

Chapitre I : Généralités sur les ventilateurs

I.1 Définition de ventilateur

Le ventilateur est une turbomachine réceptrice qui fournit l'énergie nécessaire pour entretenir l'écoulement de l'air dans le circuit de ventilation. Il doit être choisi pour débiter un certain volume d'air sous une certaine pression (qui dépend de la résistance du circuit).

I.2 Principes de fonctionnement

- Les systèmes qui nécessitent une circulation d'air sont habituellement alimentés par un ou plusieurs ventilateurs de divers types, à entraînement motorisé.
- Le moteur fait tourner le ventilateur qui fournit l'air au système en créant dans le réseau de gaines (ou les canalisations d'air) une pression qui entraîne le déplacement de l'air dans le système.
- L'air qui se déplace dans une veine d'air possède une énergie attribuable au fait qu'il se déplace et qu'il est sous pression.

Selon le théorème de Bernoulli s'appliquant à la circulation d'air, la somme de la pression statique et de la pression dynamique mesurées en un point en aval du sens de l'écoulement d'air, est égale à la somme de la pression statique et de la pression dynamique mesurées en un point situé en amont, augmentée des pertes par frottement et des pertes dynamiques entre les deux points de mesure

- Le moteur transmet son énergie au ventilateur qui, à son tour, transfère cette énergie à l'air en mouvement.
- Le réseau de gaines a pour rôle de contenir et d'acheminer l'air. Ce processus engendre certaines pertes de pression statique dues au frottement sur les parois, et aux changements de direction du flux d'air (imputables aux coudes et autres raccords), de même que certaines pertes d'air dues à des fuites inévitables.[1.2]

I.3 Classification des ventilateurs

Il y a plusieurs façons de classer les ventilateurs. Parmi eux :

Suivant la pression :

- Les ventilateurs basse pression : pression maximale ≤ 70 daPa.
- Les ventilateurs moyenne pression : $70 \leq$ pression ≤ 350 daPa.

– Les ventilateurs haute pression : pression ≥ 350 daPa.

Suivant le principe de fonctionnement

– Les ventilateurs centrifuges.

– Les ventilateurs hélicoïdes (axiaux).

Suivant les caractéristiques du fluide véhiculé




– Air propre.

– Air chargé (poussières, fibres...).

– Air humide.

– Air à température élevée, etc

La classification la plus courante se fait suivant la trajectoire de l'air dans la roue. On distingue les ventilateurs centrifuges, hélicoïdaux et tangentiels (tableau I.1).

Ventilateur	Intérêts	Photos
Centrifuge à aubes inclinées vers l'avant	<ul style="list-style-type: none"> . Roue dite « en cage d'écureuil » . Nb d'aubes entre 32 et 42 unités . Rendement de l'ordre de 60 à 75% 	
Centrifuge à aubes inclinées vers l'arrière	<ul style="list-style-type: none"> . Rendement de 75 à 85% . Nb d'aubes entre 6 à 16 unités 	
A pales radiales	<ul style="list-style-type: none"> . Peu utilisé dans les installations de conditionnement d'air . Utilisé dans l'industrie pour le transport de 	


	produits légers (copeaux, produits textiles, poussières)	
Hélicoïde	<ul style="list-style-type: none"> . Ventilateur dit « axial » . Direction d'écoulement essentiellement axiale . Nb d'aubes entre 2 et 60 unités . Rendement de 40 à 90% 	

Tableau I.1 Classification des ventilateurs suivant la trajectoire de l'air dans la roue.[3]

I.4 Lois des ventilateurs

La vitesse de rotation d'un ventilateur se mesure en tours par minute (tr/min). Comme le montrent les lois des ventilateurs ci-après, cette vitesse de rotation influe sur le rendement du ventilateur [4]:

Le débit d'air varie de façon directement proportionnelle avec la vitesse de rotation du ventilateur :

$$\text{Débit}_{\text{final}} = \text{Débit}_{\text{initial}} \times \frac{\text{tr/min}_{\text{final}}}{\text{tr/min}_{\text{initial}}} \quad (\text{I.1})$$

