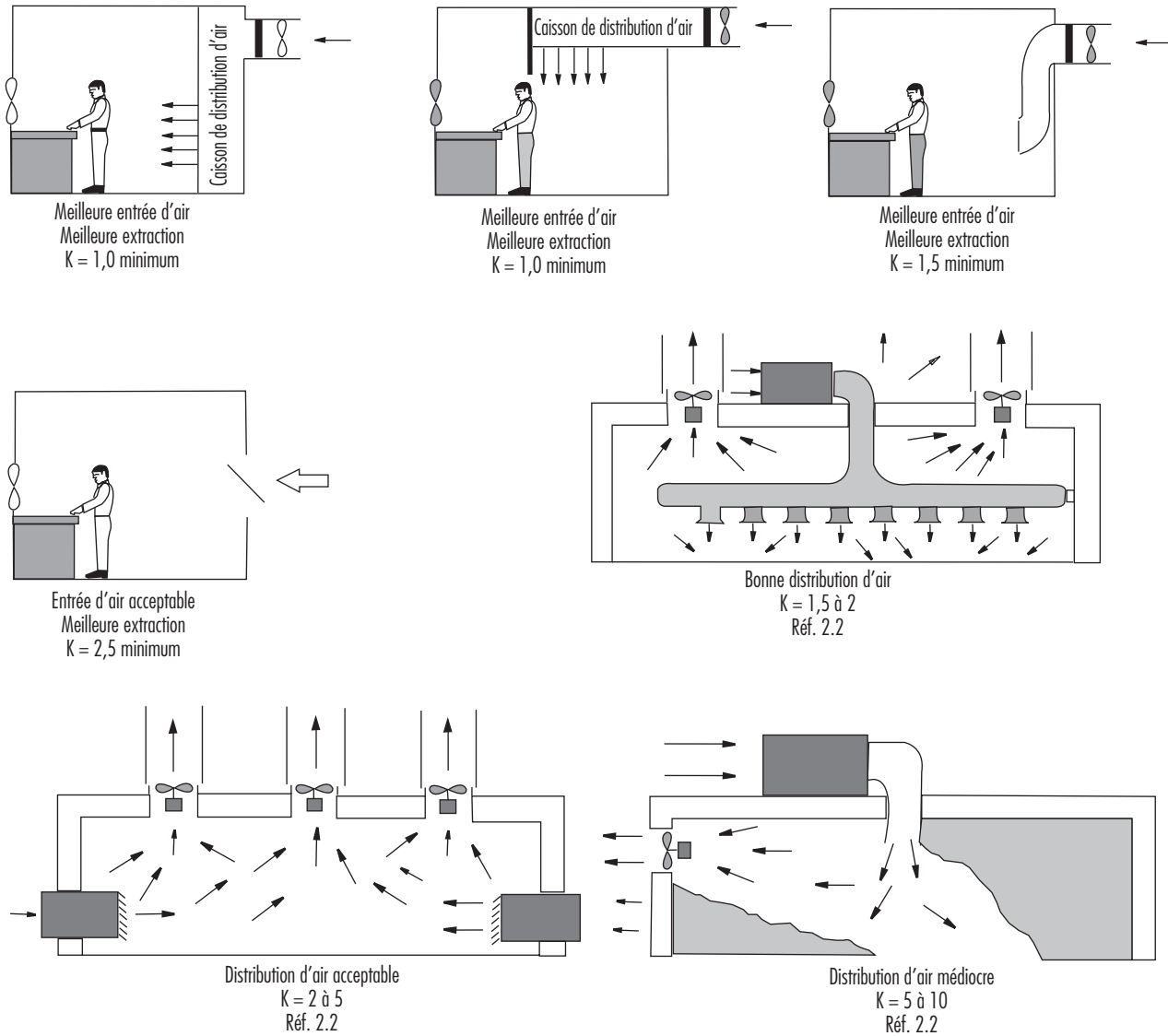
En premier lieu, elle permet de réduire les débits de renouvellement d'air du fait que les polluants tendent à se concentrer au voisinage du plafond, c'est-à-dire à l'écart des postes de travail. La concentration *moyenne* dans l'espace considéré est alors plus élevée que la valeur  $c_{lim}$  mentionnée plus haut, mais cela ne fait pas courir un plus grand risque aux travailleurs puisque, dans la zone occupée du local, la concentration des polluants est égale ou inférieure à  $c_{lim}$ .

En second lieu, si le but de la ventilation est la régulation de l'ambiance thermique, la ventilation par déplacement permet d'introduire de l'air plus chaud que dans un système de ventilation par dilution, puisque l'air extrait au voisinage du plafond a une température de plusieurs degrés supérieure à celle de la zone occupée du local.

Les principes fondamentaux de la ventilation par déplacement ont été développés par Sandberg qui, au début des années quatre-vingt, a élaboré une théorie générale pour l'analyse des situations comportant des concentrations non uniformes de polluants dans des espaces clos. Cette théorie a permis de surmonter les limitations théoriques de la ventilation par dilution (qui présuppose une concentration uniforme dans tout l'espace considéré) et a ouvert la voie à des applications pratiques (Sandberg, 1981).

Bien que la ventilation par déplacement soit largement utilisée dans certains pays, particulièrement en Scandinavie, les études comparant l'efficacité des deux méthodes dans des installations réelles sont plutôt rares. Cette situation tient sans doute aux diffi-

Figure 45.5 • Facteurs K recommandés selon l'emplacement des orifices d'admission et d'extraction de l'air



Les valeurs de K (facteur de sécurité) citées ici ne tiennent compte que des bouches d'admission et d'extraction d'air et constituent donc des indications assez grossières. Les valeurs précises de K à utiliser doivent être déterminées d'après a) le nombre et l'emplacement des travailleurs; b) la ou les sources de pollution; c) la toxicité du ou des contaminants.  
Réf. 2.2: norme Air Force AFOSH 161.2.

Source: ACGIH, 1992.

cultés pratiques que poserait l'installation de deux systèmes de ventilation différents dans une usine et au fait que l'analyse expérimentale de ces types de systèmes nécessite l'emploi de traceurs. On procède en effet à cette analyse en injectant un gaz traceur dans le courant de ventilation et en mesurant sa concentration en différents points de l'espace considéré et dans l'air extrait, ce qui permet de déterminer comment l'air est distribué et de comparer l'efficacité de différents systèmes.

Les quelques études menées dans des installations existantes n'ont pas abouti à des résultats concluants, même si elles ont prouvé que la ventilation par déplacement assure un meilleur renouvellement de l'air. De plus, les auteurs de ces études ont souvent exprimé des réserves au sujet des résultats, dans la mesure

où ceux-ci n'ont pas été confirmés par des mesures du niveau de contamination ambiante dans les lieux de travail.

## LES CRITÈRES DE VENTILATION DES BÂTIMENTS NON INDUSTRIELS

A. Hernández Calleja

La fonction première des bâtiments à usage non industriel (bureaux, écoles, logements, etc.) est d'assurer aux occupants un environnement sain et confortable. La qualité de cet environnement

dépend pour une large part de la conception, du fonctionnement et de l'entretien des systèmes de ventilation et de climatisation.

Ces systèmes doivent, par conséquent, créer et assurer une ambiance dans laquelle la température, l'humidité et la qualité de l'air intérieur sont acceptables. Autrement dit, ils doivent assurer un mélange adéquat de l'air extérieur avec l'air intérieur et être dotés de systèmes de filtration et d'épuration capables d'éliminer les polluants présents dans l'air intérieur.

L'idée que de l'air extérieur propre est nécessaire au bien-être des occupants d'un bâtiment a été exprimée dès le XVIII<sup>e</sup> siècle. Benjamin Franklin avait constaté que l'air d'une pièce était plus sain en présence d'une ventilation naturelle, c'est-à-dire quand les fenêtres sont ouvertes. L'idée qu'un important apport d'air extérieur pouvait contribuer à réduire le risque de contagion pour des maladies telles que la tuberculose a commencé à s'imposer au XIX<sup>e</sup> siècle.

Les études effectuées dans les années trente ont montré qu'il fallait introduire entre 17 et 30 m<sup>3</sup> d'air extérieur frais par heure et par occupant afin de diluer les effluves biologiques humains à un degré suffisant pour éviter les odeurs désagréables.

Établie en 1973, la norme n° 62 de la Société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)) recommandait un débit horaire minimal de 34 m<sup>3</sup> d'air extérieur par occupant pour la neutralisation des odeurs, et un minimum absolu de 8,5 m<sup>3</sup>/h/occupant pour éviter que la concentration de dioxyde de carbone ne dépasse 2 500 ppm, ce qui correspond à la moitié de la valeur limite d'exposition en milieu industriel.

Dans sa norme n° 90 de 1975 (adoptée au milieu de la crise de l'énergie), l'ASHRAE avait adopté le minimum absolu ci-dessus, faisant temporairement abstraction de la nécessité de prévoir des débits de ventilation plus importants pour diluer des polluants tels que la fumée de tabac, les effluves biologiques, etc.

L'ASHRAE a corrigé cette omission dans sa norme n° 62 de 1981, rétablissant le débit recommandé à 34 m<sup>3</sup>/h/occupant pour les zones où l'usage du tabac est permis et à 8,5 m<sup>3</sup>/h/occupant dans les locaux où il est interdit de fumer.

La dernière norme publiée en 1989 par l'ASHRAE, qui porte également le n° 62, définit un minimum de 25,5 m<sup>3</sup>/h/occupant pour les espaces intérieurs occupés, indépendamment de l'usage de tabac. Elle recommande également d'augmenter cette valeur si l'air insufflé dans le bâtiment n'est pas suffisamment mélangé dans les zones occupées ou s'il existe des sources de pollution intérieures inhabituelles.

En 1992, la Commission des Communautés européennes (CCE) a publié le document *Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings*. Contrairement aux autres recommandations en la matière, les directives européennes ne prescrivent pas les débits de renouvellement à prévoir pour un espace donné, conseillant plutôt de les calculer en fonction de la qualité souhaitée de l'air intérieur.

Les normes de ventilation existantes prescrivent des débits de renouvellement fixes à établir par occupant. Les tendances mises en évidence dans les nouvelles directives européennes montrent qu'un débit fixe ne garantit pas toujours la qualité de l'air intérieur, et cela pour trois raisons fondamentales.

