

# Traitement de l'air et climatisation

## Généralités

par **André BAILLY**

*Directeur du laboratoire de la Compagnie Industrielle d'Applications Thermiques (CIAT)*

**Michel CLERC-RENAUD**

*Ingénieur de l'Institut national des sciences appliquées de Lyon  
Conseiller technique CIAT*

**Emmanuel RUTMAN**

*Ingénieur de l'École catholique d'arts et métiers de Lyon  
Responsable de l'équipe Confort du laboratoire CIAT*

et **Claude TERNANT**

*Ingénieur de l'École des hautes études industrielles de Lille (HEI)  
Ancien responsable du département Assistance technique de CIAT*

1. L'homme et son environnement .....	BE 9 270 - 2
2. Le confort : conditions et indicateurs .....	— 5
3. Les différents systèmes de climatisation .....	— 11
4. Objectifs du traitement d'air .....	— 13
5. Réponse de la communauté professionnelle .....	— 15
Notations et symboles .....	— 16
Pour en savoir plus .....	Doc. BE 9 274

**L**e maintien des conditions d'ambiance d'un local a plusieurs buts :

- satisfaire les exigences de confort d'occupation ;
- satisfaire les exigences d'un procédé de fabrication ou d'un laboratoire ;
- assurer la conservation des bâtiments, l'humidité et le froid dégradant rapidement les murs et toitures.

Le traitement de l'air ne se limite pas au maintien d'une température ambiante. Beaucoup d'autres facteurs peuvent être pris en compte tels que l'hygrométrie, la qualité de l'air, le niveau sonore, la précision et la stabilité des paramètres, l'esthétique, la diffusion d'air...

Il fait appel à de nombreuses technologies et requiert les connaissances de spécialités aussi différentes que la thermique, l'hydraulique, l'aéraulique, l'acoustique, la filtration, la chimie, l'informatique, l'automatique, la régulation, la métrologie.

L'ère primaire du simple chauffage est révolue. L'être humain aspire à un confort thermique, acoustique, lumineux et de qualité d'air. La climatisation par le traitement d'air répond à ces nouvelles exigences.

Avant de développer les différents aspects du traitement d'air, les différentes notions de confort, de pollution de l'air et leurs effets sur l'homme seront rappelés, les composants rencontrés en traitement d'air seront indiqués.

Ce n'est pas un catalogue de solutions types, mais un exposé des bases de sélection et de calcul afin d'aider le lecteur à concevoir les climatisations par traitement d'air de la plus simple à la plus complexe.

Cet exposé se compose de 4 articles

[BE 9 270] *Traitements de l'air et climatisation. Généralités*

[BE 9 271] *Traitements de l'air et climatisation. Les composants et leurs fonctions*

[BE 9 272] *Traitements de l'air et climatisation. Aspects thermiques et mécaniques*

[BE 9 273] *Traitements de l'air et climatisation. Aspects acoustiques et physico-chimiques*

complétés par un fascicule de documentation :

[Doc BE 9 274] *Traitements de l'air et climatisation. Pour en savoir plus.*

## 1. L'homme et son environnement

### 1.1 Ajustements thermiques du corps humain avec son milieu

L'homme est un homéotherme. Il maintient sa température interne constante quel que soit son environnement, indépendamment de sa propre production de chaleur. Cela garantit l'intégrité des fonctions vitales de son organisme.

Pour maintenir l'homéothermie, nous devons avoir égalité entre la création de chaleur à l'intérieur du corps et les échanges avec l'environnement.

Cette chaleur est due principalement à l'oxydation des aliments, éventuellement complétée par des apports externes. Elle est également (dans une moindre mesure) influencée par les coefficients de conductance des divers tissus traversés et par les débits sanguins locaux [1].

Le bilan enthalpique du corps peut s'exprimer par la relation :

$$L = M + W + R + (C + C_{\text{res}}) + (E_{\text{res}} + E_{\text{diff}} + E_{\text{sud}})$$

avec	$L$	charge thermique ( $\text{W/m}^2$ ),
	$M$	métabolisme (met ou $\text{W/m}^2$ ),
	$W$	travail extérieur ( $\text{W/m}^2$ ),
	$R$	rayonnement thermique ( $\text{W/m}^2$ ),
	$C$	convection thermique ( $\text{W/m}^2$ ),
	$C_{\text{res}}$	convection respiratoire ( $\text{W/m}^2$ ),
	$E_{\text{res}}$	évaporation respiratoire ( $\text{W/m}^2$ ),
	$E_{\text{diff}}$	évaporation par diffusion d'humidité à travers la peau ( $\text{W/m}^2$ ),
	$E_{\text{sud}}$	évaporation par sudation ( $\text{W/m}^2$ ).

Les valeurs ci-dessus sont comptées positives lorsqu'elles augmentent la charge thermique du corps et négatives lorsqu'elles diminuent la charge thermique.

**Nota :** pour la définition de chacun de ces termes, le lecteur pourra se reporter à l'article *Confort thermique* [BE 9 085] de ce traité [33].

Ainsi, depuis la nuit des temps, l'homme a su évoluer et s'adapter à son milieu. L'homme moderne n'échappe pas à la règle. Pour maintenir notre température interne constante, nous mettons en œuvre des processus comportementaux et végétatifs de thermo-régulation.

■ Les **mécanismes comportementaux** rassemblent les données qui font de l'homme un animal difficilement quantifiable et souvent imprévisible.

**Exemple :** les vêtements servent aussi bien d'atours à une femme magnifique, qu'ils permettent à un corps parfois disgracieux de se dérober au regard d'autrui. Par ailleurs nous les utilisons dans un souci de confort thermique.

■ Les **mécanismes végétatifs** rassemblent les moyens de régulation du corps humain. En effet, la valeur de consigne est en permanence comparée aux informations nerveuses issues des récepteurs cutanés chauds et froids et à celles des récepteurs thermiques des sites centraux.

Pour illustrer ces mécanismes végétatifs, nous avons rassemblé dans le tableau 1 :

- les sensations (température et confort) progressives d'un homme sédentaire soumis à une exposition prolongée aux diverses conditions thermiques considérées ;

- les réactions de son organisme concernant son comportement physiologique et son état de santé [2].

### 1.2 L'homme et les sons

Nous devons toujours garder à l'esprit que le mot « son » désigne à la fois la vibration physique qui éveille la sensation et la sensation elle-même. Le son qui traduit une notion de type objectif :

- est un phénomène physique d'origine mécanique, les fluctuations rapides de la pression de l'air au niveau de nos oreilles engendrant une sensation auditive ;

- exprime le côté difficilement quantifiable et souvent imprévisible de l'homme ;

- agit d'une manière subjective qui se traduit par une perception de ce son au niveau du cerveau humain.

#### ■ Réaction de l'oreille humaine

La réaction de l'oreille humaine est proportionnelle au logarithme de la pression acoustique. L'ordre de grandeur de l'amplitude des sensations est de  $10^6$ ; il s'agit donc d'une valeur inadaptée à une échelle linéaire. La sensibilité de l'oreille varie suivant les fréquences. Ainsi, l'homme est très vulnérable aux moyennes fréquences et peu sensible aux basses et fortes fréquences [3]. Le psychoacousticien ne cherche pas à connaître les secrets de la physiologie de l'audition mais recherche plutôt la fonction de transfert entre les stimulus et les sensations perçues.

**Tableau 1 – Sensations de température et de confort, et mécanismes végétatifs**

Sensation		Comportement physiologique	Conditions de santé
Température	Confort		
Insupportable	Insupportable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Réchauffement rapide et dangereux du corps</li> <li>• Défaillance de la régulation thermique</li> </ul>	Collapsus thermique : trouble de la circulation
Très chaud	Très inconfortable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transpiration</li> <li>• Vasodilatation</li> <li>• Coup de chaleur</li> <li>• Fatigue</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Danger des coups de chaleur</li> <li>• Troubles cardio-vasculaires</li> </ul>
Chaud	Inconfortable	Même comportement que ci-dessus se réduisant avec la diminution de la sensation de chaud	
Assez chaud	Assez inconfortable		
Légèrement chaud	Légèrement inconfortable	Régulation normale par transpiration et échange vasculaire	Limite du danger des coups de chaleur
Etat thermique neutre	À l'aise	Zone de régulation vasomotrice normale	Etat de santé et d'équilibre normal
Légèrement frais	Assez confortable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmentation des pertes de chaleur sensible</li> <li>• Nécessite un vêtement plus isolant ou une activité accrue</li> </ul>	Début d'affectation par assèchement de la peau et déshydratation des muqueuses
Passablement frais	Un peu inconfortable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Augmentation des pertes de chaleur sensible</li> <li>• Nécessite un vêtement plus isolant ou une activité accrue</li> </ul>	Affectation accrue par assèchement de la peau et déshydratation des muqueuses
Froid	Inconfortable	Vasoconstrictions dans les mains et dans les pieds	
Très froid	Très inconfortable	Frissonnements	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Douleurs musculaires</li> <li>• Altération de la circulation périphérique</li> </ul>

### ■ Propagation du son dans l'oreille

Le cerveau humain, à travers ce capteur spécialisé, peut acquérir un signal lié au transfert d'énergie d'une vibration acoustique aérienne sur neuf octaves et une échelle dynamique de plus de 120 dB. Le processus de propagation du son peut se décomposer en sept étapes :

- une source sonore émet un train d'ondes ;
- le pavillon capte ces ondes ;
- le canal auditif externe joue le rôle de résonateur à la fréquence de 3 000 Hz ;
- au niveau du tympan nous pouvons observer un gain de 10 à 12 dB à 3 000 Hz et une perte d'environ 3 dB à 7 000 Hz ;
- la chaîne des osselets se met à vibrer ;
- cette vibration provoque alors l'apparition d'une force qui, en agissant sur la membrane séparant l'oreille moyenne du vestibule, va créer une pression. Celle-ci est de 10 à 30 fois supérieure, suivant les fréquences, à la valeur de la pression de l'onde sonore au niveau du pavillon ;
- les vibrations transmises à l'oreille interne provoquent l'apparition d'influx nerveux qui, par l'intermédiaire du nerf auditif, vont renseigner le cerveau.

### 1.3 Les polluants

Selon l'OMS (Organisation mondiale de la santé), un polluant est tout ce qui est susceptible d'altérer la qualité de l'air en nuisant au bien-être physique, moral et social, donc à la santé. Au vu du nombre important d'éléments en jeu et de la complexité de l'être humain, il n'existe pas pour l'instant de norme définissant un air sain. Nous devons toujours garder à l'esprit que certains polluants peuvent entraîner, à plus ou moins long terme, des risques pour l'homme pouvant parfois provoquer la mort. Bien entendu, cette

finalité est conditionnée par plusieurs facteurs dont les plus importants sont :

- le type de polluant ;
- la concentration ;
- la morphologie de l'individu ;
- la durée de l'exposition.

