

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



Département de Génie Mécanique

Projet de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme
D'Ingénieur d'Etat en Génie Mécanique

Thème

*Etude et mise en œuvre de mesures de mise en marche
d'un banc d'essais de ventilateur centrifuge au
laboratoire d'énergétique*

Etudié et présenté par :

BEKHTIAR Juba
OUKHALED Samir

Proposé et dirigé par :

Mr. H.BENNOUR
Mr. M.LATRECHE
Mr. O.STIHI

** Promotion juin 2013 **

الملخص :

الهدف من عملنا هذا المشروع هو دراسة و تنفيذ التجارب بعد إعادة تهيئة منصة إختبار مروحة الطرد المركزي بمخبر الطاقة من أجل استغلالها في مختلف الأعمال التطبيقية التي من شأنها أن تجلب دعماً قوياً في تكوين الطلاب. بعد فهم مبدأ العمل و تشخيص المنصة وتحديد الإعطاب التي تسبب الخلل الوظيفي من أجل إصلاحها أو استبدالها. في نهاية عملنا تمكنا من إعادة تهيئة المنصة وإجراء التجارب لهدف الحصول على جميع الخصائص المتعلقة بمروحة الطرد المركزي.

الكلمات المفتاحية :

مروحة الطرد المركزي, التشخيص, منصة التجارب, خصائص المراوح , تغيير السرعة, مجموعة Ward-Leonard

Résumé

L'objectif de notre travail consiste en l'étude et la mise en œuvre de mesures de mise en marche d'un banc d'essais de ventilateur centrifuge au laboratoire d'énergétique, en vue de son exploitation pour divers travaux pratiques qui va apporter un grand soutien pédagogique dans la formation des étudiants. Après avoir compris le principe de fonctionnement, nous avons diagnostiqué l'installation et localisé les anomalies qui causent le dysfonctionnement pour pouvoir les réparer.

Au terme de notre travail, nous avons réussi à remettre en marche le banc d'essais et à effectuer des essais afin d'avoir toutes les caractéristiques relatives au ventilateur centrifuge.

Mots clés : ventilateur, ventilateur centrifuge, diagnostic, groupe Ward-Léonard, banc d'essais, caractéristiques des ventilateurs, variation de vitesse.

Abstract:

The objective of our work is to study and implement measures starting of a test bench whit centrifugal fan in the engineering laboratory for its use for various practical work that will most useful in the training of students. After having understood the principle of operation, we diagnosed the installation and located abnormalities that cause dysfunction in order to repair them.

After completion of the repairs, we managed to restart and perform tests in order to have all the technical features for the centrifugal fan.

Keywords: fan, centrifugal fan, diagnosis, Ward-Leonard group, test bench, fans characteristics, variable speed.

Remerciements

Nous remercions avant tout Dieu le tout puissant de nous avoir donné la foi, la volonté et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à nos encadreurs MM. H.Bennour, M.Latreche et O.Stihi pour leurs précieux conseils et leur disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'intérêt qu'ils ont toujours porté à l'égard de notre travail.

Nous tenons tout particulièrement à remercier le professeur Ahmed-Zaid du département de génie chimique pour l'aide qu'il nous a si généreusement accordée.

Nous remercions les électriciens de l'Ecole pour leurs interventions à chaque fois que nous avons sollicité leur aide pour résoudre un problème d'alimentation électrique. Sans oublier le personnel du département de Génie Mécanique qui a mis à notre disposition tous les moyens disponibles à son niveau.

Nous remercions le professeur Mohand Améziane AIT ALI d'avoir accepté de présider notre Jury et monsieur Mohamed Madani d'avoir accepté d'examiner et d'évaluer notre travail

Que tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à l'élaboration de ce projet trouvent ici le témoignage de notre reconnaissance.

Nous tenons enfin particulièrement à adresser nos vifs remerciements à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation, à leur tête ceux du département de Génie Mécanique

A tous nos camarades de la promotion 2013, nous disons un grand merci.

Je dédie ce travail :

A la mémoire de ma grande mère qui m'a inculqué la sagesse de la vie

A ma très chère mère et à mon très cher père

A toute ma famille (mes frères, mes sœurs et leurs familles, mes oncles et tantes) et DADA Belaid.

A tous mes amis(es) : moh, kaci, omar, nacer, hakim, mokrane, abdenour, younes, samir, said, amar, juba, boussade karima, souhila, naouel, surtout mes deux amis d'enfance ahcene et lounas

A mon petit neveu Ilyes et au petit Yacine

OUKHALED Samir

Je dédie ce modeste travail

A ma mère et à mon père que je remercie pour leur soutien, et pour avoir été toujours présents pour moi depuis ma naissance.

A mon frère GAYA pour qui je souhaite une grande réussite dans la vie.

A mes grands parents à qui je souhaite une longue et heureuse vie.

A toutes mes tantes et à tous mes oncles

A tous mes amis et camarades de classe

A toute ma famille et à tous ceux qui me connaissent

BEKHTIAR JUBA

Table des matières

Introduction générale	1
-----------------------	---

CHAPITRE I

Présentation Du Banc D'essai : Aspects Descriptifs Et Aspects Théoriques

I.1 Introduction	3
I.2 Le Banc D'Essais	3
I.3 Principe de fonctionnement du groupe Ward-Leonard	5
I.4 Commande de la vitesse de rotation des machines électriques	8
I.4.1 Procédés de réglage de la vitesse de la machine asynchrone	8
I.4.2 Procédés de réglage de la vitesse du moteur à courant continu	9
I.5 Le moteur à courant continu à excitation indépendante	12
I.5.1 Point de fonctionnement	12
I.5.2 Caractéristique électromécanique de la vitesse $N(I)$	13
I.5.3 Caractéristique électromécanique de couple $T_{em}(I)$	14
I.5.4 Précautions à observer lors du démarrage du moteur à courant continu à excitation séparée	15
I.6 Eléments de théorie sur les ventilateurs	16
I.6.1 Types de ventilateurs	16
I.6.1.1 Ventilateurs centrifuges	17
I.6.1.2 Ventilateurs axiaux	20
I.6.2 Courbes caractéristiques d'un ventilateur	22
I.6.3 Point de fonctionnement d'un système de ventilation	24
I.6.4 Associations de ventilateurs	24
I.6.5 Régulation du débit d'air	25
I.6.5.1 Réglage par des pales d'entrée réglables	25
I.6.5.2 Régulation par registres	26
I.6.5.3 Réglage par variation progressive de la vitesse de rotation	28
I.7 Lois de similitudes	28
I.8 Conclusion	29

CHAPITRE II

Analyse Des Défaillances Des Equipements Et Remédiation

II.1 Introduction	30
II.2 Démarche méthodologique de diagnostic	30
II.3 Etat initial de banc d'essais	32
II.4 Premières interventions sur le banc d'essais	34
II.5 Réparations réussies	37
II.5.1 Rétablissement d'une alimentation protégée pour le banc d'essais	37
II.5.2 Intervention sur les rhéostats de réglage	38
II.5.3 Mise sous tension du groupe Ward-Leonard	38
II.5.4 mise en marche de l'ensemble moteur à courant continu - ventilateur	39
II.5.5 Equipement du banc d'essais avec les manomètres et réunion des accessoires indispensables à l'exécution des essais	41
II.6 Conclusion	44

CHAPITRE III

Réalisation Des Essais Pour L'Obtention Des Caractéristiques Du Ventilateur, Présentation Des Résultats De Ces Essais Et Interprétation

III.1 Introduction	45
III.2 Etalonnage de la balance "Trayvou"	45
III.3 Conduite des essais sur le banc du ventilateur centrifuge	46
III.4 Calculs effectués à partir des mesures obtenues	46
III.4.1 Calcul du débit volumique	46
III.4.2 Calcul des puissances et du rendement du ventilateur	47
III.4.3 Calcul des coefficients de débit φ des diaphragmes	48
III.5 Présentation graphique des résultats et interprétation	48
III.5.1 Tracé des caractéristiques du ventilateur à différentes vitesses de rotation	48
III.6 Remarque concernant les orifices de diamètre inférieur à 100 mm	52
III.7 Conclusion	53
Conclusion générale	54

Bibliographies

Annexes

La liste des figures

Figure I.1 : Vue d'ensemble du banc d'essai du ventilateur centrifuge	3
Figure I.2 : Schéma du banc d'essai	4
Figure I.3 : Groupe Ward-Leonard	5
Figure I.4 : Schéma électrique du groupe Ward-Léonard	6
Figure I.5 : Réglage de vitesse par variation de tension d'alimentation de l'induit	10
Figure I.6 : Réglage de vitesse par variation de courant d'excitation	11
Figure I.7 : Schéma du circuit électrique équivalent	12
Figure I.8 : Détermination de point de fonctionnement	13
Figure I.9 : Caractéristique électromécanique de la vitesse $N(I)$	14
Figure I.10 : Caractéristique électromécanique de couple $T(I)$	14
Figure I.11 : Caractéristique électromécanique de couple $T(N)$	15
Figure I.12 : Les différents types de ventilateurs	17
Figure I.13 : Ventilateur à pales courbées vers l'avant	18
Figure I.14 : Ventilateurs à pales à profil aérodynamique	18
Figure I.15 : Ventilateurs à pales radiales	19
Figure I.16 : Ventilateurs à pales courbées inclinées vers l'arrière	20
Figure I.17 : Ventilateur à hélice	21
Figure I.18 : Ventilateur axial à tube	21
Figure I.19 : Ventilateur axial à pales	22
Figure I.20 : Courbes caractéristiques d'un ventilateur centrifuge	23
Figure I.21 : caractéristiques de divers types de ventilateurs	23
Figure I.22 : Le point de fonctionnement d'un ventilateur	24
Figure I.23 : Courbes caractéristiques de deux ventilateurs	25
Figure I.24 : Performance d'un ventilateur muni de pales d'entrée	26
Figure I.25 : Performance d'un ventilateur muni de registre	27
Figure I.26 : Performance d'un ventilateur à vitesse variable	28
Figure II.1 : Etapes d'une démarche de diagnostic méthodique	31
Figure II.2 : Organigramme de dépannage	31
Figure II.3 : Banc d'essai avant la première opération de nettoyage	32
Figure II.4 : Etat des prises d'alimentation en énergie électrique au niveau du labo	32
Figure II.5 : Etat de l'instrumentation sur le banc d'essai	33

Figure II.6 : Interrupteur de la dynamo-frein _____	34
Figure II.7 : Sécurisation de l'espace de travail _____	35
Figure II.8 : Contrôle de la continuité des circuits et rénovation de l'isolation des fils électriques _____	36
Figure II.9 : Collecteur du moteur à courant continu (à gauche) contacteur du dispositif de protection du moteur asynchrone (à droite) _____	36
Figure II.10 : Disjoncteurs installés dans le boîtier mural qui alimente le banc d'essais _____	38
Figure II.11 : Organigramme des interventions sur les rhéostats. _____	38
Figure II.12 : démontage du MCC _____	40
Figure II.13 : Organigramme de dépannage du moteur à courant continu _____	41
Figure II.14 : Balance Trayvaux pour mesurer le couple _____	42
Figure II.15 : Tachymètre pour mesurer la vitesse de rotation _____	42
Figure II.16 : Diaphragmes de différents diamètres utilisés pour le réglage du débit d'air _____	43
Figure II.17 : Les tubes en "U" utilisés sur le banc d'essai _____	44
Figure III.1 : Courbe d'étalonnage de la balance "Trayvou" _____	46
Figure III.2 : Courbes caractéristiques du ventilateur centrifuge tracées pour différentes vitesses de rotation _____	49
Figure III.3 : Courbes des rendements à différentes vitesses de rotation _____	50
Figure III.4 : Courbes des puissances à différentes vitesses de rotation _____	50
Figure III.5 : Courbes des iso-rendements du ventilateur _____	51
Figure III.6 : Courbes caractéristiques du ventilateur en coordonnées réduites _____	52

La liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques du moteur à courant continu _____	6
Tableau I.2 : Caractéristiques du moteur asynchrone _____	6

Nomenclature

Symboles	Unités	Significations
U	V	Tension d'alimentation de l'induit
R_a	Ω	La résistance d'induit
I	A	Le courant d'induit
K		Constante
I_e	A	Le courant d'excitation de l'inducteur
T_r	N.m	Couple résistant
T_u	N.m	Couple moteur utile
T_{Em}	N.m	Couple électromécanique
C_Q		Coefficient de débit
C_H		Coefficient manométrique
C_P		Coefficient de puissance
Q_v	m ³ /s	Le débit d'air
P_0	N/m ²	La pression atmosphérique
Δh	mm	La hauteur manométrique
D	mm	Diamètre de la conduite
P_s	Pa	La pression statique
P_d	Pa	La pression dynamique
P_t	Pa	La pression totale
g	m/s ²	La gravité
C	N .m	Le couple
M	kg	La masse
V	m/s ²	la vitesse de l'écoulement
S	m ²	La section
ΔP_t	Pa	La surpression dans le ventilateur
\wp_{ent}	W	La puissance d'entraînement
\wp_{man}	W	puissance manométrique
N	tr/min	La vitesse de rotation de ventilateur
D_n	mm	Diamètre des diaphragmes

Symboles grecs	Unités	Significations
ω	rad/s	La vitesse angulaire
η	%	Le rendement
ρ_{air}	kg/m ³	La densité de l'air
Φ	Wb	Flux crée par enroulement d'excitation

Abréviations:

MA : moteur asynchrone

GCC : génératrice à courant continu

MCC : moteur à courant continu

CM : charge mécanique

CE : colonne d'eau

Introduction Générale

Les ventilateurs appartiennent à la famille des turbomachines qui servent au refoulement et à la compression des vapeurs et des gaz, et dans lesquelles l'accroissement de pression totale du fluide refoulé (ou comprimé) ne dépasse pas 13 kPa (~ 1300 mmCE).

Les ventilateurs couvrent des domaines d'utilisation très variés allant de l'usage domestique, pour la ventilation et la climatisation, à l'usage industriel dans les grandes unités de production. Ils sont classés selon la direction principale du flux du fluide à travers le rotor en :

- Ventilateurs radiaux
- Ventilateurs axiaux
- Ventilateurs mixtes (machines hélico-centrifuges et hélico-centripètes)

Le laboratoire d'énergétique du département de génie mécanique dispose d'un banc d'essai de ventilateur centrifuge qui, dans le passé, a permis à des générations d'étudiants d'aborder sous l'aspect expérimental des concepts et des problèmes liés aux ventilateurs.

Malheureusement, depuis maintenant plus d'une vingtaine d'années, le banc d'essai est à l'arrêt et reste inexploité dans les travaux pratiques. S'il est vrai que sur le banc d'essai le dispositif de réglage de la vitesse qui consiste en un groupe Ward-Leonard, comportant trois vieilles machines électriques qui nécessitent un entretien permanent pour rester en marche, est aujourd'hui une technologie largement dépassée dans le domaine de la régulation de la vitesse et que, le passage même par le moteur à courant continu n'est plus nécessaire pour amener une charge mécanique à fonctionner à vitesse variable ; il n'en demeure pas moins qu'avant d'envisager ces solutions, qui nécessitent tout de même un certain investissement, remettre en marche le banc d'essai avec les mêmes équipements dont il dispose actuellement constitue à plus d'un titre un défi que nous voulions relever. Tout d'abord, pour approfondir nos connaissances dans le domaine des machines électriques. En effet, sur le banc, nous allons avoir à faire à un moteur asynchrone, un moteur à courant continu, une génératrice et une excitatrice. Nous allons devoir les analyser, comprendre leur fonctionnement et éventuellement participer à leur dépannage en cas de problème. Ensuite, les étudiants qui, nous l'espérons à l'avenir, feront leurs travaux pratiques sur le banc d'essai pourront s'y intéresser pour appliquer les concepts qu'ils auront appris dans le cours d'électrotechnique. Par ailleurs, le banc d'essai, une fois remis en marche, permettra aux étudiants de tirer un jeu complet de caractéristiques d'une turbomachine, ce qui constitue un large terrain d'application pour la théorie des turbomachines à fluide incompressible.

Dans le cadre de ce projet de fin d'études, nous nous fixons pour objectifs :

- a) L'étude et la remise en marche du banc d'essai du ventilateur centrifuge ;
- b) La conduite des essais sur le banc, une fois redevenu opérationnel, afin de tracer les caractéristiques du ventilateur centrifuge et d'étudier son comportement par la variation des paramètres de réglage.

Dans ce rapport, nous rendrons compte de l'évolution de notre démarche en vue d'atteindre ces objectifs en nous conformant au plan suivant :

Le chapitre I, intitulé "*Présentation de l'installation : Aspects théoriques et Aspects descriptifs*", sera consacré à la description analytique du banc d'essai et de ses éléments constitutifs en insistant particulièrement sur le rôle que chacun de ces éléments remplit dans l'installation. Certaines notions nécessaires, pour la compréhension du fonctionnement du système et de la signification des essais prévus sur le banc, seront également rappelées dans ce chapitre.