La pression engendrée par le ventilateur varie comme le carré de la vitesse de rotation du ventilateur :

$$\text{Pression}_{\text{final}} = \text{Pression}_{\text{initial}} \times \left(\frac{\text{tr/min}_{\text{final}}}{\text{tr/min}_{\text{initial}}} \right)^2 \quad (\text{I.2})$$

La puissance absorbée par le ventilateur varie comme la puissance au cube de la vitesse de rotation du ventilateur :

$$\text{Puissonce}_{\text{final}} = \text{Puissonce}_{\text{initial}} \times \left(\frac{\text{tr/tr/min}_{\text{final}}}{\text{tr/tr/min}_{\text{initial}}} \right)^3 \quad (\text{I.3})$$

Lorsqu'on utilise les lois des ventilateurs, il convient de porter une attention particulière au calcul des effets produits par une variation de la vitesse, car ces lois

s'appliquent à une densité relative d'un milieu gazeux. Lorsque des variations de la vitesse du ventilateur sont accompagnées de changements notables à d'autres paramètres tels que la composition des gaz, la teneur en humidité et la température, les lois des ventilateurs doivent être ajustées en conséquence afin de compenser le changement induit dans la densité du milieu.

La vitesse de rotation doit être prise en considération parallèlement à d'autres facteurs tels que :

- la densité de la veine d'air (pression, température, teneur en humidité, composition des gaz),
- le bruit ambiant,
- la résistance mécanique du ventilateur,
- les variations dans la charge du ventilateur.

Afin d'éviter de surcharger le moteur, certains types de ventilateurs doivent être dimensionnés de manière à s'adapter aux débits d'air et à la pression spécifiés. On surveillera notamment les ventilateurs centrifuges à pales courbées vers l'avant qui produisent de forts débits d'air à des vitesses relativement peu élevées, peuvent facilement délivrer un débit d'air et une pression excessifs et surcharger ainsi le moteur dans les cas où ils fonctionnent à une vitesse trop élevée pour l'application. En outre, si le ventilateur fonctionne à une vitesse inférieure à sa vitesse spécifiée, cela risque d'entraîner un débit d'air insuffisant dans le système.

La température de la veine d'air influe notablement sur les limites de vitesse du ventilateur en raison de l'effet de la chaleur sur la résistance mécanique de la plupart des matériaux.

Pour les applications à températures élevées, les types de ventilateurs à faible vitesse présentent l'avantage d'efforts réduits sur les arbres, paliers et pales, lesquels ont tous une limite d'élasticité plus faible à ces températures. (Les contraintes dynamiques sur ces composants sont proportionnelles au carré de la vitesse de rotation).

I.5 Performance des ventilateurs

Lorsqu'elles sont disponibles, les tables de performance des fabricants constituent la source de données la plus fiable pour obtenir les caractéristiques de fonctionnement et la consommation électrique nominale d'un ventilateur. Lorsque ces données ne sont pas disponibles, on peut évaluer la consommation électrique d'un ventilateur à partir de mesures, des lois de la ventilation et des équations de la puissance du ventilateur traitées dans la présente section [4].

I.5.1 Rendement des ventilateurs

Le rendement d'un ventilateur peut être représenté par le rendement total ou le rendement statique et exclut en général les rendements du moteur et de l'entraînement. Le rendement total d'un ventilateur représente la dépense totale d'énergie utile divisée par la puissance d'entrée à l'arbre du ventilateur [4].

On calcule le rendement total, ou mécanique, à l'aide de l'équation suivante:

$$Ef_{ft} = \frac{f_a \times DP_T}{1000 \times Wf_i} \quad (I.4)$$

Où Ef_{ft} = rendement total du ventilateur (en décimales)

f_a = débit d'air (L/s)

Wf_i = puissance d'entrée à l'axe du ventilateur (kW)

1 000 = facteur de conversion

Le rendement total représente adéquatement la performance d'un ventilateur lorsqu'on connaît la pression différentielle totale ou qu'on peut la déterminer avec précision.