Premièrement, les normes existantes partent de l'hypothèse que les occupants constituent les seules sources de contamination. Or, des études récentes montrent que d'autres sources contribuent sensiblement à la pollution, comme les meubles, les matériaux de rembourrage et le système de ventilation lui-même. Deuxièmement, ces normes préconisent la même quantité d'air extérieur, indépendamment de sa qualité. Troisièmement, elles ne définissent pas clairement la qualité recherchée de l'air intérieur. Les normes de ventilation futures devraient donc être fondées sur les

trois facteurs: une qualité bien définie de l'air dans les locaux, la charge totale de polluants dans les locaux occupés, et la qualité de l'air prélevé à l'extérieur.

### La qualité perçue de l'air

La qualité de l'air intérieur peut se définir par la mesure dans laquelle il satisfait aux exigences des occupants. Ceux-ci réagissent essentiellement à deux facteurs: tout d'abord, ils veulent que l'air qu'ils respirent soit frais et non vicié, lourd ou irritant; ensuite, ils désirent avoir la certitude que l'inhalation de cet air ne peut avoir d'effets préjudiciables à leur santé.

On considère couramment que la qualité de l'air d'un local dépend plus des composants de cet air que de la perception qu'en ont les occupants. Il peut donc paraître facile d'évaluer cette qualité simplement en déterminant la composition de l'air. Cette méthode fonctionne bien dans les milieux industriels où sont présentes des substances chimiques dérivées des processus de production et où l'on dispose d'équipements de mesure et de critères de référence permettant d'évaluer les concentrations mesurées. Elle ne convient cependant pas en milieu non industriel, lorsque des milliers de substances chimiques sont présentes à des concentrations très faibles, parfois mille fois inférieures aux limites d'exposition recommandées. En évaluant ces substances une à une, on arriverait sans doute à la conclusion erronée que la qualité de l'air est excellente. En fait, nous ne connaissons pas suffisamment l'effet combiné que ces milliers de substances peuvent avoir sur l'organisme de l'être humain, ce qui pourrait expliquer pourquoi un air jugé satisfaisant d'après sa composition est parfois perçu comme vicié, lourd ou irritant.

On peut en conclure que les méthodes traditionnelles de l'hygiène industrielle ne conviennent pas pour définir le degré de qualité qui sera perçu par l'être humain respirant l'air évalué. La solution, dans ce cas, consiste à remplacer l'analyse chimique par le jugement subjectif de groupes de personnes utilisés comme moyens de mesure pour quantifier la pollution de l'air.

L'organisme humain perçoit la qualité de l'air par deux sens: l'odorat, localisé dans la cavité nasale, qui est sensible à des centaines de milliers de substances odorantes, et le «sens chimique», situé dans les muqueuses du nez et des yeux, qui réagit à un nombre similaire de substances irritantes présentes dans l'air. C'est la réaction combinée de ces deux sens qui détermine la qualité perçue de l'air et permet au sujet de juger si elle est acceptable ou non.

### L'olf

L'*olf* (du latin = *olfactus*, odorat) est le taux d'émission de polluants (bioeffluents) d'une personne standard, définie comme étant un adulte sédentaire moyen, travaillant dans un bureau ou un milieu non industriel analogue dans une ambiance thermique neutre et ayant le niveau d'hygiène personnelle que procurerait 0,7 bain par jour. Deux raisons ont motivé le choix de la pollution produite par un être humain comme base pour définir l'*olf*: d'une part, les émanations biologiques humaines sont bien connues et, d'autre part, on dispose de données abondantes sur la gêne causée par les bioeffluents.

Toute autre source de contamination peut être exprimée en nombre de personnes standard (*olfs*) requises pour causer le même degré d'insatisfaction que la source à évaluer.

La figure 45.6 présente une courbe qui définit l'*olf*. Cette courbe, qui montre comment la contamination produite par une personne standard (1 *olf*) est perçue à différents débits de ventilation, permet de calculer le pourcentage de personnes insatisfaites, c'est-à-dire de personnes qui jugeront la qualité de l'air inacceptable à leur entrée dans la pièce. La courbe en question est basée sur différentes études européennes dans lesquelles 168 personnes ont jugé la qualité d'une atmosphère polluée par plus de mille

personnes, hommes et femmes, considérées comme standards. Les résultats d'études semblables menées en Amérique du Nord et au Japon présentent un degré élevé de corrélation avec les données européennes.

**Le décipol**

La concentration de la pollution dans l'air intérieur dépend de la source ou des sources de contamination et du degré de dilution assuré par la ventilation. La pollution perçue est définie par la concentration de bioeffluents humains qui causerait le même inconfort ou la même insatisfaction que la concentration de polluants dans l'air à évaluer. Un *décipol* (du latin *pollutio*, souillure) correspond à la contamination produite par une personne standard (1 olf) sous un débit de ventilation de 10 litres/s d'air non contaminé, d'où la définition:

$$1 \text{ décipol} = \frac{0,1 \text{ olf}}{\text{litre} / \text{s}^{-1}}$$

La figure 45.7, dérivée des mêmes données que la figure précédente, indique la relation entre la qualité perçue de l'air, exprimée par le pourcentage de personnes insatisfaites, et cette même qualité exprimée en décipols.

Afin de déterminer le débit de ventilation requis pour assurer une ambiance confortable, il est essentiel de définir le niveau de qualité de l'air que l'on désire dans le local considéré. Trois niveaux sont proposés au tableau 45.7, fondés sur les courbes des figures 45.6 et 45.7. Chaque niveau correspond à un pourcentage donné de personnes insatisfaites. Le choix du niveau à retenir dépendra principalement de l'usage auquel l'espace est destiné et de considérations économiques.

Ainsi qu'on l'a dit, ces données résultent d'expériences faites sur des groupes de personnes à qui l'on demandait de juger la qualité de l'air. Il ne faut pas oublier toutefois que certains contaminants dangereux présents dans l'air (substances cancérigènes, micro-organismes, substances radioactives, etc.) ne sont pas décelés par les sens et que les effets sensoriels d'autres contaminants n'ont aucun lien quantitatif avec leur toxicité.

**Les sources de contamination**

Les normes actuelles en matière de ventilation, on l'a vu, ont l'inconvénient de ne tenir compte que des occupants comme sources de contamination. Les normes futures devront prendre en considération toutes les sources possibles de pollution. En dehors

Figure 45.6 • Courbe de définition de l'olf

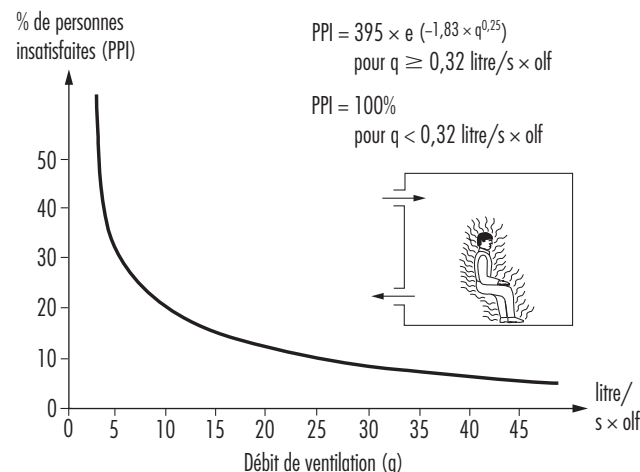
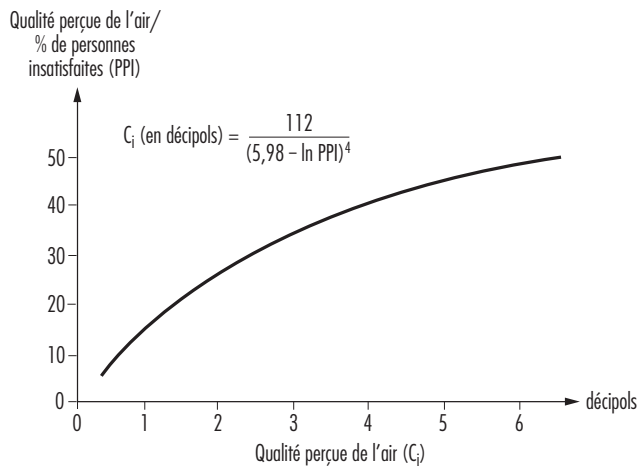


Figure 45.7 • Relation entre la qualité perçue de l'air, exprimée par le pourcentage de personnes insatisfaites (PPI) et cette même qualité exprimée en décipols



des occupants et de leurs activités (y compris dans certains cas le tabagisme), d'autres sources contribuent sensiblement à la pollution de l'air: le mobilier, les moquettes, les matériaux de construction, les articles utilisés pour la décoration, les produits de nettoyage et le système de ventilation lui-même.

La combinaison de toutes ces sources détermine la charge de pollution de l'air dans un espace donné. Cette charge peut être exprimée sous forme soit de contamination chimique, soit de contamination sensorielle (en olfs). Dans ce dernier cas, le résultat comprend les effets de diverses substances chimiques tels qu'ils sont perçus par l'être humain.

**La charge de pollution chimique**

La contamination émanant d'un matériau donné peut s'exprimer par le taux d'émission de chacune des substances chimiques qu'il contient. La charge totale de pollution chimique se calcule en additionnant toutes les sources et s'exprime en microgrammes par seconde ( $\mu\text{g/s}$ ).

En réalité, il est souvent difficile de calculer la charge chimique, car on connaît mal les taux d'émission de nombreux matériaux couramment utilisés.

Tableau 45.7 • Niveaux de qualité de l'air intérieur

Qualité perçue de l'air intérieur			
Niveau de qualité de l'air	Pourcentage de personnes insatisfaites (PPI)	Décipols	Taux de renouvellement de l'air requis <sup>1</sup> (litres/s x olf)
A	10	0,6	16
B	20	1,4	7
C	30	2,5	4

<sup>1</sup> En supposant que l'air extérieur est propre et que l'efficacité du système de ventilation est égale à l'unité.

Source: CCE, 1992.

