

Traitement de l'air et climatisation

Aspects acoustiques et physico-chimiques

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. Aspects acoustiques	BE 9 273 - 2
1.1 Notions de base	— 2
1.2 Propagation du son	— 4
1.3 Source et origine du bruit	— 6
1.4 Traitement du bruit dans un local	— 6
1.5 Implantation en local technique	— 8
1.6 Vibrations en aéraulique	— 8
1.7 Atténuations dans les gaines	— 10
1.8 Traitements complémentaires	— 11
2. Aspects physico-chimiques	— 14
2.1 Ionisation	— 14
2.2 Rayons ultraviolets	— 14
2.3 Séchage chimique	— 14
3. Conclusion	— 16
3.1 Système en évolution constante	— 16
3.2 Multiples fonctions de la centrale de traitement d'air	— 17
3.3 Clés de la réussite d'une installation	— 17
Notations et symboles	BE 9 272
Pour en savoir plus	Doc. BE 9 274

L'air est un bon élément propagateur du son. Or, en conditionnement d'air, l'air est aspiré puis refoulé dans le local traité. Entre l'extraction et le soufflage, il a traversé des éléments générateurs de bruit. Il va donc véhiculer ces bruits. Si des atténuations ne sont pas disposées au bon endroit, une gêne peut se révéler importante dans le local à traiter thermiquement et même à l'extérieur du local ou du bâtiment. L'aspect acoustique doit donc être étudié dès la conception de l'installation.

Des notions d'acoustique sont rappelées avant de répertorier les sources possibles de bruit. Ce premier paragraphe se termine par des conseils et des solutions pour les différents traitements acoustiques possibles en conditionnement d'air.

Dans certains cas, l'installation demande un traitement particulier de l'air (traitement physico-chimique). En début de ce deuxième paragraphe, les traitements

d'ionisation et par rayonnement ultraviolet sont décrits succinctement car ils tendent à disparaître au profit d'une filtration améliorée. Le séchage chimique, objet de la deuxième partie de ce paragraphe, peut remplacer la déshumidification par refroidissement. Ce principe est utilisé lorsque la valeur de l'humidité absolue de l'air désirée dans le local est très basse. Son principe et ses régulations sont décrits.

Ce document fait partie d'un ensemble de quatre articles sur le traitement d'air :

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

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

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

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

complétés par un fascicule de documentation

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

1. Aspects acoustiques

1.1 Notions de base

Le tableau des notations et symboles utilisés dans cet article est commun avec celui de l'article [BE 9 272] où il pourra être consulté.

1.1.1 Paramètres et unités utilisés

■ La **puissance acoustique** est la quantité globale d'énergie acoustique cédée par unité de temps par la source (source sonore continue considérée comme ponctuelle) sous forme d'ondes sonores. Cette puissance sonore est **émise**.

■ L'énergie diffusée par la source provoque, dans l'air ambiant, un train d'ondes de pression. La pression oscille autour de la pression atmosphérique. L'amplitude efficace des oscillations est appelée **pression acoustique**. Cette pression acoustique communément appelée **niveau sonore** est **reçue**.

■ L'**intensité acoustique** est la quantité moyenne d'énergie qui traverse, par seconde, une surface unitaire perpendiculaire à la direction des ondes sonores.

■ La **période** est l'intervalle de temps qui sépare deux valeurs les plus rapprochées pour lesquelles :

- les pressions acoustiques sont identiques ;
- les dérivées sont les mêmes (évolution dans le même sens).

■ La **fréquence** est l'inverse de la période.

■ La **vitesse de propagation** d'une onde sonore est constante pour un matériau donnée. Elle varie avec la température.

■ **Exemple** : pour l'air : $c = 331,4 + 0,607t$ soit à 20 °C : 343,54 m/s.

Le tableau 1 donne quelques valeurs de vitesse de propagation.

Tableau 1 – Vitesse de propagation de l'onde sonore pour différents matériaux

Type	Acier	Béton	Caoutchouc	Bois tendre	Eau
Vitesse (m/s)	5 000	3 à 4 000	40 à 150	250 à 400	1 450

Important : les ondes sonores ne se propagent pas dans le vide (la pression du vide est nulle).

■ La **longueur d'onde** est le rapport de la vitesse de propagation à la fréquence :

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

avec λ longueur d'onde (m),
 c vitesse de propagation (m/s),
 f fréquence (Hz).

■ Les sons, qu'il s'agisse de la puissance, de la pression ou de l'intensité, varient dans une très large plage. À titre indicatif :

- en matière de puissance sonore :
 - un murmure correspond à 10^{-9} W,
 - le booster de la fusée Saturne correspond à 3×10^8 W ;
- les pressions sonores peuvent varier de 2×10^{-5} à 2×10^3 Pa.

C'est pourquoi, l'échelle logarithmique a été utilisée pour la représentation graphique. Pour obtenir un nombre sans dimension, nous exprimons les sons (puissance, pression, intensité) sous forme d'un rapport entre la valeur mesurée et une valeur de référence. Le **bel** exprime la valeur logarithmique de ce rapport.

Un niveau sonore exprimé en bels n'a de sens que si nous indiquons la valeur de référence. Usuellement, nous utilisons le **décibel** sous-multiple qui vaut un dixième de bel (symbole dB) :

$$L = 10K \lg \left(\frac{M}{M_0} \right)$$

avec L niveau sonore (dB),
 K coefficient (1 pour la puissance et l'intensité, 2 pour la pression),
 M valeur mesurée,
 M_0 valeur de référence.

La valeur de référence correspond au **seuil d'audibilité**. L'oreille humaine travaille approximativement de façon logarithmique. Ainsi, l'oreille perçoit de façon identique le passage de 0,01 Pa à 0,1 Pa et le passage de 0,1 Pa à 1 Pa.

Le tableau 2 donne les valeurs de référence.

Tableau 2 – Valeurs de référence pour l'échelle sonore

Type de paramètre	Unité de mesure	Application	Valeur de référence	Symbole utilisé
Puissance	W	son émis	10^{-12} W	L_W
Pression	Pa	son reçu	10^{-5} Pa	L_p
Intensité	W/m ²		10^{-12} W/m ²	L_I

1.1.2 Spectre

Le spectre est une représentation graphique du niveau sonore sur la plage totale des fréquences audibles (30 à 16 000 Hz). Dans un but de standardisation, la plage est divisée en bandes d'octave. Chaque bande est définie de façon à avoir la **fréquence supérieure égale au double de la fréquence inférieure** et est désignée par sa fréquence centrale (moyenne géométrique) qui est égale à la racine carrée du produit des fréquences extrêmes.

L'Organisation internationale de normalisation (International Organization for Standardization ISO) a défini les dix bandes d'octave à utiliser (tableau 3). Les fréquences centrales sont obtenues en multipliant ou en divisant par deux la fréquence de base fixée à 1 000 Hz.

Le spectre peut être représenté par :

— la bande d'octave (figure 1) : cette courbe régulière d'un ventilateur donne les tendances du niveau sonore.

— la bande de tiers d'octave (figure 2) : cette courbe plus détaillée fait apparaître une pointe aux environs de 200 Hz ;

— une analyse fine (figure 3) : cette courbe permet de définir la pointe observée dans l'analyse en tiers d'octave. Elle se situe à 195 Hz et correspond à la fréquence de pale du ventilateur

(1 300 tr/min et 9 pales soit $\frac{1\,300}{60}$ tr/s \times 9 pales = 195 Hz).

1.1.3 Filtre et courbe de gêne

Filtre

L'oreille filtre en fonction des fréquences. Pour prendre en considération les variations de la réponse de l'oreille, des filtres de pondération ont été créés pour permettre à l'appareil de contrôle (sonomètre) de **mesurer le niveau auditif perçu** par l'oreille.

En climatisation, nous utilisons essentiellement le **filtre de pondération A** (tableau 4).

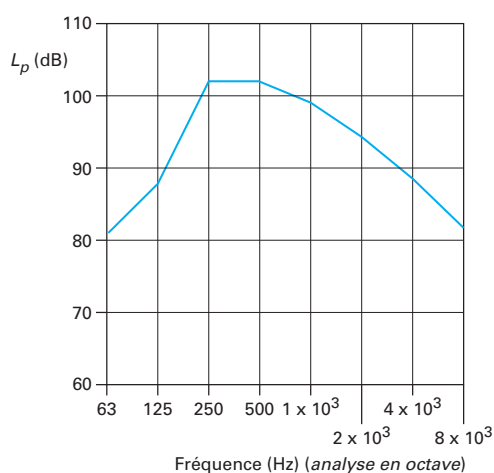
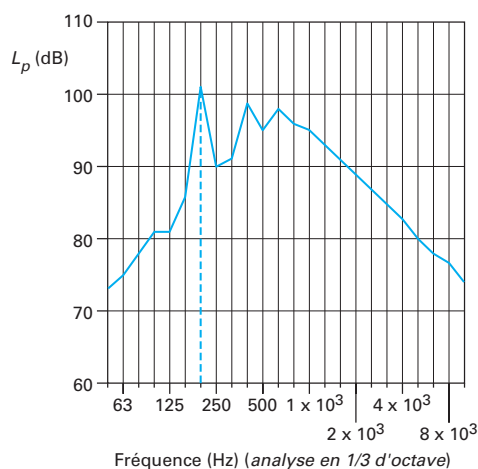
Courbe de gêne

Pour intégrer la faiblesse de l'oreille aux basses fréquences, un système empirique a été créé. Ce sont des courbes de gêne.

L'Organisation internationale de normalisation (ISO) a adopté les courbes dénommées **courbes ISO**. Le chiffre de chaque courbe correspond à son niveau sonore dans l'octave 1 000 Hz (figure 4). Le niveau de gêne est la valeur de la courbe tangente au spectre représentatif du niveau sonore. Sur la figure 4, la courbe de gêne est ISO 78.