Le rendement statique d'un ventilateur représente la puissance de sortie, basée sur la pression statique différentielle totale, divisée par la puissance d'entrée à l'arbre du ventilateur, et peut être calculé à l'aide de l'équation suivante:

$$Ef_{ft} = \frac{f_a \times DP_s}{1000 \times Wf_i} \quad (I.5)$$

Où Ef_{ft} = rendement statique du ventilateur (en décimales).

Lorsque la vitesse dans les gaines du système est inférieure à 7,5 m/s, la différence entre le rendement statique et le rendement total est habituellement négligeable. Toutefois,

le rendement statique établi dans les tables des fabricants ne représente pas toujours adéquatement la performance du ventilateur. Les deux conditions suivantes doivent faire l'objet d'une attention particulière lors du calcul du rendement statique.

- Lorsque la différence de vitesse à l'entrée et à la sortie du ventilateur est très grande, le rendement statique est trompeur en raison de la différence des pressions dues à la vitesse (énergie cinétique) entre l'entrée et la sortie.
- Le rendement statique d'un ventilateur fonctionnant sans gaine d'évacuation peut être trompeur parce qu'il est impossible de transformer la pression due à la vitesse en pression statique.

I.5.2 Puissance des ventilateurs

La puissance idéale est la puissance requise pour déplacer un volume d'air donné contre la pression statique différentielle totale du système. On calcule cette valeur comme suit[4]:

$$W_f = \frac{f_a \times DP_T}{1000} \quad (I.6)$$

où W_f = puissance idéale (kW)

f_a = débit d'air (L/s)

DP_T = pression différentielle totale du système (Pa)

1 000 = facteur de conversion

Lorsque des tables de performance du fabricant ne sont pas disponibles, les calculs relatifs à la puissance idéale peuvent servir à évaluer l'effet de changement d'un système. On peut, par exemple, déterminer l'effet d'une variation de débit d'air et de pression différentielle totale sur la puissance d'entrée d'un moteur de ventilateur en multipliant la puissance d'entrée initiale mesurée par le rapport des puissances idéales. On peut évaluer la puissance d'entrée initiale d'un moteur électrique ($W_{m_{i1}}$) à l'aide des méthodes décrites à l'annexe E et calculer la puissance d'entrée corrigée à l'aide de l'équation suivante :

$$W_{m_{i2}} = W_{m_{i1}} \times \frac{W_{f_2}}{W_{f_1}} \quad (I.7)$$

où $W_{m_{i1}}$, $W_{m_{i2}}$ = puissances d'entrée initiale et corrigée du moteur (annexe E) (kW).

W_{f_1} , W_{f_2} = puissances idéales du ventilateur aux conditions initiale et corrigée (kW)

La puissance d'entrée totale requise par un ventilateur doit compenser les pertes entraînées par le rendement du ventilateur, de l'entraînement et du moteur. L'équation détaillée suivante donne la puissance d'entrée du moteur en fonction des conditions du système et

du rendement des composants.

$$Wm_i = \frac{f_a \times DP_T}{Ef_{fT} \times Ef_d \times Ef} \quad (I.8)$$

où Ef_{fT} = rendement total du ventilateur (en décimales)

Ef_d = rendement de l'entraînement (en décimales)

Ef_m = rendement du moteur (en décimales) (Annexe E)

1 000 = facteur de conversion

La perte par transmission est habituellement représentée par un pourcentage de la puissance de sortie du moteur.

Lorsque cette valeur est inconnue, on peut utiliser les valeurs données à la table 1. On peut calculer le rendement de l'entraînement à partir de la perte par transmission à l'aide de l'équation suivante:

$$Ef_d = \frac{1 - \text{perte par transmission}}{100} \quad (I.9)$$

La perte par transmission est exprimée en pourcentage.

100 = conversion du pourcentage en décimales.

L'équation modifiée suivante peut être utilisée si nécessaire pour évaluer la puissance d'entrée requise à l'arbre du ventilateur.

$$Wf_i = \frac{f_a \times DP_T}{Ef_{fT} \times 1010} \quad (I.10)$$

Où Wf_i = puissance d'entrée à l'arbre du ventilateur (kW).