Tableau 45.8 • Contamination due aux occupants d'un bâtiment

	Charge sensorielle, olfs/occupant	CO <sub>2</sub> (l/(h x occupant))	CO <sup>3</sup> (l/(h x occupant))	Vapeur d'eau <sup>4</sup> (g/(h x occupant))
<b>Activité sédentaire, 1-1,2 met<sup>1</sup></b>				
0% fumeurs	2	19		50
20% fumeurs <sup>2</sup>	2	19	11x10 <sup>-3</sup>	50
40% fumeurs <sup>2</sup>	3	19	21x10 <sup>-3</sup>	50
100% fumeurs <sup>2</sup>	6	19	53x10 <sup>-3</sup>	50
<b>Activité nécessitant un effort physique</b>				
Faible, 3 met	4	50		200
Moyenne, 6 met	10	100		430
Intense (athlétique), 10 met	20	170		750
<b>Enfants</b>				
Garderie (3-6 ans), 2,7 met	11,2	18		90
Ecole (14-16 ans), 1,2 met	11,3	19		50

<sup>1</sup> 1 met est l'activité métabolique d'une personne sédentaire au repos (1 met = 58 W/m<sup>2</sup> de peau).  
<sup>2</sup> Consommation moyenne de 1,2 cigarette/h par fumeur. Taux d'émission moyen: 44 ml de CO par cigarette. <sup>3</sup> Dû à la fumée de tabac. <sup>4</sup> Applicable aux personnes proches de la neutralité thermique.

**La charge de pollution sensorielle**

La charge de pollution perçue par les sens est due aux émanations polluantes qui ont un effet sur la qualité perçue de l'air. On la calcule en additionnant les olfs des différentes sources de contamination présentes dans un espace donné. Comme dans le cas précédent, on ignore encore le taux d'émission spécifique (en olfs/m<sup>2</sup>) de nombreux matériaux. C'est pourquoi il est plus commode d'estimer la charge sensorielle du bâtiment pris dans son ensemble, avec ses occupants, son mobilier et son système de ventilation.

Tableau 45.9 • Taux d'occupation de quelques locaux et bâtiments

Bâtiment	Occupants/m <sup>2</sup>
Bureaux	0,07
Salles de conférence	0,5
Salles de spectacle et autres grands locaux collectifs	1,5
Ecoles (salles de classe)	0,5
Garderies	0,5
Locaux d'habitation	0,05

Source: CCE, 1992.

Tableau 45.10 • Contamination due à différents locaux et bâtiments

	Charge sensorielle, olf/m <sup>2</sup>	
	Moyenne	Intervalle
Bureaux <sup>1</sup>	0,3	0,02-0,95
Ecoles (salles de classe) <sup>2</sup>	0,3	0,12-0,54
Garderies <sup>3</sup>	0,4	0,20-0,74
Salles de spectacle <sup>4</sup>	0,5	0,13-1,32
Bâtiments à faible pollution <sup>5</sup>		0,05-0,1

<sup>1</sup> Données recueillies dans 24 bureaux à ventilation mécanique. <sup>2</sup> Données recueillies dans 6 écoles à ventilation mécanique. <sup>3</sup> Données recueillies dans 9 garderies à ventilation mécanique. <sup>4</sup> Données recueillies dans 5 salles de spectacle à ventilation mécanique. <sup>5</sup> Objectifs qui devraient être atteints dans les bâtiments neufs.  
 Source: CCE, 1992.

Le tableau 45.8 indique la charge sensorielle en olfs des occupants selon leur activité et la proportion de fumeurs parmi eux, ainsi que la production correspondante de divers composés, comme le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le monoxyde de carbone (CO) et la vapeur d'eau. Quant au tableau 45.9, il donne quelques exemples des taux d'occupation caractéristiques de différents types de locaux et de bâtiments. Enfin, le tableau 45.10 présente la charge sensorielle, calculée en olfs/m<sup>2</sup>, de différentes catégories de locaux et de bâtiments.

**La qualité de l'air extérieur**

La qualité de l'air extérieur est le dernier paramètre de base nécessaire à l'élaboration des normes futures de ventilation. La publication *Air Quality Guidelines for Europe* de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) (OMS, 1987) donne les limites d'exposition recommandées pour certaines substances, tant à l'intérieur qu'à l'extérieur.

Le tableau 45.11 présente les niveaux de qualité perçus de l'air extérieur, ainsi que les concentrations de quelques polluants rencontrés couramment dans l'environnement extérieur.

Il importe de souligner que la qualité de l'air extérieur peut, dans bien des cas, être inférieure aux niveaux indiqués dans le tableau ou dans le guide de l'OMS. Il faut alors épurer l'air avant de l'injecter dans les locaux occupés.

Tableau 45.11 • Niveaux de qualité de l'air extérieur

	Qualité perçue de l'air <sup>1</sup>	Polluants de l'environnement <sup>2</sup>			
		Décpol	CO <sub>2</sub> (mg/m <sup>3</sup> )	CO (mg/m <sup>3</sup> )	NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )
Au bord de la mer, en montagne	0	680	0-0,2	2	1
En ville, air de bonne qualité	<0,1	700	1-2	5-20	5-20
En ville, air de mauvaise qualité	>0,5	700-800	4-6	50-80	50-100

<sup>1</sup> Les valeurs présentées sont des moyennes quotidiennes. <sup>2</sup> Les valeurs présentées sont des concentrations annuelles moyennes.  
 Source: CCE, 1992.

### L'efficacité des systèmes de ventilation

L'efficacité du système de ventilation est un autre facteur important qui intervient dans le calcul des besoins de ventilation. Cette efficacité  $E_v$  est définie par le rapport entre la concentration de polluants dans l'air extrait ( $C_e$ ) et la concentration de polluants dans la zone occupée ( $C_b$ ).

$$E_v = \frac{C_e}{C_b}$$

L'efficacité de la ventilation dépend de la distribution de l'air et de l'emplacement des sources de pollution dans le local. Si l'air et les polluants sont parfaitement mélangés, l'efficacité de la ventilation est égale à l'unité. Si la qualité de l'air respiré dans la zone occupée est meilleure que celle de l'air extrait, l'efficacité est supérieure à l'unité, ce qui signifie que des débits de ventilation moindres suffiraient pour assurer la qualité d'air souhaitée. Par contre, des débits de ventilation plus importants seront nécessaires si l'efficacité est inférieure à l'unité, c'est-à-dire si la qualité de l'air dans la zone occupée est inférieure à la qualité de l'air extrait.

Pour déterminer l'efficacité de la ventilation, il est utile de diviser l'espace considéré en deux zones, celle où l'air est introduit et le reste du local. Dans le cas d'un système de ventilation par dilution, la zone d'entrée de l'air se situe généralement au-dessus de la zone de respiration et les meilleures conditions sont atteintes quand le mélange est si intime que les deux zones n'en font plus qu'une. Dans le cas d'un système de ventilation par déplacement, l'air est introduit dans la zone occupée et l'extraction se fait généralement en hauteur. Dans ce cas, les conditions optimales sont obtenues quand le mélange entre les deux zones est minimal.

L'efficacité de la ventilation est donc fonction de la localisation et des caractéristiques des éléments qui introduisent et extraient l'air, ainsi que de la localisation et des caractéristiques des sources de contamination. Elle est également fonction de la température de l'air introduit et de son débit. Il est possible de calculer l'efficacité d'un système de ventilation par simulation ou en effectuant des mesures. En l'absence de données, on peut se reporter aux chiffres de la figure 45.8, qui donne des valeurs de référence pour différents types de ventilation. Ces valeurs tiennent compte du type de distribution d'air, mais pas de la localisation des sources de contamination, que l'on suppose uniformément réparties dans tout l'espace ventilé.

Figure 45.8 • Efficacité de la ventilation dans les zones occupées, selon le type de ventilation

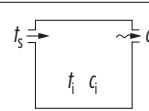
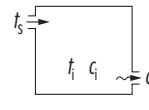
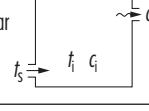
Type de ventilation	Ecart de température entre l'arrivée d'air et la zone respiratoire ( $t_s - t_r$ ) en °C	Efficacité du système de ventilation
Ventilation par dilution 	< 0 0-2 2-5 > 5	0,9-1,0 0,9 0,8 0,4-0,7
Ventilation par dilution 	< -5 0-5 > 0	0,9 0,9-1,0 1,0
Ventilation par déplacement 	< 2 0-2 > 0	0,2-0,7 0,7-0,9 1,2-1,4

Figure 45.9 • Formules à utiliser pour calculer les débits de ventilation

Confort	Santé
(1) $Q_c = 10 \times \frac{G}{C_i - C_e} \times \frac{1}{E_v}$	(2) $Q_H = \frac{G}{C_v - C_c} \times \frac{1}{E_v}$
$Q_c$ = Débit d'air nécessaire pour assurer le confort (litres/s) $G$ = Charge sensorielle totale (olfs) $C_i$ = Qualité souhaitée de l'air intérieur (décipols) $C_e$ = Qualité de l'air extérieur introduit (décipols) $E_v$ = Efficacité de la ventilation	$Q_H$ = Débit d'air nécessaire pour la protection de la santé (litres/s) $G$ = Concentration des contaminants chimiques ( $\mu\text{g/s}$ ) $C_v$ = Critère d'évaluation ( $\mu\text{g/litre}$ ) $C_c$ = Concentration du composé dans l'air introduit ( $\mu\text{g/litre}$ )

### Le calcul des débits de ventilation

La figure 45.9 donne les formules utilisées pour calculer le débit de ventilation nécessaire du double point de vue du confort et de la protection de la santé.

#### La ventilation nécessaire pour le confort

La première étape du calcul consiste à décider du niveau de qualité de l'air intérieur que l'on désire obtenir dans le local considéré (voir tableau 45.7) et à estimer le niveau de la qualité de l'air extérieur (voir tableau 45.11).

A l'étape suivante on estime la charge sensorielle à l'aide des tableaux 45.8, 45.9 et 45.10, en fonction des occupants et de leurs activités, du type de bâtiment ou de local et du taux d'occupation par  $\text{m}^2$  de surface au sol. La charge totale sera donnée par la somme des données obtenues.

Si l'on connaît le type du système de ventilation, on peut estimer l'efficacité de la ventilation en se référant à la figure 45.9. Enfin, en appliquant l'équation (1) de la figure 45.9, on obtient une estimation du débit de ventilation nécessaire.