Au chapitre II, nous décrivons comment les équipements seront analysés en vue de cerner les problèmes les touchant, avant de tenter de remédier à chaque défaillance de façon graduelle : on commence par la maintenance, ensuite la réparation et en dernier recours on remplace carrément la partie défaillante de l'équipement. Cette démarche devrait aboutir à la mise en fonctionnement du banc qui sera donc prêt pour la conduite des essais.

Le chapitre III sera dédié aux essais menés dans le cadre de cette étude afin de s'assurer que le banc d'essai est bel et bien opérationnel. Les résultats de ces essais seront traités et les caractéristiques du ventilateur seront tracées et interprétées.

Dans la conclusion de ce travail, quelques recommandations seront faites en vue d'inciter de futurs étudiants à améliorer les fonctionnalités du système pour que plus jamais un banc d'essai aussi intéressant ne soit délaissé parce qu'un de ses vieux équipements est tombé en panne.

Un manuel de travaux pratiques sera proposé en annexe.

CHAPITRE I

Présentation Du Banc D'essai : Aspects Descriptifs Et Aspects Théoriques

I.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré aux aspects descriptifs et aspects théoriques du banc d'essai.

I.2 Le Banc D'Essai

Pour sa description, notre banc d'essai pourrait être décomposé en trois parties distinctes : le circuit aéraulique qui constitue la partie principale où opère le ventilateur, le moteur d'entraînement à courant continu (4), qui est également une dynamo-frein montée sur une balance mécanique (3), qui a pour rôle de mesurer le couple moteur, et enfin le groupe Ward-Leonard (6) qui permet de satisfaire le besoin de faire varier la vitesse du moteur d'entraînement au cours des essais du ventilateur.

Au cœur du circuit aéraulique, il y a un ventilateur centrifuge (5) de type RATEAU VP235 qui aspire l'air à la pression atmosphérique (8) et le rejette également à la pression atmosphérique (1), ce qui en fait un circuit sans composante statique. Le ventilateur est relié à une gaine d'admission (7) et à une gaine de refoulement (2).

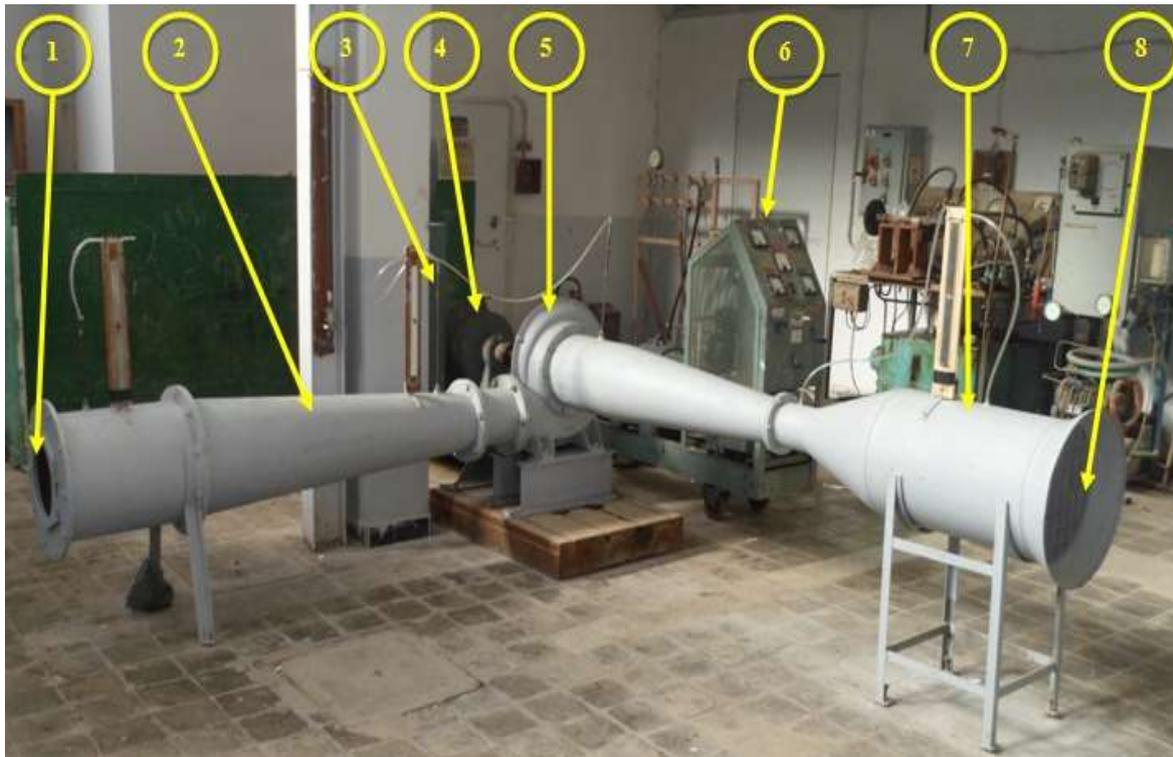


Figure I.1 : Vue d'ensemble du banc d'essais du ventilateur centrifuge

La gaine d'admission (Figure I.2) comporte une tuyère-venturi, munie d'un manomètre différentiel permettant de mesurer le débit d'air à l'admission, un caisson d'admission de 400 mm de diamètre, muni d'un redresseur à cellules en amont et un tronçon horizontal de 300 mm de diamètre en aval.

La gaine de refoulement est constituée d'un petit tronçon rectiligne de 230 mm de longueur et 225 mm de diamètre muni d'un tube de Pitot pour la mesure de la pression totale à la sortie du ventilateur. Ce tronçon sera suivi d'un divergent qui permet à l'écoulement de diffuser, avant de déboucher dans un caisson muni d'un redresseur et se terminant par un orifice en mince paroi, d'où l'air sera finalement déchargé dans l'atmosphère à travers un diaphragme interchangeable, dont la mesure de la chute de pression permet d'en évaluer le coefficient de débit par comparaison au débit mesuré par le venturi.

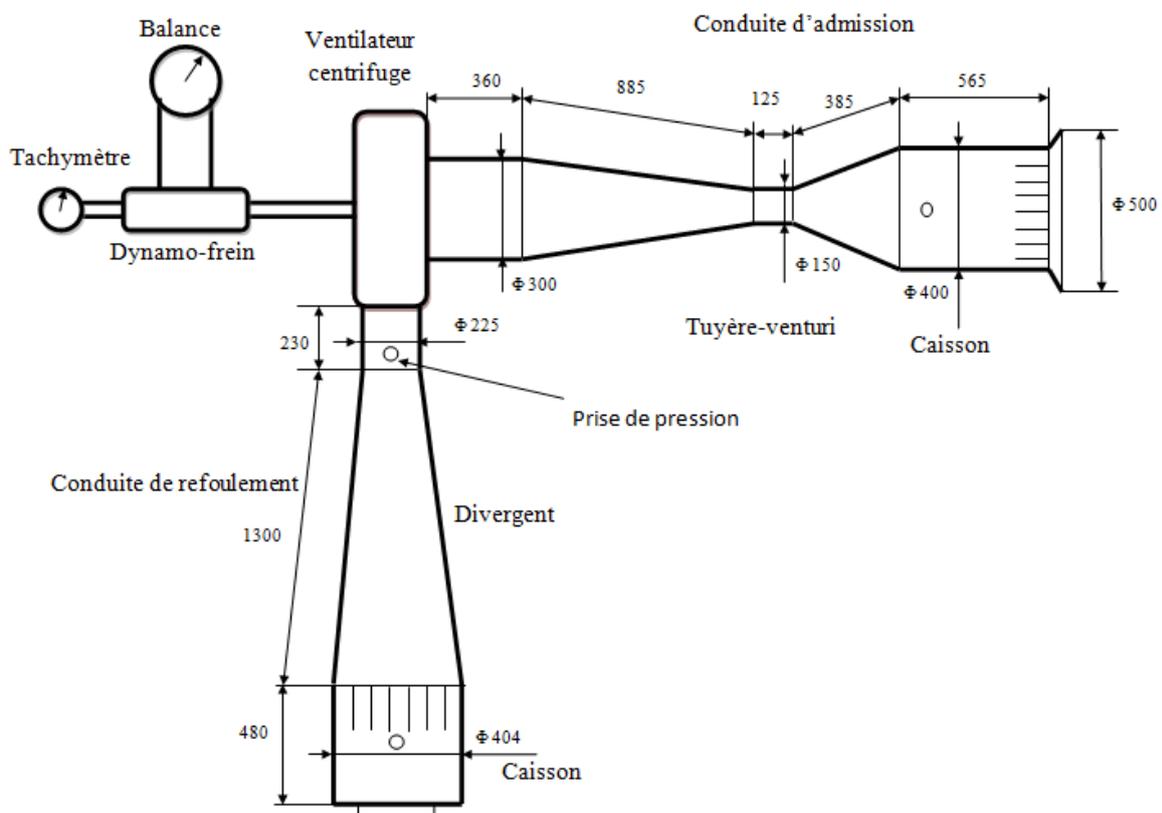


Figure I.2 : Schéma du banc d'essai

Le groupe Ward-Léonard, dont le schéma est donné à la figure I.3 ci-dessous, comporte un moteur asynchrone (MA) qui entraîne une génératrice de courant continu à excitation séparée (GCC) afin de générer le courant destiné à l'induit du moteur d'entraînement (MCC), qui est également contrôlé au moyen d'une excitation séparée. Pour régler le niveau de l'excitation de la génératrice, on utilise une petite génératrice (appelée

excitatrice), montée sur l'axe MA-GCC, elle-même à excitation shunt. Cette excitatrice, qui fonctionne grâce au champ magnétique rémanent, se charge également d'alimenter le circuit d'inducteur du MCC. La charge mécanique (CM) couplée au moteur d'entraînement consiste bien entendu dans notre cas en un ventilateur centrifuge.

Un des grands intérêts de cette solution faisant appel au groupe Ward-Leonard, du moins dans le passé lorsque les variateurs de fréquence actuels, autrement plus performants, n'existaient pas, est que le système est réversible, c'est à dire que le moteur peut fonctionner en génératrice ; et de ce fait, la génératrice en moteur, et ainsi pouvoir renvoyer de l'énergie au réseau alternatif, le moteur asynchrone fonctionnant alors en génératrice asynchrone. Et tout cela, sans précaution particulière et de façon très rustique.

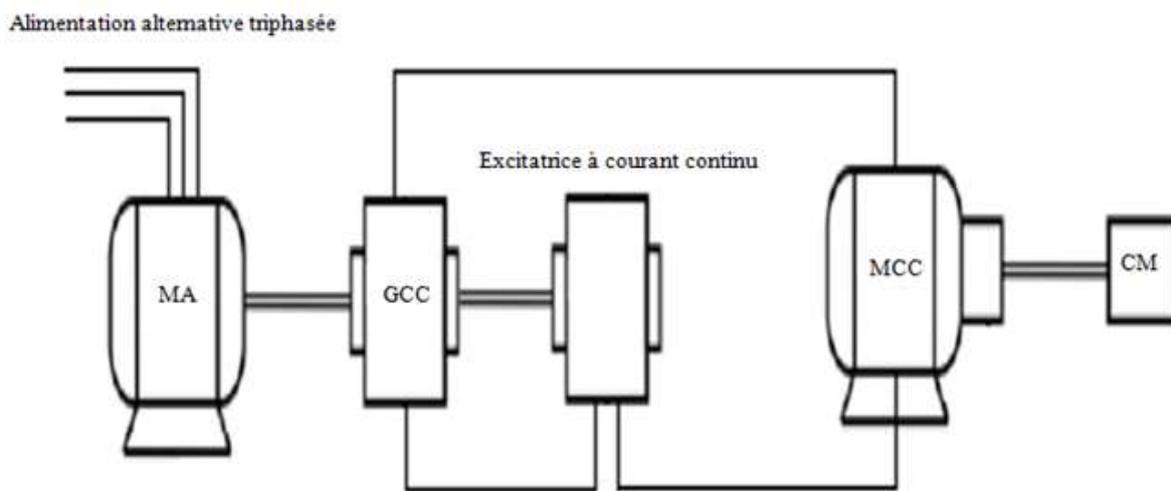


Figure I.3 : Groupe Ward-Leonard

I.3 Principe de fonctionnement du groupe Ward-Leonard

Le moteur asynchrone tourne à une vitesse pratiquement constante. L'induit de la génératrice (GCC) alimente le moteur à courant continu. Un rhéostat $R1$, placé en série avec le circuit d'excitation de la génératrice, permet de faire varier son courant d'excitation (donc son flux d'induction), ce qui va se traduire par une variation de la tension de sortie (tension induite dans la génératrice) qui alimente l'induit du moteur en courant continu et qui permet ainsi de modifier sa vitesse de rotation.

Comme il a été mentionné précédemment, l'excitatrice est destinée à fournir le courant d'excitation à la génératrice, mais également au moteur d'entraînement du ventilateur. Ainsi,

en agissant sur le rhéostat R3 qui est monté en série avec le circuit inducteur du moteur, il est possible de modifier le courant d'excitation du moteur.

On voit bien donc que le réglage de la vitesse du moteur (et donc du ventilateur), s'obtient en agissant à la fois sur le rhéostat R1, qui modifie le courant d'excitation de la génératrice et par suite la tension d'induit du moteur, et sur le rhéostat R3 qui produit des modifications directement sur le courant qui alimente l'inducteur du moteur. En d'autres termes, avec les deux rhéostats de réglage R1 et R3, on intervient sur les caractéristiques des deux circuits d'inducteurs de la génératrice et du moteur pour obtenir la vitesse de rotation souhaitée. Cette action combinée permet d'élargir la plage de réglage.

L'inducteur de l'excitatrice est alimenté par son propre induit, les deux circuits de la machine étant montés en parallèle. Au démarrage du groupe, l'excitatrice est entraînée en même temps que la génératrice par le moteur asynchrone, mais le courant ne peut pas encore être généré dans son circuit d'induit étant donné que son circuit d'inducteur ne reçoit encore aucun courant. En fait, le fonctionnement de l'excitatrice sera déclenché grâce à la présence d'un champ magnétique rémanent au niveau de ses pôles qui génère une tension de lancement aux bornes de l'induit et permet à la machine de s'autoalimenter par la suite.

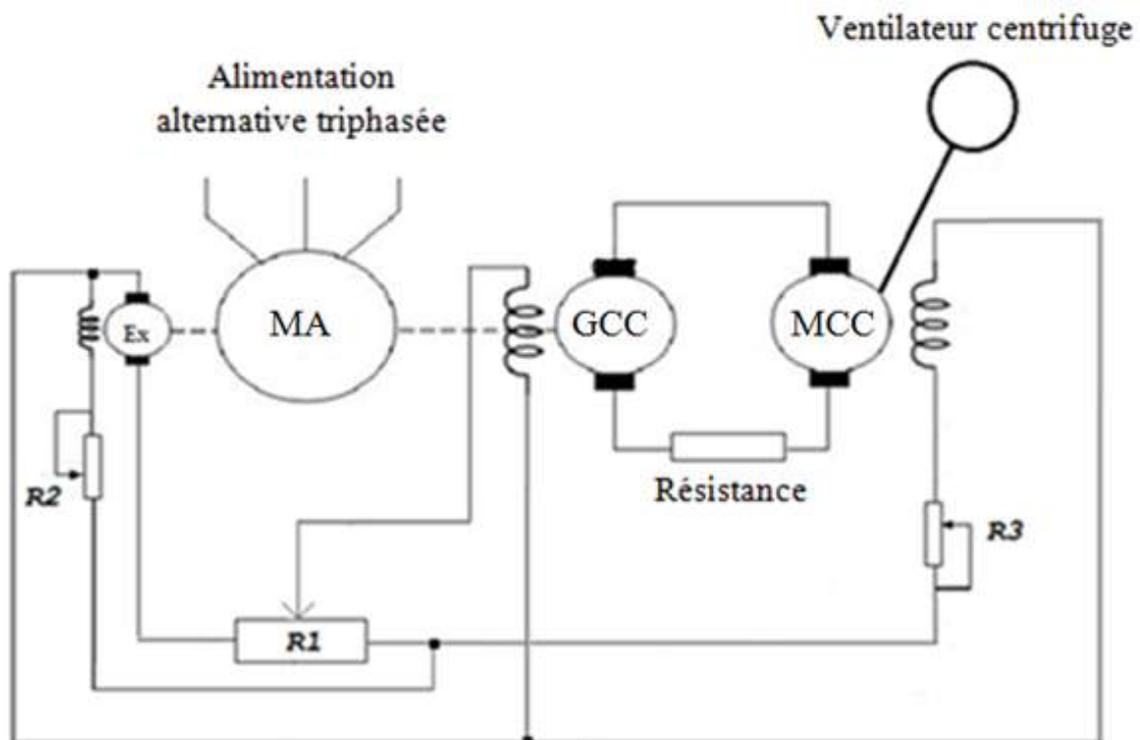


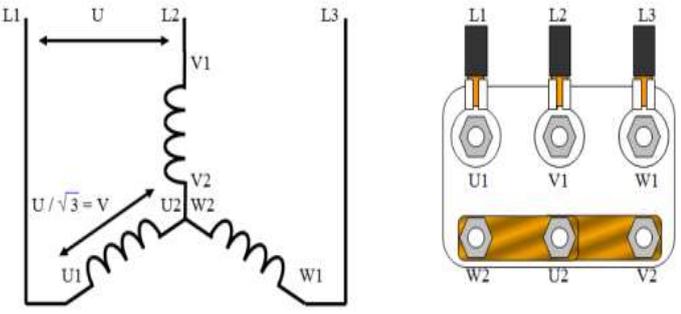
Figure I.4 : Schéma électrique du groupe Ward-Léonard

Les caractéristiques portées sur les deux tableaux suivants correspondent au moteur à courant continu qui entraîne le ventilateur et au moteur asynchrone qui entraîne les génératrices respectivement ; ces données ont été relevées sur les plaques signalétiques des deux machines.