On peut calculer, en combinant les équations précédentes, la puissance d'entrée nette à l'arbre du ventilateur d'un système d'entraînement donné.

$$Wf_i = Wm_i \times Ef_m \times Ef_d \quad (I.11)$$

I.5.3 Conditions à l'entrée et à la sortie du ventilateur

Certaines conditions changent les caractéristiques aérodynamiques d'un ventilateur et empêchent celui-ci d'assurer un plein rendement[4]:

- Débit d'entrée irrégulier.
- Turbulence à la sortie du ventilateur.
- Raccords de sortie inappropriés.

La détermination précise des effets de ces facteurs sur la performance d'un ventilateur ne peut être obtenue

que par des calculs détaillés effectués par des personnes spécialistes des critères de conception des gaines d'entrée et de sortie de ventilateurs

Les observations suivantes décrivent les conditions idéales et mauvaises à l'entrée et à la sortie d'un ventilateur pour que le lecteur soit en mesure d'identifier ces conditions et d'agir en conséquence.

Gaines d'entrée:

Lorsque les conditions à l'entrée d'un ventilateur sont mauvaises, la performance de ce dernier se détériore.

Les conditions à l'entrée ont habituellement plus d'effet sur la performance d'un ventilateur lorsque la pression différentielle est faible que lorsqu'elle est très élevée. Le ventilateur assure une performance maximale lorsque l'aire de la section d'une gaine d'entrée représente 92,5 à 112,5% de la surface d'entrée de ce ventilateur. Les parois des raccords de transition installées à l'entrée du ventilateur doivent converger à un maximum de 15° et diverger à un angle maximal de 7°.

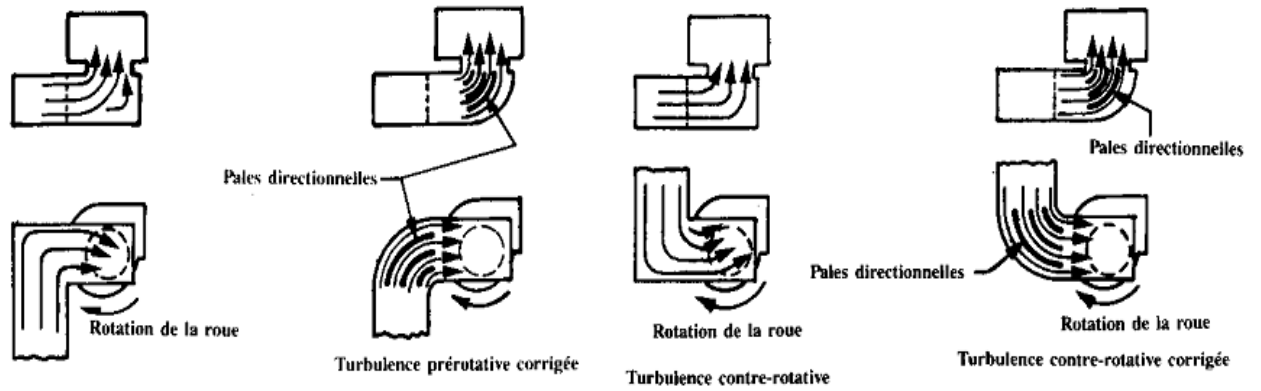
Lorsque les conditions à l'entrée sont optimales, l'air s'introduit dans la roue du ventilateur dans le sens de l'axe de l'arbre de façon uniforme et sans turbulence.

Lorsque les conditions à l'entrée de ventilateur sont très mauvaises, il se crée à cet endroit une turbulence.

Une turbulence dans le sens de rotation de la roue réduit la puissance de sortie et le rendement du ventilateur.

Dans la (figure I.1), des pales directionnelles sont installées pour corriger la turbulence prérotative à l'entrée d'un ventilateur centrifuge. Lorsque la situation n'est pas corrigée, l'installation peut accuser des pertes allant jusqu'à 45%.