Tableau 3 – Bandes d'octave standards

Dénomination de la bande d'octave (Hz)	31,3 arrondi à 31	62,5 arrondi à 63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000	16 000
Valeur minimale (Hz)	22,1	44,2	88,4	177	354	707	1 414	2 828	5 657	11 314
Valeur maximale (Hz)	44,2	88,4	177	354	707	1 414	2 828	5 657	11 314	22 627

**Figure 1 – Analyse spectrale d'un ventilateur en bande d'octave****Figure 2 – Analyse spectrale d'un ventilateur en tiers d'octave**

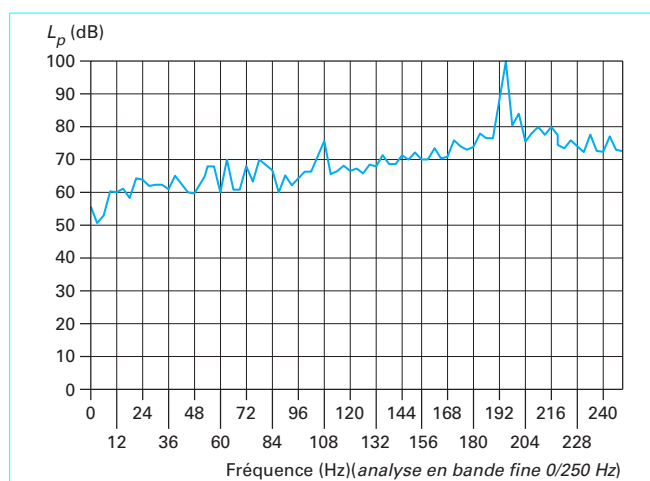


Figure 3 – Analyse spectrale d'un ventilateur en bande fine

Tableau 4 – Filtre de pondération A par bande d'octave

Bande d'octave (Hz)	63	125	250	500	1 000	2 000	4 000	8 000
Valeur à ajouter . (Hz)	-	-	- 8,6	- 3,2	0	+ 1,2	+ 1,0	- 1,1
Valeur à ajouter . (Hz)	26,2	16,1						

1.2 Propagation du son

1.2.1 Relation puissance/pression/distance

En champ libre, la relation entre la pression et la puissance est :

$$p_Y^2 = \rho c \frac{1}{4\pi d^2} P_X$$

avec P_X puissance efficace émise par la source X (W),
 p_Y pression efficace perçue au point Y (Pa),
 ρ masse volumique du milieu (kg/m^3),
 c vitesse du son dans le milieu (m/s),
 d distance entre les points X et Y (m).

Cette relation montre l'importance de la distance dans l'amortissement d'un son. Le niveau de pression sonore chute de **6 dB** chaque fois que la **distance est doublée**.

1.2.2 Directivité

En champ libre, la puissance sonore se diffuse sur la surface totale d'une sphère. Avec des obstacles, la même puissance se diffuse sur une partie de la sphère seulement. Elle est plus concentrée, donc la pression acoustique reçue est plus forte. Le facteur de **directivité** q d'une source est le rapport de la surface totale de la sphère à la surface réelle de la partie de sphère sur laquelle se diffuse le son (figure 5).

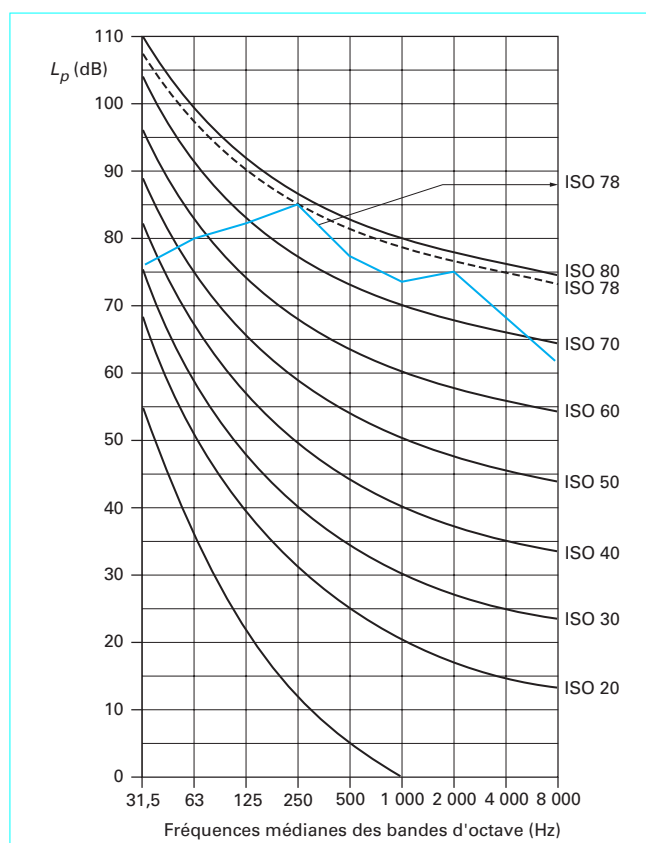


Figure 4 – Courbes de gêne ISO

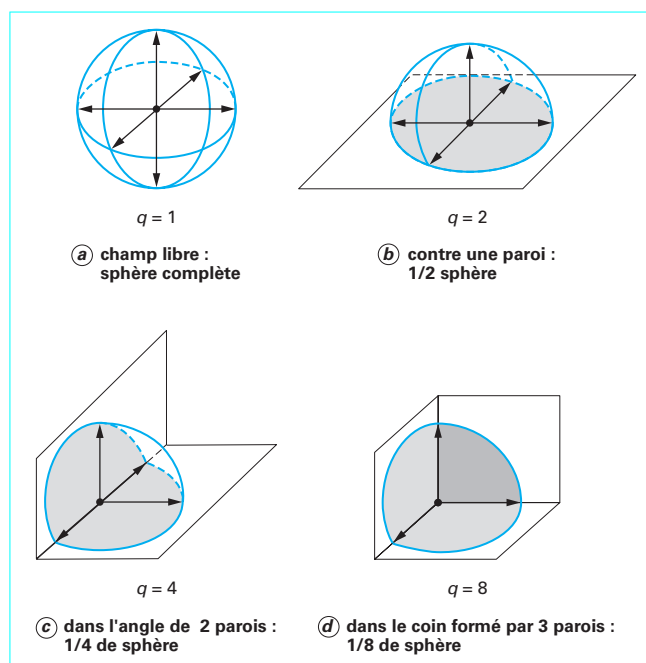


Figure 5 – Facteurs de directivité

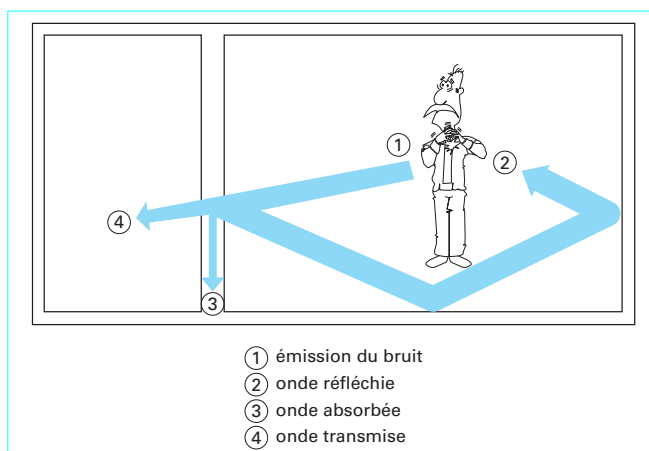


Figure 6 – Propagation du son en local clos

La formule de calcul de la pression devient :

$$p_x^2 = \rho c \frac{q}{4\pi d^2} P_x$$

avec q facteur de directivité,
 d distance entre les points X et Y (m).

1.2.3 Propagation et absorption du son

■ Propagation en local clos

L'énergie sonore qui atteint la paroi (figure 6, énergie incidente ①) se divise en trois parties :

— l'énergie **réfléchie**, qui repart dans le local où s'est produit le bruit :

- l'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence,
- l'onde réfléchie reste dans le plan d'incidence,
- c'est une transmission aérienne (onde réfléchie ②, sur la figure 6) ;

— l'énergie **dissipée** dans la paroi sous forme de chaleur ou transmise vers d'autres parois (transmission solidienne) (onde absorbée ③, sur la figure 6) ;

— l'énergie **transmise** dans la pièce voisine (transmission aérienne) (onde transmise ④, sur la figure 6).

■ Absorption du son

Un matériau absorbant mis sur une paroi diminue la quantité d'énergie sonore réfléchie à l'intérieur du local.

La partie d'énergie absorbée s'appelle le **coefficient d'absorption** α . Sa valeur varie avec la fréquence.

Le chercheur Sabine a défini la **surface d'absorption** d'une paroi, dont l'aire est S et le coefficient α égal à : αS .

En faisant la somme des αS pour toutes les parois d'un local et pour une bande d'octave déterminée, nous obtenons la **surface totale d'absorption** $A = \Sigma \alpha S$ exprimée en m^2 Sabine.

1.2.4 Niveau de pression sonore d'un local

Dans un local, la pression acoustique reçue en un point de l'espace résulte de l'effet conjugué :

- d'une onde directe ;
- de toutes les ondes réfléchies.

La pression perçue est égale à :

$$p^2 = \rho c P \left(\frac{q}{4\pi d^2} + \frac{4}{A} \right)$$

avec p pression sonore perçue (Pa),
 ρ masse volumique de l'air (kg/m^3),
 c vitesse du son dans l'air (m/s),
 P puissance sonore émise (W),
 q facteur de directivité,
 d distance entre la source et le récepteur,
 A surface totale d'absorption du local.

Le calcul en décibels devient :

$$L_p = 20 \lg \frac{p}{p_0} = 20 \lg \left[\frac{\rho c P}{p_0^2} \left(\frac{q}{4\pi d^2} + \frac{4}{A} \right) \right]^{1/2}$$

Comme $p_0^2 = \rho c P_0$

$$\begin{aligned} L_p &= 20 \lg \left[\frac{P}{P_0} \left(\frac{q}{4\pi d^2} + \frac{4}{A} \right) \right]^{1/2} \\ &= 10 \lg \frac{P}{P_0} + 10 \lg \left(\frac{q}{4\pi d^2} + \frac{4}{A} \right) \\ L_p &= L_W + 10 \lg \left(\frac{q}{4\pi d^2} + \frac{4}{A} \right) \end{aligned}$$

avec L_p niveau de pression sonore perçue (dB),
 L_W niveau de puissance sonore émise (dB).

p_0 et P_0 sont les valeurs de référence à indiquer obligatoirement pour toute valeur donnée en décibels.