Tableau I.1 : Caractéristiques du moteur à courant continu

Moteur à courant continu	
Puissance absorbée : 4.4 kW	
Puissance utile : 3.7 kW	
Inducteur : 110 V	
Induit : 220 V	
Courant induit : 20 A	
Vitesse de rotation : 1500 tr /min	

Tableau I.2 : Caractéristiques du moteur asynchrone

Moteur – asynchrone	Couplage
Puissance nominale : 8.1 kW	
Nombre de phase : 3	
Fréquence : 50 HZ	
Tension : 220 / 380 V	
Intensité : 28.5 / 16.5 A	
Vitesse de rotation : 1420 tr/min	
Facteur de puissance $\cos \varphi = 0.88$	
Rotor : AD	
Poids : 110 kg	

Après cette présentation du banc d'essais sur le plan descriptif et fonctionnel des principaux éléments qui le composent, nous allons, dans la suite du présent chapitre, présenter quelques rappels concernant les équipements les phénomènes et les procédés mis en jeu au cours des essais.

I.4 Commande de la vitesse de rotation des machines électriques

Pour démarrer les moteurs électriques et contrôler leur vitesse, les démarreurs rhéostatiques, les variateurs mécaniques et les groupes tournants (Ward-Léonard en particulier) ont été les premières solutions ; puis les démarreurs et variateurs électroniques se sont imposés dans l'industrie comme la solution moderne, économique, fiable et sans entretien. Sur les installations industrielles, grâce à une accélération et une décélération progressive, les variateurs de vitesse permettent une adaptation précise de la vitesse aux conditions d'exploitation. Les variateurs de vitesse destinés aux moteurs à courant continu sont de type redresseur contrôlé, ceux destinés aux moteurs à courant alternatif sont des convertisseurs de fréquence [1].

I.4.1 Procédés de réglage de la vitesse de la machine asynchrone [2]

- **Réglage par modification du nombre de paires de pôles** : Ce mode de réglage ne permet pas une variation continue de la vitesse et n'est donc pas envisagé pour un réglage fin du point de fonctionnement désiré.

- **Réglage par variation de la tension** : Le couple électromagnétique de la machine asynchrone étant proportionnel au carré de la tension d'alimentation statorique, Il est possible d'envisager un ajustement de la vitesse au dessous de la vitesse nominale en modifiant la tension d'alimentation du stator avec un gradateur triphasé.

- **Réglage par action sur le glissement** : L'utilisation de résistances rotoriques permet un réglage de la vitesse au dessous de la vitesse nominale mais avec un rendement déplorable. On essaiera donc de récupérer cette énergie transmise au rotor : c'est la cascade hypo synchrone réservée à la très forte puissance pour des machines à rotor bobiné.

- **Réglage par variation de fréquence** : Le convertisseur de fréquence, alimenté à tension et à fréquence fixes par le réseau, assure au moteur, en fonction des exigences de vitesse, son alimentation en courant alternatif à tension et fréquence variables. Le circuit de puissance est constitué par un redresseur et un onduleur qui, à partir de la tension redressée, produit une tension d'amplitude et fréquence variables. Ce type de variateur est destiné à l'alimentation des moteurs asynchrones à cage.

I.4.2 Procédés de réglage de la vitesse du moteur à courant continu [3]

Les mécanismes d'entraînement à courant continu sont couramment utilisés dans l'industrie en raison de leur vitesse variable, de leur bonne régulation de vitesse, de leur capacité de freinage et de l'inversion de sens de marche. Autrefois, les moteurs à courant continu étaient utilisés dans la plupart des applications de variation de vitesse malgré leur complexité, leur coût élevé et la maintenance importante qu'ils impliquaient. Aujourd'hui encore, les entraînements à courant continu sont toujours utilisés dans les applications de variation de vitesse les plus exigeantes.

Pour le moteur à courant continu à excitation indépendante voir schéma électrique de la figure I.7, on a la relation :

$$U - R_a I = kN\Phi \quad (1.1)$$

D'où, l'expression de la vitesse de rotation en fonction des paramètres électromagnétiques :

$$N = \frac{U - R_a I}{k\Phi} \quad (1.2)$$

Avec :

U : tension d'alimentation de l'induit [V] ;

R_a : résistance d'induit [Ω] ;

I : courant d'induit [A] ;

k : constante ;

Φ : flux magnétique créé par l'enroulement d'excitation [Wb] ;

N : vitesse de rotation du moteur [rad/s] ;

Le sens de rotation dépend :

- du sens du flux, donc du sens du courant d'excitation I_e ;
- du sens du courant d'induit I .

L'équation (1.1) ci-dessus montre qu'on peut régler la vitesse de rotation du moteur par :

- La régulation de la tension de l'induit ;
- La régulation du flux d'excitation ;

- **Réglage par variation de la tension de l'induit** : Si l'on admet que le flux utile est invariable, alors la vitesse sera proportionnelle à la tension d'induit (tension d'alimentation). Au cas où cette dernière peut être réglée progressivement de la valeur nulle à la valeur

maximale, on peut assurer un réglage de vitesse progressif, économique et d'une grande souplesse, Ce mode de réglage est assuré par le groupe « **Ward-Léonard** ».

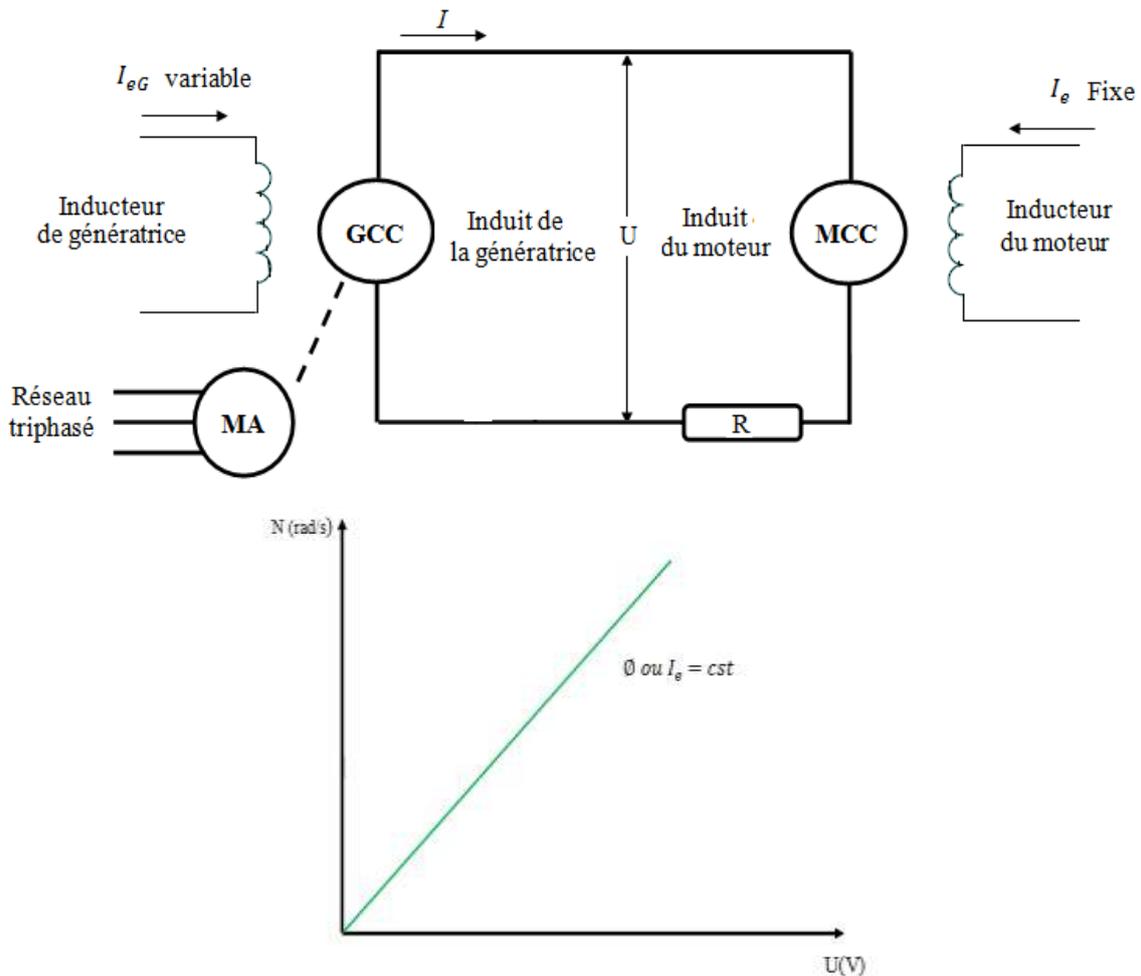


Figure I.5 : Réglage de vitesse par variation de tension d'alimentation de l'induit

- **Réglage par variation du flux d'excitation :** Lorsqu'un moteur à courant continu marche en régime normal, la chute de tension ($R_a \cdot I$) dans la résistance de l'induit est généralement faible, de sorte qu'on peut la négliger dans la plupart des calculs de la vitesse. La vitesse sous tension constante sera donc inversement proportionnelle au flux. Quand le flux augmente (avec le courant d'excitation), la vitesse diminue et vice versa. Cette méthode de variation de la vitesse est fréquemment employée car elle est très simple et ne requiert qu'un rhéostat d'excitation peu coûteux. Le rhéostat est branché en série avec l'inducteur.

Si l'on augmente la résistance du rhéostat de réglage, le courant d'excitation et le flux diminuent. Cet affaiblissement du flux réduit la tension induite, ce qui fait augmenter temporairement le courant dans l'induit. Le moteur développe un couple plus grand qu'auparavant et il accélère.

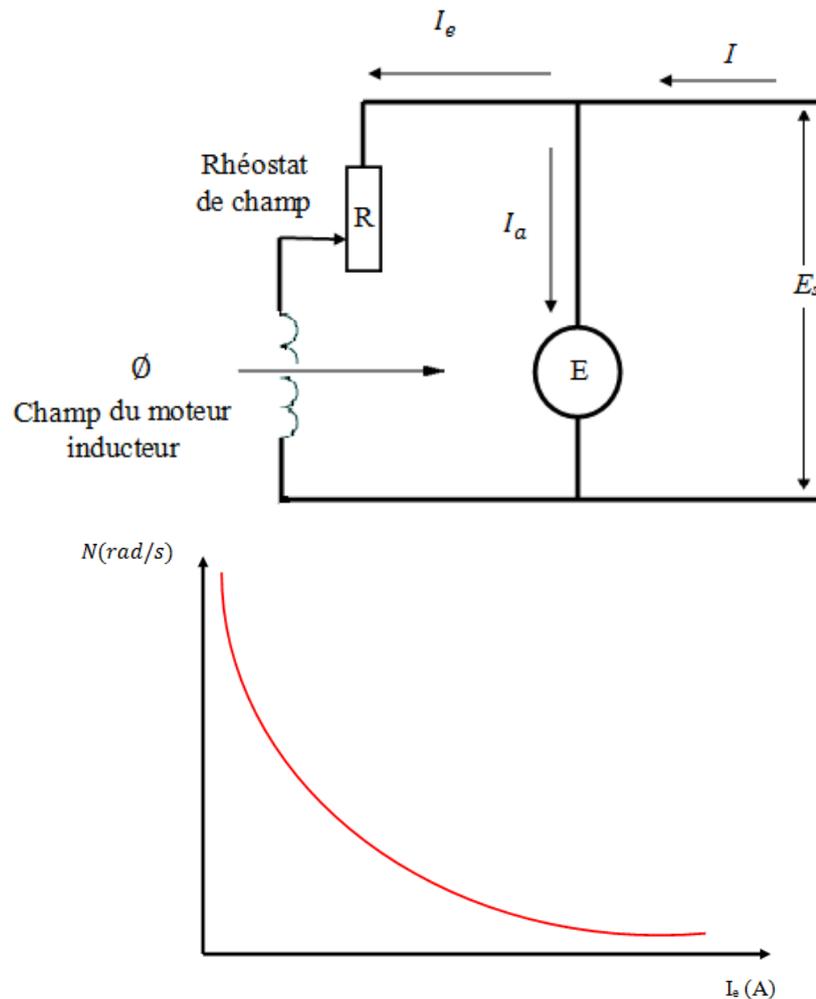


Figure I.6 : Réglage de vitesse par variation de courant d'excitation

- **Le variateur électronique :** Les variateurs de vitesse électroniques sont alimentés sous une tension fixe à partir du réseau alternatif et fournissent au moteur une tension continue variable. Un pont de diodes ou un pont à thyristors, en général monophasé, permet l'alimentation du circuit d'excitation. Le circuit de puissance est un redresseur. La tension à délivrer devant être variable, ce redresseur doit être de type contrôlé, c'est-à-dire comporter des composants de puissance dont la conduction peut être commandée (thyristors).

Pour des variateurs de faible puissance, ou des variateurs alimentés par une batterie d'accumulateurs, le circuit de puissance, parfois constitué de transistors de puissance (hacheur), fait varier la tension continue de sortie en ajustant le temps de conduction. Ce mode de fonctionnement est dénommé MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) [4].

I.5 Le moteur à courant continu à excitation indépendante [5]

Un moteur à courant continu est composé de deux parties principales :

- Un stator, élément fixe, dont le rôle est de créer un flux magnétique. Cette fonction peut être assurée par un aimant permanent ou par un courant électrique circulant dans un bobinage.
- Un rotor, aussi appelé induit, composé d'un châssis métallique comprenant un certain nombre d'encoches, sur lesquelles sont placés un certain nombre de bobinages.

L'induit est alimenté par une tension continue à travers l'ensemble collecteur/balais. Les conducteurs de l'induit sont parcourus par un courant, dans un champ magnétique créé par l'inducteur. Ces conducteurs sont soumis à des forces électromagnétiques (force de Laplace), un couple moteur apparaît, entraînant l'induit en rotation, le moment du couple est fonction de l'intensité du courant d'induit et de l'intensité du champ magnétique inducteur.

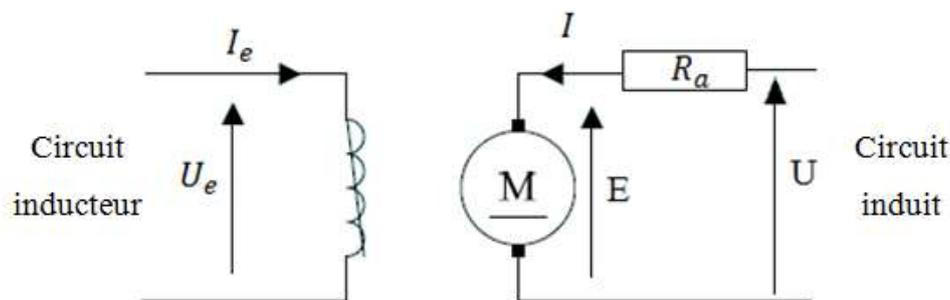


Figure I.7 : Schéma du circuit électrique équivalent

I.5.1 Point de fonctionnement

Une charge oppose au moteur un couple résistant T_r . Pour que le moteur puisse entraîner cette charge, le moteur doit fournir un couple utile T_u de telle sorte que :

$$T_u = T_r$$

Cette équation détermine le point de fonctionnement du moteur.