#### La ventilation nécessaire pour la protection de la santé

Une procédure semblable à la précédente, mais fondée sur l'équation (2) de la figure 45.9, donne le débit de ventilation nécessaire pour assurer la protection de la santé. Pour calculer cette valeur, il faut déterminer la substance ou le groupe de substances chimiques que l'on souhaite contrôler et estimer leurs concentrations dans l'air; il faut également prévoir un critère d'évaluation tenant compte des effets du contaminant et de la sensibilité des occupants que l'on désire protéger, par exemple les enfants et les personnes âgées.

Malheureusement, il est encore difficile d'estimer la ventilation requise pour la protection de la santé, car on manque de renseignements sur certaines variables entrant dans le calcul, notamment les taux d'émission de contaminants ( $G$ ) et les critères d'évaluation des espaces intérieurs ( $C_v$ ).

Les études de terrain montrent que dans les espaces où la ventilation est calculée pour assurer le confort, les concentrations de substances chimiques sont très faibles. Néanmoins, des sources de contamination dangereuses pour la santé peuvent y exister et le mieux, dans ce cas, est d'éliminer, de remplacer ou de maîtriser ces sources, au lieu d'avoir recours au système de ventilation générale pour diluer les contaminants.

## ● LES SYSTÈMES DE CHAUFFAGE ET DE CLIMATISATION

F. Ramos Pérez et J. Guasch Farrás

Les besoins d'une personne donnée en matière de chauffage dépendent de nombreux facteurs, qui peuvent être classés en deux groupes principaux: les facteurs liés au milieu environnant et les facteurs humains. Le premier groupe comprend les facteurs géographiques (latitude et altitude) et climatiques, l'exposition du local occupé, les cloisons qui le protègent de l'environnement extérieur, etc. Parmi les facteurs humains figurent la consommation d'énergie du travailleur, le rythme de travail ou l'effort exigé par la tâche accomplie, les vêtements portés pour se protéger du froid, ainsi que les goûts et préférences personnels.

Le chauffage est un besoin saisonnier dans de nombreuses régions, ce qui ne signifie pas pour autant que l'on puisse s'en dispenser durant la saison froide. Une ambiance froide influe sur la santé, le rendement physique et mental et la précision et peut, dans certains cas, augmenter les risques d'accidents. Le but d'un bon système de chauffage est de maintenir des conditions thermiques agréables pouvant prévenir ou réduire le plus possible les effets préjudiciables du froid sur la santé.

Les caractéristiques physiologiques de l'organisme humain lui permettent de supporter de grandes variations de température. Chez l'humain, c'est l'hypothalamus qui réalise l'équilibre thermique grâce aux informations que lui transmettent les récepteurs thermiques de la peau: c'est ainsi qu'il maintient la température du corps entre 36 et 38 °C, comme le montre la figure 45.10.

Tout système de chauffage doit posséder un mécanisme de régulation très précis, surtout si les travailleurs sont assis ou immobiles dans une position qui ne stimule pas la circulation du sang vers les extrémités. Si la nature du travail permet une certaine mobilité, la régulation peut être un peu moins précise. Enfin, lorsque le travail s'effectue dans des conditions particulièrement

défavorables, comme dans des chambres frigorifiques ou par temps très froid, des mesures d'appoint peuvent être prises pour protéger certains tissus, limiter le temps d'exposition ou assurer un apport de chaleur extérieure grâce à des dispositifs électriques incorporés dans les vêtements de travail.

### La définition et la description de l'environnement thermique

Tout système de chauffage ou de climatisation doit permettre de contrôler, dans des limites prescrites, les variables qui définissent l'environnement thermique durant chaque saison de l'année. Ces variables sont:

1. la température de l'air;
2. la température moyenne des surfaces intérieures (parois, plancher et plafond), qui délimitent le local considéré;
3. la teneur de l'air en humidité;
4. la vitesse d'écoulement de l'air et l'uniformité de sa distribution.

Il existe une relation très simple entre la température de l'air, la température des surfaces intérieures du local et la température qui donnerait la même perception de chaleur dans un local différent. Cette relation s'exprime par la formule ci-après:

$$T_{eq} = \frac{T_{tbs} + T_{ms}}{2}$$

dans laquelle

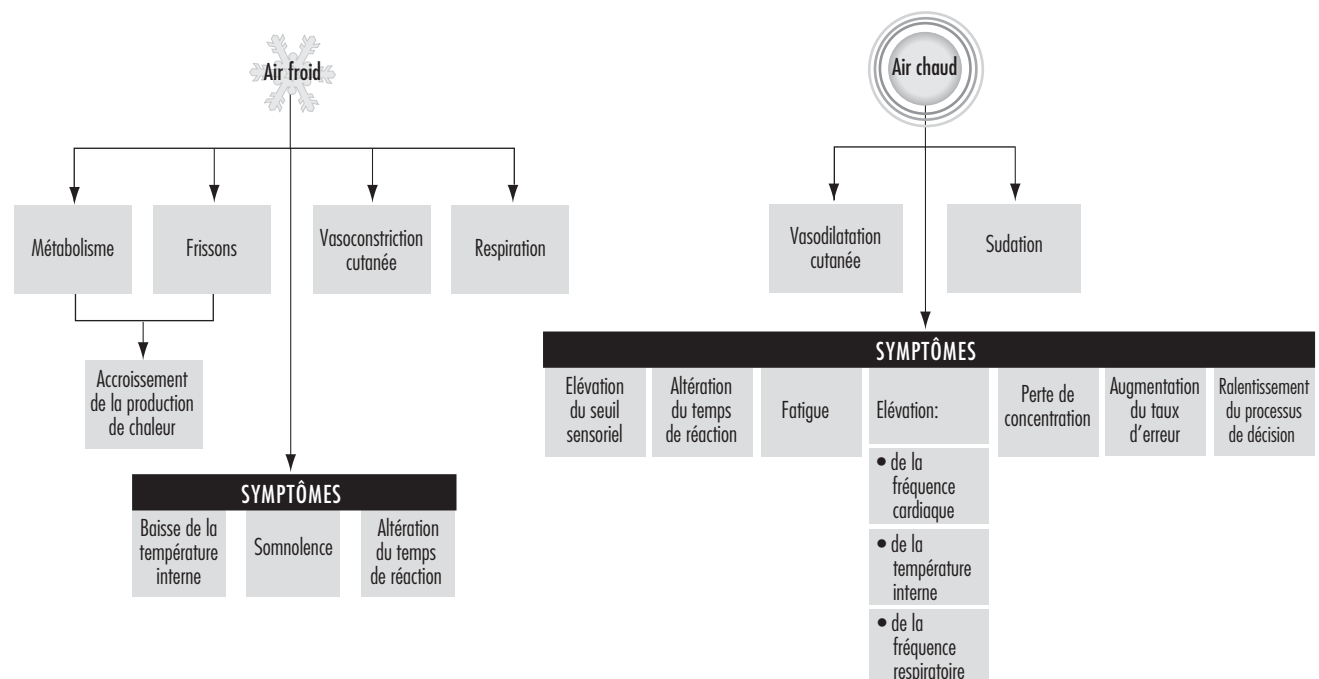
$T_{eq}$  = température équivalente de l'air qui donne une perception thermique donnée

$T_{tbs}$  = température de l'air mesurée avec un thermomètre à bulbe sec

$T_{ms}$  = température moyenne mesurée à la surface des parois du plancher et du plafond du local.

Si, par exemple, dans un local donné, l'air et les parois sont à 20 °C, la température équivalente sera de 20 °C, c'est-à-dire la

Figure 45.10 • Mécanismes thermorégulateurs chez l'être humain



même que dans un local où la température moyenne des parois serait de 15 °C et la température de l'air de 25 °C. Du point de vue de la température, les occupants des deux locaux auraient donc la même sensation de confort thermique.

### Les propriétés de l'air humide

Il importe, dans un projet de climatisation, de tenir compte de trois éléments: les caractéristiques thermodynamiques de l'air dans le local, celles de l'air extérieur et celles de l'air de ventilation. Le choix d'un système capable d'agir sur les propriétés thermodynamiques de l'air insufflé par la ventilation dépend alors des charges thermiques de chaque élément. Il est donc indispensable de connaître les propriétés thermodynamiques de l'air humide, à savoir:

$T_{\text{tbs}}$  = température «sèche» mesurée à l'aide d'un thermomètre à bulbe sec à l'abri de toute source de rayonnement calorifique

$T_r$  = point de rosée, c'est-à-dire la température sèche à laquelle l'air humide non saturé doit être abaissé pour arriver à saturation

$W$  = taux d'humidité absorbée, allant de zéro pour l'air sec à  $W_s$  pour l'air saturé de vapeur d'eau. Il s'exprime en g de vapeur d'eau par  $\text{m}^3$  d'air sec

$HR$  = humidité relative

$t^*$  = température thermodynamique mesurée à l'aide d'un thermomètre à bulbe humide

$v$  = volume spécifique de l'air humide (en  $\text{m}^3/\text{kg}$ ). C'est l'inverse de la masse volumique

$H$  = enthalpie, en kcal/kg, de l'air sec et de la vapeur d'eau associés.

Parmi les variables ci-dessus, seules trois sont directement mesurables, la température «sèche», le point de rosée et l'humidité relative. Une quatrième variable est également mesurable par des moyens empiriques: c'est la température «humide», déterminée au moyen d'un thermomètre dont le réservoir est mouillé et que l'on déplace à une vitesse modérée dans de l'air humide non saturé, en général à l'aide d'un ressort. Cette variable diffère très peu de la température thermodynamique du thermomètre à bulbe sec (3%), de sorte que les deux peuvent être utilisées dans les calculs sans risque excessif d'erreur.

### Diagramme psychrométrique

Les propriétés définies au paragraphe précédent ont entre elles des relations qu'il est possible de représenter sous forme graphique. Les courbes ainsi obtenues sont appelées diagrammes psychrométriques. Ce sont des graphiques simplifiés basés sur les tables de la Société américaine des ingénieurs en chauffage, réfrigération et climatisation (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE)). Les coordonnées sont l'enthalpie et le degré d'humidité; différentes courbes correspondent aux températures sèche et humide, à l'humidité relative et au volume spécifique. Grâce aux diagrammes psychrométriques, il suffit de connaître deux variables pour déduire l'ensemble des propriétés de l'air humide.