### ■ Polluants gazeux

Nous avons rassemblé, dans le tableau 2, les polluants gazeux avec leurs principales sources connues.

**Tableau 2 – Sources de polluants gazeux**

Polluant	Source
Monoxyde de carbone (CO)	Atmosphère, moteurs thermiques, cigarettes, chaudières
Dioxyde de carbone (CO <sub>2</sub> )	Hommes, atmosphère, combustion
Oxydes d'azote (NO <sub>x</sub> )	Atmosphère, moteurs thermiques, cigarettes, chaudières
Dioxyde de soufre (SO <sub>2</sub> )	Atmosphère, combustion
Formaldéhyde (HCHO)	Matériaux de construction, cigarettes
Ozone (O <sub>3</sub> )	Équipement d'éclairage, photocopieurs

### ■ Micro-organismes

Les principales causes de prolifération des micro-organismes sont :

- une hygrométrie importante ;
- une température élevée ;
- un milieu nutritif approprié.

Nous pouvons citer parmi ces micro-organismes les levures, les champignons et les bactéries. Un milieu chaud, humide et empoussiéré est un véritable « paradis » pour ces polluants.

### ■ Radon

Le radon est un gaz radioactif lié à la désintégration du radium. Cet élément naturel est situé dans le sol, les roches et l'eau. Il peut être à l'origine du cancer de la thyroïde.

Ce polluant pénètre dans les bâtiments par diffusion et convection. Dans l'atmosphère, il va se désintégrer. La concentration du radon est exprimée en becquerels par m<sup>3</sup> (Bq/m<sup>3</sup>). Ses résidus de désintégration sont exprimés en *working level* (WL).

**Nota :** le *Working Level* est la mesure des résidus de désintégration du radon. La valeur 1 WL représente toute combinaison de résidus de radon éphémère dans un litre d'air qui résulte d'une émission résiduelle de  $1,3 \times 10^5$  MeV d'énergie potentielle  $\alpha$ .

Un WL est généralement égal à environ 200 pCi/L (picocuries par litre d'air).

Pour information, nous pouvons citer l'Atomic Energy Control Board (Canada) qui a fixé deux seuils :

- à partir de 0,01 WL, il faut une investigation de contrôle ;
- à partir de 0,15 WL, il faut une intervention immédiate.

### ■ Fibres

Suite aux différentes polémiques de ces dernières années sur les dangers des fibres d'amiante, nous comprenons aisément que certaines concentrations de ces fibres dans l'air puissent être nocives pour l'homme. L'OMS recommande une valeur crête maximale de 500 mg/m<sup>3</sup> pour une durée d'exposition de 10 min et une valeur moyenne de 120 mg/m<sup>3</sup> pour une durée d'exposition de 24 h.

## 1.4 Effets des polluants sur l'homme

Les répercussions sanitaires des ambiances artificielles sont mal connues et sont souvent sujettes à polémiques. Nous allons traiter les principales pathologies médicales associées aux techniques de mise en œuvre des climats artificiels.

### ■ Allergies

La pénétration dans un organisme de molécules antigènes provoque l'apparition d'anticorps spécifiques. Dans certains cas, notre action de défense immunitaire réagit de manière disproportionnée. C'est cette action que nous appelons allergie. Bien entendu, les individus sont inégaux devant les attaques des antigènes transportés par l'air, souvent rassemblés sous le terme de pneumallergènes. En effet, ces allergies n'affectent que les sujets les plus sensibles présentant une certaine prédisposition génétique. Certains facteurs comme le tabagisme ou un état dépressif facilitent l'apparition des allergies. Concrètement, elles se manifestent le plus souvent par des rhinites, des sinusites, de l'asthme, de l'urticaire, de l'eczéma voire des conjonctivites.

### ■ Legionellose

En 1976, à la suite d'un congrès dans un hôtel de Philadelphie, de nombreux légionnaires furent hospitalisés. En 1977 fut découverte la bactérie responsable de ces troubles. Cette infection est liée à l'inhalation de « *Legionella pneumophila* ». Elle se traduit par une pneumopathie infectieuse.

### ■ Fièvre de Pontiac

À l'instar de la légionellose, elle se traduit par une affection bénigne de type pseudogrippal. La première épidémie a eu lieu en 1968 à Pontiac dans le Michigan.

### ■ Syndromes toxiques

Sous ce vocable sont regroupés les effets pouvant être mortels pour l'homme. Nous retrouvons :

- les intoxications oxycarbonées, le CO étant un puissant inhibiteur de l'oxygénation des tissus. Il existe heureusement certains symptômes d'alerte à une intoxication oxycarbonée, en particulier maux de tête, troubles digestifs, vertiges et fatigue ;

- le saturnisme : le **plomb**, élément présent dans les peintures utilisées à la fin du 19<sup>e</sup> siècle et au début du 20<sup>e</sup> siècle, est responsable de cette maladie.

### ■ Syndrome des bâtiments malsains

Contrairement aux effets traités précédemment, nous abordons ici un syndrome non spécifique. Il est plus connu sous son appellation anglaise, *Sick Building Syndrome* (SBS). Depuis la fin des années 1970, les occupants des bureaux climatisés des IGH (immeuble de grande hauteur) se plaignent, entre autres, de troubles respiratoires, de manifestations oculaires, cutanées, neuropsychiques et digestives. Ces troubles provoquent une sensation d'inconfort bénin mais permanent.

Les facteurs de développement du SBS :

- sont, entre autres, liés à la qualité de l'air intérieur, notamment au débit d'air neuf ;

- dépendent aussi des équipements techniques comme l'éclairage et des facteurs organisationnels comme le confort du mobilier et le stress physico-social.

De même, les aspects psychosomatiques liés à l'absence de contrôle sur l'environnement jouent un rôle dans l'apparition du SBS.

L'OMS considère que 25 à 30 % des bâtiments neufs et rénovés sont concernés par le *Sick Building Syndrome*.

## 1.5 Odeurs

Le cycle olfactif humain se décompose en quatre étapes bien distinctes, nous permettant de différencier plus de 4 000 odeurs :

### ■ Détection de l'odeur

Cette action est liée à la notion de seuil absolu qui correspond à la concentration minimale du stimulus pour qu'il devienne perceptible. Nous comprenons aisément que ce terme d'absolu soit inadapté. En effet, il est plus correct de ramener ces seuils à des concepts statistiques. Ainsi, il est convenu de définir le seuil de détection comme la concentration à laquelle un sujet détecte une odeur avec une probabilité de 0,5. Parmi les différents agents qui jouent un rôle dans le mécanisme de détection, nous pouvons citer l'adaptation, la distorsion du signal, les rythmes diurnes, l'activité hormonale, mais aussi l'âge et la maladie.

### ■ Expression de l'intensité perçue en fonction du stimulus exercé

Elle se fait suivant une loi de type puissance qui peut s'écrire ;

$$I = kC^n$$

avec  $I$  intensité perçue,

$C$  concentration de l'odeur (mg/m<sup>3</sup>),

$k, n$  constantes dépendant du type d'odeur.

### ■ Caractérisation de l'odeur

Nous utilisons comme unité de quantification l'unité d'odeur (UO). Elle correspond à la dilution de l'odeur dans l'air. Ainsi une odeur de 10 UO équivaut à un volume de l'odeur donnée diluée

dans 10 fois son volume en air pur non odorant. Ainsi l'unité d'odeur est équivalente à sa dilution. Ce paramètre est utilisé pour quantifier les odeurs liées aux matériaux. Bien entendu, cette unité ne traduit pas l'amplitude du signal ; ainsi nous pouvons très bien avoir une odeur avec 20 UO qui sera moins gênante qu'une autre odeur avec 10 UO. Cette méthodologie est parfaitement définie dans la norme ASTM D1366-67a, traitant de l'analyse de l'air.

#### ■ Expression de la sensation perçue

Cette modélisation de la sensation ressentie par l'homme vis-à-vis d'un stimulus olfactif est complexe à mettre en œuvre. En effet, nous devons intégrer des paramètres aussi variés que le type et la concentration du polluant, la durée et la fréquence de l'exposition, l'environnement, l'âge, le sexe, la profession. Néanmoins certains phénomènes semblent constants :

- une odeur jugée agréable devient vite désagréable si la concentration de sa source augmente ;
- une odeur jugée désagréable reste désagréable, malgré la diminution de la concentration de sa source.

**Remarque :** l'utilisation d'un jury de nez semble être une bonne méthode pour connaître la réponse du cycle olfactif humain à des stimulus odorants. Cette méthode, utilisée par de nombreux chercheurs, demande certaines précautions. Néanmoins, un échantillon de 10 personnes judicieusement choisies peut être suffisant.

Pour de plus amples renseignements sur les odeurs, le lecteur se reporterà à l'article [G 2 900] *Les odeurs dans l'environnement* paru dans le traité Environnement des Techniques de l'Ingénieur [32].

## 2. Le confort : conditions et indicateurs

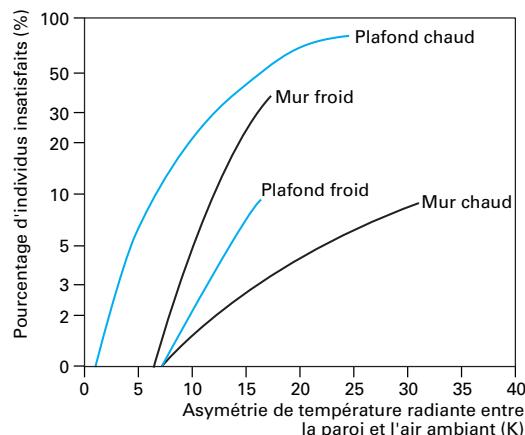
### 2.1 Confort thermique

Pour plus de détail le lecteur pourra se reporter à l'article *Confort thermique* [BE 9 085] de ce traité [33].

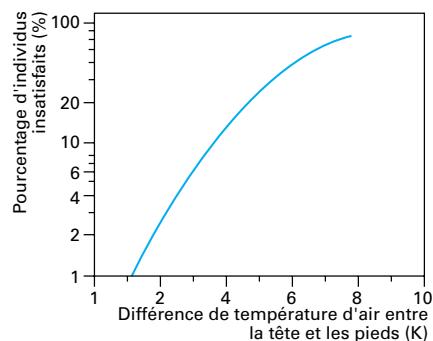
D'un point de vue physiologique, le confort thermique est propre à chaque homme à un instant donné. En effet, si nous considérons un individu dont la tenue vestimentaire et l'activité sont figées, il n'existe qu'une température ambiante pour laquelle le corps ne met pas en œuvre ses mécanismes de thermorégulation. Il s'agit de la **température de neutralité**. Sur cette base, Fanger [4], comme de nombreux autres auteurs, a défini le confort thermique comme l'absence d'inconfort. Ainsi, en considérant les phénomènes de thermorégulation comme des sources d'inconfort, la neutralité thermique correspond au confort. Les travaux de Fanger ont servi de base pour la norme ISO 7730 [5]. Or, définir le confort uniquement comme absence d'inconfort est restrictif ; en effet, nous devons tenir compte des phénomènes de gêne locale. La qualification de ce confort thermique passe par l'utilisation de différents indicateurs que nous pouvons regrouper en trois grandes classes :

- les indices rationnels ;
- les zones de confort ;
- les équations de confort.