Généralement les valeurs de référence sont :

$$p_0 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa ;}$$

$$P_0 = 10^{-12} \text{ W.}$$

1.2.5 Addition des bruits

Plusieurs sources sonores peuvent être situées proches les unes des autres. Les puissances et les carrés des pressions s'additionnent et leurs valeurs en décibels s'additionnent de façon logarithmique :

$$P_t = P_1 + P_2 + \dots + P_i + \dots + P_n = \sum_{i=1}^n P_i$$

$$p_t^2 = p_1^2 + p_2^2 + \dots + p_i^2 + \dots + p_n^2 = \sum_{i=1}^n p_i^2$$

$$\begin{aligned} L_W &= 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{P_0} \right) \\ &= 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{\left(\lg \frac{P_i}{P_0} \right)} \right) \\ &= 10 \lg \left(\sum_{i=1}^n 10^{\left(\frac{L_{W_i}}{10} \right)} \right) \end{aligned}$$

Tableau 5 – Origines des bruits d'un ventilateur

Origine	Nature	Type de bruit	Représentation graphique
Aéraulique	Mouvement de roue	<ul style="list-style-type: none"> • Fréquence fondamentale Fréquence de pales $f_p = np$ n vitesse (tr/s) p nombre de pales • Harmonique de fréquence de pales $2 f_p, 3 f_p, 4 f_p \dots$ 	Spectre de raies
	Turbulence	Variation désordonnée de la vitesse du fluide créant, au contact des obstacles, des variations de pression	Bruit à large bande
	Giration	Giration de l'écoulement entraînant des décollements provoquant un son pur	Raie
	Instabilité de l'écoulement	Peut entraîner des résonances du circuit	Bruit de pompage
	Écoulement de l'air de refroidissement du moteur	<ul style="list-style-type: none"> • Rotation du ventilateur • Turbulence de l'air sur les ailettes et les grilles 	<ul style="list-style-type: none"> • Spectre de raies • Bruit à large bande
Électromagnétique et mécanique	Moteur d'entraînement	Ronflement créé par le champ magnétique	Raie sur une grande partie du spectre
	Transmission	<ul style="list-style-type: none"> • Défaut d'alignement sur un accouplement rigide • Crissement des courroies au démarrage 	<ul style="list-style-type: none"> • Bruit de pompage • Spectre de raies
	Paliers	Roulements à billes plus bruyants que paliers lisses	Spectre de raies
	Mauvais équilibrage du rotor	Vibrations dues au balourd	Raies dans la fréquence fondamentale et harmonique
	Résonance du caisson	Vibrations des tôles	Bruit de pompage

De même :

$$L_p = 10 \lg \left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i}{P_0} \right)^2 \right] = 10 \lg \left[\sum_{i=1}^n 10^{\left(\frac{L_{p_i}}{10} \right)} \right]$$

avec P_i puissance sonore émise par la source i (W),
 p_i pression sonore reçue de la source i (Pa),
 L_W valeur totale des puissances sonores émises par les sources (dB),
 L_p valeur totale des pressions sonores reçues des sources (dB).

Le bruit de fond est considéré comme une source sonore indépendante et s'additionne aux autres sources sonores.

1.3 Source et origine du bruit

■ Les sources

En climatisation par centrale de traitement d'air, les différentes sources de bruit sont :

- le flux d'air ;
- le ventilateur ;
- le variateur de vitesse ;
- l'humidificateur (eau + circulateur) ;
- la régénération des conduits ;
- les diffuseurs, les registres ;
- l'interphonie entre les locaux ;
- la transparence des gaines.

■ Les origines

Pour un même appareil, les bruits peuvent avoir des origines différentes :

- aéraulique ;
- électromagnétique ;
- mécanique ;
- hydraulique.

● Ventilateur

Le tableau 5 classe les bruits provenant des ventilateurs selon leurs origines.

● Gains

Les gaines peuvent à la fois absorber par les longueurs droites, les coudes, etc., et être génératrices de bruit (par les registres, clapets, grilles, diffuseurs, etc.). Les réseaux eux-mêmes peuvent aussi jouer un rôle :

- de transmetteur (interphonie, figure 7) ;
- de diffuseur (transparence de gaine, figure 8).

1.4 Traitement du bruit dans un local

■ Énergie transmise : isolation acoustique

Un matériau isolant réduit la quantité d'énergie sonore transmise vers la pièce voisine ou venant d'un local annexe. La quantité d'énergie réfléchie n'est pas modifiée (figure 9).

■ Énergie réfléchie : correction acoustique

La correction acoustique (encore appelée absorption acoustique) est l'ensemble des moyens utilisés pour améliorer la qualité acoustique d'un local vis-à-vis des bruits propres à ce local (figure 10).

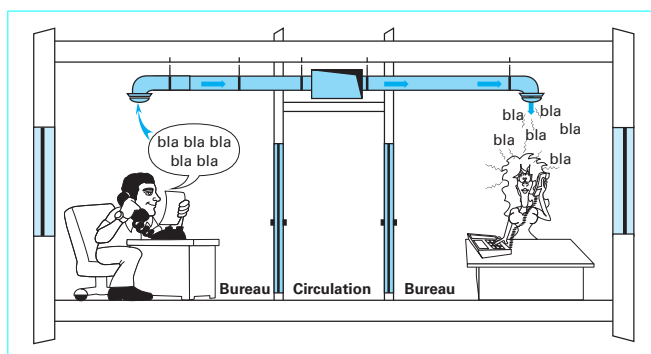


Figure 7 - Interphonie

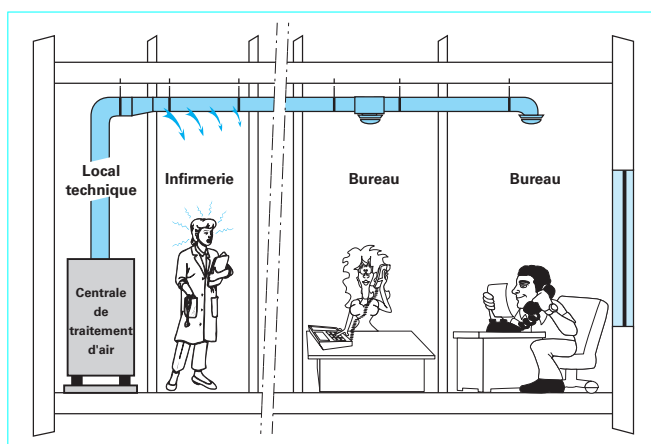


Figure 8 - Transparence de gaine

La démarche ne se préoccupe pas obligatoirement de renforcer l'isolement vis-à-vis d'un local voisin.

Nous utilisons généralement des matériaux absorbants entraînant une réduction du niveau sonore à l'intérieur du local, tels que :

- une moquette murale ;
- des tissus et un molleton.

Le matériau absorbant réduit la quantité d'énergie sonore réfléchie dans le local. La quantité d'énergie transmise vers les autres locaux n'est pas modifiée.

■ Autres dispositifs de correction acoustique

Il existe différents dispositifs dont l'efficacité est plus ou moins adaptée à la fréquence des sons que nous désirons piéger.

● **L'absorption des basses fréquences** ou sons graves (20 à 400 Hz) est réalisée par des membranes fléchissantes : plaques de matériau minces placées devant la paroi en ménageant une lame d'air (figure 11 a).

● **L'absorption des moyennes fréquences** ou sons médium (400 à 1 600 Hz) est réalisée à l'aide de résonateurs : plaques de matériau perforées ou rainurées placées devant la paroi en ménageant une lame d'air (figure 11 b).

● **L'absorption des hautes fréquences** ou sons aigus (1 600 à 20 000 Hz) est réalisée avec des matériaux poreux à « porosité ouverte » tels que :

- les laines minérales ;
- les moquettes ;
- les mousses plastiques souples.