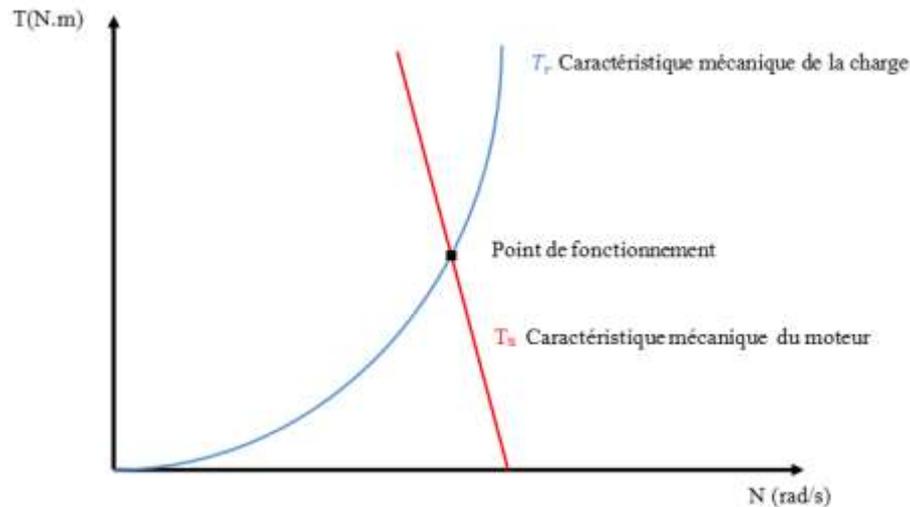


Figure I.8 : Détermination de point de fonctionnement

I.5.2 Caractéristique électromécanique de la vitesse $N(I)$

A vide, sous une tension d'alimentation U donnée, l'équation (1.2) montre qu'il est nécessaire d'avoir un flux d'excitation Φ assez élevé, donc un courant inducteur I_e suffisant, pour éviter un emballement du moteur, particulièrement au démarrage. D'ailleurs on dit qu'*un moteur à courant continu, quelque soit son mode d'excitation, doit toujours démarrer à champ fort c'est à dire avec un courant d'excitation proche de sa valeur nominale.*

En charge et pour une tension U fixée et une résistance du circuit d'excitation constante (le courant I_e est alors constant dans le circuit d'inducteur), la vitesse diminue mais très légèrement quand le courant d'induit augmente (car le terme $R_a I$ dans l'équation (1.2) reste petit devant U , comme nous l'avons mentionné précédemment), *la vitesse varie donc peu avec la charge.*

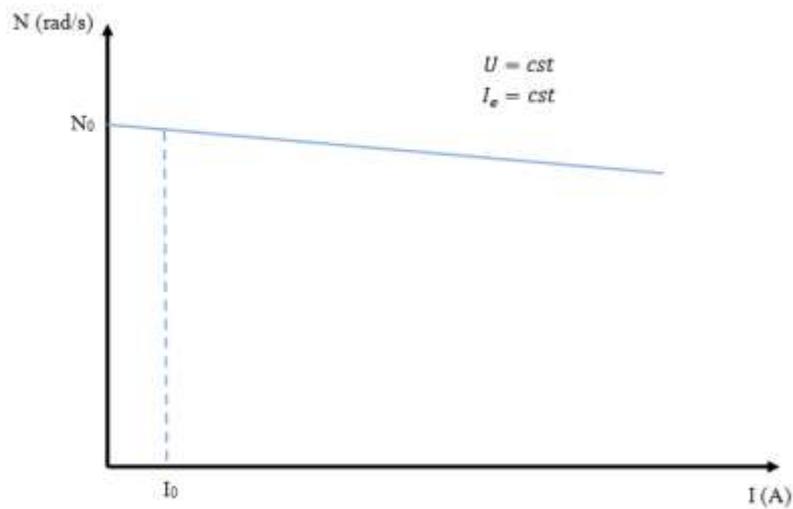


Figure I.9 : Caractéristique électromécanique de la vitesse $N(I)$

I.5.3 Caractéristique électromécanique de couple $T_{em}(I)$

Le couple électromécanique du moteur à excitation indépendante, sous tension U et courant d'excitation I_{ex} constants, est donné par l'équation :

$$T_{Em} = K\Phi I \quad (1.3)$$

Cette équation prédit une caractéristique électromécanique de couple qui passe par l'origine des coordonnées voir figure I.10 ci-dessous. Or, lorsqu'un moteur est alimenté et qu'il tourne à une vitesse donnée, le courant d'induit à vide ne peut être nul (en effet, une puissance est absorbée par le moteur à vide pour vaincre le couple de pertes).

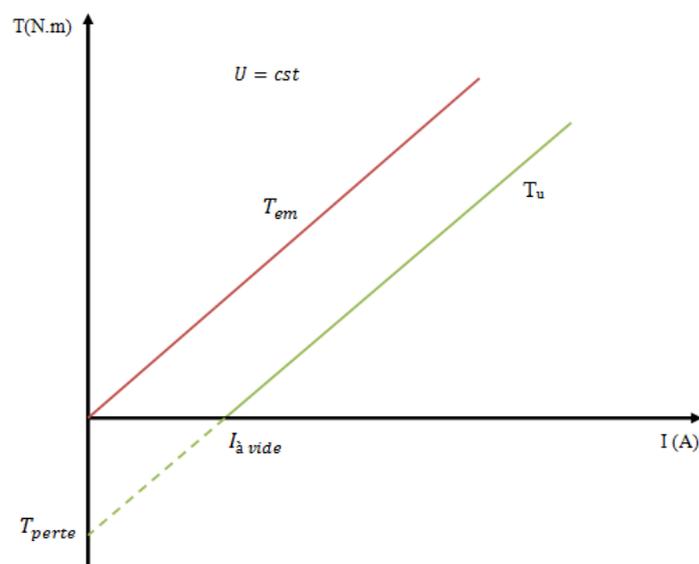


Figure I.10 : Caractéristique électromécanique de couple $T(I)$

Sous tension U et courant d'excitation I_e constants, on peut déduire la caractéristique mécanique $T(N)$ à partir des deux caractéristiques électromécaniques précédentes $T(I)$ et $N(I)$. Il suffit pour cela, à courant d'induit I donné, de noter la vitesse et le couple correspondants à partir des caractéristiques électromagnétiques. En combinant les équations (1.2) et (1.3) pour en éliminer le courant d'induit I , on aboutit à l'équation :

$$T = \frac{K\phi U}{R_a} - \frac{(K\phi)^2}{R_a} N \quad (1.4)$$

Qui montre que la pente de cette caractéristique mécanique est négative, représenté sur La figure I.11 ci-après pour I_e et U fixés.

Le moteur à excitation séparée, alimenté sous une tension constante et à résistance du circuit inducteur constante (courant d'excitation constant), est utilisé dans des applications qui nécessitent une vitesse pratiquement indépendante de la charge.

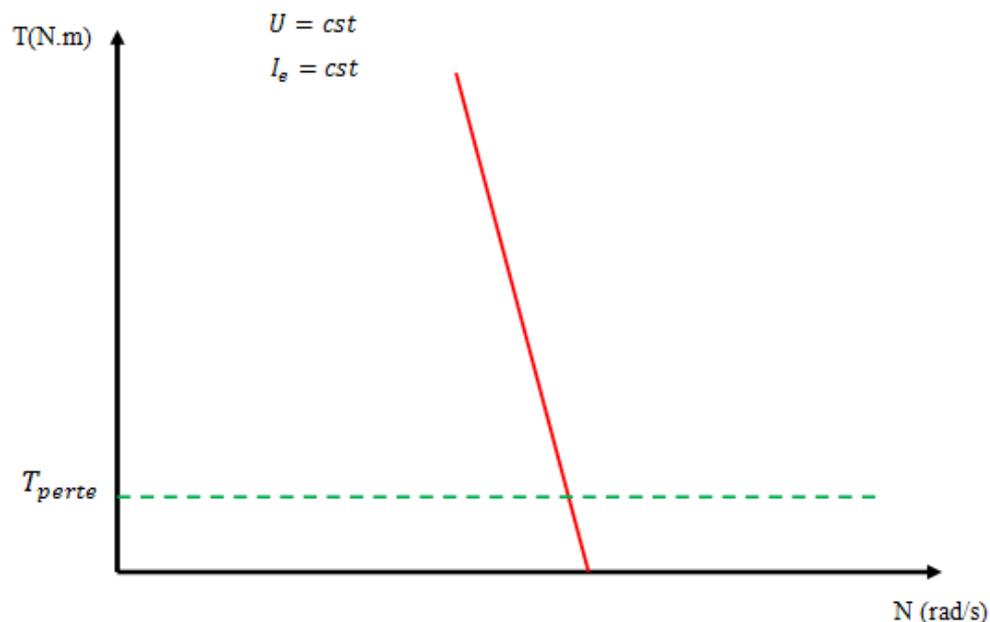


Figure I.11 : Caractéristique électromécanique de couple $T(N)$

I.5.4 Précautions à observer lors du démarrage du moteur à courant continu à excitation séparée

On alimente l'inducteur avant l'induit en réglant I_e à sa valeur nominale.

- Il faut limiter le courant d'induit I au démarrage ($I < 2I_N$ en général) en démarrant sous tension réduite.

- On peut démarrer en charge si $I > \frac{T_r}{K\phi}$ où T_r est le couple résistant opposé par la charge au démarrage. En conséquence le moteur possède un couple important au démarrage.

✘ **Remarque :**

Si l'excitation s'annule alors que l'induit est encore alimenté, le moteur s'emballe et peut détruire l'induit. En conséquence :

- Il ne faut jamais couper le circuit d'excitation.
- Pour arrêter le moteur, il faut couper l'induit avant l'inducteur.

I.6 Eléments de théorie sur les ventilateurs

Un ventilateur est une turbomachine qui utilise un système de pales entraînées en rotation autour d'un axe, susceptible de créer une différence de pression permettant l'écoulement d'un fluide gazeux entre l'amont et l'aval pour vaincre la résistance d'un réseau aéraulique ou bien pour créer des conditions aérodynamiques adéquates (dans une soufflerie par exemple). Une grande partie de l'énergie mécanique qu'un ventilateur reçoit sur son arbre de la part d'un moteur d'entraînement, sera transmise au fluide sous forme d'énergie statique et d'énergie dynamique en proportion variable, selon le type de ventilateur.

Les ventilateurs sont utilisés dans les applications les plus diverses (ventilation, conditionnement d'air, dépoussiérage, transport pneumatique...etc.). Par rapport aux autres turbomachines, ils sont caractérisés par un faible taux de compression, qui ne dépasse pas 1.3, et de faibles vitesses de circulation du fluide véhiculé à travers la machine [9].

I.6.1 Types de ventilateurs [7]

La figure ci-dessous donne une classification des différents types de ventilateurs d'usage courant.

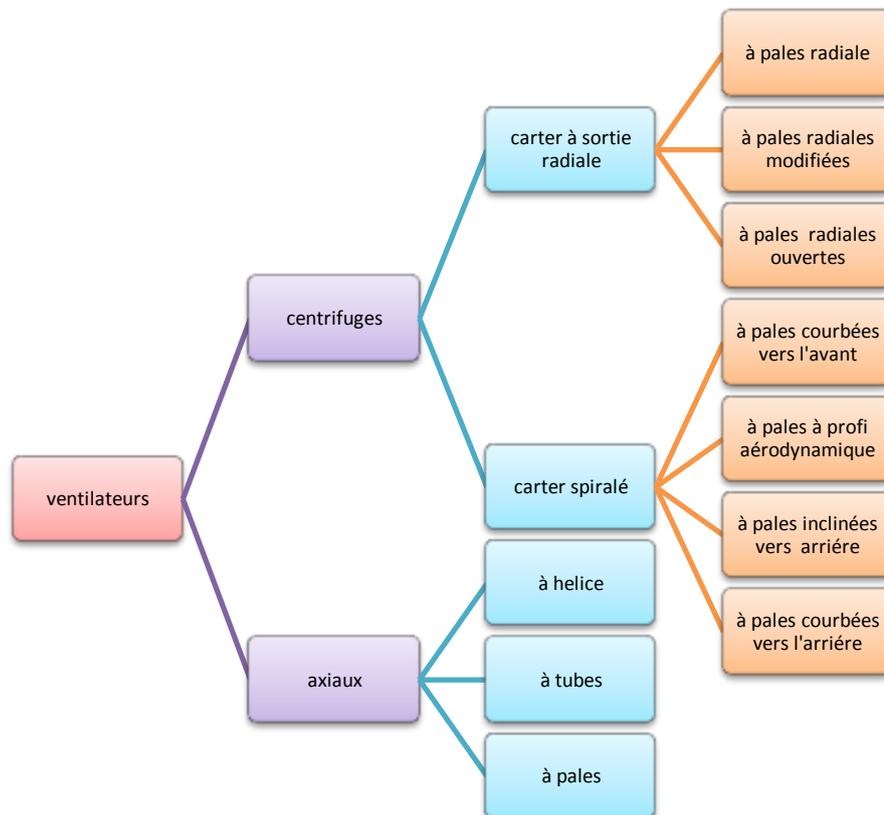


Figure I.12 : Les différents types de ventilateurs

Les ventilateurs centrifuges et les ventilateurs axiaux constituent les deux typologies de base qui se subdivisent ensuite selon la géométrie des pales de la roue.

I.6.1.1 Ventilateurs centrifuges

Les ventilateurs centrifuges sont d'usage très courant dans les domaines du chauffage, de la ventilation et du conditionnement d'air. En général, une roue large et de petit diamètre déplace une grande quantité d'air contre une faible pression différentielle. Tandis qu'une roue étroite de grand diamètre déplace une petite quantité d'air à une pression différentielle élevée.

- Ventilateurs à pales courbées vers l'avant

Ce type de ventilateurs génère un grand volume d'air relativement à sa taille, de plus il est très léger et économique. Comme les pales peuvent accumuler des dépôts, elles ne sont utilisées que pour le traitement de l'air propre. Les ventilateurs à pales courbées vers l'avant sont d'usage très courant dans les petits équipements de traitement d'air. Leur rendement et le

jeu entre la roue et l'entrée sont moins grands que celui des ventilateurs à pales à profil aérodynamique.

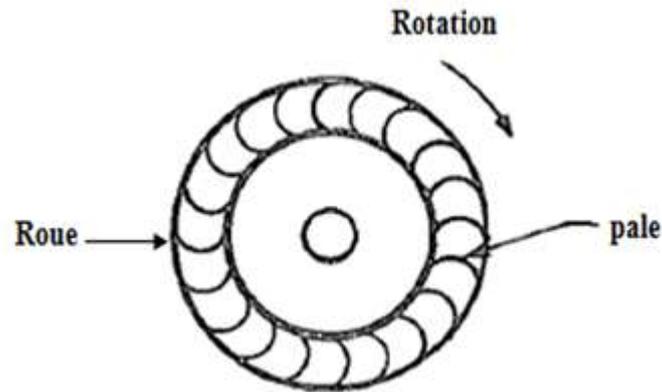


Figure I.13 : Ventilateur à pales courbées vers l'avant

- Ventilateurs à pales à profil aérodynamique

Les ventilateurs à pales à profil aérodynamique sont les ventilateurs centrifuges les plus efficaces. Ils se prêtent surtout aux gros systèmes où les économies d'énergie entraînées par leur haut rendement compensent leur coût relativement élevé. Les débits s'écoulant de ces ventilateurs sont très uniformes et, pour une application donnée, ces ventilateurs centrifuges opèrent à haute vitesse. Leur fonctionnement est stable et le niveau de bruit est très faible sur toute l'échelle des vitesses de fonctionnement. Comme les pales à profil aérodynamiques reviennent chères à la fabrication et même à la réparation, on limite l'utilisation de ces ventilateurs aux gaz propres et non abrasifs.

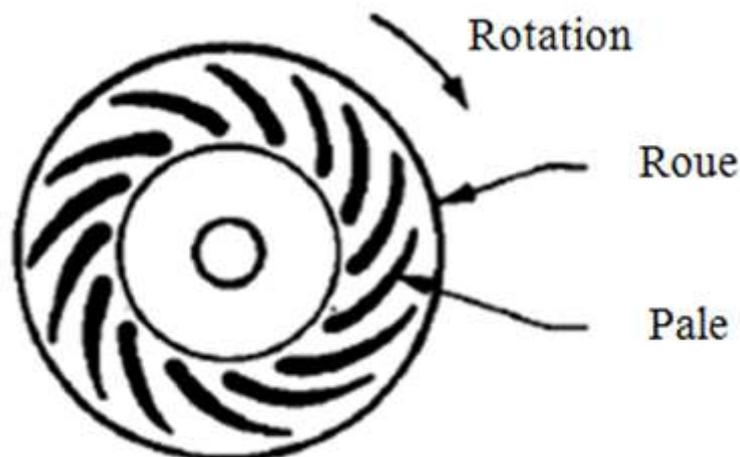


Figure I.14 : Ventilateurs à pales à profil aérodynamique

- Ventilateurs à pales radiales

Le ventilateur à pales radiales plates est le ventilateur centrifuge le plus simple et le moins efficace. On l'utilise surtout dans le transport pneumatique de produits et lorsque l'écoulement contient des particules abrasives. On peut modifier la forme initiale des pales pour augmenter l'efficacité de l'appareil. La roue radiale, qui comprend six à dix pales, a une résistance mécanique très élevée et la roue se répare facilement. Les pales radiales plates provoquent une turbulence qui projette les particules de gaz loin des pales, ce qui garantit une résistance maximale à l'abrasion mais conduit à un faible rendement. Les dimensions et les jeux du carter du ventilateur ne sont pas aussi importants à cause du faible rendement des pales.

Les ventilateurs à pales radiales modifiées présentent des pales dont seule l'extrémité reste purement radiale tandis qu'elles sont inclinées vers l'arrière et courbées vers l'avant. Sur toute l'échelle de fonctionnement, leur rendement est beaucoup plus élevé que celui d'autres types à pales radiales. Les pales résistent bien à l'abrasion et sont ainsi idéales pour le traitement de l'air contenant un taux moyen de poussières.