Lorsque la turbulence est dans le sens inverse du sens de rotation de la roue, la puissance du ventilateur n'est peut-être pas réduite mais ce dernier consomme plus d'électricité. Dans la (figure I.2), des pales directionnelles sont installées pour réduire cette contre-rotation.

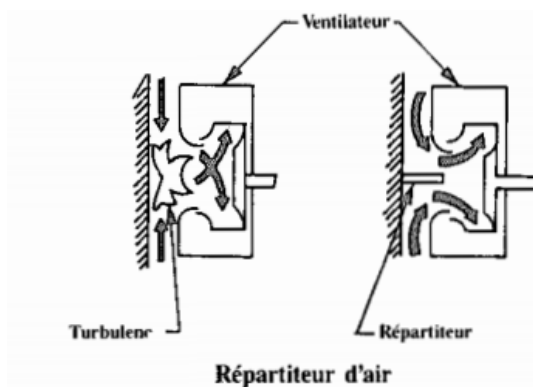
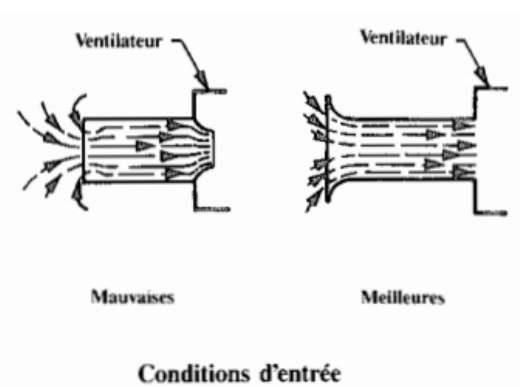
**Figure I.1 :** Turbulence prérotative [4]**figure I.2:** Turbulence contre-rotative [4]

Un registre papillon installé trop près de l'entrée du ventilateur peut causer de la turbulence et réduire le rendement du ventilateur. Il faut, si possible, installer le registre à une distance au moins égale à la distance de sortie L , telle que déterminée à la section Mesure de la performance des ventilateurs.

La (figure I.3) montre un ventilateur centrifuge, dont l'entrée est près d'un mur, avec et sans répartiteur d'air.

Lorsqu'il n'y a pas de répartiteur d'air, les débits d'air de sens opposés se heurtent et causent de la turbulence à l'entrée du ventilateur. Lorsqu'il y a un répartiteur d'air, les débits d'air ne peuvent pas se heurter et la résistance à l'entrée du ventilateur est réduite, augmentant ainsi sa performance.

La (figure I.4) illustre des formes de raccords d'entrée pour des ventilateurs sans gaine d'entrée. Il est à noter qu'une entrée montée en cloche améliore la trajectoire de débit et par conséquent, augmente la performance du ventilateur.

**Figure I.3 :** Répartiteur d'air [4].**Figure I.4:** Conditions d'entrée[4].

Gaines de sortie:

Semblables aux gaines d'entrée, les gaines de sortie doivent avoir une surface de la section de 87,5 à 107,5% de la surface de sortie du ventilateur pour assurer une performance maximale. Les parois d'un raccord qui relie le ventilateur à la gaine d'évacuation doivent converger à un angle maximum de 15° et diverger à un angle maximal de 7° .

La distance L dans les (figures I.1 et I.2) représente la distance au-delà de la surface de sortie du ventilateur à laquelle on obtient un débit régulier. Il s'agit de la longueur minimale désirée de section droite de gaine avant que le réseau de gaines ne change de direction. Si le débit d'air change de direction à l'intérieur de cette longueur de gaine, la performance du ventilateur est réduite. On utilise couramment des pales directionnelles pour parer à cette éventualité. Toutefois, ces pales peuvent prolonger le profil de vitesse irrégulier au-delà des coudes jusqu'à d'autres raccords, ce qui amplifie les effets négatifs sur le ventilateur. Les mouvements giratoires provoqués dans les gaines d'évacuation doivent être dirigés dans le même sens que le débit naturel de l'air soufflé par le ventilateur pour assurer la performance optimale de ce dernier [4].