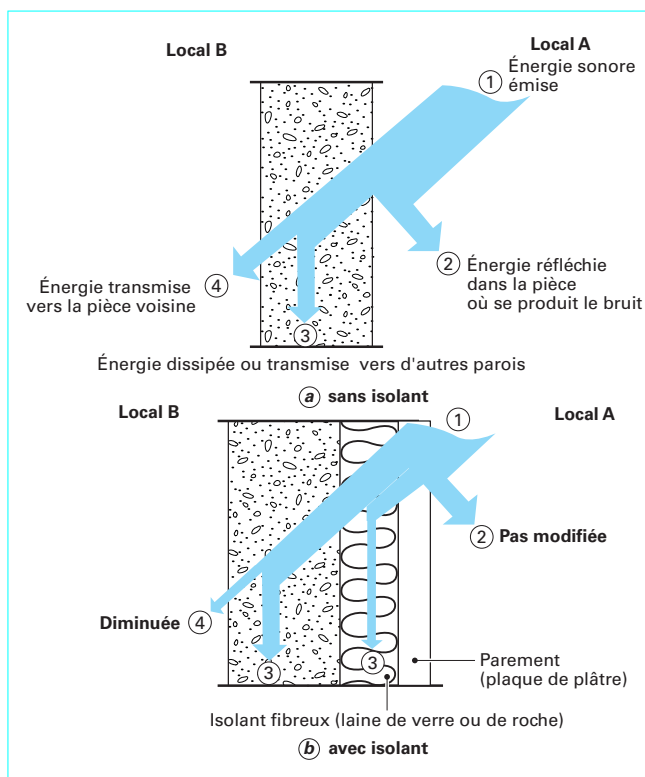


Figure 9 - Isolation acoustique

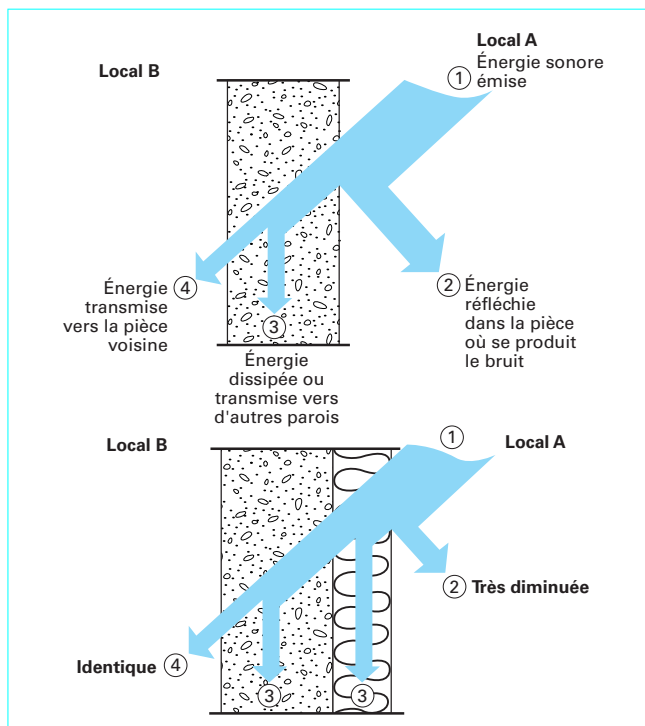


Figure 10 - Correction ou absorption acoustique

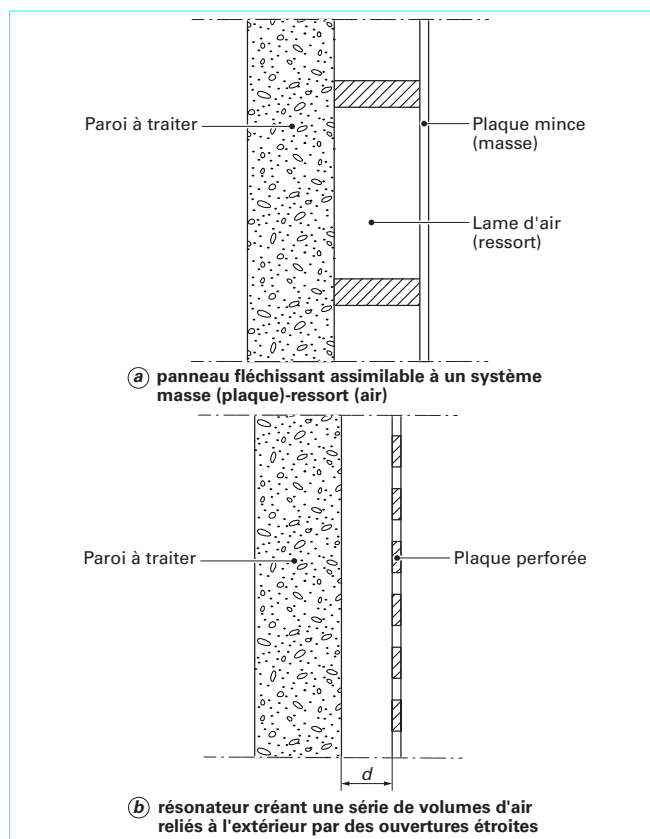


Figure 11 – Autres dispositifs de correction acoustique

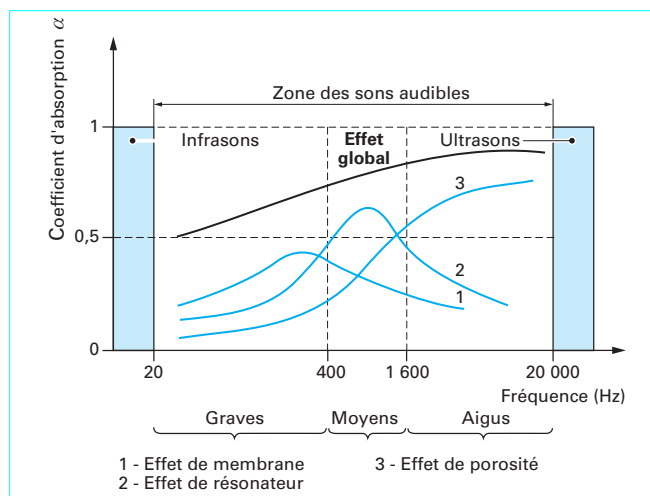


Figure 12 – Effet combiné des trois procédés de correction acoustique

Le coefficient d'absorption est proportionnel à l'épaisseur.

● Lorsque nous désirons une correction efficace et complète sur l'ensemble du spectre, nous pouvons **combinaison des trois procédés** ou utiliser une disposition qui s'en rapproche (figure 12).

Nous pouvons, par ailleurs, traiter les parois pour diminuer les ondes transmises.

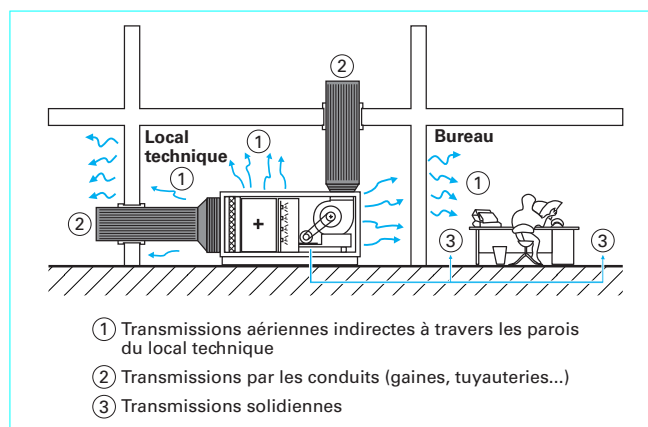


Figure 13 – Transmission du bruit en local technique

1.5 Implantation en local technique

L'implantation de la centrale de traitement d'air en local technique nécessite de prendre en compte les différentes transmissions de bruits possibles. La figure 13 en donne un exemple.

La première démarche lors de l'implantation du local doit relever du bon sens. Quelques recommandations plus précises sont données dans le tableau 6.

Tableau 6 – Quelques recommandations d'implantation en local technique

Situation	Prendre en compte	Conséquence
Vis-à-vis de l'intérieur	Éloigner le local technique des locaux sensibles	Choix de la localisation : accepter des réseaux plus conséquents
	Étudier le local technique et la composition des parois	L'isolement acoustique est déterminé en fonction du spectre de bruit de l'équipement
Vis-à-vis de l'extérieur	Étudier les possibilités de transmission	Orifices d'aération Traversée de parois
	Éloigner au maximum des plaignants potentiels	Prendre en compte le cas de locaux techniques donnant sur la voie publique ou une propriété mitoyenne

1.6 Vibrations en aéraulique

■ Plots antivibratiles

Les plots antivibratiles possèdent des propriétés d'élasticité et d'amortissement qui limitent la transmission des ondes. Ce sont des ressorts en acier capables de subir de fortes oscillations (figure 14).

Ces plots sont calculés en fonction :

- de la fréquence de vibration ;
- du poids à supporter par plot ;
- de l'efficacité souhaitée.

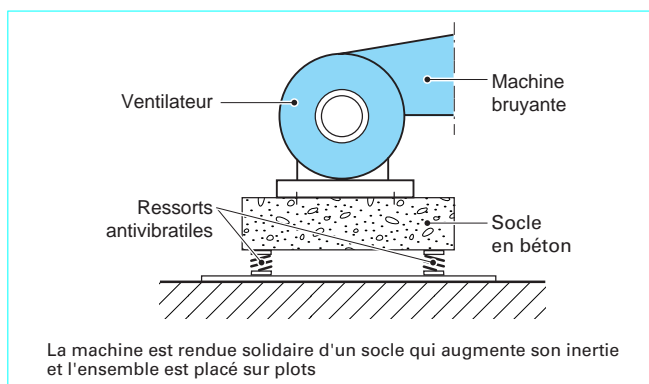


Figure 14 – Plots antivibratiles

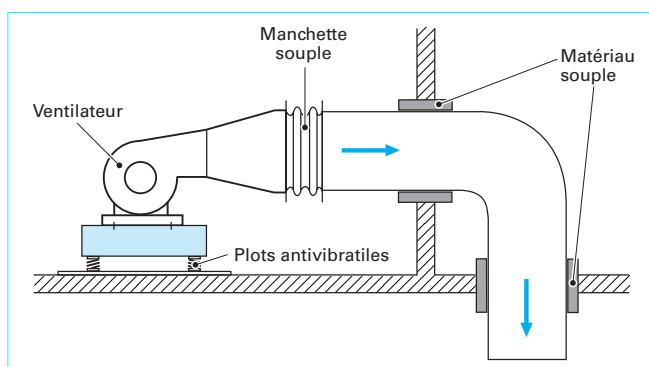


Figure 15 – Exemple d'installation d'un ventilateur avec traversée de parois

Manchette souple

La manchette souple (figure 15) désolidarise la machine tournante de la gaine. Elle ne doit pas être tendue. Toutes les gaines doivent être raccordées de cette façon :

- à l'aspiration ;
- au refoulement ;
- à l'amenée d'air neuf.

Les traversées de parois ou de dalles doivent également être traitées avec un matériau souple.

Support de gaine

Il est conseillé d'intercaler un matériau souple et absorbant entre la gaine et le support (figure 16).

Conception des réseaux de gaine

Les ventilateurs, générateurs de vibrations, sont aussi à l'origine de turbulences provoquées au sein de la veine d'air et créatrices de nuisances acoustiques.

En outre, si des turbulences sont créées en amont du ventilateur par un quelconque obstacle, elles se trouvent amplifiées par l'action du ventilateur (figure 17 a).

L'idéal est de laisser une distance suffisante (5 à 10 fois le diamètre D de la gaine) entre l'élément créateur de la turbulence et le ventilateur (figure 17 b).

La conception du réseau en matière de construction a son importance (coudes, changements de section...) (figure 18 a). En outre, la mise en place d'aubes directionnelles diminue la création de turbulences (figure 18 b).

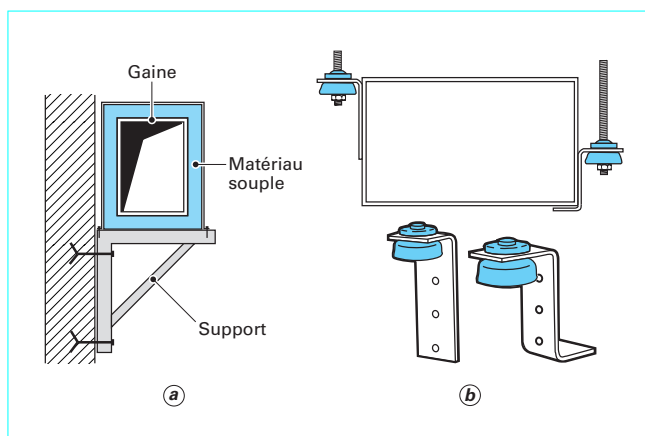


Figure 16 – Support de gaine

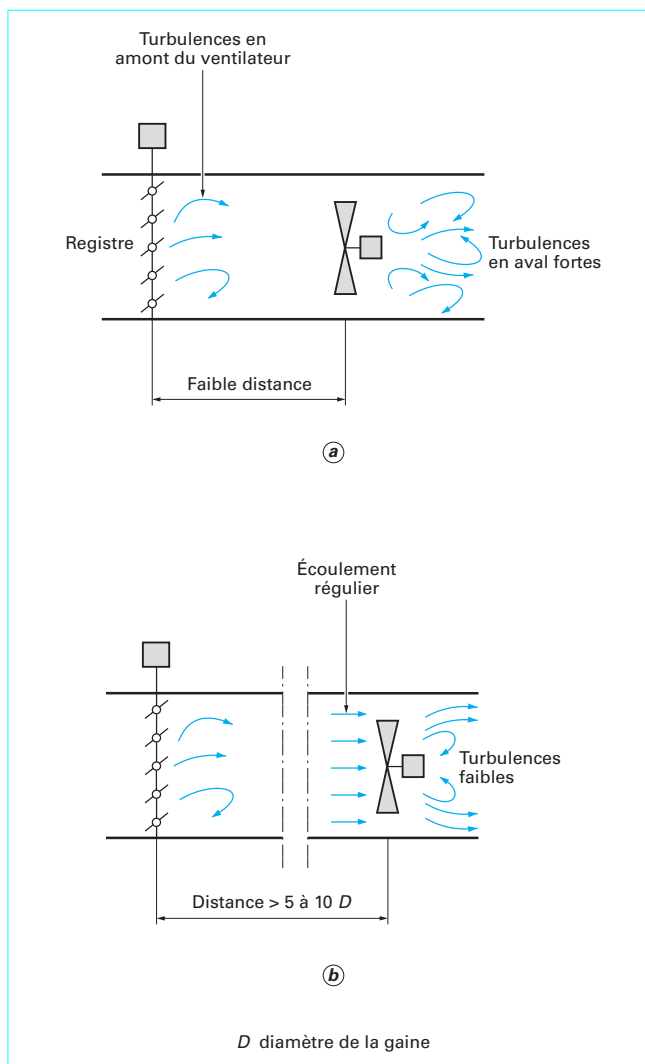


Figure 17 – Emplacement d'un ventilateur proche d'un obstacle

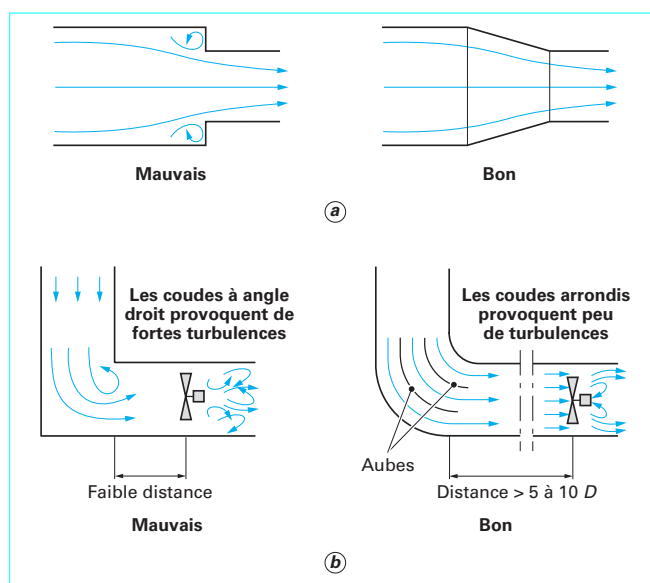


Figure 18 - Conception des coudes et rétrécissements

1.7 Atténuations dans les gaines

■ Gains non traitées

L'atténuation dans les longueurs droites est négligeable et n'est généralement pas prise en compte. L'atténuation dans les coudes arrondis ou à angles droits équipés d'aubes directrices :

- augmente avec le rayon du coude ;
- diminue avec la diminution de l'angle de changement de direction ;
- augmente avec la fréquence.