### Les conditions de confort thermique

Le confort thermique se définit comme la sensation ressentie par une personne satisfaite de son ambiance thermique. Il est influencé par des facteurs physiques et physiologiques.

Il est difficile de définir quelles sont les conditions générales capables d'assurer le confort thermique, car ces conditions diffèrent suivant les situations de travail. Il est même possible que les conditions requises varient pour un même poste s'il est occupé par des personnes différentes. En outre, il est impossible d'appliquer dans tous les pays une même norme technique définissant les

conditions de confort thermique en raison de la multiplicité des conditions climatiques et des coutumes vestimentaires.

Des observations réalisées sur des travailleurs effectuant un travail manuel léger ont néanmoins permis de définir une série de critères en ce qui concerne la température, la vitesse et l'humidité de l'air; ces critères sont rassemblés dans le tableau 45.12 (Bedford et Chrenko, 1974).

Les facteurs ci-dessus sont interdépendants. Ainsi, il faut abaisser la température de l'air en cas de rayonnement thermique important et l'élever si la vitesse de l'air augmente.

En règle générale, les corrections à apporter sont les suivantes:

Il faut élever la température:

- si la vitesse d'écoulement de l'air est élevée;
- si le travail est sédentaire;
- si les vêtements portés sont légers;
- s'il faut habituer les occupants à des températures intérieures élevées.

De même, la température de l'air devrait être abaissée:

- si le travail impose un important effort physique;
- si les vêtements portés sont chauds.

Pour une sensation agréable de confort thermique, il est préférable que la température ambiante soit légèrement supérieure à la température de l'air, que le flux d'énergie rayonnante soit le même dans toutes les directions et qu'il ne soit pas excessif au niveau du plafond. Le gradient vertical de température devrait être minimisé, de façon que les pieds restent au chaud sans que la charge thermique soit trop élevée à la hauteur de la tête. La vitesse d'écoulement de l'air influe assez fortement sur la sensation de confort thermique. Il existe des diagrammes qui donnent les vitesses recommandées en fonction de l'activité exercée et de l'habillement (voir figure 45.11).

Certains pays ont établi des normes de température ambiante minimales, mais pour l'heure aucune valeur optimale n'a été proposée. La valeur maximale de la température de l'air est généralement fixée à 20 °C. Les récents perfectionnements techniques ont accru la complexité de la mesure du confort thermique. De nombreux indices ont été définis, notamment l'indice de température effective (ET), l'indice de température effective corrigée (CET), l'indice de surcharge calorifique, l'indice de contrainte thermique (HSI), l'indice de température au thermomètre globe à bulbe humide (WBGT) et l'indice des valeurs médianes de Fanger (IMV). L'indice WBGT permet de déterminer les intervalles de récupération nécessaires en fonction de l'intensité de l'effort physique, de façon à éviter la contrainte thermique au travail. On trouvera une description détaillée de ces indices dans le chapitre n° 42, «Les réponses physiologiques à l'environnement thermique».

### La zone de confort thermique dans un diagramme psychrométrique

La zone d'un diagramme psychrométrique qui correspond aux conditions dans lesquelles un adulte éprouve une sensation de confort thermique a été soigneusement étudiée. Elle est définie dans la norme ASHRAE en fonction de la température effective. Celle-ci est elle-même définie comme étant la température, mesurée avec un thermomètre à bulbe sec dans un local uniforme, à 50% d'humidité relative, à laquelle une personne aurait les mêmes échanges de chaleur par rayonnement, par convection et par évaporation que dans son environnement habituel, au niveau d'humidité qui y règne. L'échelle de température effective est définie par l'ASHRAE pour une vêture de 0,6 clo (1 clo étant le degré d'isolation assuré par des vêtements ordinaires, et 0 clo correspondant au sujet nu) procurant une isolation thermique de  $0,155 \text{ K m}^2\text{W}^{-1}$  (K étant la température exprimée en degrés Kel-

Tableau 45.12 • Facteurs d'ambiance: critères proposés

Facteur d'ambiance	Critères proposés
Température de l'air	21 °C
Température moyenne de rayonnement	≥ 21 °C
Humidité relative	30-70%
Vitesse de l'air	0,05-0,1 m/s
Gradient de température (de la tête aux pieds)	≤ 2,5 °C

vin) pour une vitesse de déplacement de l'air de 0,2 m s<sup>-1</sup> (le sujet étant au repos) et pour une exposition de 1 heure à une activité sédentaire donnée de 1 met (unité d'activité métabolique égale à 50 kcal/m<sup>2</sup>h ou 58 W/m<sup>2</sup> de surface corporelle). La zone de confort est représentée sur la figure 45.11. On peut se servir de ces courbes pour les ambiances thermiques où la température produite par la chaleur de rayonnement est à peu près la même que celle qui est mesurée par un thermomètre à bulbe sec et où la vitesse d'écoulement de l'air est inférieure à 0,2 m s<sup>-1</sup>, les occupants étant vêtus légèrement et faisant un travail sédentaire (1 met).

**La formule de confort: la méthode de Fanger**

La méthode mise au point par Fanger repose sur une formule qui regroupe la température ambiante, la température moyenne de rayonnement, la vitesse relative de l'air, la tension de vapeur dans l'air ambiant, le niveau d'activité et la résistance thermique des vêtements portés. Le tableau 45.13 présente un exemple basé sur la formule de confort qui peut servir dans la pratique pour déterminer une température confortable en fonction des vêtements portés, du métabolisme énergétique correspondant au travail accompli et de la vitesse d'écoulement de l'air.

**Les systèmes de chauffage**

La conception d'un système de chauffage devrait être fondée sur les caractéristiques des locaux à chauffer et les activités censées s'y

dérouler. Il est cependant rare, dans le cas des établissements industriels, que les besoins des travailleurs en matière de chauffage soient pris en compte, souvent parce que les processus et les postes de travail n'ont pas encore été définis. Les installations sont donc conçues en fonction de critères très généraux, tenant uniquement compte des charges thermiques prévues et de l'apport de chaleur nécessaire pour maintenir une température donnée dans les locaux, abstraction faite de la répartition de la chaleur, de la localisation des postes de travail et d'autres facteurs plus spécifiques. C'est ce qui explique les déficiences du chauffage dans certains bâtiments, qui se traduisent par la présence de points froids et de courants d'air, par l'insuffisance du nombre d'éléments chauffants et par d'autres problèmes.

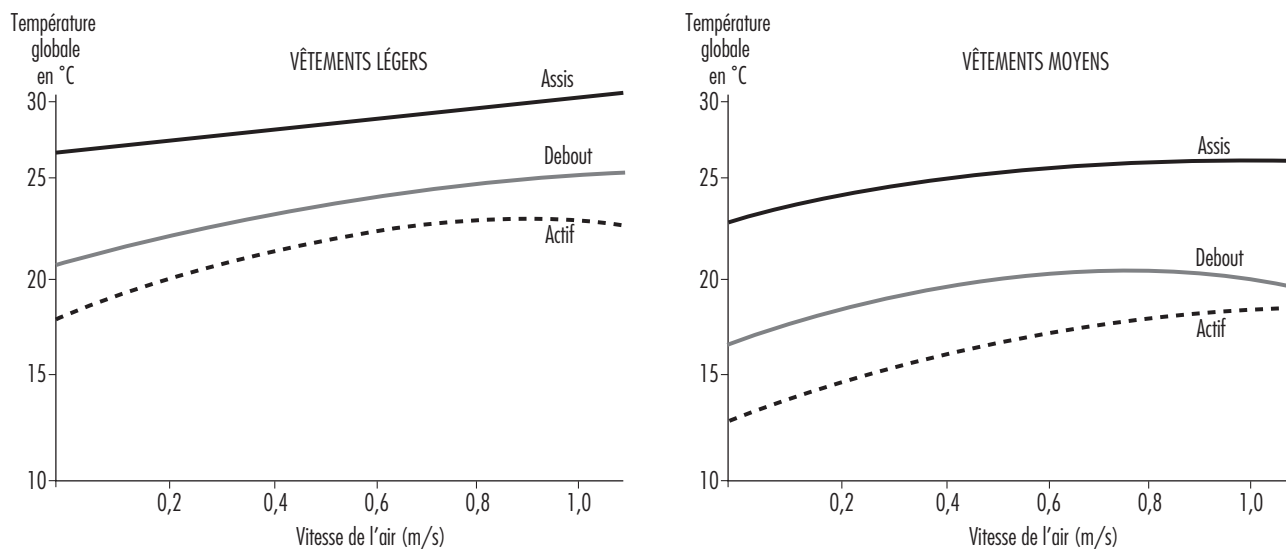
Pour bien concevoir le système de chauffage au stade de la planification d'un bâtiment, il importe de considérer au moins les points ci-après:

- Localisation adéquate des matériaux isolants, afin de réduire la consommation d'énergie et minimiser les gradients de température dans le bâtiment.
- Réduction des infiltrations d'air froid, afin de limiter le plus possible les variations de température dans les zones de travail.
- Prévention de la pollution de l'air, grâce à des extractions localisées et à une ventilation par déplacement ou par dilution.
- Contrôle des dégagements de chaleur résultant des processus mis en œuvre et étude de leur répartition dans les zones occupées du bâtiment.

Lorsque le chauffage est directement produit par des brûleurs sans conduits d'évacuation, il faut porter une attention particulière à l'inhalation par les occupants des produits de combustion. En brûlant, des combustibles tels que le mazout, le gaz naturel et le coke produisent en général du dioxyde de soufre, des oxydes d'azote, du monoxyde de carbone et d'autres produits de combustion. Il existe pour ces composés des limites d'exposition qu'il importe de respecter, surtout dans les espaces clos où leur concentration peut monter rapidement et où le rendement de la réaction de combustion peut baisser.

L'étude d'un système de chauffage implique toujours des compromis entre différents facteurs tels que le coût initial, la facilité

Figure 45.11 • Zones de confort en fonction de la température globale et de la vitesse d'écoulement de l'air



Source: BIT, 1983.