Ces différents critères sont détaillés dans la référence [33]. Mais, au cours d'un exposé succinct des différents inconforts locaux, nous complétons cette référence par une présentation de l'indice normalisé *DR* qui caractérise la gêne locale due au courant d'air.



**Figure 1 – Asymétrie de rayonnement**  
(Ashrae Handbook of Fundamentals) [2]



**Figure 2 – Gradient de température vertical**  
(Ashrae Handbook of Fundamentals) [2]

#### ■ Asymétrie de rayonnement

L'individu placé au centre d'un local est soumis à des températures rayonnantes non homogènes. Comme nous pouvons le constater sur la figure 1, un individu sera plus sensible aux asymétries de rayonnement issues d'un plafond chauffant que d'un mur chaud.

#### ■ Gradient vertical de température

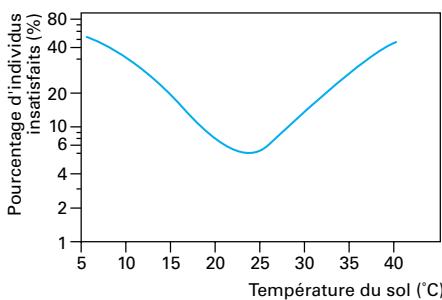
De la même manière, un individu peut être soumis à un gradient vertical de température. La figure 2 représente le pourcentage d'individus insatisfaits en fonction de l'écart de température tête-pied d'un individu assis.

#### ■ Température du sol

Dès 1931, le lien confort-température du sol a été étudié par Missernard [6]. Depuis, les travaux d'Olesen [7] ont permis de définir une température optimale du sol en thermoneutralité ( $23^{\circ}\text{C}$  s'ils sont assis et  $25^{\circ}\text{C}$  s'ils sont debout) pour des individus chaussés (figure 3).

#### ■ Sensation de courant d'air

C'est certainement la sensation la plus impopulaire auprès des usagers de la climatisation. Fanger et Melikov [8] ont, à partir d'expériences réalisées sur cinquante individus, défini une équation



**Figure 3 – Pourcentage d'individus insatisfaits en fonction de la température du sol**

exprimant le pourcentage d'insatisfaits par sensation de courant d'air. Cette équation inclut les travaux préalables de Fanger et Pedersen [31] sur la relation entre l'inconfort ressenti et la fréquence de fluctuation de la vitesse. Cette loi tient également compte des travaux de Fanger [4] et [9] sur la température cutanée moyenne en fonction du métabolisme. Cette sensation est caractérisée par l'indice normatif *DR*. Cette gêne (en anglais *Draft Raughting*) représente le pourcentage d'insatisfaits dû au courant d'air qui peut provoquer un refroidissement et/ou un réchauffement local :

$$DR = (34 - t_a)(v - 0,05)^{0,62} (3,14 + 0,37 T_u v)$$

avec  $t_a$  température de l'air au point considéré (°C),  
 $v$  vitesse de l'air au point considéré (m/s),  
 $T_u$  intensité relative de turbulence au point considéré (%).

L'article 6 de la norme AFNOR [5] nous recommande qu'au moins 85 % de la population ne soit pas incommodée par les courants d'air. Cela correspond à un *DR* de 15 %.

**Exemple :** dans un local à 24 °C de température sèche, des vitesses de 0,14 m/s avec une intensité relative de turbulence de 60 % provoquent la même gêne que des vitesses d'air de 0,32 m/s avec une intensité relative de turbulence de 0 %.

## 2.2 Qualité de la diffusion aéraulique

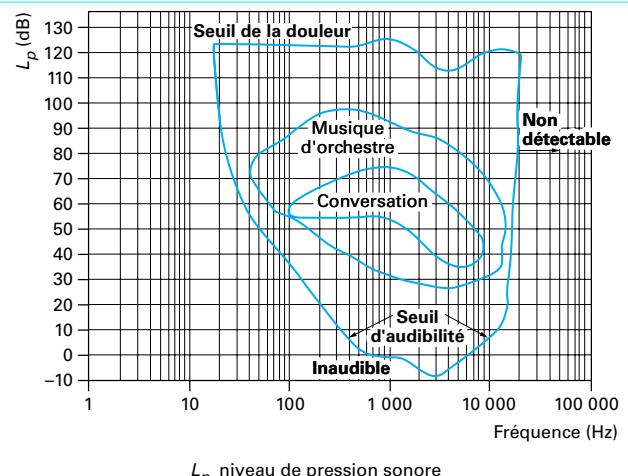
En 1955, Koestel et Tuve [10], à partir des travaux sur la température effective de Rydberg et Norback [11], mirent au point une méthode d'essais des systèmes de conditionnement d'air. Ils aboutirent à la définition de la température effective de courant d'air qui tient compte de la température et de la vitesse au point considéré :

$$EDT = (t_a - t_{a(\text{moyen})}) - 8(v - 0,15)$$

avec  $t_a$  température de l'air au point considéré (°C),  
 $t_{a(\text{moyen})}$  température moyenne de l'air (°C),  
 $v$  vitesse d'air au point considéré (m/s)

À partir des travaux de Koestel et Tuve [10] sur la température effective de courant d'air, l'ASHRAE dans sa norme 113-1990 [12] a défini un indice permettant de quantifier la performance d'un système de diffusion, en anglais *Air Diffusion Performance Index (ADPI)*. Il s'agit du pourcentage de points respectant les deux critères suivants :

$$-1,7 \text{ K} < EDT < 1,1 \text{ K} \text{ avec } v \leq 0,35 \text{ m/s}$$



**Figure 4 – Représentation du champ auditif d'un être humain**

Ces points sont placés à 0,1 m du sol pour les chevilles d'un individu, 0,6 m du sol pour les hanches, 1,1 m pour la tête d'un individu assis et 1,7 m pour la tête d'un individu debout. Il faut au minimum réaliser cinq profils verticaux de vitesse et d'*EDT* dans au moins deux plans parallèles à la direction de soufflage de l'air anisotherme dans le local traité.

En général, nous considérons que 80 % des occupants sont satisfaits par la diffusion d'air, lorsque l'indice *ADPI* est égal à 100 %.

## 2.3 Confort acoustique

Cette partie sera étudiée en détail dans l'article [BE 9 273], troisième partie de cette étude sur *Traitement de l'air et climatisation*.

Les sensations sonores ressenties par l'être humain se ramènent à la définition de quatre paramètres.

### Sonic

La sonie correspond à la perception de l'intensité sonore. La figure 4 représente les domaines de l'acoustique où nous retrouvons les seuils d'audibilité et de douleur.

À partir des travaux de Fletcher et Munson dans les années 1937 cités par Mercier [13], Robinson et Dadson cités par Harris [14] ont pu tracer les réseaux de courbes isosoniques qui correspondent aux courbes d'égales amplitudes de la sensation acoustique. Ces courbes sont reproduites sur la figure 5.

Nous remarquons que l'homme est ;

- très sensible à 3 500 Hz ;
- sensible aux hautes fréquences ;
- peu sensible aux basses fréquences.

Pour tenir compte des courbes de niveau d'isosonie, il a été décidé d'affecter des poids en fonction de la fréquence de mesure. Cela se traduit par les courbes de pondération A, B, C et D représentées sur la figure 6.

**Nota :** les valeurs ont été déterminées par une commission qui, en fonction de l'utilisation de la courbe de pondération, a donné plus ou moins de poids à chaque bande d'octave. C'est pour cette raison qu'il existe 4 courbes de pondération.

Elles sont utilisées en ajoutant, pour chaque bande d'octave, la valeur de pondération à la valeur du niveau sonore mesuré ou calculé. Avec le résultat, il faut préciser la pondération utilisée. Elle est ajoutée à l'unité [dB(A), dB(B), dB(C), dB(D)].

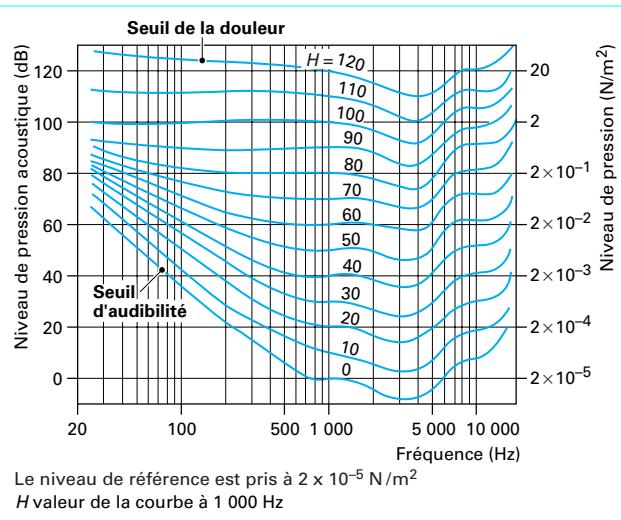


Figure 5 – Courbe de niveau d'isotonie

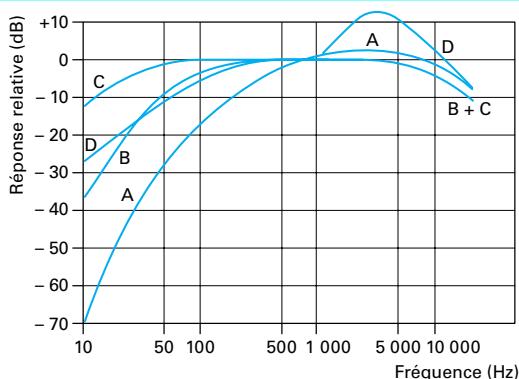


Figure 6 – Courbes de pondération acoustique A, B, C et D  
(la courbe D n'est utilisée qu'en aéronautique)

## Tonie

La tonie traduit la perception de la hauteur du son. D'après Chaigne [15], la sensation de hauteur varie avec le niveau de pression acoustique. Ainsi, en basses fréquences, la tonie diminue lorsque le niveau de pression augmente et, à partir de 2 000 Hz, la tonie évolue de manière similaire avec le niveau de pression acoustique.

## Chronie

La chronie interprète la perception de la durée d'un son. L'influence de la durée d'un son est étudiée par de nombreux auteurs. Nous ne parlerons que de son influence sur l'intensité et la hauteur d'un son.

Plus le son est bref, moins sa sonie est élevée. Pedersen cité par Chaigne [15] a montré que la sonie augmente de manière progressive entre 0,08 s et 0,2 s.

De la même manière, il existe une durée critique pour laquelle la hauteur d'un son n'est plus détectable.