Lorsque les lames des registres de réglage sont perpendiculaires à l'axe du ventilateur, ceux-ci sont plus efficaces et ont moins d'effet négatif sur la performance de l'appareil (figure I.5).

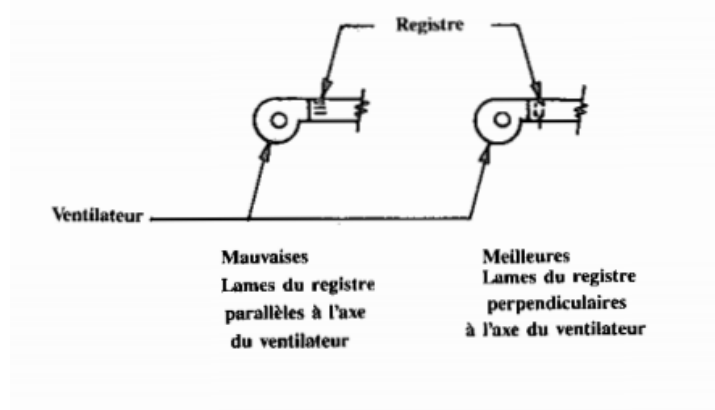


Figure I.5:Registres d'évacuation[4].

I.6 Sens général de l'écoulement de l'air

Dans le cas d'un ventilateur centrifuge, l'aspiration de l'air se fait axialement et le refoulement radialement. Pour un ventilateur axial, l'air est véhiculé parallèlement à l'axe de la roue (figure I.6)[3].

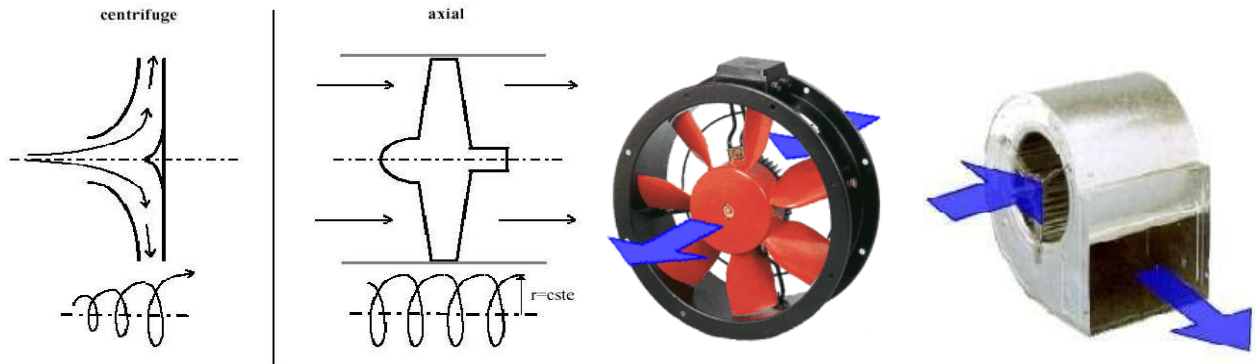


Figure I.6 : Sens général de l'écoulement de l'air

I.7 Différentes possibilités d'entraînement des ventilateurs

Il existe différents modes d'entraînement des ventilateurs (tableau I.2), le plus fréquent étant l'entraînement Direct [3].

Mode d'entraînement	Principe	Avantages	Inconvénients
Direct par l'arbre du moteur	Roue directement calée sur l'arbre du moteur	<ul style="list-style-type: none"> . Faible coût d'investissement . Encombrement réduit . Faible coût d'entretien 	<ul style="list-style-type: none"> . Impossibilité de faire varier la vitesse de rotation . Ne convient pas pour des températures d'aspiration élevées
Par courroies	L'arbre de la roue et du moteur sont décalés et parallèles	<ul style="list-style-type: none"> . Variation de la vitesse de rotation aisée . Correction du point de fonctionnement possible par échange de poulies 	<ul style="list-style-type: none"> . Rendement peu élevé . Usure des courroies . Frais d'entretien plus important
Direct par moteur à rotor extérieur	Roue calée sur le rotor du moteur à rotor extérieur	<ul style="list-style-type: none"> . Solution bon marché . Peu de maintenance sur de petits ventilateurs . Variation de vitesse réglable . Encombrement réduit 	<ul style="list-style-type: none"> . Faibles températures admissibles d'aspiration (40 à 50°C) . Rendement faible

Tableau I. 2 Avantages et inconvénients de trois modes d'entraînement[4].