Tableau 45.13 • Températures cutanées de confort thermique (en °C) pour une humidité relative de 50% en fonction de différents paramètres (sur la base de la formule de Fanger)

Température de rayonnement		20 °C	25 °C	30 °C
<b>Métabolisme énergétique, 105 W/m<sup>2</sup> (1,8 met)</b>				
<i>Résistance thermique des vêtements (0,5 clo)</i>				
Vitesse de l'air	0,2 m/s	30,5	27,5	24,3
	0,5 m/s	30,6	29,0	27,0
	1,5 m/s	30,7	29,5	28,3
<i>Résistance thermique des vêtements (1,0 clo)</i>				
Vitesse de l'air	0,2 m/s	26,0	23,0	20,0
	0,5 m/s	26,7	24,3	22,7
	1,5 m/s	27,0	25,7	24,5
<b>Métabolisme énergétique, 157 W/m<sup>2</sup> (2,7 met)</b>				
<i>Résistance thermique des vêtements (0,5 clo)</i>				
Vitesse de l'air	0,2 m/s	21,0	17,1	14,0
	0,5 m/s	23,0	20,7	18,3
	1,5 m/s	23,5	23,3	22,0
<i>Résistance thermique des vêtements (1,0 clo)</i>				
Vitesse de l'air	0,2 m/s	13,3	10,0	6,5
	0,5 m/s	16,0	14,0	11,5
	1,5 m/s	18,3	17,0	15,7
<b>Métabolisme énergétique, 210 W/m<sup>2</sup> (3,6 met)</b>				
<i>Résistance thermique des vêtements (0,5 clo)</i>				
Vitesse de l'air	0,2 m/s	11,0	8,0	4,0
	0,5 m/s	15,0	13,0	7,4
	1,5 m/s	18,3	17,0	16,0
<i>Résistance thermique des vêtements (1,0 clo)</i>				
Vitesse de l'air	0,2 m/s	7,0		
	0,5 m/s	1,5	3,0	
	1,5 m/s	5,0	2,0	1,0

d'entretien, le rendement énergétique et l'applicabilité. C'est ainsi que l'on pourra envisager d'utiliser des radiateurs électriques pour chauffer les locaux pendant les heures creuses, lorsque l'électricité est moins chère, ou des systèmes chimiques (au sulfure de sodium, par exemple) pouvant stocker la chaleur et être mis en service aux heures de pointe. On peut également prévoir d'installer simultanément plusieurs systèmes différents et de les faire fonctionner de manière à optimiser les frais de chauffage.

L'installation d'appareils de chauffage pouvant indifféremment brûler du gaz ou du mazout est particulièrement intéressante. En chauffant directement à l'électricité, on consomme une forme d'énergie supérieure qui peut souvent se révéler coûteuse, mais qui peut en même temps assurer la souplesse nécessaire dans certains cas. Les pompes à chaleur et autres systèmes de cogénération tirant parti de la chaleur résiduelle peuvent offrir des solutions avantageuses du point de vue financier, en dépit de leur coût initial élevé.

En matière de chauffage et de climatisation, la tendance actuelle privilégie l'optimisation du fonctionnement et les économies d'énergie. Les nouveaux systèmes comportent donc des capteurs et des dispositifs de contrôle répartis dans tous les locaux à chauffer, de façon à limiter les apports de chaleur aux endroits et durant les périodes où ils sont indispensables au confort thermique. De cette manière, les économies réalisées peuvent atteindre 30%. La figure 45.12 présente quelques systèmes de chauffage courants, avec leurs avantages et leurs inconvénients.

### Les systèmes de climatisation

L'expérience montre qu'en milieu industriel une ambiance proche de la zone de confort durant les mois d'été augmente la productivité, réduit la fréquence des accidents, diminue l'absentéisme et favorise en général de meilleures relations humaines. Dans les commerces de détail, les hôpitaux et les grandes surfaces, la climatisation doit ordinairement être réglée pour assurer le confort thermique lorsque les conditions extérieures l'imposent.

Dans certains environnements industriels soumis à des conditions extérieures particulièrement rigoureuses, les systèmes de climatisation sont davantage destinés à éviter les effets négatifs de conditions extrêmes sur la santé qu'à assurer le confort thermique. On veillera à surveiller étroitement la maintenance et l'utilisation des installations, surtout si elles sont dotées d'humidificateurs, car ceux-ci peuvent devenir de dangereuses sources de contamination microbiologique.

Aujourd'hui, les systèmes de ventilation et de climatisation tendent à répondre simultanément, souvent à l'aide des mêmes installations, aux besoins de chauffage, de refroidissement et de conditionnement de l'air d'un bâtiment. De multiples classifications permettent de catégoriser les systèmes de refroidissement.

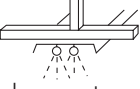


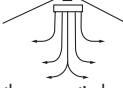
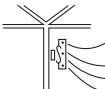

Ainsi, ils peuvent être classés, selon leur configuration, en :

- Unités hermétiques dont le réfrigérant a été préchargé en usine. Ces appareils, qui peuvent être ouverts et rechargés dans un atelier de réparation, sont en général employés dans les bureaux, les logements et autres locaux semblables.
- Unités semi-hermétiques de taille moyenne fabriquées en usine. Elles sont plus grandes que les unités domestiques et peuvent être réparées grâce à des trappes d'accès conçues à cette fin.
- Systèmes modulaires destinés aux entrepôts et aux grandes surfaces, formés de sous-ensembles clairement différenciés et matériellement distincts (le compresseur et le condenseur sont distincts de l'évaporateur et du détendeur). Ils sont utilisés dans les grands ensembles de bureaux, les hôtels, les hôpitaux, les usines et les bâtiments industriels.

Les systèmes de climatisation peuvent également être classés d'après la zone desservie en :

- Systèmes monozones: un même groupe de traitement d'air dessert simultanément plusieurs pièces d'un bâtiment qui ont des besoins semblables de chauffage, de refroidissement et de ventilation et sont régulées par une commande commune (thermostat ou appareil similaire). Les systèmes de ce type ne peuvent pas toujours assurer un niveau de confort adéquat dans toutes les pièces, surtout s'ils n'ont pas été conçus en fonction de la charge thermique particulière de chacune d'elles. La charge thermique peut d'ailleurs varier, par exemple lorsque le nombre d'occupants d'un local augmente ou que l'on ajoute un luminaire ou une autre source de chaleur (ordinateur, photocopieuse, etc.) qui n'avait pas été prévue au départ. L'inconfort peut également découler des variations saisonnières de l'ensoleillement dans une même pièce, ou même des variations de l'ensoleillement d'une pièce à l'autre dans la même journée.
- Systèmes multizones: ces systèmes peuvent fournir à plusieurs zones de l'air à des températures et à des niveaux d'humidité

Figure 45.12 • Caractéristiques des systèmes de chauffage les plus couramment utilisés sur les lieux de travail

SYSTÈME	CARACTÉRISTIQUES											
	Caractéristiques positives (avantages) <b>+</b>			Caractéristiques négatives (inconvenients) <b>-</b>			Caractéristiques neutres <b>○</b>			Caractéristiques variables <b>?</b>		
	Coût initial peu élevé	Faible coût de maintenance	Faible encombrement au sol	Réparation facile	Nécessite un circuit de vapeur ou d'eau chaude	Peu d'entretien	Pas de courants d'air	Faible gradient de température	Chauffage uniforme	Possibilité de ventilation en été	Possibilité de chauffage de l'air neuf	Possibilité de chauffage d'une zone ou d'un local
<b>Appareils à rayonnement</b>												
 Bande rayonnante montée sur une poutelle	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	-
 Panneau vertical monté sur un support	-	+	+	-	+	+	+	+	+	-	-	○
 Chauffage incandescent au gaz ou à l'électricité	+	○	+	+	-	○	+	?	-	-	-	+
<b>Appareils à convection</b>												
 Aérotherme vertical monté au point le plus élevé	○	-	+	+	+	○	○	+	+	+	+	○
 Aérotherme horizontal monté sur une poutelle	○	-	+	+	+	○	-	-	-	+	+	+
 Aérotherme horizontal monté au sol	+	-	-	+	-	-	-	-	-	+	?	+

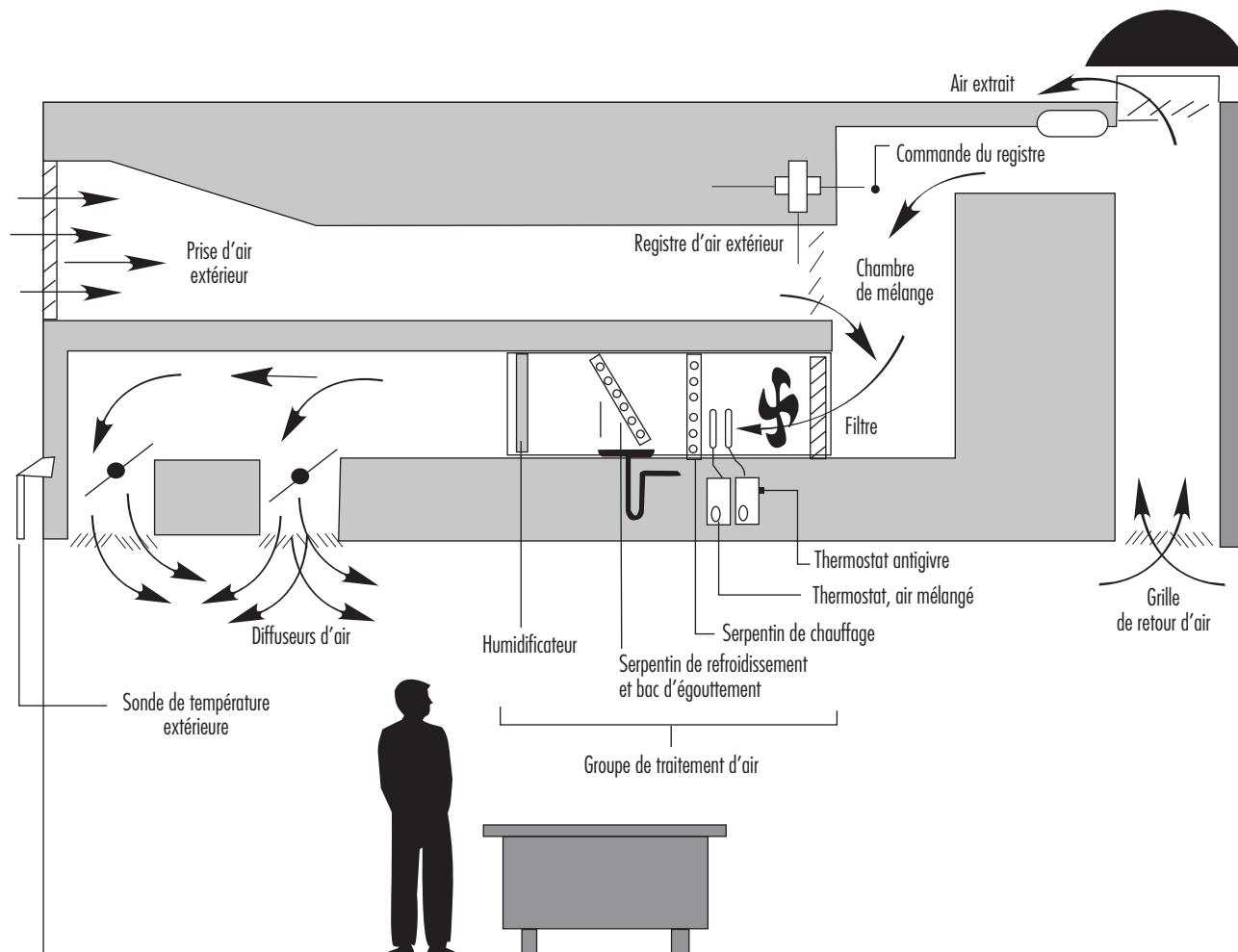
Source: BIT, 1983.