## Timbre

« Il s'agit d'un attribut perceptif permettant de distinguer deux sons de hauteurs et d'intensités égales. »

Cette définition de l'American Standard Association traduit bien la difficulté que nous avons pour caractériser ce paramètre. Ainsi, il s'agit d'une notion perceptive dont l'étude est liée :

- à la connaissance des constituants du timbre via une analyse acoustique ;
- à l'étude des mécanismes perceptifs.

## 2.4 Quantification du confort acoustique

Différentes approches sont utilisées pour quantifier le confort acoustique :

- les courbes de niveaux ;
- l'approche par un niveau de bruit global.

Toutes les deux sont basées sur l'aspect psychoacoustique lié à l'étude de l'intensité sonore et aux indices de qualité acoustique.

### Courbes de niveaux

Les courbes de niveaux sont liées à une analyse spectrale du bruit étudié. Leur utilisation s'effectue toujours en deux étapes :

- tracer le spectre de niveau de pression acoustique par bande d'octave dans le diagramme ;
- noter la courbe d'évaluation qui se trouve immédiatement au-dessus de la courbe du spectre par octave. La courbe donnée pour indice ne coupe jamais la courbe du spectre mais elle peut lui être égale en certains points.

À la suite des travaux de Beranek [16] qui ont abouti au réseau de courbes NC (*Noise Criteria*), Kosten et Van Os cités par CIAT [17] et Webb [18] ont développé un autre réseau, appelé *Noise Rating Curves* NR. Alors que les courbes NC ont été définies de manière empirique, le réseau NR est le résultat d'un calcul numérique. Ce réseau fut partiellement adopté par l'ISO avec la recommandation ISO R 1996 « *Estimation du bruit par rapport aux réactions des collectivités* ». Un abus de langage le désigne souvent sous le terme réseau ISO (cf. article [BE 9 273], 3<sup>e</sup> volet de cet exposé).

### Niveau global

Le niveau de pression acoustique dans un local est caractérisé par une valeur globale. Cette valeur, souvent exprimée en dB(A), ne permet pas de mettre en évidence les niveaux de bruit par fréquences. Ainsi nous pouvons avoir deux bruits avec des spectres différents et un niveau global identique. Malgré ces défauts, cette approche du confort acoustique est retenue par plusieurs organismes, notamment dans le cadre normatif. Nous pouvons citer les recommandations du groupe de travail n° 6, du Comité européen de normalisation n° 156 qui travaille sur les critères de conception de l'environnement intérieur [19], la norme allemande DIN 1946 part 2 [20], la nouvelle réglementation acoustique NRA [21].

### Approche psychoacoustique

Cette science de l'audition est utilisée pour la caractérisation d'un certain confort acoustique. Elle se base sur l'idée qu'un produit n'est pas seulement une source de bruit. Il doit aussi offrir un certain confort d'écoute. Cette approche permet de caractériser la qualité acoustique d'un produit ; nous parlons alors d'étude du « design sonore ». Nous comprenons aisément que si nous arrivons à établir une certaine qualité acoustique pour un produit, nous pouvons espérer améliorer le confort des usagers.

Il n'existe pas à proprement parler d'indice synthétique général pour caractériser la qualité acoustique des produits. Par contre, la plupart des chercheurs [22] [23] [24] [25] travaillant sur ce thème utilisent des méthodes similaires qui peuvent aboutir, pour les objets étudiés, à la définition d'un indice particulier.

## 2.5 Qualité de l'air

La qualité de l'air et la qualité de la ventilation sont deux notions fondamentales, distinctes mais complémentaires.

Les indices permettant de caractériser la qualité de l'air peuvent être regroupés en deux grandes familles. La première rassemble les indices de type sanitaire et la seconde regroupe les indices de confort olfactifs.

### 2.5.1 Indices sanitaires

Cette approche, dite classique, est liée à la mesure de la concentration de différents polluants caractéristiques d'un bâtiment afin de connaître les troubles physiologiques encourus par les occupants d'un local donné. La quantification de la qualité de l'air sera alors traitée par des indices monogaz ou multigaz.

#### Indices monogaz

La plupart des pays du monde industriel ont défini des limites aux concentrations des polluants connus. En France nous utilisons deux notions :

- les valeurs à risques importants *VRI* : à partir de cette limite, un individu court des risques importants pour sa santé ;
- les valeurs à risques limités *VRL* : au-dessous de ce seuil, le polluant concerné ne présente pas d'effet sur l'homme.

Le tableau 3 regroupe des valeurs limites imposées par le code du travail français pour le secteur industriel.

**Tableau 3 – Valeurs limites imposées par le code du travail français [en ppm (volume)]**

Polluant	Exposition sur 8 h	Exposition sur 15 min
Dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ )		3
Monoxyde de carbone (CO)	50	
Dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ )	2	5
Ozone ( $\text{O}_3$ )	0,1	0,2
Formaldéhyde (HCHO)		2

**Pour information :** aux États-Unis, l'Occupational Safety and Health Administration (OSHA), le National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH) et l'American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH) sont à l'origine d'un répertoire de plus de 600 composants permettant de caractériser la qualité de l'air en milieu industriel. Ils utilisent des seuils notés *TLV* (*Threshold Limit Values*), traitant d'expositions longues équivalentes à une journée de travail et d'expositions courtes dont la durée est, la plupart du temps, de 15 min. Pour les secteurs résidentiels et tertiaires, de nombreux organismes ont étudié les valeurs de concentrations maximales admissibles. Nous pouvons citer, entre autres, l'Organisation mondiale de la santé (OMS) et, bien sûr, l'American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE). Ce dernier organisme est à l'origine de la norme 62-1989, *Ventilation for acceptable Indoor Air Quality*.

Nous avons rassemblé, dans les tableaux 4 et 5, les données fournies par l'OMS [26]. Cet organisme sépare les produits cancérogènes des autres. Pour les polluants reconnus comme cancérogè-

nes, l'OMS définit une unité de risque. Celle-ci correspond au surplus de cancers provoqués dans une population pour une exposition de 70 ans à une concentration de  $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  du polluant considéré dans l'air ambiant.

**Tableau 4 – Valeurs seuils de concentrations de polluants fournies par l'OMS**

Polluant	Concentration moyenne limite ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )	Durée d'exposition
Dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ )	0,21	1 h
	0,08	24 h
Monoxyde de carbone (CO)	100	15 min
	60	30 min
Dioxyde de soufre ( $\text{SO}_2$ )	30	1 h
	10	8 h
Dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ )	0,5	10 min
	0,35	1 h
Ozone ( $\text{O}_3$ )	1 800	1 h
	0,15 à 0,2	1 h
Formaldéhyde (HCHO)	0,1	30 min
	0,1	24 h
Disulfure de carbone ( $\text{CS}_2$ )	7,5	24 h
	0,1	24 h
Toluène ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{CH}_3$ )	0,1 à 0,12	8 h
Tétrachloréthylène ( $\text{C}_2\text{Cl}_4$ )	5	24 h

**Tableau 5 – Unités de risque fournies par l'OMS pour des substances cancérogènes**

Substance	Unité de risque
Acrylonitrile	$2 \times 10^{-5}$
Arsenic	$4 \times 10^{-3}$
Benzène	$4 \times 10^{-6}$
Chrome	$4 \times 10^{-2}$
Nickel	$4 \times 10^{-4}$
Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP)	$9 \times 10^{-2}$
Chlorure de vinyle	$1 \times 10^{-6}$

#### Indices multigaz

La qualité de l'air peut également être qualifiée à partir d'indices qui tiennent compte de la durée d'exposition et du dénombrement bactérien. Il existe aussi des indices basés sur l'addition des effets.

### 2.5.2 Indices olfactifs

Le dioxyde de carbone ( $\text{CO}_2$ ), bien que ne possédant intrinsèquement aucune valeur odorante, est souvent utilisé comme traceur de la pollution due aux bioéffluents humains car sa concentration est proportionnelle à l'activité métabolique.

Une concentration en un polluant donné peut indiquer le risque produit par l'ensemble des polluants intérieurs. Creuzevault, cité par Barbat [27], a défini une loi exprimant le pourcentage d'individus insatisfaits par la qualité de l'air intérieur  $PPD_{(IAQ)}$  (*predicted percentage of dissatisfied persons by indoor air quality*).

$$PPD_{(IAQ)} = 395 \exp(-15,15 [\text{CO}_2]^{-0,25})$$

avec  $PPD_{(IAQ)}$  pourcentage d'individus insatisfaits,  
 $[\text{CO}_2]$  concentration de dioxyde de carbone ( $\text{mg}/\text{m}^3$ ).

Les indices monomarqueurs sont également utilisés pour traiter le cas des COV (composants organiques volatils) comme le formaldéhyde [28].

Il est évident que, par sa définition, cet indice trouve ses limites lorsque nous sommes en présence d'un grand nombre de polluants.

L'indice *DEM* (*Degree of Effluvium Measurement*) développé par Moschandreas en 1992, cité par Blondeau [28], se base sur un jury de nez, composé d'occupants du local étudié, qui évalue la qualité de l'air intérieur.

Pendant 7 jours, ces panélistes vont attribuer une note variant de 1 (pas d'odeur) à 7 (mauvaise odeur). L'indice *DEM* se détermine à partir de calculs statistiques. Lors de son utilisation dans le diagnostic de bâtiments, cet indice s'est révélé en adéquation avec les plaintes des usagers. Bien entendu, de par sa conception, cet indice ne peut pas facilement s'appliquer lors d'une approche analytique du problème de la qualité de l'air.

Le concept du *Sick Building Syndrome* développé à la suite de plaintes de la part des occupants de locaux non industriels a conduit de nombreux chercheurs à travailler sur les indices de qualité d'air intérieur. Dans le cadre de ces études, le Professeur Fanger a introduit deux nouvelles unités (*Olfet Décipol*) qui sont basées sur la perception des sens olfactifs.

La définition et l'utilisation de ces indices ont été fortement remises en cause par la communauté professionnelle internationale, notamment par les Français. Nous ne détaillerons donc pas ces indices dans ce présent document. Nous invitons le lecteur intéressé à se référer à la bibliographie pour de plus amples renseignements.

## 2.6 Qualité de la ventilation

L'objectif de la ventilation est double : apport d'air neuf pour les occupants et évacuation des polluants.

Ces objectifs s'expriment à travers le terme générique d'efficacité de la ventilation. Cette notion nous conduit à vouloir définir deux paramètres bien distincts :

- le rendement de renouvellement d'air ;
- l'efficacité d'extraction des polluants.

### 2.6.1 Rendement de renouvellement d'air

Ce paramètre ne tient pas compte des polluants en présence ; il sert uniquement à quantifier la façon dont l'air neuf est mélangé à l'air de la pièce. Pour faciliter la compréhension de ce rendement, nous allons introduire des paramètres intermédiaires.