Les ventilateurs à pales radiales ouvertes sont utilisés lorsqu'il y a beaucoup de particules abrasives dans l'écoulement d'air. Les pales sont en forme de palettes plates souvent sans cotés. Ces ventilateurs sont habituellement considérés comme des souffleurs industriels. L'usure des pales peut être importante, c'est pourquoi elles sont en général conçues facilement remplaçables ou usinables. Le carter spiralé est construit pour une longue durée de vie et non, comme c'est de coutume, pour augmenter le rendement de l'appareil.

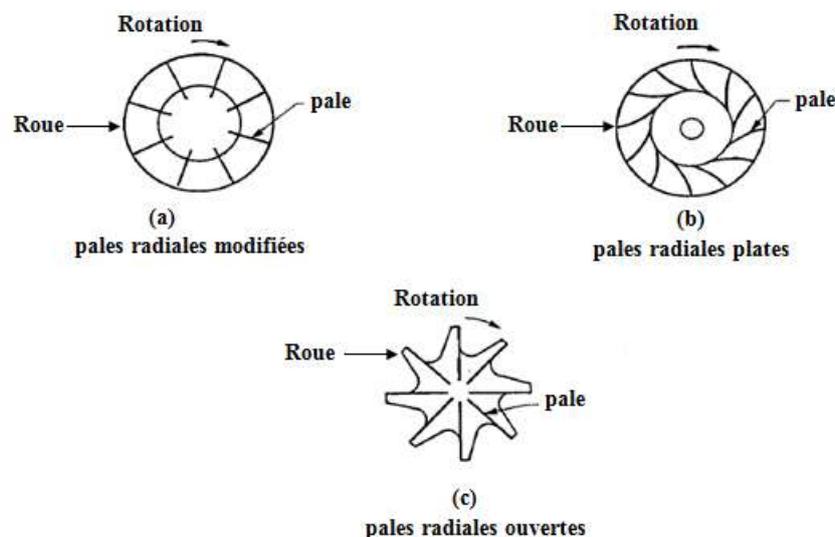


Figure I.15 : Ventilateurs à pales radiales

- Ventilateurs à pales courbées et inclinées vers l'arrière

Les pales courbées et les pales inclinées vers l'arrière sont un peu moins efficaces, coûtent moins cher et sont légèrement plus bruyantes que les pales à profil aérodynamique. Ce type de ventilateurs à pales courbées vers l'arrière fonctionne sur toute la gamme de débits d'air, de la position complètement ouverte à la position complètement fermée, tandis que le fonctionnement des ventilateurs à pales inclinées vers l'arrière devient instable lorsque le débit est inférieur à la valeur du point nominal.

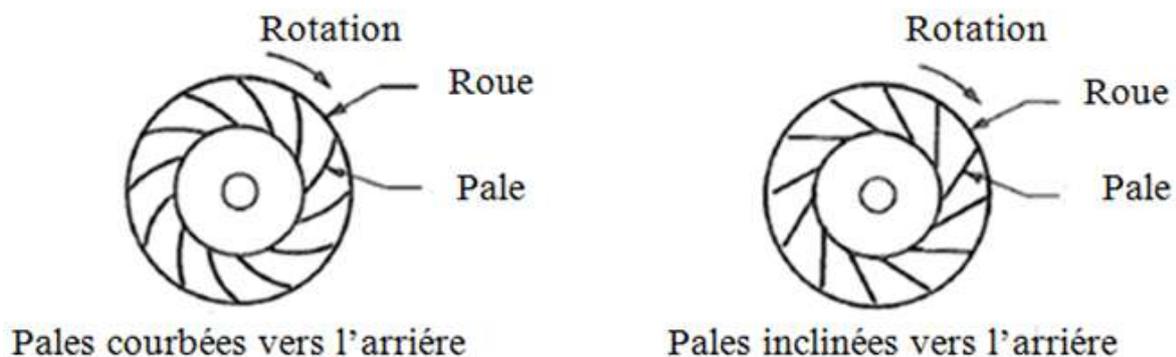


Figure I.16 : Ventilateurs à pales courbées inclinées vers l'arrière

I.6.1.2 Ventilateurs axiaux

- Ventilateur à hélice

Les ventilateurs à hélice sont des ventilateurs peu coûteux, à faible rendement, utilisés lorsque les pressions différentielles sont minimales. La roue du ventilateur comprend habituellement deux ou plusieurs pales d'une même épaisseur, reliées à un petit moyeu. Le carter le plus simple comporte une plaque plate munie d'un trou circulaire alors que d'autres types de carters comprennent un diaphragme ou un venturi pour augmenter la performance du ventilateur. L'entrée des ventilateurs est conçue pour assurer un rendement optimal.

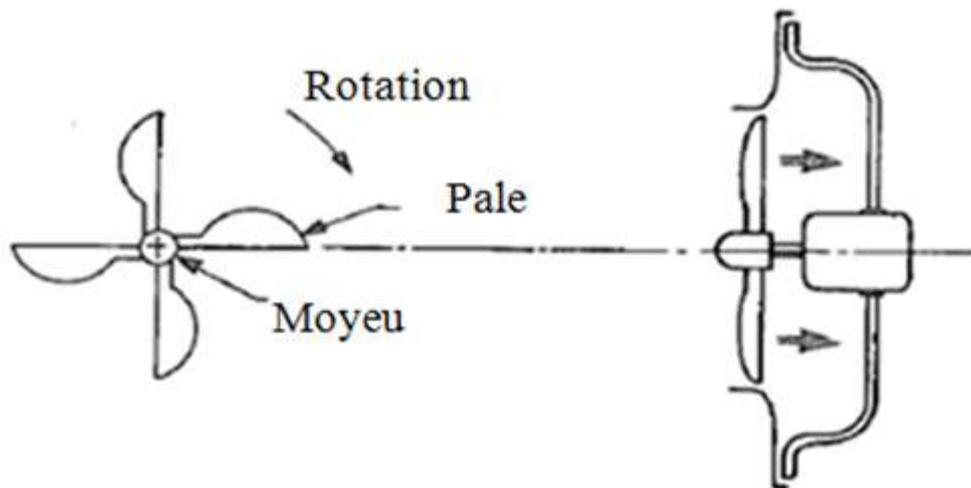


Figure I.17 : Ventilateur à hélice

- Ventilateurs axiaux à tubes

Les ventilateurs axiaux à tube sont plus efficaces que les ventilateurs à hélice et peuvent opérer à des pressions différentielles plus élevées. Ils comprennent quatre à huit pales à profil aérodynamique ou courbées. En général, la taille du moyeu est moitié du diamètre de du carter du ventilateur. Le carter est constitué d'un tube cylindrique formé de façon que le jeu radial soit minimal entre l'extrémité des pales et le tube. Les ventilateurs axiaux à tube sont par conséquent plus efficaces que les ventilateurs à hélice. Leurs caractéristiques principales résident dans leur facilité d'installation, leur coût raisonnable et un entretien minimal. Ils sont utilisés dans l'industrie pour les sècheurs, les postes de vaporisation de peinture et les systèmes d'évacuation.

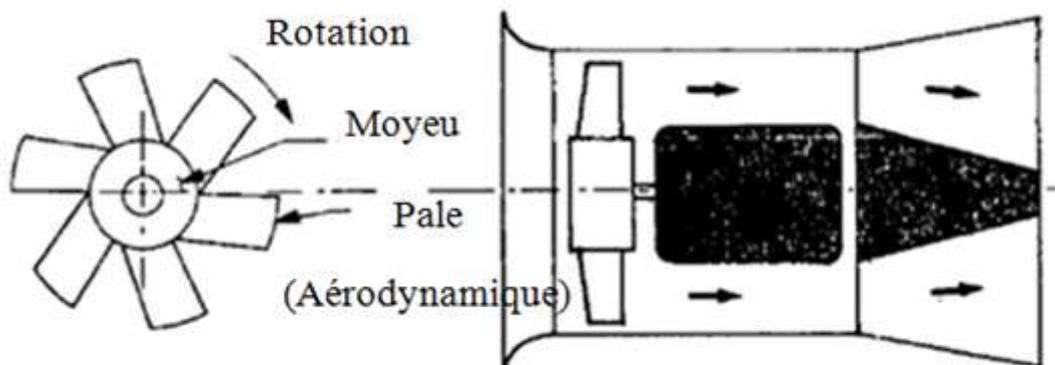


Figure I.18 : Ventilateur axial à tube

- Ventilateurs axiaux à pales

Les ventilateurs axiaux à pales comportent des pales qui génèrent efficacement des débits d'air à une pression différentielle moyenne et élevée. Les plus efficaces intègrent des pales à profil aérodynamique. Le pas est fixe ou réglable et le diamètre du moyeu est en général plus grand que la moitié de celui du carter. Les carters de ces ventilateurs sont des enveloppes cylindriques et le jeu est minimal entre ces dernières et l'extrémité des pales. Ces ventilateurs sont habituellement équipés de cônes d'entrée et de sortie qui emboîtent le moyeu et l'entraînement, et comprennent des pales directrices en amont et en aval de la roue. Grâce à ces composants additionnels, ils assurent un meilleur rendement que les ventilateurs axiaux à tubes. Les ventilateurs axiaux à pales ont les mêmes applications que ceux à tube.

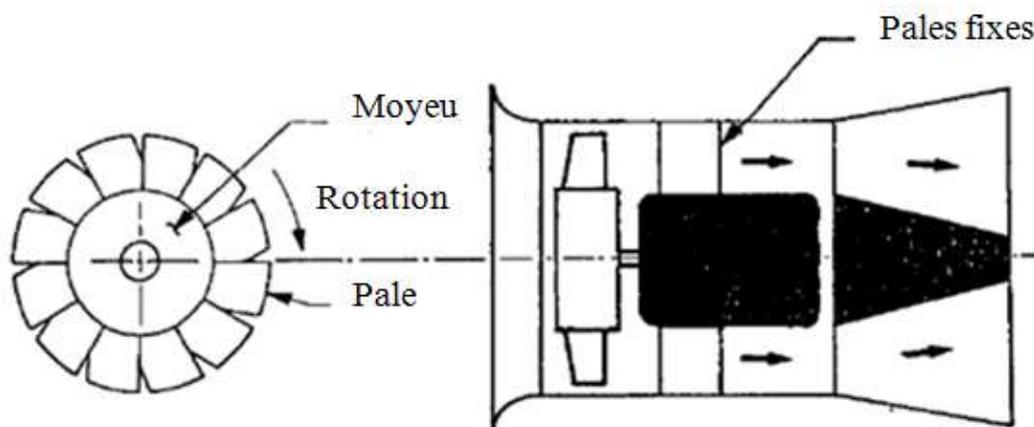


Figure I.19 : Ventilateur axial à pales

I.6.2 Courbes caractéristiques d'un ventilateur [7]

Les grandeurs principales définissant un ventilateur sont : la vitesse de rotation, le débit d'air, la hauteur manométrique ou la pression totale, le rendement et la puissance absorbée. Les courbes caractéristiques d'un ventilateur représentent l'évolution de ces grandeurs en fonction du débit volumique pulsé. A vitesse de rotation constante, de telles courbes caractéristiques, obtenues à partir de calculs qui s'appuient sur des mesures effectuées lors d'essais normalisés, sont représentées à la figure I.20 pour un ventilateur centrifuge. L'allure de ces courbes caractéristiques dépend d'un certain nombre de paramètres, tels que le type de ventilateur, le type de dispositif utilisé pour le réglage de débit, etc.... A titre indicatif, nous présentons ici, sur la figure I.21 ci-dessous, les caractéristiques pour des ventilateurs dotés de quatre types de pales différents.

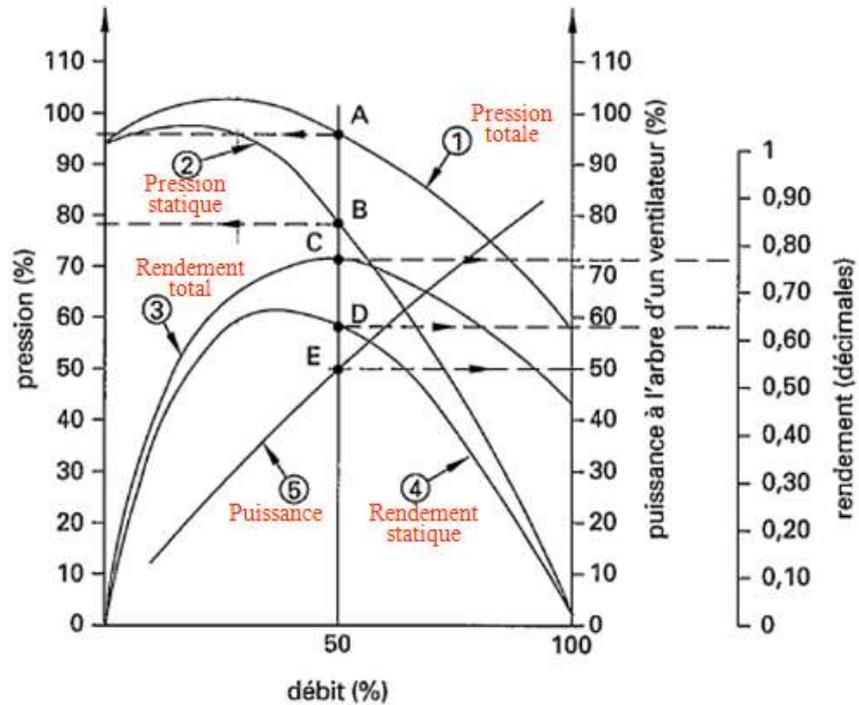


Figure I.20 : Courbes caractéristiques d'un ventilateur centrifuge

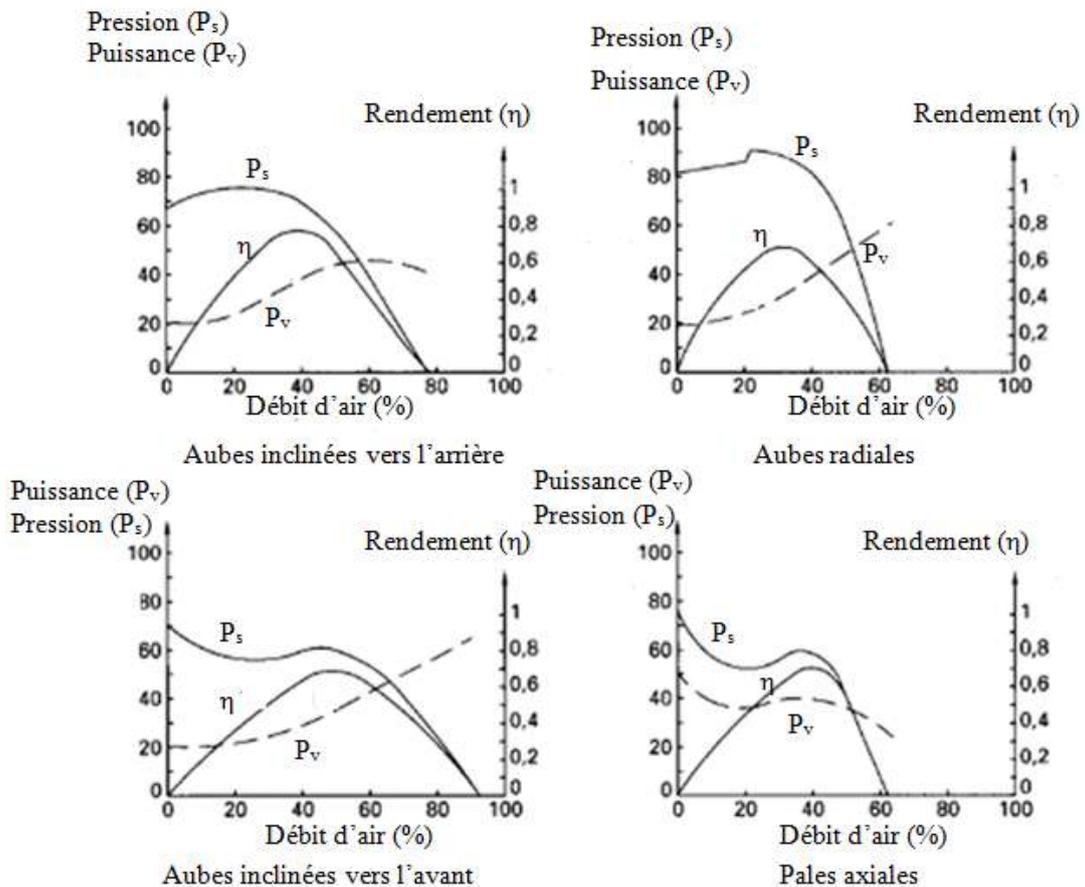


Figure I.21 : caractéristiques de divers types de ventilateurs

I.6.3 Point de fonctionnement d'un système de ventilation

Le point de fonctionnement du ventilateur se trouve à l'intersection de la courbe caractéristique du ventilateur et de la courbe de perte de charge du circuit aéraulique, comme indiqué sur la figure ci-après.