I.8 Diamètre nominaux des ventilateurs

On appelle diamètre nominal d'un ventilateur le diamètre de la section de raccordement placée à l'aspiration en raccordement direct par conduit ; Il n'est pas tenu compte d'un éventuel pavillon d'aspiration ou d'un caisson de raccordement [3].

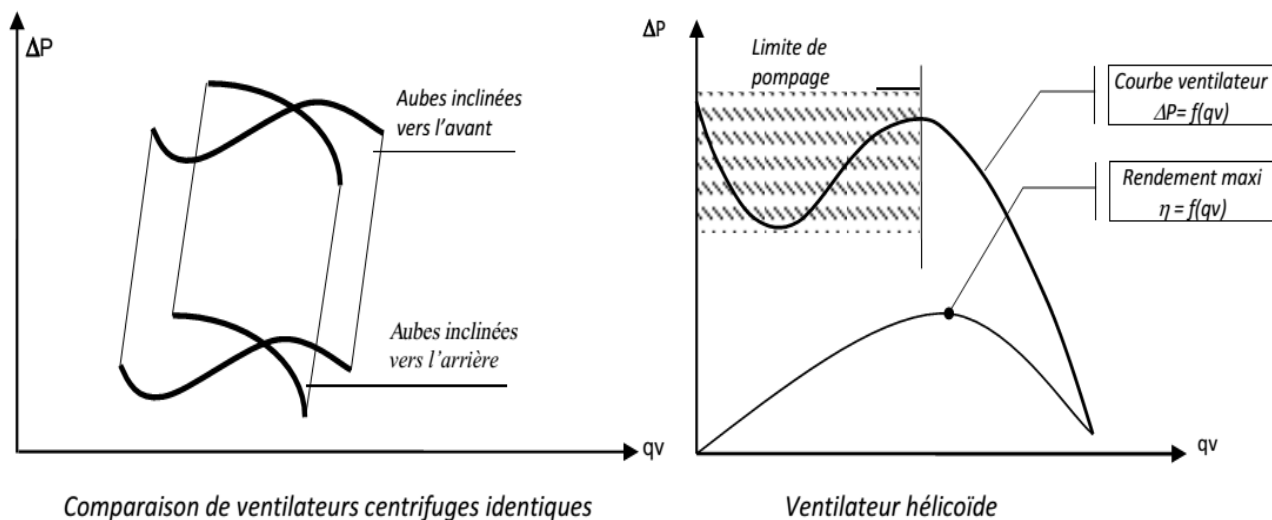
Diamètres nominaux en mm	63	71	80	90	100	115	125	140	160
	180	200	225	250	280	315	355	400	450
	550	560	630	710	800	900	1000	1120	1250
	1400	1600	1800	2000					

Tableau I.3 Diamètre nominaux des ventilateurs[3].

I.9 Domaine d'emploi des ventilateurs

Champs des courbes caractéristiques : $\Delta p = f(qv)$

Les trois types de ventilateurs les plus utilisés disposent de courbes spécifiques dont les allures sont données (Figure I.7) ci-dessous .

Figures I.7 : Champs des courbes caractéristiques : $\Delta p = f(qv)$ [3].

Les courbes des ventilateurs centrifuges à pales inclinées vers l'avant sont plus plates que celles inclinées vers l'arrière. Quant au ventilateur centrifuge, seule une partie de la courbe sera utilisable sous peine d'obtenir un fonctionnement instable ; le rendement maxi d'un tel ventilateur se situe non loin de la limite de pompage [3].