■ Longueurs droites traitées intérieurement

L'atténuation est donnée par la formule empirique suivante :

$$R = 1,05 \alpha^{1,4} \frac{\mathcal{P}}{S}$$

avec R réduction acoustique de la gaine par mètre de longueur (dB/m),

α coefficient d'absorption du matériau dans la fréquence considérée,

\mathcal{P} périmètre intérieur de la gaine (m),

S section intérieure libre de la gaine (m²).

Cela est valable pour des épaisseurs d'isolant comprises entre 3 et 5 cm.

Ce traitement est efficace dans les **basses fréquences**.

■ Longueurs droites traitées extérieurement

L'atténuation dans les longueurs droites traitées extérieurement :

- augmente avec la dimension des gaines ;
- augmente avec la densité du calorifuge ;
- est efficace dans les **basses fréquences**.

■ Coudes traités intérieurement

Un matériau absorbant placé perpendiculairement au bruit est plus efficace que placé parallèlement (figure 19). De ce fait, un coude est plus efficace qu'une longueur droite, dans les **moyennes et hautes fréquences**.

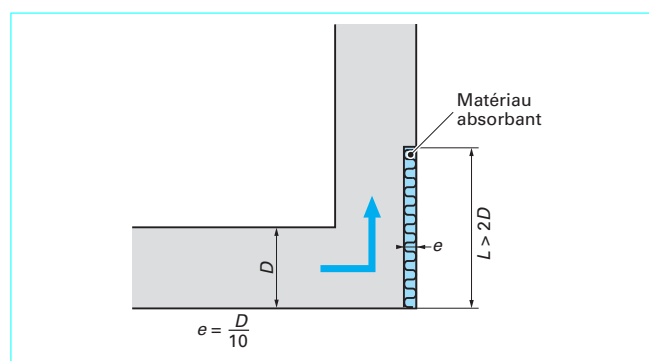


Figure 19 - Emplacement du matériau absorbant dans un coude

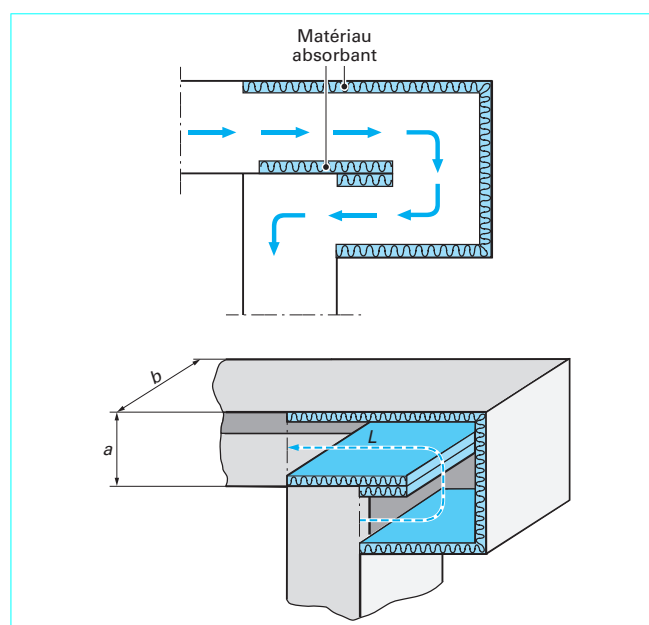


Figure 20 - Coude à 180° ou chicane absorbante

Une succession de coudes à 90° renforce l'efficacité mais présente l'inconvénient d'augmenter considérablement les pertes de charge. Ce type de montage est quelquefois appelé coude à 180° ou chicane absorbante (figure 20).

L'atténuation augmente avec le rapport :

$$N = \frac{L}{D}$$

avec L longueur développée de la chicane,

D diamètre hydraulique de la gaine $\left(D = \frac{2ab}{a+b}\right)$,

a et b dimensions de la gaine.

■ Embranchement acoustique

Dans l'embranchement (figure 21), l'énergie acoustique se répartit dans chaque branche au prorata des sections de passage.

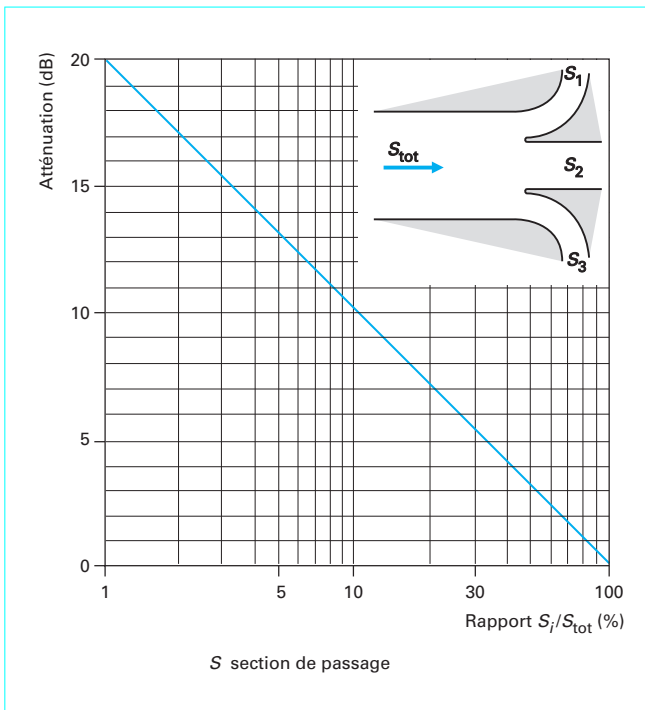


Figure 21 – Atténuation (en dB) dans un embranchement i égale à $10 \lg \frac{S_i}{S_{tot}}$

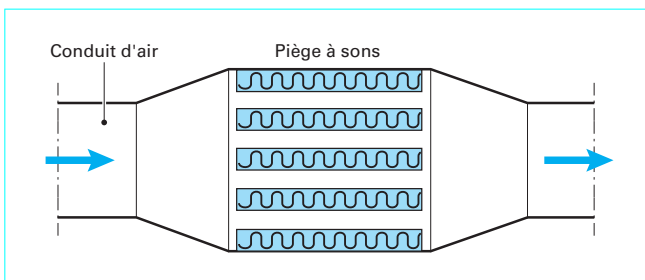


Figure 22 – Piège à sons statique

1.8 Traitements complémentaires

■ Pièges à sons statiques

Le piège à sons statique (figure 22) est constitué d'une enveloppe externe qui contient :

- des baffles [blocs de fibres minérales de densité adaptée, équipés d'un film protecteur contre l'érosion (voile de verre)] ;
- des voies d'air (plus ou moins étroites en fonction de l'efficacité recherchée).

L'atténuation d'un piège à sons statique augmente avec :

- sa longueur ;
- la minceur des veines d'air ;
- l'épaisseur des baffles.

Il est efficace aux moyennes et hautes fréquences.

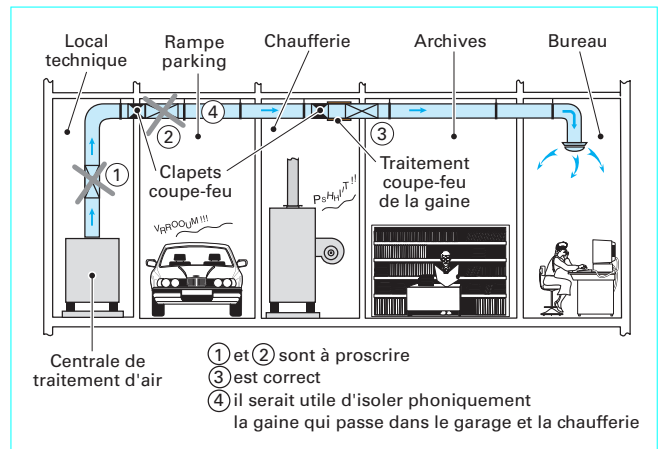


Figure 23 – Emplacement du piège à sons

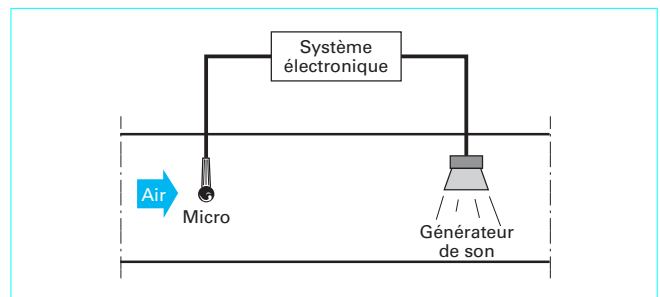


Figure 24 – Principe du son dynamique

Le piège à sons est implanté sur le réseau de gaine qui dessert le local sensible à protéger.

Il est important de bien choisir le lieu d'implantation afin de ne pas risquer de bypasser l'action du piège à sons (figure 23). La section du piège à sons peut être éventuellement supérieure à celle de la gaine, ce qui permet de conserver une section de passage d'air admissible (cf. figure 22) en matière de pertes de charge.

■ Pièges à sons dynamiques

Le but du piège à sons dynamique est de créer un son en opposition de phase du son à piéger (figure 24).

Les étapes suivantes sont réalisées :

- un micro mesure le son à piéger ;
- le système électronique décompose ce son en fréquences ;
- le système électronique crée un son en opposition de phase de même intensité pour chaque fréquence ;
- un générateur de sons envoie ce son dans le conduit d'air, ce qui a pour effet d'annuler le son à piéger.