■ La **constante de temps nominale**  $\tau_n$  correspond au temps de résidence minimal de l'air dans le local. Elle s'exprime en fonction du volume de la pièce  $V$  et du débit d'air dans la pièce  $Q$ . Ce paramètre est l'inverse du débit spécifique appelé parfois nombre de renouvellement par heure :

$$\tau_n = \frac{V}{Q}$$

■ L'**âge de l'air** a deux définitions :

– **âge local moyen**  $\tau_{P_0}$  : temps mis par les particules de l'air pour atteindre un point donné, à partir du moment où elles sont entrées dans la pièce ;

– **âge moyen dans la pièce**  $\tau_V$  : moyenne spatiale des âges locaux de tous les points  $P_0$  de la pièce :

$$\tau_V = \frac{1}{V} \int_V \tau_{P_0} dV$$

■ Le **temps de changement d'air**  $\tau_{ca}$  est défini par la relation :

$$\tau_{ca} = 2\tau_V$$

■ Finalement le **rendement de renouvellement d'air** parfois appelé « efficacité globale du renouvellement d'air » s'exprimera par la relation :

$$\eta_{RA} = 100 \frac{\tau_n}{\tau_{ca}}$$

Pour information, nous avons rassemblé, dans le tableau 6, les rendements de renouvellement d'air de deux systèmes de ventilation.

**Tableau 6 – Exemples de rendement de renouvellement d'air**

Système	$\eta_{RA}$ (%)	Principe d'utilisation
Ventilation par piston	100	Flux laminaire
Ventilation par mélange complet	50	Système de climatisation par déplacement
		Ventilation classique

■ À partir de ce rendement, nous pouvons construire le **coefficient de performance global du renouvellement d'air** utilisé dans l'ASHRAE 62 comme indice d'efficacité de la ventilation. Ce coefficient  $\eta_G$  se traduit par la relation suivante :

$$\eta_G = 2\eta_{RA} = 100 \frac{\tau_n}{\tau_V}$$

### 2.6.2 Efficacité d'extraction des polluants

Cette efficacité permet de connaître le mouvement et la dilution d'un polluant  $P$  dans le volume  $V$  d'une pièce. La détermination de ce paramètre s'applique à la plupart des polluants. Comme pour le rendement de renouvellement d'air, nous allons introduire des paramètres intermédiaires.

■ L'**âge moyen local du polluant**  $\tau_{P_0}^P$  est le temps moyen nécessaire au polluant pour se déplacer de sa source au point  $P_0$ .

■ L'**âge moyen du polluant dans le local**  $\tau_V^P$  est la moyenne spatiale des âges locaux de tous les points  $P_0$  de la pièce :

$$\tau_V^P = \frac{1}{V} \int_V \tau_{P_0}^P dV$$

■ La **constante de temps nominale du polluant**  $\tau_e^P$  est le temps de résidence du polluant dans la pièce. C'est le temps moyen néces-

saire au polluant P pour se déplacer de sa source à la bouche d'extraction de l'air. Nous aurons :

$$\tau_e^P = \frac{V_e^P}{Q^P}$$

avec  $V_e^P$  volume équivalent de polluant P dans la pièce ( $m^3$ ),  
 $Q^P$  taux d'émission de polluant P dans la pièce ( $m^3/s$ ).

■ **L'efficacité locale**  $\varepsilon_{e, P_0}^P$  est le rapport des concentrations du polluant P à l'extraction e et au point  $P_0$ .

■ **L'efficacité globale**  $\varepsilon_e^P$  est le rapport entre la concentration d'équilibre du polluant P à l'extraction e et sa concentration moyenne dans le local étudié. Soit :

$$\varepsilon_e^P = \left( \frac{Q^P}{Q} \right) \left( \frac{V}{V_e^P} \right) = \frac{\tau_n}{\tau_e^P}$$

## 2.7 Réglementation française

### 2.7.1 Présentation

Il existe une réglementation qui fixe les principes d'aération et d'assainissement de l'air des locaux où le personnel est appelé à séjourner. Elle traite également des lieux où le personnel doit intervenir et qui présentent un risque lié à l'atmosphère.

En réalité, nous décomposerons les locaux en deux groupes, les locaux à pollution non spécifique et les locaux à pollution spécifique.

Nous allons définir un certain nombre de termes.

- **Aération** : action de faire entrer de l'air neuf en vue de maintenir la salubrité de l'atmosphère d'un local ;

- **Assainissement** : action qui consiste à éliminer, dans un local, les polluants qui sont présents sous toutes leurs formes en réduisant leur concentration au-dessous des seuils admissibles afin de rendre l'atmosphère salubre ;

- **Pollution spécifique** : pollution des locaux dans lesquels des substances dangereuses ou gênantes sont émises sous formes de gaz, vapeurs, aérosols solides ou liquides autres que celles qui sont liées à la seule présence humaine. Ce sont des locaux pouvant contenir des sources de micro-organismes potentiellement pathogènes et les locaux sanitaires ;

- **Pollution non spécifique** : pollution liée à la seule présence humaine, à l'exception des locaux sanitaires.

Lossature de la réglementation française est constituée de quatre principes.

#### ■ Fixer les objectifs sur le niveau de salubrité de l'air :

- état de la pureté pour préserver la santé ;
- températures, odeurs, condensations ;
- valeurs limites de concentration en poussières.

#### ■ Définir les obligations minimales :

- pour les locaux à pollution non spécifique, débit minimal d'air neuf à mettre en œuvre ;
- pour les locaux à pollution spécifique, captage de sources, limitation et contrôle du recyclage.

#### ■ Intégration de ces objectifs et obligations dès la conception des nouvelles constructions et aménagements.

#### ■ Obligation d'information.

### 2.7.2 Contenu de la réglementation

En ce qui concerne les obligations du maître d'ouvrage, les obligations du chef d'établissement, les droits des représentants des salariés et les prescriptions de l'inspecteur du travail, nous renvoyons nos lecteurs aux textes réglementaires [29].

Nous avons rassemblé dans les tableaux 7 et 8 les données relatives aux locaux à pollution non spécifique et aux locaux sanitaires.

**Tableau 7 – Réglementation relative à la ventilation des locaux à pollution non spécifique**

Type de ventilation	Réglementation											
Naturelle par ouvrant	<ul style="list-style-type: none"> <li>● Pour les bureaux, si le volume du local est supérieur à <math>15 m^3</math> par occupant</li> <li>● Pour les autres locaux, si le volume du local est supérieur à <math>24 m^3</math> par occupant</li> </ul>											
Mécanique	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>Local</th><th>Débit d'air neuf par occupant (<math>m^3/h/occupant</math>)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Bureaux, locaux sans travail physique</td><td>25</td></tr> <tr> <td>Locaux de restauration, de vente, de réunion</td><td>30</td></tr> <tr> <td>Ateliers et locaux avec travail physique léger</td><td>45</td></tr> <tr> <td>Autres ateliers et locaux</td><td>60</td></tr> </tbody> </table>	Local	Débit d'air neuf par occupant ( $m^3/h/occupant$ )	Bureaux, locaux sans travail physique	25	Locaux de restauration, de vente, de réunion	30	Ateliers et locaux avec travail physique léger	45	Autres ateliers et locaux	60	
Local	Débit d'air neuf par occupant ( $m^3/h/occupant$ )											
Bureaux, locaux sans travail physique	25											
Locaux de restauration, de vente, de réunion	30											
Ateliers et locaux avec travail physique léger	45											
Autres ateliers et locaux	60											

**Tableau 8 – Réglementation relative à la ventilation des locaux sanitaires**

Local	Débit minimal d'air introduit ( $m^3/h/local$ )
Cabinet d'aisances isolé (1)	30
Salle de bains ou de douche isolée (1)	45
Salle de bains ou de douche commune avec un cabinet d'aisances	60
Bains, douches et cabinets d'aisances groupés	$30 + 15N$ (2)
Lavabos groupés	$10 + 5N$ (2)

(1) Si ce local n'est pas à usage collectif, ces débits peuvent être ramenés à  $15 m^3/h$ .  
(2) N : nombre d'équipements dans le local.

**Tableau 9 – Valeurs limites d'exposition et valeurs moyennes d'exposition à différentes substances**

Substance	Valeur limite d'exposition		Valeur moyenne d'exposition	
	(ppm volume)	(mg/m <sup>3</sup> )	(ppm volume)	(mg/m <sup>3</sup> )
Acide acétique	10	25		
Acide chlorhydrique	5	7,5		
Acide fluorhydrique	3	2,5		
Acide formique	5	9		
Acide nitrique	4	10	2	5
Acroléine	0,1	0,25		
Alcool n-butylque	50	150		
Alcool sec-butylque			100	300
Alcool ter-butylque			100	300
Alcool éthylique	5 000		1 000	1 900
Alcool isobutylique			50	150
Alcool isopropylque	400	980		
Alcool méthylique	1 000	1 300	200	500
Alcool propylque			200	500
Aldéhyde formique	2	3		
Aldéhyde furfurylique	2	8		
Ammoniac	50	36	25	18
Anhydride chromique		0,1		
Anhydride maléique		1		
Anhydride phthalique		6		
Anhydride sulfureux	5	10	2	5
Brome	0,1	0,7		
Butylamine	5	15		
Chlore	1	3		
Fluor	1	2		
Ozone	0,2	0,4	0,1	0,2

Pour les locaux à pollution spécifique, le débit minimal d'air neuf à introduire doit, dans tous les cas, rester au moins égal à celui qui a été fixé pour les locaux à pollution non spécifique en tenant compte du nombre d'occupants. Nous avons, dans le tableau 9, regroupé les valeurs limites d'exposition et les valeurs moyennes d'exposition à différentes substances citées dans la circulaire du 19 juillet 1982. Depuis, plusieurs centaines de valeurs limites indicatives ont été publiées par le ministère du Travail ; nous renvoyons les lecteurs aux documents de l'INRS ND 1945-153-93 et ND 1940-152-93 [30].

### 3. Les différents systèmes de climatisation

Le système de climatisation regroupe l'ensemble des éléments retenus pour résoudre un problème posé.

Nous distinguons trois grands systèmes :

- centralisé ;
- décentralisé ;
- mixte.

Nous allons définir ces trois systèmes et, pour chacun, indiquer le rôle de la centrale de traitement d'air.

#### 3.1 Système centralisé

Chaque local est traité par l'apport d'un débit d'air préparé dans une unité centralisée qui comporte (figure 7) :

- une centrale de traitement d'air ;
- un générateur de chaud (+) ;
- un générateur de froid (-) ;
- les réseaux de gaines nécessaires.

Les générateurs de chaud et de froid peuvent être intégrés à la centrale de traitement d'air (groupe frigorifique pour le froid et le chaud, batterie électrique ou générateur gaz pour le chaud). Les climatiseurs de toiture pour les grandes surfaces font partie des systèmes centralisés. La totalité de l'énergie nécessaire au traitement du local est véhiculée par l'air.