différents en chauffant, refroidissant, humidifiant ou déshumidifiant l'air, ou en en modifiant le débit. Ces systèmes, même s'ils sont généralement dotés d'une unité centrale commune de réfrigération (compresseur, évaporateur, etc.), sont équipés de nombreux éléments complémentaires: dispositifs de commande du débit, serpentins de chauffage, humidificateurs, etc. Ils peuvent réguler les conditions de température et d'humidité dans les locaux desservis en fonction des charges thermiques ponctuelles détectées au moyen de capteurs.

Les systèmes de climatisation peuvent en outre être classés selon les caractéristiques des débits d'air insufflés dans les locaux en:

- Systèmes à débit constant: ces systèmes injectent un débit d'air constant dans chaque local, la température étant régulée par chauffage ou refroidissement de l'air insufflé. L'air intérieur est le plus souvent recyclé après adjonction d'un certain pourcentage d'air frais.
- Systèmes à débit variable: ces systèmes assurent le confort thermique en modulant la quantité d'air chauffé ou refroidi intro-

Figure 45.13 • Schéma simplifié d'un système de climatisation



Source: NIOSH, 1991.

duit dans chaque local. Ils fonctionnent principalement par modification du débit, mais peuvent être combinés à des dispositifs qui modifient la température de l'air injecté.

Les problèmes les plus courants rencontrés dans ces divers systèmes sont soit l'excès de chauffage ou de refroidissement (s'ils ne sont pas capables de réagir aux variations de charge thermique), soit une ventilation insuffisante (s'ils n'apportent pas une quantité minimale d'air extérieur pour renouveler l'air intérieur). Cela peut créer des ambiances intérieures confinées où la qualité de l'air se dégrade peu à peu.

Tous les systèmes de climatisation ont les éléments de base ci-après (voir figure 45.13):

- Un ou plusieurs dépoussiéreurs, généralement à manche filtrante ou à précipitation électrostatique.
- Des dispositifs de chauffage ou de refroidissement de l'air. Ces dispositifs assurent un échange thermique qui permet de refroidir l'air avec de l'eau froide ou un réfrigérant, ou par ventilation forcée en été, ou de le réchauffer au moyen d'éléments électriques, ou par combustion en hiver.
- Appareils de régulation de l'humidité. En hiver, de l'humidité peut être ajoutée par injection directe de vapeur d'eau ou par

évaporation; en été, elle peut être réduite soit à l'aide de serpentins réfrigérés qui provoquent la condensation d'une partie de l'humidité contenue dans l'air, soit d'un circuit d'eau réfrigérée où l'air humide passe à travers un rideau de gouttes d'eau dont la température est inférieure à son point de rosée.

## L'IONISATION DE L'AIR INTÉRIEUR

*E. Adán Liébana et J. Guasch Farrás*

L'ionisation est l'une des techniques employées pour éliminer les poussières ou autres matières particulières en suspension dans l'air. Les ions agissent comme des noyaux de condensation pour les fines particules qui, s'agglutinant les unes aux autres, augmentent de taille et se déposent par précipitation.

En règle générale, la concentration ionique dans les espaces clos intérieurs est inférieure à celle que l'on constate à l'extérieur, en l'absence d'autres sources d'ions. D'où l'idée d'améliorer la qualité de l'air intérieur en y augmentant la concentration d'ions négatifs.

Selon certaines études basées sur des données épidémiologiques et des recherches expérimentales en projet, l'augmentation de la concentration d'ions négatifs (anions) en milieu de travail accroît la productivité des travailleurs et favorise la bonne humeur, tandis que les ions positifs (cations) ont des effets contraires. Toutefois, d'autres études ont abouti à la conclusion que les données existantes relatives aux effets des ions négatifs sur la productivité sont incohérentes et contradictoires. Il est donc impossible, à l'heure actuelle, d'affirmer catégoriquement que l'ionisation négative est réellement bénéfique.

### L'ionisation naturelle

Dans l'atmosphère, les molécules de gaz peuvent s'ioniser soit négativement en gagnant un électron, soit positivement en perdant un. Il faut cependant pour cela que les molécules acquièrent une énergie suffisante, dite *énergie d'ionisation*, qui est caractéristique de chaque molécule. Il existe dans la nature de nombreuses sources d'énergie, d'origine cosmique ou terrestre, qui peuvent produire ce phénomène: rayonnement naturel, rayonnement électromagnétique d'origine solaire (notamment dans l'ultraviolet), rayons cosmiques, atomisation des liquides (dans les cascades, par exemple), mouvements de grandes masses d'air à la surface de la Terre, phénomènes électriques tels qu'orages et éclairs, processus de combustion et substances radioactives.

Bien qu'elle soit encore imparfaitement connue, la configuration électrique des ions ainsi formés semble comprendre des ions carbone et des ions H<sub>+</sub>, H<sub>3</sub>O<sub>+</sub>, O<sub>+</sub>, N<sub>+</sub>, OH<sup>-</sup>, H<sub>2</sub>O<sup>-</sup> et O<sub>2</sub><sup>-</sup>. Les molécules ionisées peuvent s'agglomérer par adsorption des particules en suspension (brouillard, silice et autres contaminants). Les ions sont classés suivant leur taille et leur mobilité; celle-ci est le quotient de vitesse communiquée par un champ électrique à une particule chargée, par l'intensité de ce champ, et s'exprime en cm/s par volt/cm (cm/s/V/cm) ou plus simplement, en

$$\frac{cm^2}{Vs}$$

Les ions atmosphériques tendent à disparaître par recombinaison. Leur demi-vie dépend de leur taille et est inversement proportionnelle à leur mobilité. Les ions négatifs sont statistiquement plus petits que les ions positifs, la demi-vie des premiers étant de quelques minutes et celle des seconds, d'environ une demi-heure. La *charge spatiale* est le quotient des concentrations en ions positifs et en ions négatifs. Ce rapport, en général supérieur à l'unité, dépend de facteurs tels que le climat, le lieu et la saison. Dans les espaces occupés, il peut être inférieur à l'unité. Le tableau 45.14 présente quelques caractéristiques des ions.

### L'ionisation artificielle

L'activité humaine modifie l'ionisation naturelle de l'air. L'ionisation artificielle, quant à elle, peut être provoquée par les processus industriels et nucléaires ou par le feu. Les matières particulaires en

suspension dans l'air favorisent la formation d'ions Langevin (ions fixés à des particules). Les radiateurs électriques augmentent considérablement la concentration en ions positifs. Les climatiseurs accroissent également la charge spatiale des ambiances intérieures.

En milieu de travail, il y a des machines qui produisent des ions tant positifs que négatifs. C'est le cas des machines qui libèrent localement d'importantes quantités d'énergie mécanique (presses, métiers à filer et à tisser), d'énergie électrique (moteurs, imprimantes électroniques, photocopieuses, lignes et installations à haute tension), d'énergie électromagnétique (écrans cathodiques, téléviseurs, moniteurs d'ordinateurs) ou de radioactivité (bombes au cobalt 42). Ces équipements créent autour d'eux des environnements plus riches en ions positifs, ceux-ci ayant une durée de vie plus longue que les ions négatifs.

### Les concentrations ioniques ambiantes

Les concentrations ioniques varient avec les conditions environnementales et météorologiques. Dans les zones faiblement polluées, comme les forêts et les montagnes ou en haute altitude, la concentration en ions de petite taille augmente. A proximité de sources radioactives, de chutes d'eau ou de rapides, la concentration peut atteindre des milliers de petits ions par cm<sup>3</sup>. Par contre, au voisinage de la mer et là où les niveaux d'humidité sont élevés, les ions de grande taille prédominent. En général, les concentrations moyennes dans l'air pur sont de 500 ions négatifs et 600 ions positifs par cm<sup>3</sup>.

Certains vents peuvent transporter de fortes concentrations d'ions positifs: le föhn en Suisse, le Santa Ana dans l'ouest des Etats-Unis, le sirocco en Afrique du Nord, le chinook dans les Rocheuses et le khamsin au Moyen-Orient.

Dans les lieux de travail où n'existent pas d'importants facteurs ionisants, il y a souvent une accumulation d'ions de grande taille. C'est notamment le cas dans les espaces hermétiquement clos et les mines. La concentration en ions négatifs diminue nettement à l'intérieur et dans les zones contaminées ou poussiéreuses. Plusieurs raisons expliquent la baisse de la concentration en ions négatifs dans les locaux climatisés. D'abord, ces ions sont retenus dans les conduits et les filtres ou sont attirés par les surfaces à charge positive. Ainsi, les écrans cathodiques, du fait qu'ils sont chargés positivement, créent dans leur voisinage immédiat un microclimat pauvre en ions négatifs. Les systèmes de filtration conçus pour les «chambres propres», où les niveaux de contamination doivent être maintenus à un niveau infime, semblent également éliminer les ions négatifs.

Par ailleurs, un excès d'humidité condense les ions, tandis qu'un air sec crée des ambiances dans lesquelles de nombreuses charges électrostatiques s'accumulent sur les plastiques et les fibres synthétiques présents dans les locaux ou portés par les occupants.