■ Écran

L'écran est utilisé à l'extérieur (figure 25 a), mais aussi parfois à l'intérieur d'un local (figure 25 b). Il réagit comme une paroi. Son principe de fonctionnement est identique et suit les lois de propagation des ondes sonores.

Le tableau 7 (page 13) donne les matériaux souvent utilisés (figure 26).

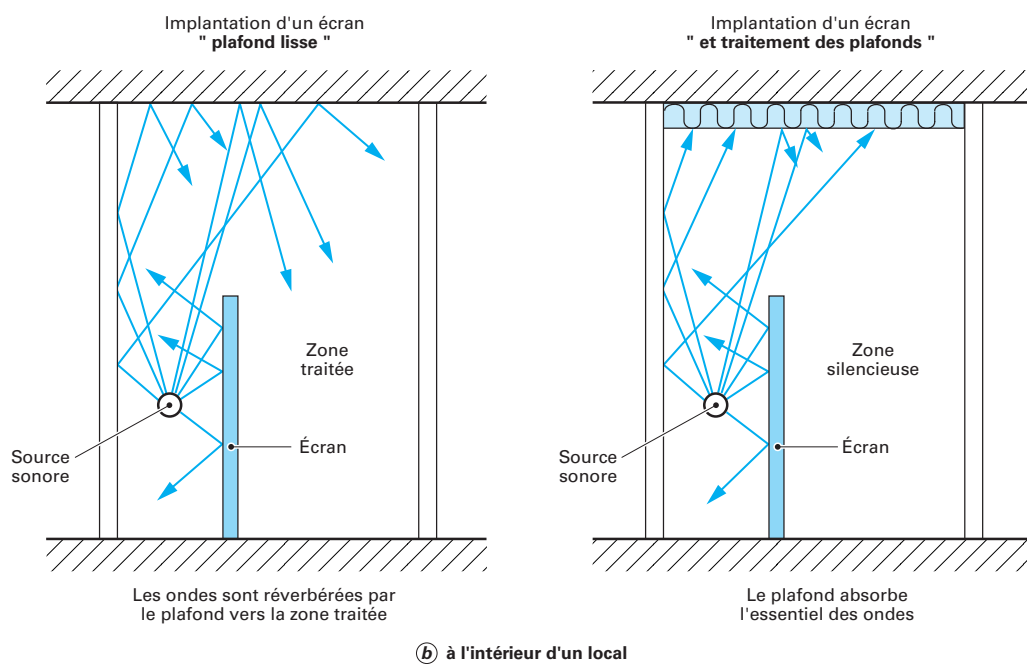
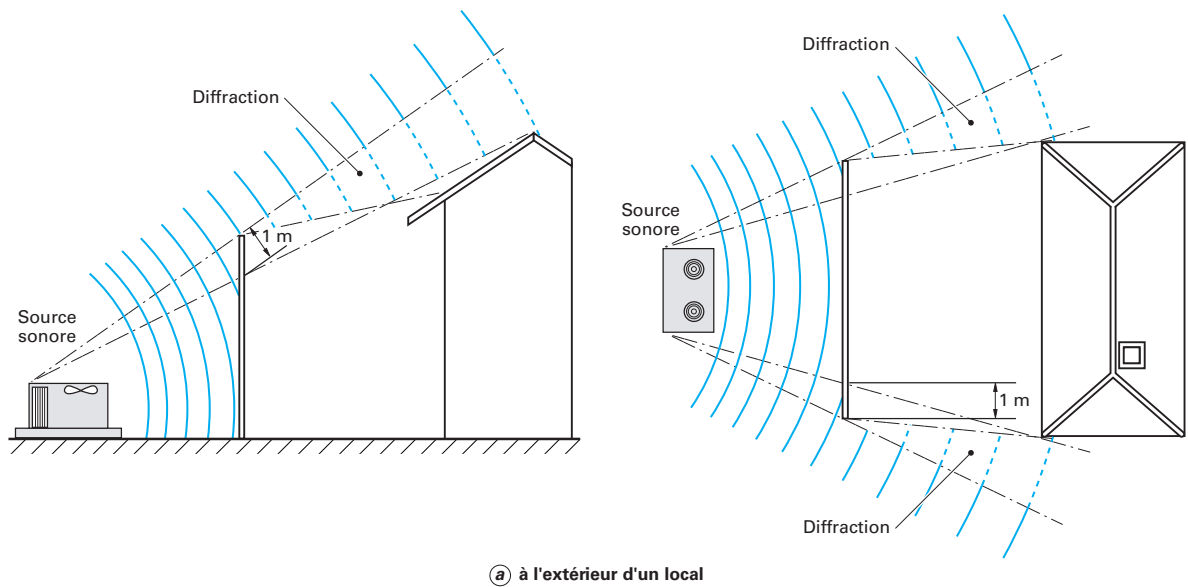


Figure 25 – Installation d'un écran

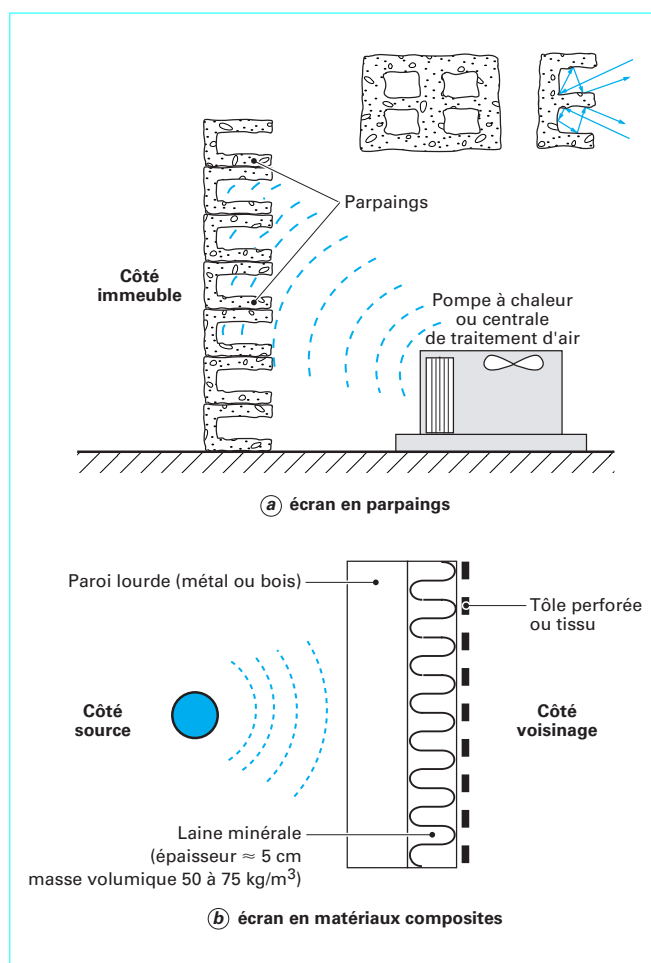


Figure 26 – Différents types d'écran

Tableau 7 – Matériaux utilisés pour les écrans			
Matériaux	Qualités	Défauts	Prix
Parpaing creux posé sur-le-champ (figure 26 a)	Efficace	Lourd	Peu onéreux
Verre minéral ou acrylique	Léger	Réfléchissant	
Matériaux légers et absorbants	Très efficace et léger		Cher
Matériaux composites (lourds et absorbants) (figure 26 b)	Très efficace	La mise en œuvre demande beaucoup de main-d'œuvre	Cher

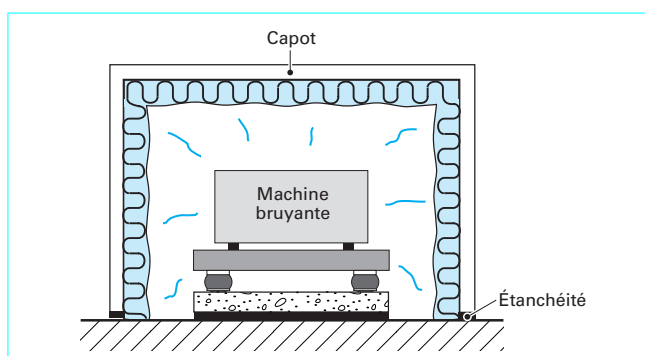


Figure 27 – Conception d'un capotage

■ Capotage

Le capotage est rarement utilisé en traitement d'air car les centrales ont un faible bruit rayonné. Les paramètres à prendre en compte sont les suivants :

- isolation des parois ;
- absorption intérieure ;
- voie d'accès ;
- passage des tuyauteries et alimentation électrique ;
- hublot et regard (s'il y a lieu) ;
- étanchéité des joints ;
- ventilation ;
- isolation des vibrations.

La conception du capot acoustique (figure 27) devra tenir compte de ces divers éléments. La détermination se fera à partir de la connaissance de la puissance rayonnée par la machine et du niveau de pression sonore désirée à l'extérieur du capot.

■ Comparaison

Le tableau 8 établit un comparatif succinct entre les différents domaines d'application des trois procédés de traitement complémentaire. La comparaison entre les performances (tableau 9) ne peut être qu'indicative car elle dépend en grande partie des choix d'investissement et des composants.

Tableau 8 – Comparatif d'application des procédés de traitements complémentaires		
Dénomination	Applications	Remarques
Piège à sons	Traitement du bruit émis par un ventilateur à travers un réseau de gaines	Les freins principaux sont : • les pertes de charge, • le prix.
Écran	Traitement d'un bruit aérien en champ libre : • bruit rayonné, • bruit émis.	Concerne généralement des implantations extérieures mais peut être utilisé en intérieur (poste de travail en atelier)
Capotage	Traitement du bruit rayonné	• Utilisés dans les cas délicats ou très délicats
Capotage + piège à sons	Traitement du bruit aérien rayonné et émis par le ventilateur dans le flux d'air	• Relativement onéreux mais l'objectif primordial est généralement d'ordre technique et acoustique

Tableau 9 – Comparatif d'atténuation des procédés de traitements complémentaires

Désignation	Capacité d'atténuation			Réduction du niveau sonore espéré
	Basse fréquence	Moyenne fréquence	Haute fréquence	
Piège à sons	Faible	Élevée	Moyenne	5 à 60 dB en fonction des caractéristiques géométriques et de l'investissement accepté
Écran	Très faible	Élevée	Élevée	10 à 15 dB
Capotage (1)	Faible	Élevée	Élevée	15 à 30 dB

(1) Essentiellement lié à la conception, au choix des composants et à la qualité de la mise en œuvre.

2. Aspects physico-chimiques

Certains cas particuliers de locaux demandent de traiter l'air chimiquement :

- par ionisation pour rendre l'air plus salubre ;
- par irradiation pour détruire les micro-organismes ;
- par séchage chimique pour abaisser le taux d'humidité.

L'ionisation et le traitement aux rayons ultraviolets sont de plus en plus remplacés, dans les salles propres, par un renouvellement d'air important et une filtration très fine (filtre absolu).