Les bâtiments anciens n'étant pas conçus pour la climatisation, nous retrouvons plus souvent ce type d'installation dans les bâtiments neufs ou récents. La conception du bâtiment doit prendre en compte l'ensemble du système : local technique, passage des gaines...

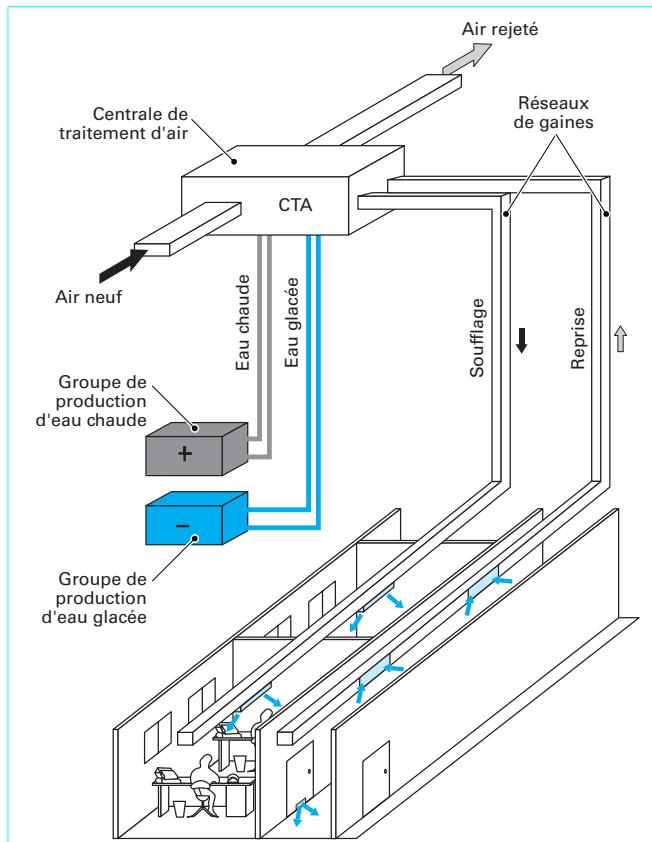
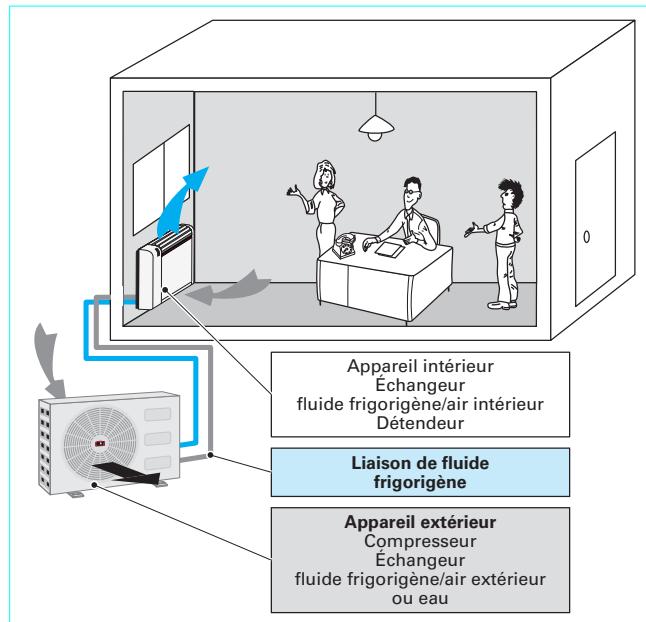


Figure 7 – Principe du système centralisé



**Figure 8 – Principe du système décentralisé avec production d'énergie décentralisée**

Les solutions sont fonction du type de locaux et de l'évolution des charges. Elles dépendent aussi des possibilités d'investissement et des impératifs de chaque local.

Parmi les solutions les plus souvent utilisées, nous pouvons citer :

- l'équipement individuel : une centrale de traitement d'air et un réseau de gaines pour chaque local ;
- l'équipement collectif : une centrale de traitement d'air et son réseau de gaines desservent un groupe de locaux ;
- une centrale de traitement d'air commune reliée à deux gaines : l'une pour l'air chaud, l'autre pour l'air froid. Pour chaque local, une boîte de mélange assure le dosage adéquat ;
- une centrale de traitement d'air dite « multizone » avec un réseau de gaines pour chaque local. Le mélange air chaud/air froid s'effectue au départ de la centrale de traitement d'air ;
- un équipement de base traditionnel (centrale de traitement d'air) avec, pour chaque local, une boîte de diffusion d'air à débit variable.

## 3.2 Système décentralisé

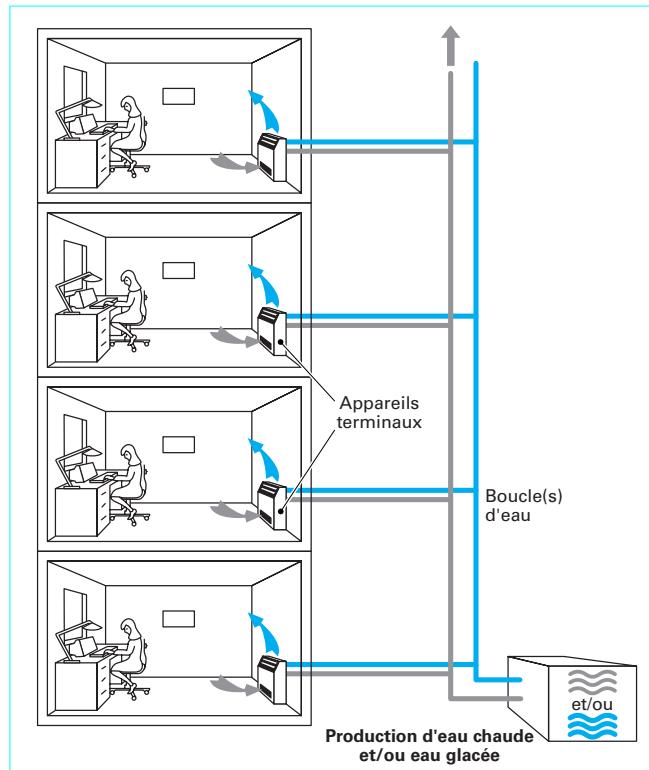
Chaque local est traité individuellement avec un équipement autonome regroupant :

- production de froid et/ou de chaud ;
- préparation et diffusion de l'air.

Il s'agit généralement d'équipement **monobloc** ou **bibloc** (figure 8), de faible ou moyenne puissance, du type à détente directe.

■ Les **armoires de climatisation autonomes** équipant les salles à forts apports internes, par exemple, font partie des systèmes décentralisés. La **totalité de l'énergie** nécessaire au traitement du local **est véhiculée par l'air**. Le réseau de gaines est limité à l'aménée d'air neuf.

Le système décentralisé est généralement utilisé dans l'habitat individuel ou le petit tertiaire pour équiper des locaux existants.



**Figure 9 – Principe du système décentralisé avec production d'énergie centralisée**

■ Un autre type de système décentralisé est l'**unité terminale non autonome** alimentée en eau chaude et/ou froide (figure 9). La production d'énergie est centralisée.

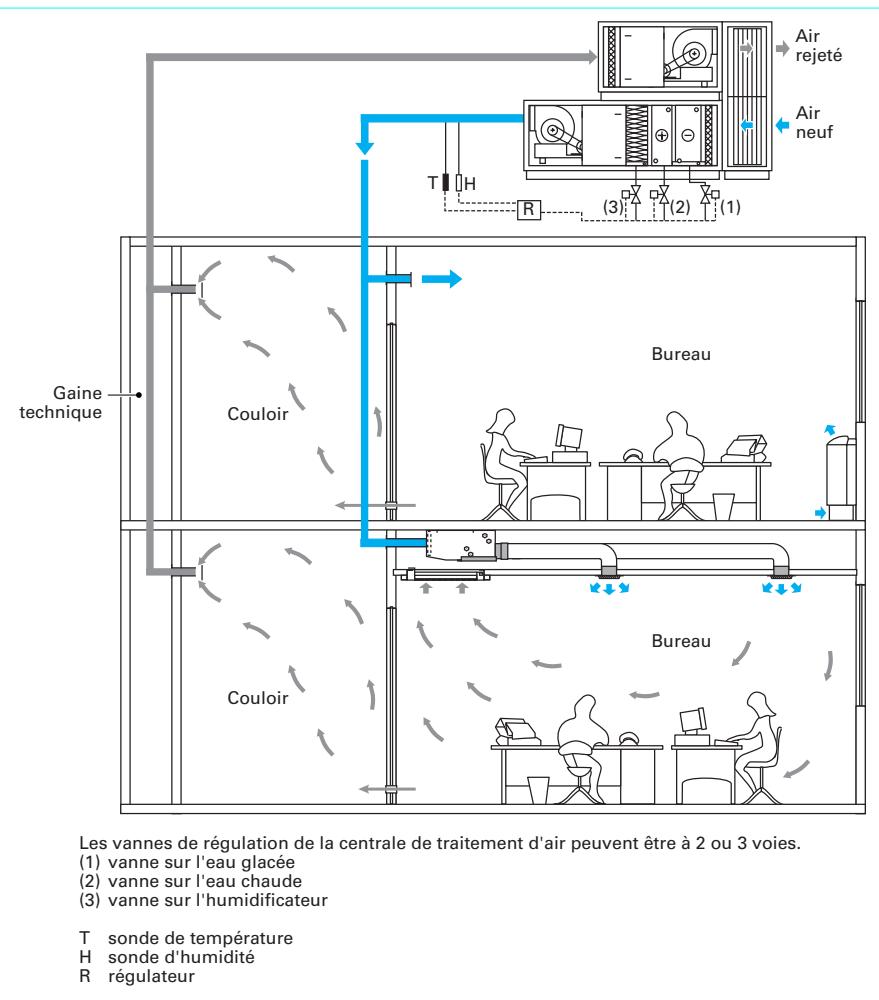
Les armoires de climatisation non autonomes équipant les salles à forts apports internes, par exemple, font partie des systèmes décentralisés à production d'énergie centralisée. Ce système décentralisé est utilisé dans l'habitat, le tertiaire et l'industrie. Il peut équiper des locaux neufs ou existants de toutes dimensions.

■ Les solutions dépendent du type de local, des charges faibles ou fortes, constantes ou variables.

Parmi les solutions les plus souvent utilisées, nous pouvons citer :

- le climatiseur individuel monobloc, split-system ou multisplit, pour l'habitat, le bureau, les commerces ;
- l'unité terminale plafonnière en faux plafond ou murale non autonome pour l'habitat, les bureaux, les commerces, les ateliers, etc. ;
- l'armoire autonome de climatisation à condensation par eau (monobloc) ou air (split-system) pour des locaux généralement à fort dégagement de chaleur interne et à charge relativement constante ;
- l'armoire non autonome de climatisation pour des locaux généralement à fort dégagement de chaleur interne et à charge pouvant être variable.