### Les générateurs d'ions

Ces générateurs ionisent l'air en produisant une grande quantité d'énergie; celle-ci peut provenir d'une source de rayonnement alpha (comme le tritium) ou être engendrée par une source électrique en portant une électrode très pointue à une tension élevée. Les sources radioactives sont interdites dans la plupart des pays en raison de la radioactivité qu'elles émettent.

Les générateurs électriques sont constitués d'une cathode pointue portant une tension négative de plusieurs milliers de volts, entourée d'une anode en couronne mise à la terre. Les ions négatifs sont repoussés vers l'extérieur, tandis que les ions positifs sont attirés vers le générateur. La quantité d'ions négatifs produits augmente avec la tension appliquée et le nombre d'électrodes. Les générateurs à électrodes multiples fonctionnant à une tension moyenne sont les plus sûrs, car l'utilisation de tensions dépassant 8 000 à 10 000 volts libère également de l'ozone et des oxydes

Tableau 45.14 • Caractéristiques des ions selon leur mobilité et leur diamètre

Mobilité (cm <sup>2</sup> /Vs)	Diamètre (µm)	Caractéristiques
3,0-0,1	0,001-0,003	Petite taille, grande mobilité, courte durée de vie
0,1-0,005	0,003-0,03	Taille intermédiaire, plus lents que les petits ions
0,005-0,002	>0,03	Lents, s'agglutinent sur les matières particulaires (ions de Langevin)

d'azote. La dispersion des ions est obtenue par répulsion électrostatique.

La migration des ions dépend de l'alignement du champ magnétique qui s'établit entre le point d'émission et les objets qui l'entourent. La concentration ionique n'est pas homogène autour du générateur et diminue fortement avec la distance. Des ventilateurs permettent d'élargir la zone de dispersion ionique. Il y a lieu de noter qu'un nettoyage régulier des éléments actifs du générateur est indispensable à son bon fonctionnement.

On peut également produire des ions en ayant recours à l'atomisation de l'eau, à l'effet thermoélectrique ou au rayonnement ultraviolet. Il existe de nombreux types et tailles de générateurs pouvant être montés au plafond ou fixés à une paroi; les petits appareils portatifs peuvent être placés n'importe où.

### La mesure de la concentration ionique

Les appareils de mesure de la concentration ionique sont formés de deux plaques conductrices placées à 0,75 cm l'une de l'autre et entre lesquelles règne un champ électrique variable. Les ions sont attirés par la plaque de polarité. On mesure l'intensité du courant traversant l'une des plaques à l'aide d'un picoampèremètre. La tension variable permet de mesurer les concentrations d'ions de différentes mobilités. La concentration ionique  $N$  est donnée par la formule:

$$N = \frac{I}{VqA}$$

dans laquelle  $I$  est le courant en ampères,  $V$  la vitesse de l'air en cm/s,  $q$  la charge d'un ion monovalent ( $1,6 \times 10^{-19}$  coulomb) et  $A$  la surface efficace des plaques conductrices en cm<sup>2</sup>. On suppose que tous les ions ont une charge unitaire et qu'ils sont tous captés par les plaques. Il faut noter que cette méthode a ses limites en raison de la présence de courants de fond non négligeables et de l'influence d'autres facteurs tels que l'humidité et l'électricité électrostatique.

### L'effet des ions sur l'organisme

Les petits ions négatifs sont censés avoir l'effet biologique le plus important du fait de leur plus grande mobilité. Des concentrations élevées d'ions négatifs peuvent tuer les micro-organismes pathogènes ou arrêter leur croissance, sans que l'on ait apparemment décelé d'effets nuisibles sur l'humain.

Certaines études laissent penser que l'exposition à de fortes concentrations d'ions négatifs produit chez certaines personnes des modifications biochimiques et physiologiques qui ont un effet relaxant, réduisent la tension et les maux de tête, augmentent la vigilance et diminuent les temps de réaction. Ces effets pourraient être dus à l'inhibition, chez certains sujets hypersensibles, de l'hormone neurale sérotonine (5-HT) et de l'histamine dans les environnements riches en ions négatifs. Toutefois, d'autres études aboutissent à des conclusions différentes quant aux effets des ions négatifs sur l'organisme. Les bienfaits de l'ionisation négative restent donc contestés et d'autres études devront être entreprises avant qu'il soit possible de clore le débat.

### Références bibliographiques

- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH), 1992: *Industrial Ventilation — A Manual of Recommended Practice*, 21<sup>e</sup> édition (Cincinnati).
- American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 1992: *Method of Testing Air Cleaner Devices Used in General Ventilation for Removing Particulate Matter* (Atlanta).
- Baturin, V.V., 1972: *Fundamentals of Industrial Ventilation* (New York, Pergamon).
- Bedford, T. et Chrenko, F.A., 1974: *Basic Principles of Ventilation and Heating* (Londres, H.K. Lewis).
- Bureau international du Travail (BIT), 1983: *Encyclopedia of Occupational Health and Safety*, L. Parmeggiani (directeur de publication), 3<sup>e</sup> édition (Genève).
- Chartered Institution of Building Services, 1978: *Environmental Criteria for Design* (Londres).
- Comité européen de normalisation (CEN), 1992: *Méthode d'essai des filtres à air utilisés en ventilation générale*, Eurovent 4/5 (Eurovent, Paris).
- Commission des Communautés européennes (CCE), 1992: *Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings* (Luxembourg).
- Constance, J.D., 1983: *Controlling In-plant Airborne Contaminants. System Design and Calculations* (New York, Marcel Dekker).
- Fanger, P.O., 1988: «Introduction of the olf and the decipol units to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors», *Energy Building*, vol. 12, pp. 7-19.
- , 1989: «The new comfort equation for indoor air quality», *ASHRAE Journal*, vol. 10, pp. 33-38.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 1991: *Building Air Quality: A Guide for Building Owners and Facility Managers* (Cincinnati).
- Organisation mondiale de la santé (OMS), 1987: *Air Quality Guidelines for Europe*, European Series No. 23 (Copenhague, Bureau de l'Europe).
- Sandberg, M., 1981: «What is ventilation efficiency?», *Building Environment*, vol. 16, pp. 123-135.

### Références complémentaires

- «Air filters — how effective are they?», 1991: *Indoor Air Quality Update*, vol. 4, n° 8, pp. 1-7.
- American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE), 1977: *Handbook and Product Directory: Fundamentals* (Atlanta).
- , 1978: *Handbook and Product Directory: Applications* (Atlanta).
- Berg-Munch, B., Clausen, G. et Fanger, P.O., 1986: «Ventilation requirements for the control of body odor in spaces occupied by women», *Environment International*, vol. 12, pp. 195-199.
- Bethe, R.M., 1978: *Air Pollution Control Technology* (New York, Van Nostrand Reinhold).
- Billings, C.E., 1982: «Methods for indoor air quality», *Environment International*, vol. 8, pp. 497-504.
- Breum, N.O., 1991: «High versus low momentum ventilation in a machine workshop», *Staub-Reinhalung der Luft*, vol. 51, pp. 91-96.
- Brunet, R., 1976: *Ventilation et chauffage des locaux de travail associés à l'économie et à la récupération d'énergie* (INRS, Paris), ED 532.
- Building Research Establishment, Department of the Environment, 1979: «Thermal, visual, and acoustic requirements in buildings», *Building Research Establishment Digest* (Londres, HMSO), vol. 226, juin.
- Cain, W.S. et coll., 1983: «Ventilation requirements in buildings: Control of occupancy odor and tobacco smoke odors», *Atmospheric Environment. Part A: General Topics*, vol. 17, n° 6, pp. 1187-1197.
- Central Cooling Air-Conditioners: Standard for Safety, 1978: (Illinois, Underwriters Laboratories, Inc.)
- Cone, J. et Hodgson, M.J., 1989: «Building-associated illness and problem buildings», *Occupational Medicine: State of the Art Reviews*, vol. 4, n° 4.
- Fanger, P.O., 1973: «Assessment of man's thermal comfort in practice», *British Journal of Industrial Medicine*, vol. 30, n° 4, pp. 313-324.
- Gilet, J.C., Laforest, J.C., Méreau, P. et Vandevyver, B., 1992: «Ionisation négative de l'air — Synthèse

bibliographique et enquête exploratoire en entreprise», *Cahiers de notes documentaires — Sécurité et hygiène du travail*, 1<sup>er</sup> trimestre, n° 146, note n° 1867-146-92, pp. 15-26.

- Hamilton, M., 1984: *Air Ion Balance in the Workplace*, vol. 2, Industrial Safety Data File No. 65 (Londres, United Trade Press).
- Hawkins, L.H., 1982: «Air ions and office health», *Occupational Health*, vol. 34, n° 3, pp. 116-124.
- Hawkinson, T.E. et Barber, D.E., 1981: «The industrial hygiene significance of small air ions», *American Industrial Hygiene Association Journal*, vol. 42, n° 10, pp. 759-762.
- Health and Safety Executive (HSE), 1983: *Ozone: Health Hazards and Precautionary Measures* (Londres).
- Hedge, A. et Collis, M.D., 1987: «Do negative air ions affect human mood and performance?», *Occupational Hygiene*, vol. 31, n° 3, pp. 285-290.
- Hedge, A. et Eleftherakis, A., 1982: «Air ionization: An evaluation of its physiological and psychological effects», *ibid.*, vol. 25, n° 4, pp. 409-419.
- Heinsohn, R.J., 1991: *Industrial Ventilation. Engineering Principles* (New York, Wiley).
- Liu, R.T., Raber, R.R. et Yu, H.H.S., 1991: «Filter selection on an engineering basis», *Heating, Piping, Air-Conditioning*, vol. 63, n° 5, pp. 37-44.
- National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 1978: *Symposium Proceedings: The Recirculation of Industrial Exhaust Air* (Cincinnati).
- Rolloos, M., 1993: «HVAC systems and indoor air quality», *Indoor Environment*, vol. 2, pp. 204-212.
- Turiel, I., 1986: *Indoor Air Quality and Human Health* (Palo Alto, Californie, Stanford University Press).
- Weekes, D.M. et Gammage, R.B., 1990: *The Practitioner's Approach to Indoor Air Quality Investigations* (Akron, Ohio, AIHA).