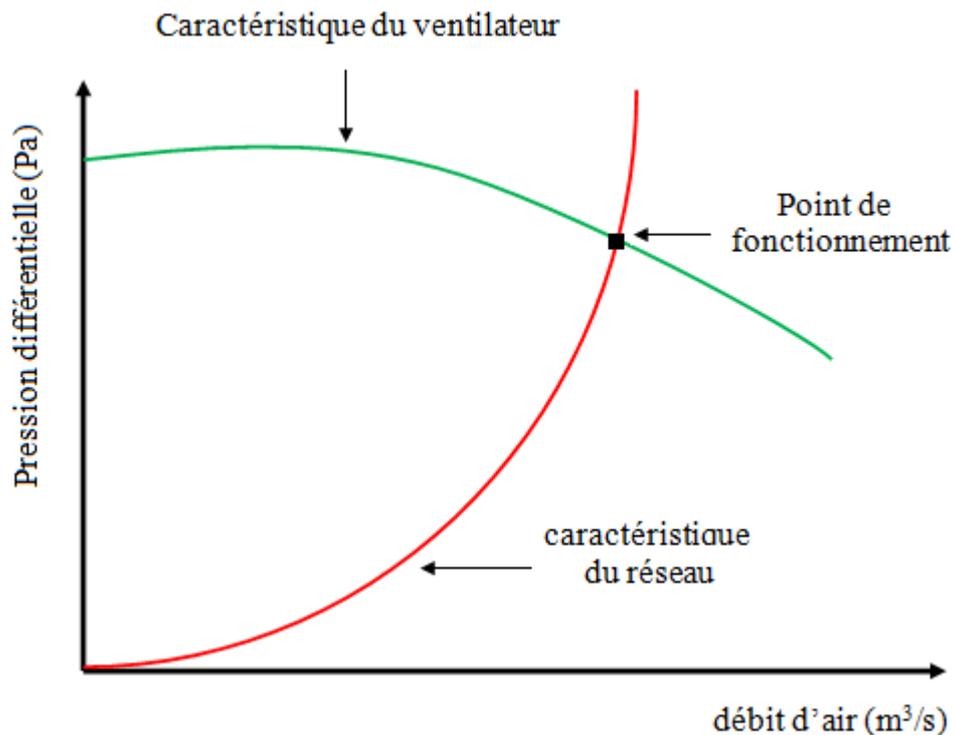


Figure I.22 : Le point de fonctionnement d'un ventilateur

I.6.4 Associations de ventilateurs

Pour augmenter la pression différentielle, on peut raccorder deux ventilateurs en série. Idéalement, la pression totale est égale à la somme des pressions différentielles au même débit d'air (figure I.23(a)). En pratique, si le ventilateur du deuxième étage est installé trop près du premier, il peut y avoir une importante perte de rendement en raison de l'irrégularité des vitesses.

Pour augmenter le débit d'air, on peut monter deux ventilateurs en parallèle. Idéalement, le débit total est égal à la somme des débits à une même pression différentielle (figure I.23(b)). Toutefois, si les conditions à l'entrée et à la sortie ne sont pas bonnes, le débit total de ces ventilateurs peut être inférieur à la valeur idéale. La figure montre une plage où le fonctionnement est instable et dans laquelle la courbe du système croise la courbe combinée de fonctionnement en deux points. Pour répondre à la charge imposée par le système, un des

ventilateurs sera sous-chargé alors que l'autre sera surchargé, ainsi ils auront tous les deux un faible rendement et le système accusera une perte de puissance importante. On peut remédier à cette situation en faisant fonctionner les deux ventilateurs simultanément et en dotant le système d'appareils de régulation appropriés.

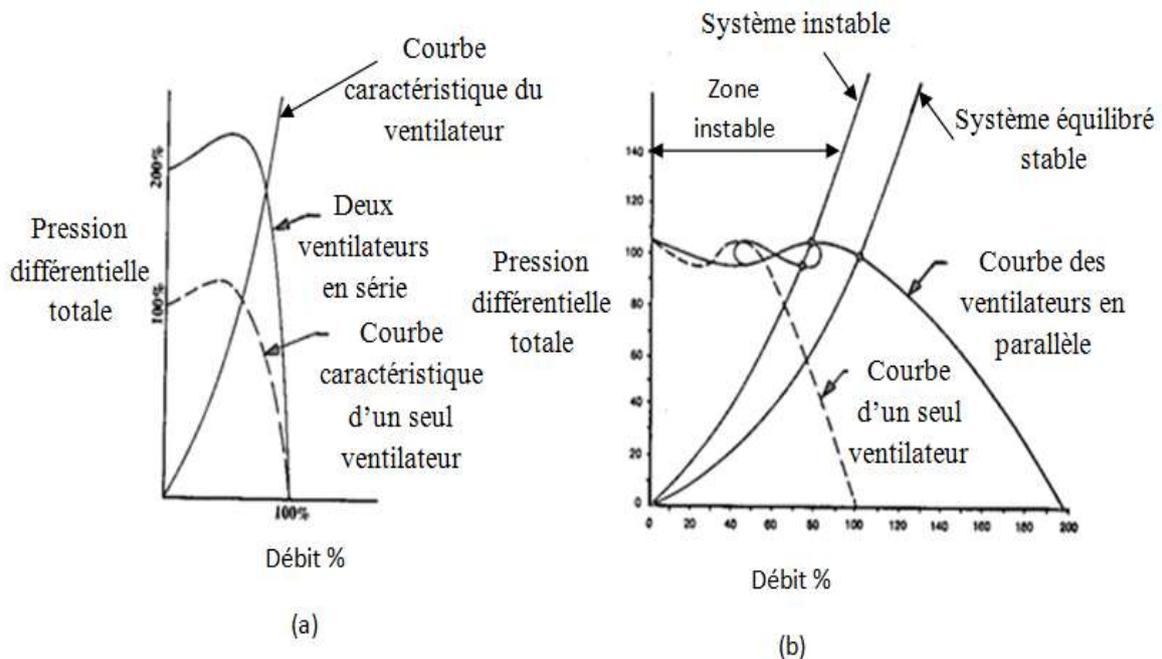


Figure I.23 : Courbes caractéristiques de deux ventilateurs

I.6.5 Régulation du débit d'air [10]

I.6.5.1 Réglage par des pales d'entrée réglables

On peut installer des pales réglables (ou pales d'entrée) à l'entrée du ventilateur pour contrôler le débit d'air. La figure I.24 ci-après présente les variations d'une courbe de fonctionnement d'un ventilateur lorsque les pales d'entrée sont à différentes positions d'étranglement. La courbe diffère pour chaque réglage de pales, et les différentes valeurs de débit d'air, de pression différentielle et de puissance d'entrée sont représentées par les points d'intersection entre les courbes de fonctionnement du ventilateur et la courbe du système. Des pales d'entrée réglables peuvent réduire la consommation de puissance du ventilateur pour un fonctionnement à débit réduit des ventilateurs à pales courbées vers l'avant, radiales ou inclinées vers l'arrière. L'échelle de réglage des pales d'entrée est très grande et ces dernières peuvent être réglées manuellement ou automatiquement. Elles présentent cependant

l'inconvénient d'obstruer l'écoulement d'air, ce qui entraîne une perte de rendement à débit plus élevé et un niveau sonore plus élevé à plus faible débit.

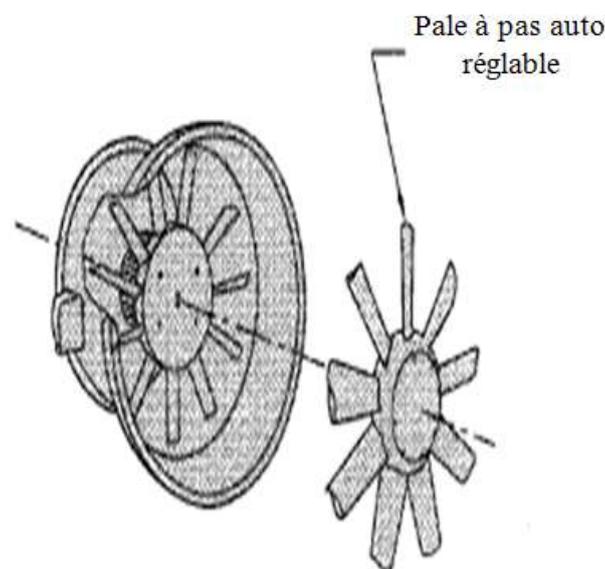
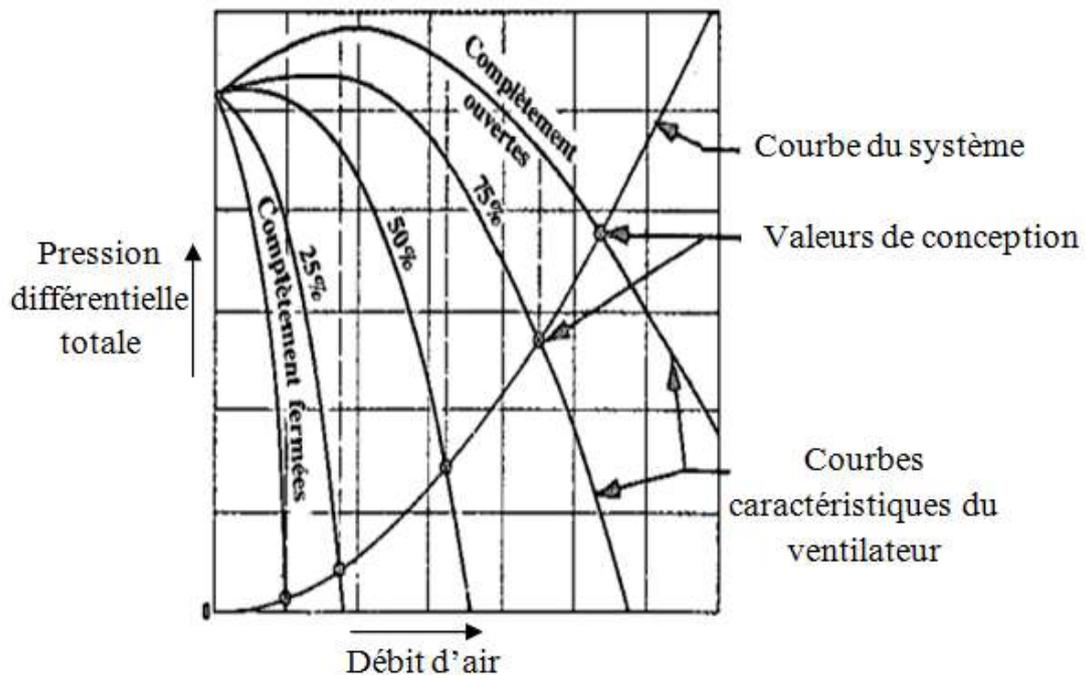


Figure I.24 : Performance d'un ventilateur muni de pales d'entrée

I.6.5.2 Régulation par registres

Un registre placé en aval du ventilateur vient modifier les pertes de charge du réseau dans des proportions dépendantes de sa position : c'est un système qui convient parfaitement pour des plages de variation faibles, mais l'augmentation du débit d'air dans le ventilateur

entraîne une augmentation de la puissance sur arbre. La possibilité de détérioration du moteur est importante.

Les registres d'entrée ressemblent aux pales d'entrée et sont plus souvent utilisés avec des ventilateurs à pales radiales modifiées pour générer des débits de gaz à haute température. Le mécanisme est installé à l'extérieur de la gaine et est protégé contre les températures élevées.

Les registres d'évacuation réduisent le débit d'air soufflé par un ventilateur en augmentant la pression différentielle. Ces registres ne sont pas très coûteux mais règlent le débit d'une façon inefficace. La figure I.25 ci-dessous montre comment ce type de registre règle de la position de pleine ouverture jusqu'à la position de fermeture complète, force le ventilateur à fonctionner le long de la courbe caractéristique.

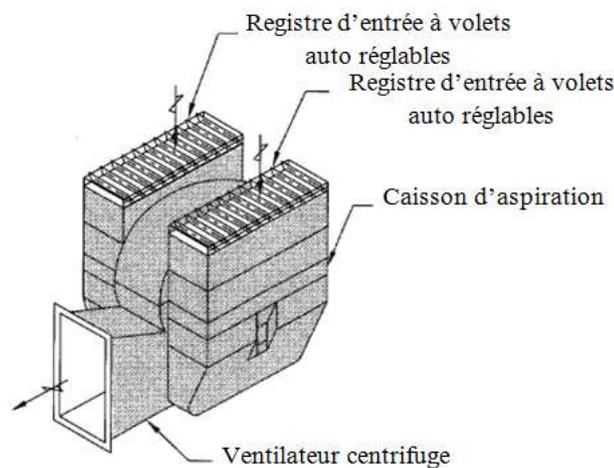
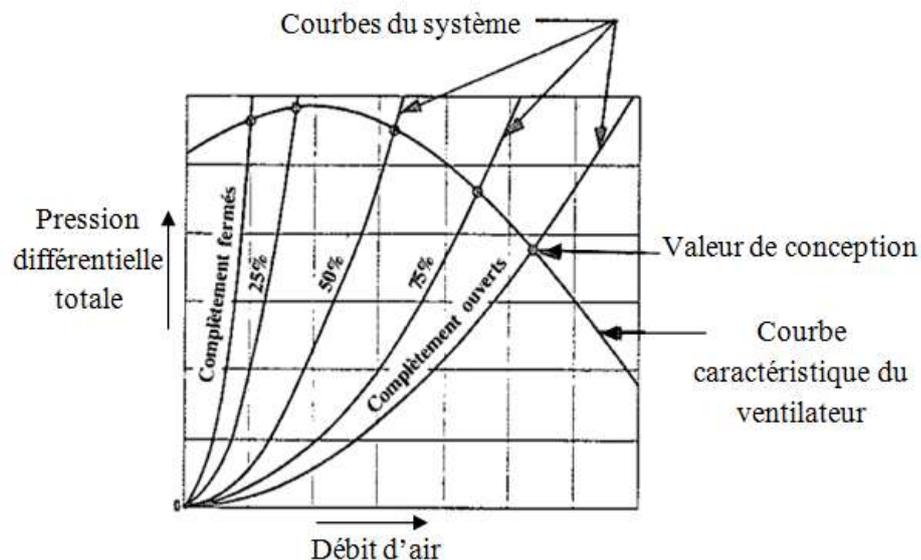


Figure I.25 : Performance d'un ventilateur muni de registre

I.6.5.3 Réglage par variation progressive de la vitesse de rotation

On agit directement sur la vitesse de rotation du moteur d'entraînement au moyen d'un variateur de vitesse. Il existe plusieurs types d'accouplements d'entrainements à vitesse variable que l'on peut installer entre les moteurs et les ventilateurs. Leur gamme de vitesse est habituellement très grande. La performance d'un ventilateur à vitesse variable type est présentée à la figure I.26 ci-après. L'installation d'un moteur à vitesse variable est le moyen le plus efficace de varier le débit d'air d'un ventilateur.

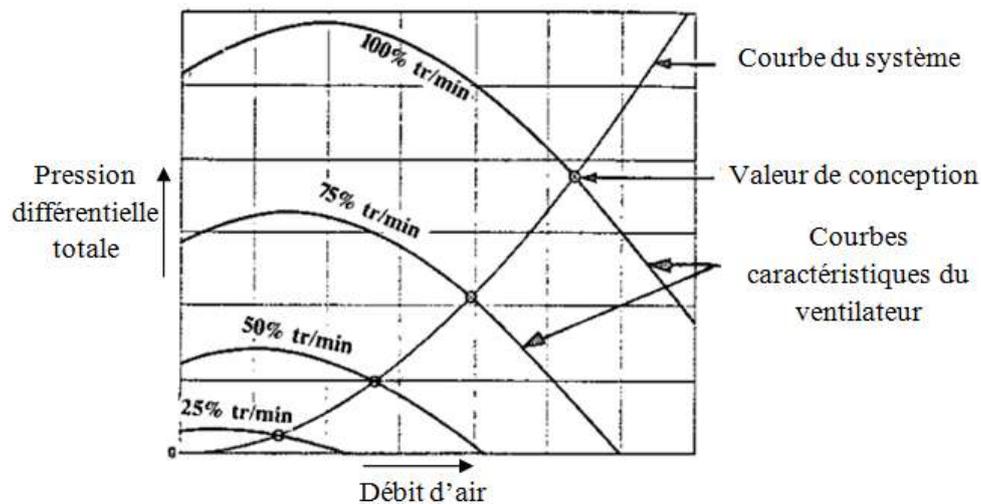


Figure I.26 : Performance d'un ventilateur à vitesse variable

I.7 Lois de similitudes [8]

RATEAU a introduit des nombres sans dimensions permettant d'établir des coefficients de débit, de pression, de puissance absorbée en fonction de la vitesse de rotation d'une roue de ventilateur. C'est à partir de ces coefficients qu'ont été établies les trois courbes fondamentales d'un ventilateur.

- Coefficient de débit : $C_Q = \frac{Q}{ND^3}$
- Coefficient manométrique : $C_H = \frac{gH}{N^2D^2}$
- Coefficient de puissance : $C_P = \frac{P}{\rho N^3 D^5}$

Pour n'importe quel ventilateur appartenant à une même famille géométrique, essayé à des vitesses quelconques et avec des fluides de poids spécifiques quelconques on obtient les mêmes caractéristiques réduites.