**Nota :** un appareil en split-system est composé de deux éléments (l'un installé à l'intérieur, l'autre à l'extérieur du bâtiment) reliés par deux tuyauteries frigorifiques et un câble électrique.



**Figure 10 – Principe du système mixte centralisé de traitement d'air et unités terminales**

### 3.3 Système mixte

Le système mixte se compose ainsi (figure 10) :

- une centrale de traitement d'air, **commune et centralisée**, prépare l'air pour l'ensemble des locaux à des conditions de température et d'hygrométrie moyennes ;
- un réseau de gaines dessert chacun des locaux concernés ;
- un équipement terminal, **individualisé et personnalisé**, équipe chaque local et retraite l'air, au sortir de la gaine, afin d'adapter température et hygrométrie en fonction du besoin propre.

Une partie de l'énergie nécessaire est véhiculée par l'air (réseau de gaines), l'autre partie est véhiculée par l'eau (alimentation des unités terminales).

La centrale de traitement d'air est classique. Ses composants sont déterminés en fonction de la qualité d'air que nous désirons obtenir et du type d'installation retenue.

Parmi les solutions les plus souvent utilisées, nous pouvons citer :

- une centrale primaire avec corrections locales par batteries chaudes et froides terminales et humidificateur en gaine placée à l'entrée de chaque local ;
- une centrale primaire assurant le traitement de l'air neuf et des unités terminales servant à combattre les charges du local.

## 4. Objectifs du traitement d'air

Selon le type de local, son utilisation, le confort désiré, les objectifs du traitement d'air sont différents.

### 4.1 Chauffage-rafaîchissement

Le chauffage et le rafraîchissement sont les traitements simplifiés appliqués à l'air ambiant. Le but est d'obtenir une température de confort en hiver et un abaissement de température de quelques degrés par rapport à l'air extérieur en été (2 à 3 K). Le traitement d'hiver apporte une impression de fraîcheur. Seule la température est prise en compte. L'humidité n'est pas contrôlée. Il peut en résulter occasionnellement une sensation d'inconfort.

Le chauffage-rafaîchissement peut être utilisé dans tous les domaines (habitat, tertiaire, industrie) dès lors que l'aspect financier prend le pas sur l'aspect technique.

## 4.2 Climatisation de confort

La climatisation de confort regroupe l'ensemble des traitements appliqués à l'air ambiant pour obtenir une ambiance interne de confort définie en température et humidité. Son but est d'obtenir toute l'année des conditions favorables à la vie des occupants, leur santé, leur bien-être.

Dans l'habitat, elle vise le bien-être. Dans le tertiaire ou l'industrie, elle vise :

- une amélioration de productivité au niveau du personnel ;
- un agrément supplémentaire au niveau de la clientèle.

Le traitement d'air prend en compte :

- la température ;
- l'humidité ;
- la propreté de l'air (impuretés, odeurs) ;
- le niveau sonore ;
- la qualité de la diffusion (mouvements d'air, vitesse).

La climatisation de confort s'applique à l'habitat (individuel ou collectif), au tertiaire (magasins, bureaux, bâtiments publics...) et à l'industrie (bureaux, ateliers...).

## 4.3 Conditionnement d'air

Le conditionnement d'air représente l'ensemble des traitements appliqués à l'air ambiant pour obtenir des **caractéristiques précises** de température et d'hygrométrie liées :

- à l'activité ;
- à un process ;
- aux conditions de conservation des produits entreposés.

Son but est d'obtenir, toute l'année, des **résultats précis, constants et fiables** qui seront garants du bon fonctionnement de l'activité ou du process généré dans le local.

Les paramètres pris en compte varient avec le type d'activité :

- propreté de l'air (impuretés, odeurs) ;
- température ;
- humidité ;
- charges internes fortes (sensible, latente).

En général, le maintien de ces paramètres s'accompagne d'exigences plus ou moins draconniennes sur :

- la précision du résultat ;
- la constance du résultat dans le temps et dans l'espace ou la constance dans la variation du résultat (rampe) ;
- la qualité du résultat (notion de salle blanche ou de salle propre).

Les domaines d'application sont vastes. Le conditionnement d'air s'applique :

- à l'industrie de précision (microélectronique, avionique, optique, horlogerie, automobile, peinture, chimie fine...) ;
- à la biologie (agroalimentaire, pharmacie, cosmétique, biotechnologie, domaine hospitalier...) ;
- aux laboratoires (recherche, mesure...) ;
- aux process (séchage, déshumidification de piscine...) ;
- aux locaux particuliers (téléphonie, ordinateurs...).

Nous allons aborder les particularités des principales applications du conditionnement d'air.

### ■ Industrie de précision

La température et l'humidité sont rigoureusement contrôlées. La stabilité et la précision demandées dépendent du type de fabrication. L'industriel connaît bien les exigences pour chaque fabrication.

Pour le matériel miniature (électronique, disques...), les poussières peuvent créer un défaut de fabrication.

Il faut donc des salles à empoussièvement contrôlé appelées salles grises ou salles blanches selon le nombre toléré de particules de poussières par m<sup>3</sup> d'air. La salle est étanche et comporte un sas à l'entrée. Le personnel porte des vêtements particuliers suivant le type de salle (blouse, combinaison, masque, bottes, scaphandre ventilé).

### ■ Biologie

La température dépend du produit fabriqué (exemple 12 °C pour le traitement de la viande). L'humidité peut être élevée (80 % d'humidité relative) pour éviter le dessèchement du produit ou basse (20 % d'humidité relative) pour la fabrication de produit avide d'humidité (poudres, cachets effervescents...).

Le taux d'empoussièvement est contrôlé. Les micro-organismes doivent être réduits à néant pour des raisons évidentes d'hygiène (les produits sortants doivent être sains).

La salle est étanche, lavée quotidiennement, décontaminée dans certains cas. Un sas est prévu à l'entrée. Le personnel porte des vêtements stériles avec masque, bonnet et gants.

### ■ Laboratoires

Selon le type de laboratoire, les exigences diffèrent. Les précisions des conditions d'ambiance sont sévères notamment dans les laboratoires de mesures. Les variations autorisées doivent rester dans un domaine étroit :

- température inférieure à ± 0,5 K ;
- humidité relative inférieure à ± 5 %.

L'empoussièvement et la contamination sont parfois contrôlés (dans certains laboratoires de recherche).

Afin de pouvoir maintenir de telles conditions, il faut, obligatoirement, un **local étanche**, sinon la migration d'humidité et les entrées d'air parasites ne permettront pas d'obtenir la stabilité et la précision des conditions d'ambiance.

### ■ Séchage

Le séchage nécessite l'évacuation de l'humidité du produit vers l'extérieur. La centrale de traitement d'air utilise la batterie froide pour déshumidifier l'air. La sélection s'effectue sur la quantité d'eau à évacuer. La température maintenue dépend du type de produit :

- fromages, saucisson : 10 à 12 °C ;
- peaux (pour le cuir) : 30 à 50 °C ;
- bois : variable selon les essences et phase de séchage.

Durant le cycle de séchage, les conditions peuvent être fixes, variables par palier ou variables en continu (rampe).

### ■ Piscines

Dans une piscine, une forte quantité d'eau s'évapore de la surface du bassin, sur les plages, sur la peau des baigneurs.

La température de l'air est maintenue autour de 27 °C et celle de l'eau à 25 °C. Dans les piscines dites médicales ou les bassins pour bébés nageurs, l'air est à une température de l'ordre de 30 à 35 °C et l'eau est à 29 à 37 °C.

L'humidité relative se situe vers 65 %. La centrale de traitement d'air sert à déshumidifier mais aussi à renouveler l'air pour éliminer les polluants dus à la respiration des baigneurs et à l'évaporation des produits de traitement de l'eau.

### ■ Locaux à forts apports internes de chaleur

Dans les locaux ayant une forte concentration de matériel électrique (autocommutateurs de téléphone, ordinateurs...), de puissantes machines, de fours, etc., le dégagement de chaleur est important. Il est impératif de traiter l'air afin d'éviter la dérive de température qui détériorerait certains composants. Une centrale de traitement d'air spécifique est généralement prévue ; la demande de froid est toujours présente même pendant la période hivernale.

Afin de sécuriser l'installation, il est souvent prévu une unité en secours. Selon l'importance du matériel et la sécurité demandée, deux unités sur trois ou une unité sur deux ou trois fonctionnent.