2.1 Ionisation

Un appareil ioniseur par décharges d'électricité statique à travers de l'air extrêmement sec émet des milliards d'ions négatifs par seconde (O^{2-}). Ces ions se repoussent les uns les autres.

Ainsi, ils se répartissent dans tout le local. L'appareil augmente ainsi la salubrité du local en maintenant une concentration minimale d'ions. En effet, la filtration d'air crée un frottement :

- qui réduit la concentration d'ions (O^{2-}) ;
- qui charge les microparticules positivement par perte d'électrons.

Ces particules provoquent, chez l'être humain, des pathologies dites atypiques comme migraines, céphalées, troubles rhinopharyngés, perte de vigilance, fatigue permanente.

En comparaison :

- un air dit « salubre » (air de la montagne) contient 2 500 à 10 000 ions O^{2-}/cm^3 d'air ;
- à la ville, l'air contient 50 à 100 ions/ cm^3 ;
- dans une salle climatisée 0 à 50 ions/ cm^3 .

L'appareil ioniseur participe :

- à la diminution des pathologies atypiques du personnel par l'augmentation de la concentration en ions négatifs ;
- à la destruction des micro-organismes (bactéries, moisissures, levures, spores, virus...) par action de la charge électrique des ions négatifs ;
- à l'élimination de l'électricité statique par action de la charge électrique des ions négatifs.

2.2 Rayons ultraviolets

Des tubes à rayons ultraviolets de longueur d'onde 253,7 nm irradient en permanence l'air. Ces radiations émises inactivent les micro-organismes et les empêchent de se multiplier. La dose germicide minimale pour obtenir une inactivation à 99,99 % du colibacille *Escherichia coli* est de 53 mW/s/ cm^2 . Ces radiations éliminent plus de 95 % des micro-organismes contenus dans l'air tels que :

- les bactéries :
 - *Escherichia coli* ;
 - streptocoques ;
 - staphylocoques... ;
- les virus :
 - bactériophages ;
 - grippe... ;
- les levures ;
- les moisissures ;
- les spores...

Les tubes à rayons UV peuvent s'utiliser là où un air stérile est demandé, c'est-à-dire :

- dans les gaines de soufflage (bloc opératoire, laboratoire de recherche, conditionnement de produits alimentaires...) ;
- dans les gaines d'extraction lorsque nous devons rejeter dans l'atmosphère un air bactériologiquement propre.

Ces tubes doivent être entretenus et surveillés car le vieillissement et l'encrassement diminuent l'énergie UV émise. Pour prolonger leur durée de vie, il est préférable de les placer après les batteries et l'ensemble de filtration. Ils doivent être utilisés avec précaution. La radiation est susceptible de provoquer certains désordres physiologiques chez l'homme tels que : érythème ou conjonctivite.

Il est donc indispensable de protéger les yeux et les parties découvertes du corps du rayonnement direct.

2.3 Séchage chimique

Certaines substances appelées hygroscopiques ont le pouvoir d'absorber une forte quantité d'eau. Parmi celles-ci, les plus utilisées sont :

- le *Silicagel* ou gel de silice ;
- le chlorure de sodium ;
- le chlorure de calcium ;
- le chlorure de lithium...

■ Principe

Une roue est remplie de substance hygroscopique (figure 28). L'air humide traverse cette substance. Celle-ci absorbe l'eau contenue dans l'air qui ressort avec une humidité absolue proche de 0 g/kg d'air sec.

La substance ayant besoin d'être régénérée, cela est réalisé par évaporation de l'eau grâce à de l'air très chaud (environ 100 °C). La substance passe de la zone d'absorption à la zone de régénération et inversement par rotation de la roue. La roue réchauffée par l'air chaud lors de la régénération cède sa chaleur à l'air traité. Une batterie de refroidissement est généralement prévue en aval. L'appellation commune d'une roue de séchage est le **déshydrateur**.

■ Réalisation

La figure 29 montre le principe de la circulation de l'air.

La batterie de chauffage de l'air de régénération peut être électrique ou à vapeur.

Les filtres servent à protéger la roue et les batteries de l'encrassement.

Une autre filtration est généralement prévue dans la centrale de traitement d'air.

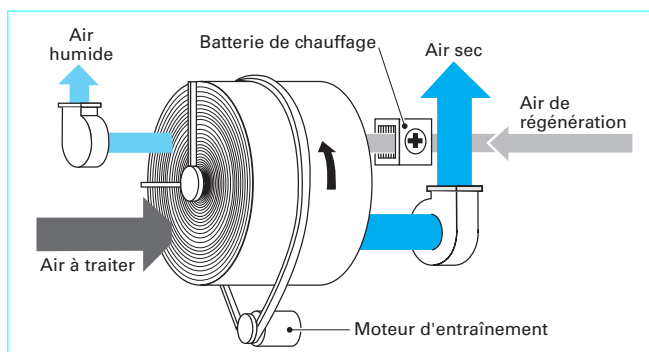


Figure 28 - Composition d'une roue de séchage

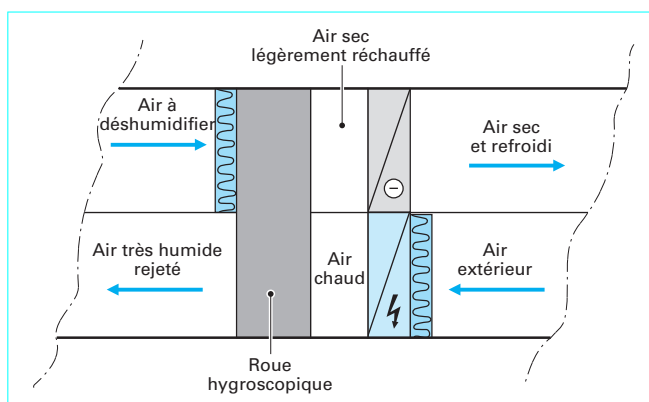


Figure 29 - Sens de circulation de l'air

Régulation

Toutes les régulations possibles de la roue hygroscopique ont un temps mort long. Mais, comme la variation d'humidité dans l'air est lente, la régulation reste stable.

La régulation d'humidité relative peut être réalisée :

- soit par variation de la chaleur de régénération (figure 30 a). L'eau contenue dans la roue est plus ou moins évaporée, ce qui fait que le pouvoir d'absorption varie. Une sonde de limitation évite le dépassement de température de l'air chaud car la substance hygroscopique peut être détériorée par une forte chaleur ;
- soit par commande en tout ou rien de la rotation de la roue. Pour cela, la roue ne tourne que lors de la demande de déshumidification et l'ensemble de régénération est asservi au fonctionnement de la roue (figure 30 b) ;
- soit enfin par variation de la vitesse de rotation de la roue, qui dépend de la quantité d'eau à enlever à l'air (figure 30 c).

Évolution de l'air sur le diagramme de l'air humide

La roue cédant de la chaleur à l'air traité, ce réchauffage dépend de la capacité d'humidité enlevée par la roue (figure 31).

La figure 32 montre l'évolution, sur le diagramme de l'air humide, de l'air traité entre l'entrée et la sortie de la roue. Nous pouvons aussi voir que l'air est très sec. Avec une hygrométrie d'ambiance aussi basse (de l'ordre de 20 %), la demande de déshumidification de l'air n'est généralement que de quelques dixièmes de grammes par kilogramme d'air sec. Dans ce cas, seulement une partie du débit d'air traité passe par la roue (figure 33). Une partie de l'air est déshumidifié et réchauffé, l'autre partie ne subit pas de

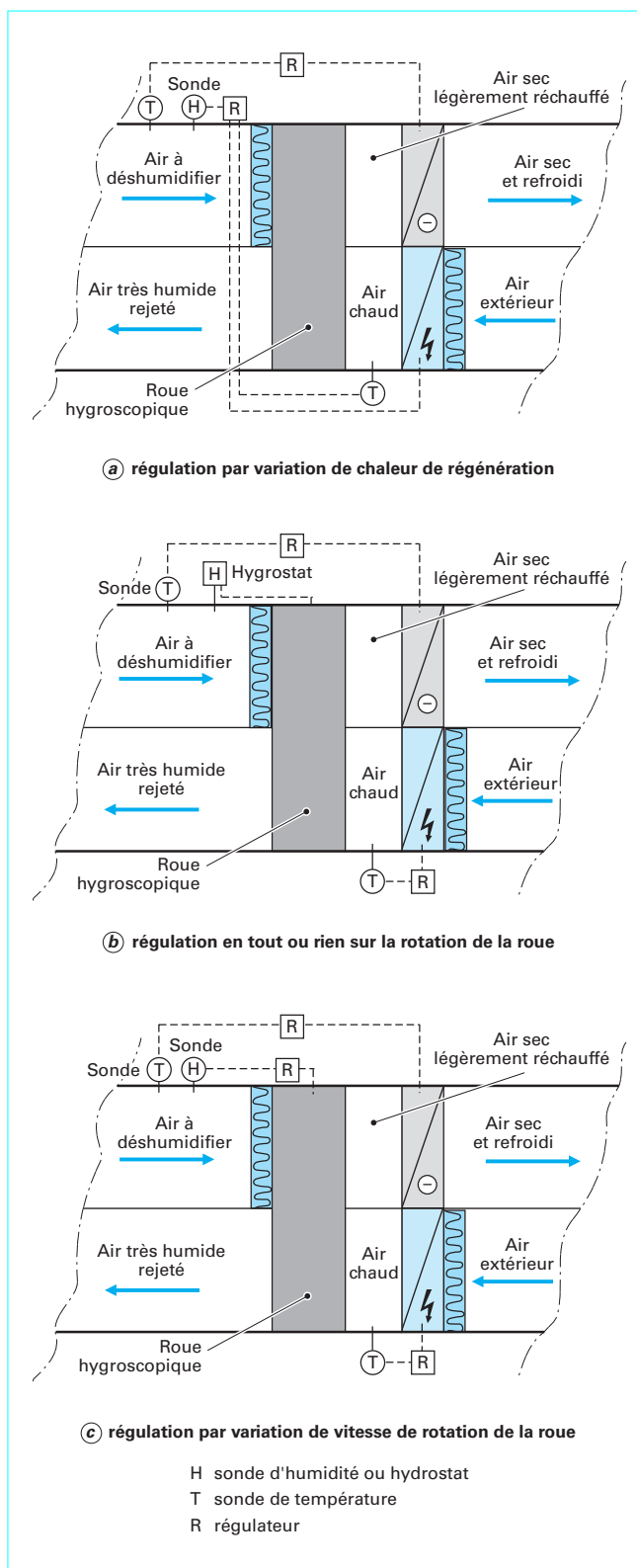


Figure 30 - Régulation de la roue hygroscopique

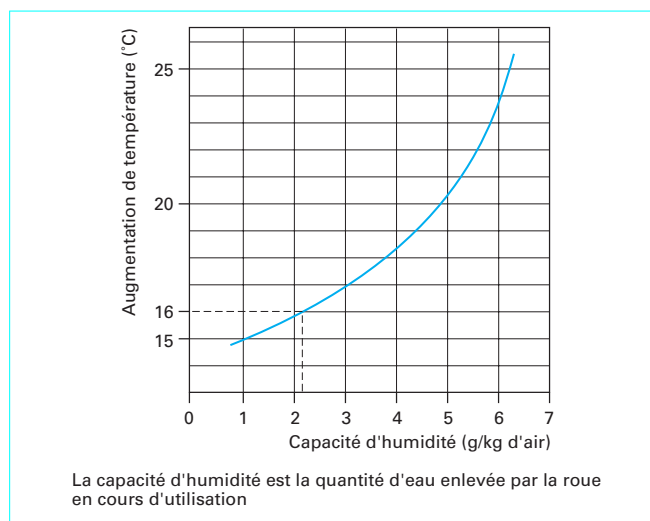


Figure 31 – Exemple de courbe d'augmentation de température en fonction de la capacité d'humidité enlevée