Un nombre important de relations ont été déduites des lois de similitude :

- Le débit d'air Q varie proportionnellement à la vitesse N : $Q_2 = Q_1 \frac{N_2}{N_1}$
- La pression H varie proportionnellement au carré de la vitesse N : $H_2 = H_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^2$
- La puissance P varie proportionnellement au cube de la vitesse N : $P_2 = P_1 \left(\frac{N_2}{N_1}\right)^3$

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné une description du banc d'essais et du rôle que doit jouer dans le fonctionnement du système chacun des principaux éléments dont il est constitué. Nous avons également introduit des notions sur l'électronique de puissance et les techniques utilisées pour le réglage de la vitesse des machines électriques. Ces notions ont été introduites dans le but d'aider à comprendre le fonctionnement du groupe Ward-Leonard utilisé sur le banc d'essai pour varier la vitesse de rotation du ventilateur. Ensuite, nous avons décrit les différents types de ventilateurs et les concepts nécessaires pour la compréhension du comportement des ventilateurs dans les installations réelles et sur les bancs d'essais. La rédaction de ce chapitre nous a servi tout au long de nos interventions sur le banc d'essais, aussi bien dans notre démarche en vue d'établir le diagnostic des équipements que lors des différents réglages nécessaires à la bonne marche des essais.

CHAPITRE II

Analyse Des Défaillances Des Equipements Et Remédiation

II.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à l'analyse des équipements du banc d'essais composant par composant en vue d'en établir le diagnostic. Nous interviendrons ensuite sur les éléments qui seront jugés en bon état avec les opérations d'entretien nécessaires pour consolider leur état de marche. Les éléments défectueux seront réparés si possible en ayant recours uniquement aux moyens dont dispose le département, sinon en faisant appel au concours de personnes et de moyens appartenant à d'autres départements de l'Ecole et si des pièces de rechange ou manquantes s'avèrent absolument nécessaires pour la remise en marche du banc d'essais, l'opération d'achat de ces pièces sera initiée. Mais avant d'intervenir directement sur les équipements, nous avons dû réaménager l'espace de travail sur le banc, notamment en éloignant le groupe Ward-Leonard de l'endroit où se trouve le transformateur abandonné là depuis quelques décennies et en procédant, dans la mesure des moyens de fortune qu'on a trouvés sur place, à l'isolement de l'espace occupé par ce transformateur et où de l'huile d'askarel, produit cancérigène soumis à des normes de sécurité très strictes, est très fortement présente. Comme le banc d'essai était là à l'abandon durant une très longue durée, nous avons bien-entendu commencé par le dépoussiérage de ces différentes parties à l'aide d'un compresseur, les parties électriques ayant été l'objet de soins très délicats, pour éviter tout risque de courts-circuits au moment de la première mise sous tension de l'installation.

II.2 Démarche Méthodologique De Diagnostic

Afin de préserver ce qui peut fonctionner encore en l'état sur le banc d'essais et pour une identification systématique et précise des défaillances, nous avons adopté une démarche ordonnée qui comporte les étapes successives indiquées sur le schéma de la figure II.1 ci-après :

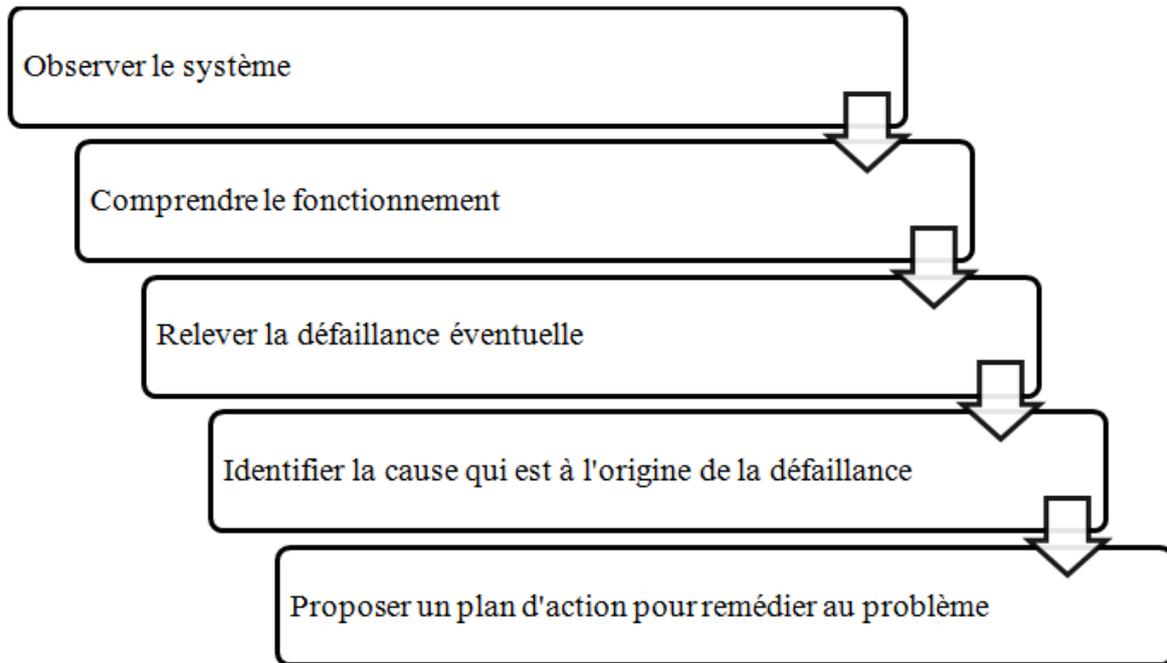


Figure II.1 : Etapes d'une démarche de diagnostic méthodique

Et pour que notre diagnostic soit aussi efficace que possible, nous nous sommes appliqués à suivre la procédure décrite à l'organigramme de dépannage ci-dessous, qui est un outil d'aide au diagnostic permettant d'établir la liste des origines possibles d'une défaillance afin de réparer ou de remplacer les pièces défectueuses et de procéder ensuite à la vérification de la bonne marche du système [6].

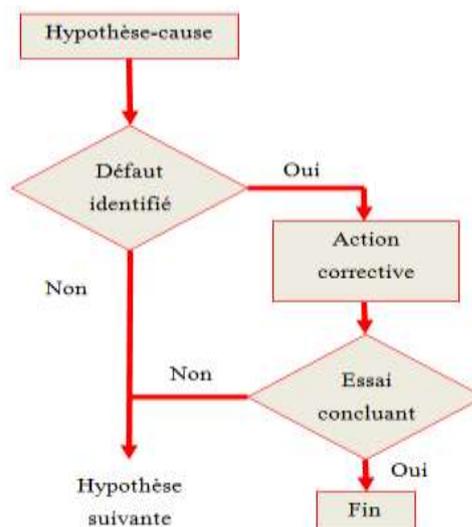


Figure II.2 : Organigramme de dépannage [6]

II.3 Etat initial de banc d'essai

Le banc d'essai du ventilateur centrifuge était à l'arrêt depuis au moins deux décennies. A notre première intervention sur le banc d'essai, nous avons pu faire les observations suivantes:

- Les équipements étaient recouverts d'une épaisse couche de poussière ; cette poussière durcie par l'humidité s'est incrustée jusque dans les circuits internes des équipements électriques. Dans tout l'espace, en principe réservé au banc d'essai, il y avait de vieilles pièces métalliques dont il était difficile de connaître la provenance et qu'il était donc aussi difficile de reclasser pour redonner à l'espace un semblant d'organisation.



Figure II.3 : Banc d'essai avant la première opération de nettoyage

- L'absence d'alimentation électrique au niveau de la totalité des prises accessibles à partir du banc d'essais et l'inexistence des dispositifs de sécurité (disjoncteurs, contacteurs, fusibles) dans les boites et petites armoires de distribution en place au niveau du Hall d'énergétique. Le banc d'essai n'est arrimé à aucune source d'alimentation électrique, le câble d'alimentation du banc d'essai n'existe même pas.



Figure II.4 : Etat des prises d'alimentation en énergie électrique au niveau du labo

- Absence de l'instrumentation nécessaire pour la prise de mesure sur le banc (tachymètre, manomètres) et défaillance des ampèremètres et voltamètres équipant le pupitre de commande et qui sont des indicateurs nécessaires au réglage de la vitesse de rotation du moteur à courant continu.



Figure II.5 : Etat de l'instrumentation sur le banc d'essai

- Usure et dégradation des charbons (balais) et des collecteurs des machines électriques, notamment ceux du moteur à courant continu, les irrégularités au niveau de l'état de surface des collecteurs des différentes machines produit un mauvais contact collecteur/balais et par suite une discontinuité de passage du courant d'induit ; on a remarqué également l'état de vieillissement de la gaine d'isolation sur certains fils électriques, ce qui fait courir au système le risque de courts-circuits à la première mise sous tension.
- Problème de lubrification et de graissage résultant en un bruit et un frottement au niveau des paliers du moteur.
- Curseurs des rhéostats bloqués à cause de l'oxydation, de la poussière et de l'absence de lubrification.
- L'interrupteur de l'excitation de la dynamo-frein est endommagé comme montré à la figure ci-dessous.



Figure II.6 : Interrupteur de la dynamo-frein

II.4 Premières interventions sur le banc d'essais

Notre sécurité et celle de toutes les personnes qui seront amenées par la suite à intervenir sur le banc d'essais a été notre première préoccupation. Nous avons donc commencé par sécuriser le champ d'intervention en essayant de réunir les conditions minimales à même de nous éviter tout contact avec l'huile d'askarel qui fuit du transformateur.

Le transformateur a été isolé à l'aide de deux vieux tableaux hors d'usage récupérés à partir des ateliers des métaux du département de Génie Mécanique. Le danger d'un contact avec l'huile d'askarel demeure cependant toujours présent tant que la question de l'évacuation du transformateur vers un lieu où il sera décontaminé n'a pas été prise en charge sérieusement par les services responsables. D'autant plus qu'avec les problèmes d'infiltration qui touchent tout le bâtiment d'énergétique depuis au moins quatre ans déjà, l'huile en arrive à être propagée partout en se mêlant à l'eau.



Figure II.7 : Sécurisation de l'espace de travail

Nous avons ensuite procédé au dépoussiérage du banc d'essais et au nettoyage général de tout l'espace d'intervention après l'avoir débarrassé de tous les objets et matériels qui n'avaient pas de raison d'être là. Cette opération devait malheureusement être refaite à plusieurs reprises, étant donné qu'aucune personne n'est désignée pour veiller sur les équipements du Hall d'énergétique, ni sur la propreté des lieux, surtout que ces lieux sont accessibles à tout le monde et à n'importe quel moment (même après 17 heures, il nous a été donné de constater que des enfants, très probablement appartenant à des familles résidentes à l'Ecole, accèdent à ce Hall).

Pour comprendre la manière dont doit opérer l'installation, surtout la partie concernant la commande de la vitesse de rotation du moteur d'entraînement du ventilateur, nous nous sommes attelés à analyser élément du système :

- Lecture des plaques signalétiques des machines pour s'informer de leurs caractéristiques et des limites de fonctionnement à ne pas dépasser (tension max, puissance max, courant max etc.).

- Réalisation, grâce à l'analyse des circuits, d'un schéma électrique descriptif (voir figure I.4 au chapitre I) nécessaire pour comprendre le rôle de chaque composant et analyser toutes les connexions, aussi bien électriques que mécaniques.

- Vérification de la continuité des câbles et des fils électriques à l'aide d'un testeur de continuité sonore (multimètre), afin de nous assurer de la fermeture effective de tous les circuits électriques identifiés. Au cours de ces vérifications, les bornes des circuits parallèles ont été déconnectées, afin de pouvoir s'assurer de leur continuité séparément et les caractériser avec autant de précision que possible. Les fils dénudés ont été recouverts

d'adhésif pour garantir de nouveau leur isolation et les fils abimés ont été remplacés. Nous avons également procédé à la vérification de l'état des résistances des bobinages de toutes les machines électriques qui composent le groupe.



Figure II.8 : Contrôle de la continuité des circuits et rénovation de l'isolation des fils électriques

- Décrassage des collecteurs des différentes machines à l'aide de papier à verre pour assurer un contact électrique continu et propre, seul garant d'une circulation régulière du courant. Nous avons également vérifié l'état du fusible et de la bobine du contacteur de protection du moteur asynchrone, dont nous avons dû dérouiller les surfaces de contact, nous nous sommes enfin assurés du bon fonctionnement des boutons poussoirs de mise en marche et de mise à l'arrêt du moteur asynchrone.



Figure II.9 : Collecteur du moteur à courant continu (à gauche) contacteur du dispositif de protection du moteur asynchrone (à droite)

II.5 Réparations réussies

Après avoir procédé à l'analyse du système composant par composant et étudié l'état des circuits électriques, nous avons pu relever les défaillances qui nécessitent soit une réparation soit un remplacement. Dans ce qui suit nous allons exposer les principales opérations de réparation réussies et la méthodologie adoptée dans nos interventions :

II.5.1 Rétablissement d'une alimentation protégée pour le banc d'essais

Pour alimenter le moteur asynchrone du groupe Ward-Leonard en courant triphasé, nous avons choisi le boîtier mural le plus proche du banc pour minimiser la longueur du câble de connexion au moteur. Notons que ce boîtier n'a jamais été destiné pour le banc du ventilateur centrifuge, qui selon les informations que nous avons recueillies auprès de M. Benafla Abdelkader, ancien magasinier au laboratoire d'énergétique et actuellement à la retraite, était alimenté directement à partir de la chambre qui abrite le transformateur principal. Pour des raisons que personne n'a pu nous fournir, le câble qui reliait le banc à la source à partir de laquelle il était alimenté a disparu. Le boîtier mural que nous avons décidé d'utiliser était fermé à l'aide d'un cadenas dont personne au département ne détenait les clés. Nous avons donc été amenés à forcer la fermeture du boîtier et à remplacer l'ancien cadenas par un nouveau pour avoir accès à l'intérieur du boîtier. A l'intérieur le boîtier était vide et aucun courant n'était détectable à son niveau. Nous avons donc fait appel au service de maintenance de l'Ecole dont les techniciens sont intervenus pour rétablir le courant à partir du transformateur principal via la boîte de dérivation qui se trouve juste au-dessus de notre boîtier. Ils ont également installé un disjoncteur différentiel, dont le rôle est d'assurer la protection des circuits contre les surintensités dues aux surcharges ou aux courts circuits et la protection des personnes contre les contacts indirects. Nous avons également, sur conseil de notre promoteur O. STIHI, qui nous a accompagnés et travaillé avec nous sur toute la partie électrique du banc d'essais et grâce à qui nous avons énormément appris sur les machines électriques, acheté par le biais de la régie de l'Ecole puis installé un disjoncteur moteur GV2, adapté à la commande et à la protection de moteur asynchrone.



Figure II.10 : Disjoncteurs installés dans le boîtier mural qui alimente le banc d'essai

II.5.2 Intervention sur les rhéostats de réglage

Les différents rhéostats sont démontés, nettoyés (résistances, curseurs et fourches de contact), lubrifiés (si curseur bloqué), puis remontés et vérifiés. Si des problèmes persistent, on recommence jusqu'à ce que le mouvement des devienne aisé tout maintenant un contact propre et continu entre les fourches et les résistances.

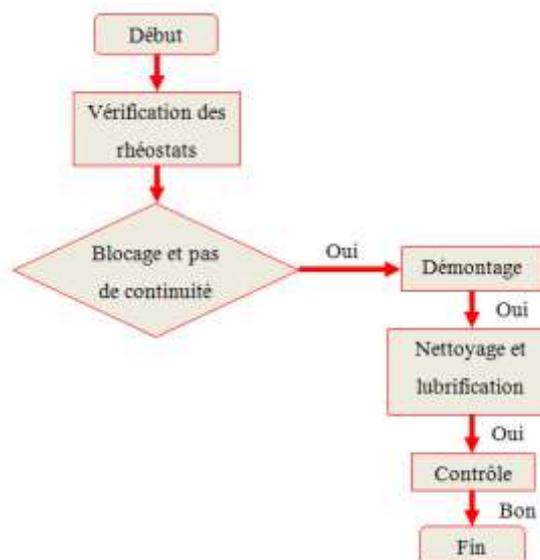


Figure II.11 : Organigramme des interventions sur les rhéostats.

II.5.3 Mise sous tension du groupe Ward-Leonard

En tenant compte des caractéristiques du moteur asynchrone en alimentation triphasée, nous avons estimé que le câble d'alimentation devait avoir quatre brins de plus de 3 mm chacun et nous avons récupéré un câble en très bon état répondant à ces conditions. Le câble

appartenait à une vieille machine hors d'usage qui se trouve au niveau des ateliers des métaux au département de Génie Mécanique. Le banc d'essai ayant désormais subi toutes les vérifications nécessaires et étant connecté au boîtier d'alimentation, tout était prêt pour une première mise sous tension du groupe Ward-Leonard. Ce que nous avons fait en veillant à l'application stricte des consignes de mise en marche indiquées à la rubrique "mode opératoire" de l'ancien manuel de travaux pratiques du banc d'essai. Nous avons ainsi en particulier ajusté les potentiometres d'excitation (de l'excitricice et de la génératrice au minimum et celui de la dynamo-frein au maximum). Nous avons procédé au démarrage du moteur asynchrone à vide, sans alimenter le moteur à courant continu, pour réduire au minimum les conséquences d'un éventuel court circuit. Le moteur asynchrone a démarré le plus naturellement du monde, mais cette mise sous tension a mis en évidence quelques dysfonctionnements du groupe. En effet le courant généré par l'excitricice était trop faible pour créer un champ magnétique suffisant dans l'inducteur de la génératrice principale pour la génération d'un courant d'induit capable d'entraîner le moteur à courant continu.