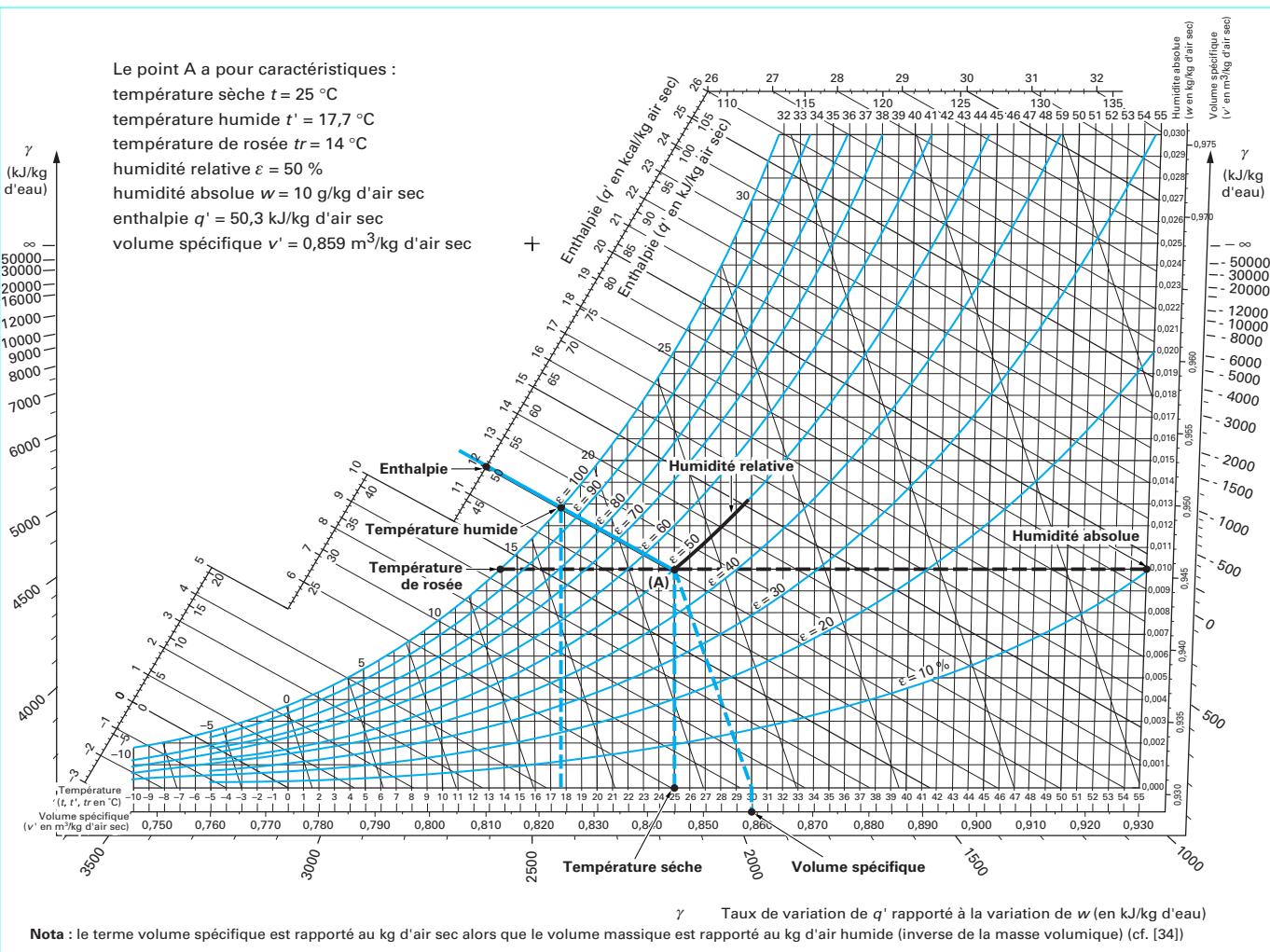


Figure 11 – Diagramme de l'air humide

## 5. Réponse de la communauté professionnelle

Afin de faciliter les calculs et sélections, la communauté professionnelle s'est entourée d'outils.

Pour une détermination manuelle, des graphes ont été élaborés comme le diagramme de l'air humide (figure 11), les abaques de sélection. Pour une détermination par ordinateur, des logiciels ont été créés (bilan thermique, sélection de matériel...).

### 5.1 Diagramme de l'air humide

Le lecteur pourra également se reporter à l'article *Air humide* [B 2 230] et [B 2 231] de ce traité et à l'article [J 2 480] du traité Génie des procédés [34] [35].

Le diagramme de l'air humide (figure 11) permet :

- de suivre l'évolution de l'air en fonction des différents traitements qu'il subit ;
- de connaître toutes les caractéristiques d'un air ;
- de calculer les puissances nécessaires au traitement de l'air.

C'est une représentation graphique de l'évolution du mélange air sec + vapeur d'eau. Toutes les valeurs sont ramenées à l'unité de masse de l'air sec (kg AS). Deux valeurs suffisent pour déterminer un air dans le diagramme de l'air humide.

Les couples les plus employés sont :

- température et humidité relative ;
- température sèche et température humide.

Le diagramme de l'air humide utilisé dans cet article est tracé à partir des coordonnées suivantes :

- en abscisse, la température (en  $^\circ\text{C}$ ) ;
- en ordonnée, l'humidité absolue (en kg d'eau/kg AS) ;
- en ordonnée oblique, l'enthalpie (en  $\text{kJ/kg AS}$ ).

L'origine est :

- température :  $t = 0^\circ\text{C}$  ;
- humidité absolue :  $w = 0 \text{ kg/kg AS}$  ;
- enthalpie :  $q' = 0 \text{ kJ/kg AS}$ .

## 5.2 Logiciels

Beaucoup de logiciels ont été créés depuis l'apparition de l'ordinateur de bureau. Nous pouvons citer :

— les logiciels de sélection de matériel : chaque constructeur a créé des logiciels permettant d'optimiser la sélection de son matériel ;

— les logiciels de calcul de bilan : nous trouvons sur le marché plusieurs logiciels qui permettent de calculer le bilan thermique d'une installation. Ces logiciels calculent aussi les coefficients d'échange de chaque paroi. Ils peuvent permettre de :

- connaître le bilan à chaque heure du jour le plus chaud et le plus froid (optimisation de la puissance à installer),
- simuler la variation du bilan en fonction de l'orientation du local (optimisation de l'exposition),
- connaître le gain de puissance par l'ajout de protections solaires (optimisation de l'équipement ou de la composition des parois) ;

— les logiciels de détermination des réseaux et tracés : en fonction de l'emplacement des unités terminales ou des bouches et grilles, ces logiciels déterminent les sections et longueurs des tuyauteries et gaines. Ils donnent aussi la perte de charge de l'installation pour sélectionner les ventilateurs et circulateurs et déterminer les valeurs de réglage des vannes et registres.

Notations et symboles		
Symbol	Unité	Définition
A	sans	Point d'ambiance sur le diagramme de l'air humide
ADPI	%	Indice de performance d'un système de diffusion ( <i>Air Diffusion Performance Index</i> )
C	W/m <sup>2</sup>	Convection thermique du corps humain dans l'air
C	mg/m <sup>3</sup>	Concentration d'une odeur
C <sub>res</sub>	W/m <sup>2</sup>	Convection thermique du corps humain par la respiration
D	m	Diamètre de la gaine circulaire ou diamètre équivalent d'une gaine rectangulaire de côtés <i>a</i> et <i>b</i> égal à $\frac{2ab}{a+b}$
DEM	sans	Indice de qualité de l'air ambiant ( <i>Degree of Effluvium Measurement</i> )
DR	%	Pourcentage d'insatisfaits dû au courant d'air ( <i>Draft Raughting</i> )
E <sub>diff</sub>	W/m <sup>2</sup>	Évaporation d'eau du corps humain par diffusion d'humidité
E <sub>res</sub>	W/m <sup>2</sup>	Évaporation d'eau du corps humain par la respiration
E <sub>sud</sub>	W/m <sup>2</sup>	Évaporation d'eau du corps humain par la sudation
EDT	°C	Température effective de courant d'air

Notations et symboles		
Symbol	Unité	Définition
HR	%	Valeur de l'humidité relative de l'air humide (suit l'unité %)
I	sans	Intensité perçue des odeurs
L	W/m <sup>2</sup>	Charge thermique du corps humain
L <sub>p</sub>	dB	Niveau de pression sonore
M	met ou W/m <sup>2</sup>	Métabolisme du corps humain
N	sans	Nombre d'équipements sanitaires dans le local
N	tr/min	Vitesse de rotation d'un ventilateur
NC	sans	Courbes de niveau sonore équivalent par bande d'octave référence 2 000 Hz ( <i>Noise Criteria</i> )
NR	sans	Courbes de niveau sonore équivalent par bande d'octave référence 1 000 Hz ( <i>Noise Rating Curves</i> )
P	m	Périmètre d'une gaine
PPD <sub>(IAQ)</sub>	%	Pourcentage d'individus insatisfaits de la qualité d'air ( <i>predicted percentage of dissatisfied persons by indoor air quality</i> )
Q	kg/s	Débit massique d'un air sec
Q <sup>P</sup>	m <sup>3</sup> /s	Taux d'émission de polluant P dans la pièce
R	W/m <sup>2</sup>	Rayonnement thermique de l'air sur le corps humain
S	m <sup>2</sup>	Section d'une gaine
T <sub>u</sub>	%	Intensité relative de turbulence de l'air au point considéré pour le calcul du pourcentage d'insatisfaits dû au courant d'air
TLV	ppm	Valeur seuil d'exposition aux polluants ( <i>Threshold Limit Value</i> )
V	m <sup>3</sup>	Volume d'un local
V <sub>e</sub> <sup>P</sup>	m <sup>3</sup>	Volume équivalent du polluant P dans la pièce
VRI	ppm	Valeur à risques importants. À partir de cette limite d'exposition à un polluant, un individu court des risques importants pour sa santé
VRL	ppm	Valeur à risques limités. Au-dessous de ce seuil d'exposition, le polluant concerné ne présente pas d'effet sur l'homme

Notations et Symboles		
Symbol	Unité	Définition
$W$	$\text{W/m}^2$	Travail extérieur du corps humain
$k$	sans	Constante (facteur) dépendant du type d'odeur
$n$	sans	Constante (puissance) dépendant du type d'odeur
$p$	Pa	Pression d'air
$q'$	$\text{kJ/kg air sec}$	Enthalpie de l'air humide
$t$	$^\circ\text{C}$	Température sèche de l'air humide
$t_a$	$^\circ\text{C}$	Température de l'air au point considéré pour le calcul du pourcentage d'insatisfaisants dû au courant d'air
$t_a$	$^\circ\text{C}$	Température ambiante
$t_{a(\text{moyen})}$	$^\circ\text{C}$	Température moyenne de l'air ambiant
$tr$	$^\circ\text{C}$	Température de rosée de l'air humide
$t_s$	$^\circ\text{C}$	Température de soufflage
$t'$	$^\circ\text{C}$	Température humide de l'air humide
$v$	m/s	Vitesse de l'air
$v'$	$\text{m}^3/\text{kg air sec}$	Volume spécifique de l'air humide
$w$	$\text{kg/kg air sec}$	Humidité absolue de l'air humide
$\alpha$	sans	Coefficient d'absorption sonore d'un matériau
$\gamma$	$\text{kJ/kg d'eau}$	Droite de pente dans le diagramme de l'air humide
$\varepsilon$	%	Humidité relative de l'air

Notations et Symboles		
Symbol	Unité	Définition
$\varepsilon_e^P$	sans	Efficacité globale d'extraction d'un polluant
$\varepsilon_{e, P_0}^P$	sans	Efficacité locale d'extraction d'un polluant
$\eta_a$	sans	Rendement aéraulique d'un ventilateur
$\eta_G$	%	Coefficient de performance global du renouvellement d'air
$\eta_m$	sans	Rendement d'un moteur
$\eta_{RA}$	%	Rendement ou efficacité globale de renouvellement d'air
$\rho$	$\text{kg/m}^3$	Masse volumique de l'air
$\tau_{ca}$	s	Temps de changement d'air égal à deux fois l'âge moyen de l'air dans la pièce
$\tau_e^P$	s	Constante de temps nominale du polluant $P$ , soit le temps de résidence du polluant dans la pièce ou le temps moyen nécessaire au polluant $P$ pour se déplacer de sa source à la bouche d'extraction
$\tau_n$	s	Constante de temps nominale correspondant au temps de résidence minimal de l'air dans le local
$\tau_{P_0}$	s	Âge local moyen : temps mis par les particules d'air pour atteindre un point donné $P_0$ , à partir du moment où elles sont entrées dans la pièce
$\tau_{P_0}^P$	s	Âge moyen local d'un polluant $P$ : temps moyen nécessaire au polluant pour se déplacer de sa source au point $P_0$
$\tau_V^P$	s	Moyenne spatiale des âges locaux d'un polluant $P$ de tous les points $P_0$ de la pièce
$\tau_V$	s	Âge moyen dans la pièce : moyenne spatiale des âges locaux d'air de tous les points $P_0$ de la pièce