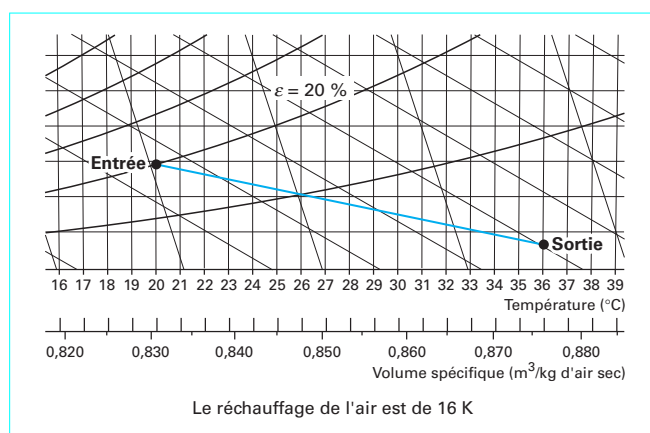


Figure 32 – Évolution de l'air traité à travers la roue

modifications. Le mélange de ces deux airs en sortie de la roue donne un air déshumidifié et légèrement réchauffé.

La figure 34 montre l'évolution, sur le diagramme de l'air humide, de l'air traité entre l'entrée et la sortie du bypass.

■ Applications

Ce procédé de séchage coûte cher autant à l'achat qu'à l'exploitation. Il n'est utilisé que pour déshumidifier des ambiances à faible humidité absolue. Dans ce cas, la température de rosée de l'air à traiter est proche de 0 °C ou est négative. Pour assurer une déshumidification de l'air, la température de surface des ailettes de la batterie doit être négative pour être inférieure à la température de rosée de l'air.

Ainsi, l'eau qui se condense sur les ailettes prend en glace. La batterie givre. La couche de glace diminue la section de passage d'air donc le débit. La glace est isolante, le coefficient d'échange chute.

Il est nécessaire cycliquement de dégivrer la batterie. Cette opération est réalisée :

- soit par passage d'air chaud sur les ailettes ;

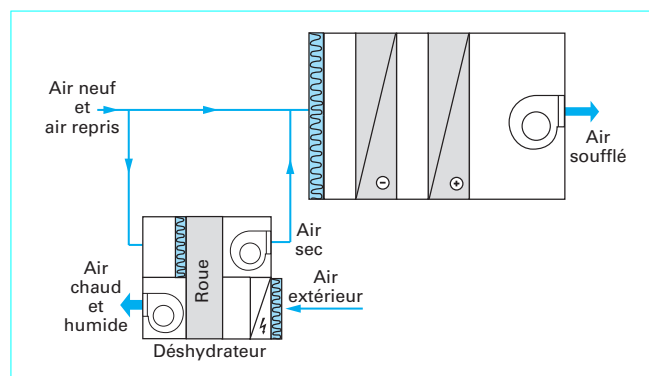


Figure 33 – Principe de raccordement d'une roue de séchage ne traitant qu'une partie du débit d'air de la centrale de traitement d'air

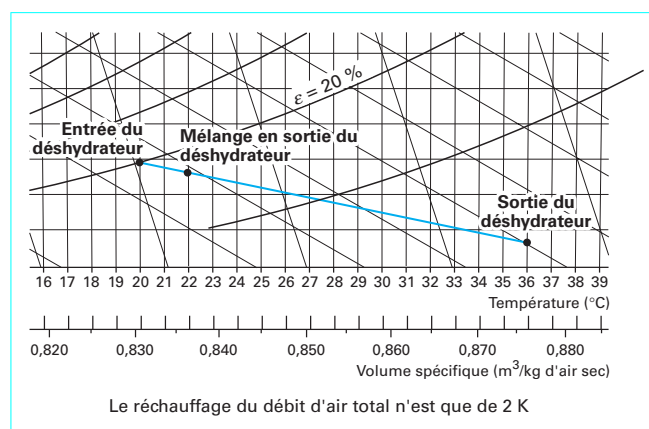


Figure 34 – Évolution de l'air traité avec bypass

– soit par des résistances électriques fixées sur les ailettes, la centrale de traitement d'air étant à l'arrêt.

Dans les deux cas, les conditions d'ambiance ne sont pas maintenues pendant la période de dégivrage. Il est nécessaire de prévoir une seconde centrale de traitement d'air en parallèle. Une des centrales fonctionne pendant que l'autre dégivre.

Le déshydrateur devient, dans ce cas, compétitif. Il offre une meilleure stabilité de la régulation et une meilleure précision. Il est surtout utilisé pour des fabrications de produits avides d'eau comme des poudres explosives ou des médicaments effervescents.

3. Conclusion

3.1 Système en constante évolution

Dans les installations de conditionnement d'air, les exigences deviennent de plus en plus accrues surtout dans les domaines :

- du confort ;
- de la productivité ;
- de l'économie ;
- de la sécurité ;

- de l'environnement.

La climatisation et les centrales de traitement d'air ont évolué pour répondre aux besoins actuels, techniquement et qualitativement et la régulation automatique est devenue une partie intégrante de l'installation.

Toute installation de conditionnement d'air exige une maîtrise simultanée d'un nombre important de paramètres comme :

- la température et l'humidité de l'air ;
- la qualité de l'air ;
- la distribution et la diffusion de l'air ;
- le bruit ;
- les sources d'énergie ;
- l'esthétique.

3.2 Multiples fonctions de la centrale de traitement d'air

La centrale de traitement d'air doit assurer de multiples fonctions.

■ Elle **introduit l'air neuf** nécessaire au renouvellement d'air, à la dilution des polluants internes (l'homme, les machines, les meubles).

■ Elle **purifie l'air soufflé** grâce à une filtration plus ou moins fine selon l'exigence du local traité et grâce à des absorbeurs d'odeurs ou de gaz. Elle piège ainsi :

- les impuretés ou polluants comme CO_2 , SO_2 , NO_x , les fibres, les poussières, etc. ;
- les micro-organismes comme les bactéries, les moisissures, les levures, les spores, les virus, etc.

■ Elle **maintient un confort ambiant** en température et parfois en humidité. Ce confort peut être celui réclamé par l'homme pour son bien-être ou celui exigé par le procédé de fabrication. Dans ce dernier cas, des aménagements peuvent être prévus pour assurer un confort correct du personnel (microclimat sur le poste de travail, vêtements appropriés, protections du poste, etc.). Pour obtenir ce confort, la centrale de traitement d'air combat les déperditions ou les apports de chaleur tant en chaleur sensible qu'en chaleur latente en soufflant un air :

- plus chaud ou plus froid que l'air ambiant ;
- plus humide ou plus sec que l'air ambiant.

■ Elle peut **maintenir une surpression ou une dépression** dans le local. Ainsi, on peut maîtriser le sens du mouvement d'air :

- en surpression, pour éviter l'introduction d'air non traité (salle propre, par exemple) ;
- en dépression pour éviter les fuites d'air pollué (laboratoire de recherche bactériologique, par exemple) ou la migration d'odeurs dans des locaux adjacents (cuisine d'un restaurant, par exemple).

■ Elle **maintient un niveau de pression acoustique**. En effet, grâce à la climatisation et au renouvellement d'air généré par la centrale de traitement d'air, il n'est plus nécessaire d'ouvrir les fenêtres. Ainsi, le bruit extérieur ne pénètre que très affaibli dans le local traité. Par contre, l'installation de conditionnement d'air génère du bruit par la centrale de traitement d'air, les gaines, les bouches et grilles, etc. Il faut noter que si les gaines génèrent du bruit, elles participent aussi à la diminution du niveau sonore.

Un traitement complémentaire peut être nécessaire (piège à sons, écrans acoustiques, capotage...).

3.3 Clés de la réussite d'une installation

Une installation de conditionnement d'air est très complexe et il faut la réussir du premier coup. Toute modification ultérieure est toujours onéreuse et même parfois difficile à mettre en œuvre, certains problèmes pouvant s'avérer insolubles.

La maintenance de l'installation ne doit pas être négligée car c'est la clé de la réussite dans le temps de l'installation. Une mauvaise maintenance peut générer des désagréments :

- sur le confort, car les conditions d'ambiance ne sont plus conservées ;
- sur la productivité (effets dus à de mauvaises conditions d'ambiance ou à la qualité de l'air, à augmentation des nuisances sonores...) ;
- sur l'économie par une diminution des performances ;
- sur la sécurité et l'hygiène (la légionellose provient souvent de centrales de traitement d'air mal entretenues).

Tous ces désagréments donnent une mauvaise image de la climatisation. Pour y remédier, une installation de conditionnement d'air doit être correctement étudiée à tous les stades de sa mise en œuvre. Il est nécessaire :

- de bien calculer le bilan thermique du local par la connaissance :

- de la composition des parois,
- des entrées d'air parasites,
- des dégagements internes en chaleur sensible et en chaleur latente,
- de l'exposition,
- des protections des vitrages,
- des pollutions internes et externes,
- des conditions à maintenir,
- de l'environnement (conditions externes, nuisances...), etc. ;

- de connaître les exigences du maître d'ouvrage :

- température à maintenir,
- contrôle ou non de l'hygrométrie,
- qualité de l'air,
- niveau sonore,
- précision, stabilité et gradient des conditions à maintenir,
- esthétique, etc.,

- de sélectionner correctement les matériels :

- composants de la centrale de traitement d'air,
- gaines,
- bouches et grilles,
- composants de la régulation ;

- de maîtriser les mouvements d'air ambiant :

- système de soufflage,
- gradients de vitesse d'air, de température, d'humidité, etc.,

- de réaliser une installation de qualité :

- choix de l'emplacement de la centrale de traitement d'air,
- position des prises d'air extérieur,
- cheminement des gaines,
- position des bouches et grilles,
- position des composants de la régulation, etc.

Baucoup de facteurs interviennent donc dans la réussite d'une installation de traitement d'air. Le but final reste la satisfaction de l'utilisateur.