I.10 Caractéristiques d'un ventilateur

Les courbes caractéristiques d'un ventilateur représentent l'évolution des principales caractéristiques en fonction du débit volume pulsé. Ce sont pour chaque ventilateur [3]:

- Courbe de gain de pression totale ou charge

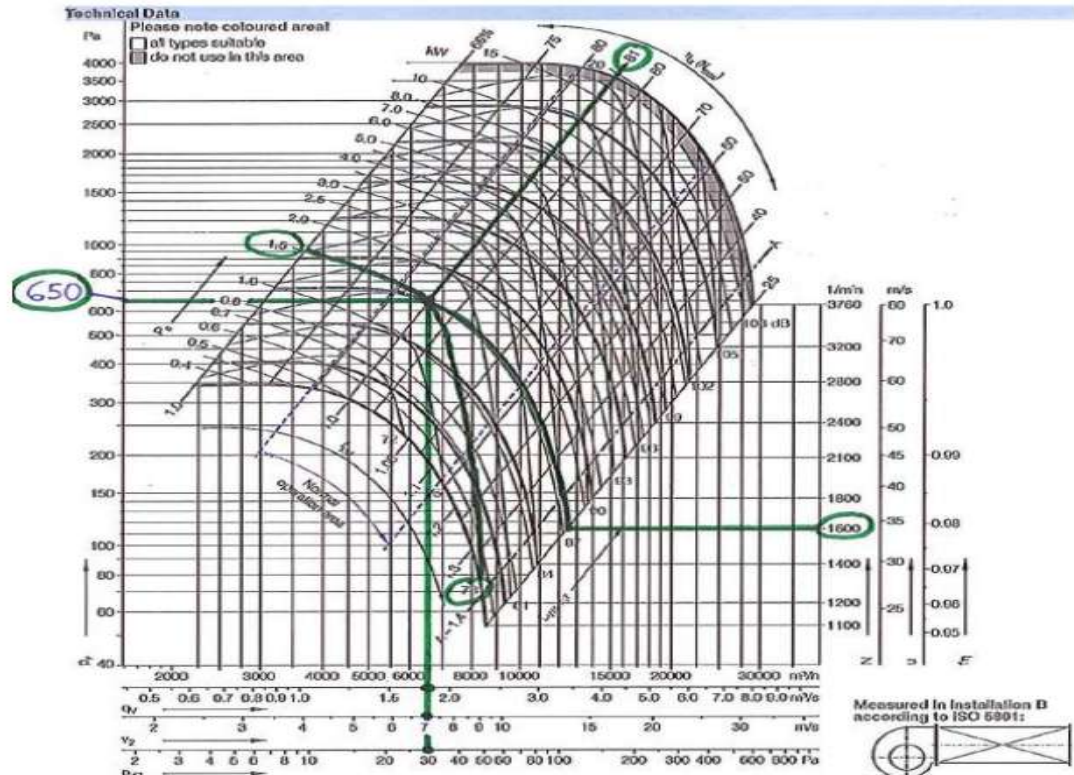
- Courbe de puissance sur l'arbre du ventilateur
- Courbe de rendement global
- Courbe du niveau de puissance

Les diagrammes sont souvent établis pour de l'air standard $p=101325 \text{ Pa}$, $\theta=20 \text{ }^{\circ}\text{C}$, $\varphi=50\%$ ce qui correspond à $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$.

Sur le diagramme ci-joint, au point de fonctionnement nominal, la turbine du ventilateur aura les caractéristiques suivantes :

- Charge du ventilateur = 650 Pa (pression statique + pression dynamique)
 - Puissance sur l'arbre du ventilateur = 1,5 kW
- Rendement = 0,81
- Vitesse de rotation = 1600 1/min
 - Niveau de puissance acoustique = 73 dB

La pression statique est calculée suivant la sélection du gainage de ventilation. La pression dynamique est déduite du débit de ventilation. Deux mesures sont suffisantes pour trouver le point de fonctionnement nominal.



Figures I.8 : Courbes caractéristiques d'un ventilateur centrifuge à aubes inclinées vers l'arrière [3]