La première hypothèse que nous devons vérifier est que ce problème n'était pas dû à une inversion du sens de rotation du groupe, nous avons donc inversé les deux phases d'alimentation du moteur pour inverser le sens de rotation, malheureusement le courant est resté toujours toujours faible.

La deuxième hypothèse était que le champ rémanent de l'excitricice a disparu à cause du fait que cela faisait très longtemps que le groupe n'a pas fonctionné. On a appris avec O. STIHI qu'en donnant des coups de maillet sur l'excitricice, on pouvait réveiller le champ rémanent, sinon il resterait la solution de revenir à une excitation indépendante de la petite génératrice. Après quelques coups de maillet, on a relevé une augmentation de courant au niveau des bornes de l'excitricice et de la génératrice, à partir de là, le moteur à courant continu pouvait être alimenté sans risque de court circuit provenant du groupe Ward-Leonard.

II.5.4 mise en marche de l'ensemble moteur à courant continu - ventilateur

L'étape suivante a été d'inspecter l'état du moteur à courant continu en vérifiant les jonction entre les fils du moteur, pour éviter les mauvais contacts et les courts-circuits au niveau du moteur lui-même, courts-circuits qui pourraient engendrer des dommages également sur les machines du groupe Ward-Leonard, sans oublier leurs danger pour l'utilisateur. Dès nos premières observations, nous avons relevé la dégradation de la gaine

d'isolation des fils d'alimentation des enroulements de l'inducteur. Par ailleurs, un test de continuité des bobinage a révélé que celui de l'inducteur posait problème. Il devient alors évident que sans le démontage du moteur, il n'était pas possible de changer les fils défectueux et de tester les bobines de l'inducteur afin de situer la partie qui provoque la discontinuité du circuit.

L'opération de démontage du moteur devait être menée avec beaucoup de précaution. Tous les composants devaient être repérés par rapport à leurs emplacements, pour le remontage exact du moteur par la suite. Cette opération, au cours de laquelle il a fallu déplacer une charge de plus de 200 kg, a nécessité l'utilisation d'une giraffe, qui, pour notre bonheur, était sur place étant donné que nos camarades qui travaillaient sur la soufflerie l'avaient utilisée et devaient encore l'utiliser, et également le concours de nos camarades. Ensuite, il fallai utiliser une arrache pour extraire les supports du moteur, le roulement et le flasque, avant de pouvoir finalement accéder aux bobinages du stator et le rotor.

Les résistances de toutes les bobines de l'enroulement du stator ont été testées, d'abord séparément, puis combinées ensemble. Ces tests ont révélé que le bobinage de l'inducteur était en bonne état. Il ne restait plus qu'à procéder au remplacement des fils de raccordement qui étaient défectueux. Après remontage du moteur, sa mise en marche a été cette fois-ci concluente. Le moteur a bien démarré et sa vitesse a pu être réglée sur une gamme suffisamment large pour permettre aux essais d'avoir lieu.



Figure II.12 : démontage du MCC

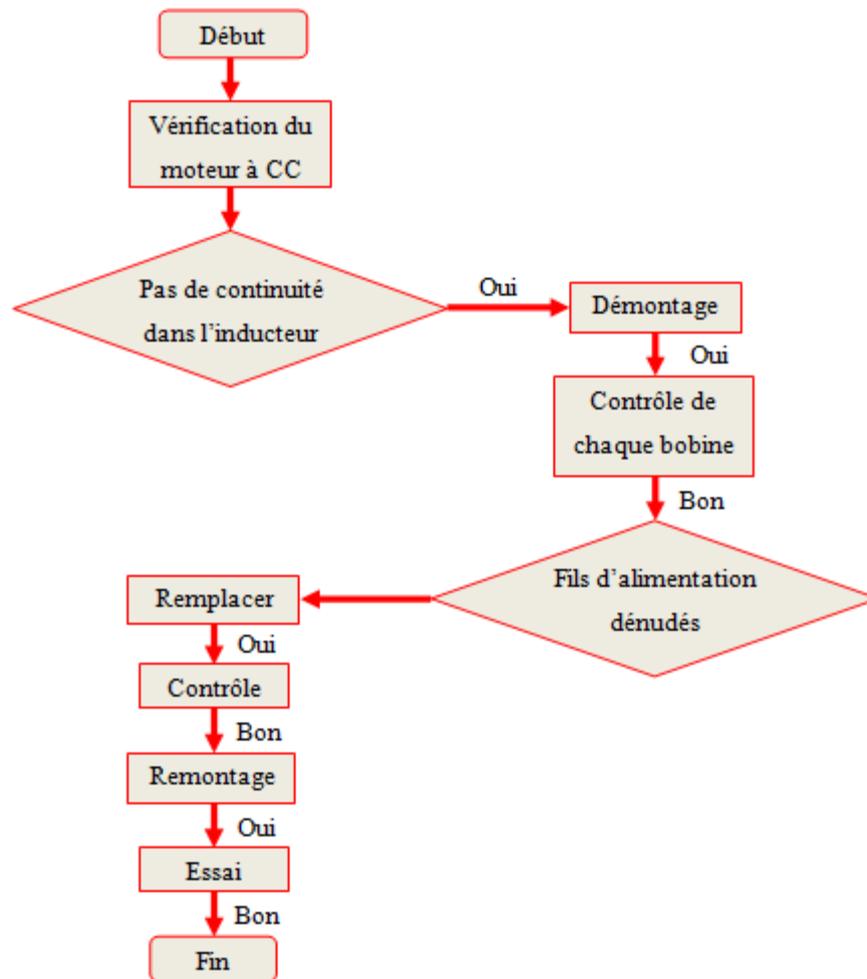


Figure II.13 : Organigramme de dépannage du moteur à courant continu

II.5.5 Equipement du banc d'essai avec les manomètres et réunion des accessoires indispensable à l'exécution des essais

Pour pouvoir exploiter le banc d'essais, il reste à présent à l'équiper avec les instruments de mesure nécessaires et à réunir les accessoires qui vont nous permettre de disposer de paramètres de réglage supplémentaires et d'élargir les possibilités d'essais sur le banc.

En plus du groupe Ward-Leonard qui permet de faire varier la vitesse de rotation du moteur d'entraînement du ventilateur, nous disposons sur le banc d'une balance qui semble entrès bon état et qui nous servira à mesurer le couple moteur qui, avec la connaissance de la valeur de la vitesse de rotation nous permettra de calculer la puissance mécanique absorbée par le ventilateur au cours des essais. Cette balance sera étalonnée avant de procéder aux essais sur le ventilateur dans le cadre du chapitre III.



Figure II.14 : Balance Trayvou pour mesurer le couple

La vitesse de rotation sera mesurée à l'aide d'un tachymètre que nous avons acquis à partir du magasin du laboratoire d'énergétique (voir Figure II.15) et que nous mettons avec les accessoires nécessaires au fonctionnement du banc d'essais.



Figure II.15 : Tachymètre pour mesurer la vitesse de rotation

D'autres accessoires indispensables pour le déroulement des essais sont des diaphragmes portant des orifices de diamètre variable. Ces diaphragmes seront montés en mince paroi à la sortie du caisson de la gaine de refoulement et serviront pour le réglage du débit au cours des essais. Nous avons retrouvé ces diaphragmes au niveau du local qui faisait office de labo-photos.



Figure II.16 : Diaphragmes de différents diamètres utilisés pour le réglage du débit d'air

Pour mesurer le débit d'air et la hauteur manométrique du ventilateur et pouvoir ainsi calculer la puissance aéraulique transmise à l'air et par suite le rendement du ventilateur, nous avons recours à une instrumentation rudimentaire qui se résume en deux tubes de Pitot et deux tubes en "U". Les deux tubes de Pitot nous permettront de mesurer directement l'augmentation de pression totale entre l'entrée et la sortie du ventilateur. Un troisième tube en "U" est nécessaire au niveau du caisson de sortie pour permettre d'évaluer les coefficients de débit des différents diagrammes utilisés. Pour confectionner les tubes en "U", nous avons travaillé à partir de cannes de verre, disponibles au niveau du laboratoire, que nous avons appris, sur les conseils du professeur T. AHMED-ZAID, à courber à l'aide d'un simple bec bunsen. Nous n'avons cependant pu obtenir des résultats satisfaisants qu'après plusieurs tentatives infructueuses.

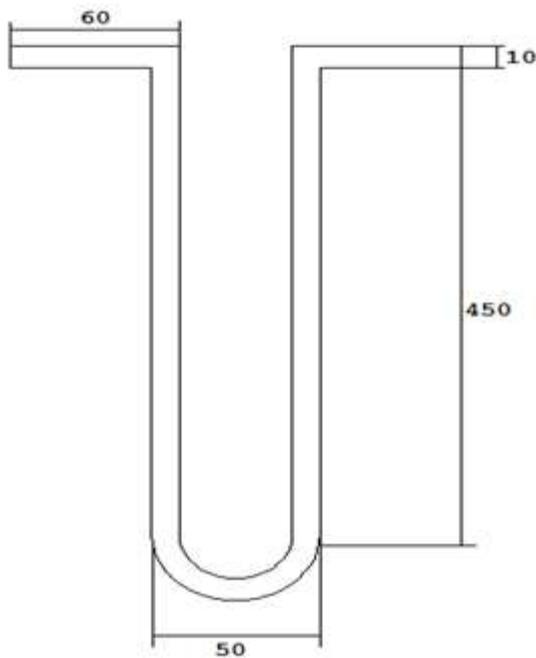


Figure II.17 : Les tubes en "U" utilisés sur le banc d'essai

II.6 Conclusion

Après avoir passé beaucoup de temps pour comprendre le fonctionnement du groupe Ward-Leonard et cerner au mieux le rôle et l'utilité de chaque organe afin d'agir prudemment et pertinemment sur les équipements, nous avons réussi à détecter les défaillances et les anomalies qui sont à l'origine du dysfonctionnement de l'installation. Nous avons été aidés en cela en nous conformant strictement à suivre les étapes d'un bon diagnostic. Les interventions menées sur le banc d'essais n'ont pas été simples, mais nous ont donné entière satisfaction puisqu'elles nous ont permis d'atteindre nos objectifs et de rendre le banc d'essai opérationnel.

Le chapitre suivant sera consacré à la conduite des essais sur le banc ainsi qu'au traitement et à l'interprétation des résultats de ces essais.

CHAPITRE III

**Réalisation Des Essais Pour L'Obtention Des
Caractéristiques Du Ventilateur, Présentation
Des Résultats De Ces Essais Et Interprétation**

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons aborder la partie expérimentale de notre étude, partie qui consiste à mener des essais sur le banc du ventilateur centrifuge en vue d'en obtenir les caractéristiques.

III.2 Etalonnage de la balance "Trayvou"

Pour que la balance montée sur le banc d'essai puisse être utilisée pour mesurer le couple au cours des différentes manipulations, il est nécessaire de l'étalonner au préalable en procédant de la manière suivante :

On procède tout d'abord au réglage de la balance en agissant sur ses mécanismes constitués de masselottes et de ressorts pour amener l'aiguille du cadran au zéro de l'échelle de mesure. Ensuite, on applique des poids dont les masses sont connues et, connaissant la valeur du bras de levier qui sépare la petite nacelle où les masses sont posées de l'axe de la dynamo-frein, on calcule le couple appliqué et on le compare à chaque fois à la valeur du couple indiquée sur le cadran de la balance.

Le calcul du couple se fera à l'aide de la formule suivante :

$$C = M . L . g \quad (3.1)$$

Où M désigne la masse appliquée (en kg) ; L = 30 cm, le bras de levier et $g = 9.81 \text{ m/s}^2$, l'accélération de la pesanteur.

Les mesures obtenues lors de cette expérience sont portées au tableau AII.1 inséré en annexe II. Ces mesures ont donné lieu au tracé de la courbe d'étalonnage de la balance de la figure III.1 ci-dessous. Cette courbe qui représente la valeur calculée du couple, exprimée en (N.m) en fonction de celle du couple indiquée par la balance, exprimée en kg.m, est donc une droite dont la pente représente une valeur constante du rapport de la valeur calculée (C) sur celle indiquée sur le cadran (C'). D'après la courbe d'étalonnage, ce rapport vaut **7.9** ; ce qui permet donc d'obtenir directement le couple moteur à partir de l'indication du cadran de la balance :

$$C [N.m] = 7.9 * C' [kg.m] \quad (3.2)$$

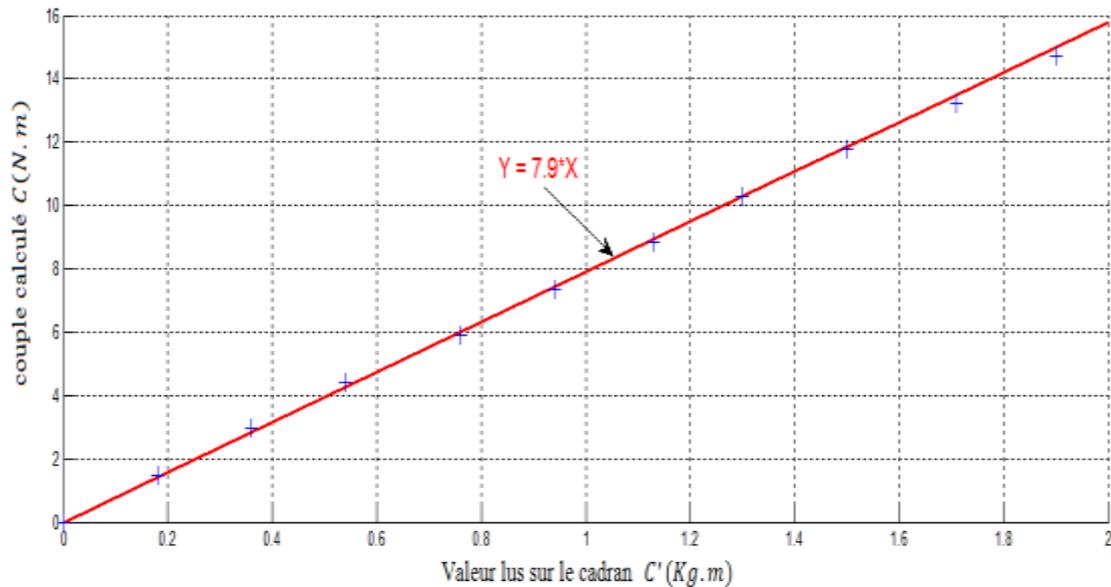


Figure III.1 : Courbe d'étalonnage de la balance "Trayvou".

III.3 Conduite des essais sur le banc du ventilateur centrifuge

On monte un diaphragme à l'endroit prévu à cet effet à la sortie de la gaine de refoulement du ventilateur, on règle la vitesse de rotation à une valeur choisie puis on relève les pressions différentielles indiquées par les trois tubes en "U" montés sur le banc d'essai, on mesure la vitesse de rotation à l'aide d'un tachymètre et on note l'indication de la balance. Cette opération sera effectuée pour les vitesses de rotation 1000 ; 1200 ; 1400 ; 1600 et 1800 trs/mn. On monte un diaphragme qui présente un orifice de diamètre différent et on reprend les mêmes opérations. On procédera ainsi avec tous les diaphragmes disponibles.

Les mesures obtenues sont portées sur les tableaux AII.2-6 insérés en annexe II.

III.4 Calculs effectués à partir des mesures obtenues

Hypothèse : Etant donné que les pressions auxquelles nous avons affaire sur le banc sont très faible, l'air sera considéré comme un fluide incompressible de masse volumique $\rho \cong 1,22 \frac{Kg}{m^3}$ dans les conditions de la conduite des essais.

III.4.1 Calcul du débit volumique

Sur le banc d'essais, le débit d'air est mesuré par une méthode indirecte à l'aide d'un tube en "U" qui indique la différence entre les pressions statiques prises à l'entrée et au col

d'un tube de Venturi. En négligeant la vitesse d'écoulement dans le caisson d'entrée devant la vitesse V_1 au col, l'application du théorème de Bernoulli entre l'entrée (0) du Venturi et le col (1) permet d'exprimer la vitesse en fonction de la chute de pression mesurée comme suit :

$$V_1 = \sqrt{\frac{2(P_0 - P_1)}{\rho}} \quad (3.3)$$

Le tube en "U" indiquant la pression en mmCE, alors que dans l'expression de la vitesse ci-dessus, la différence de pression doit être exprimée en Pa, il est utile de rappeler la correspondance suivante entre l'indication Δh_1 (mmCE) du manomètre et la différence de pression effective ($P_0 - P_1$) (Pa) :

$$(P_0 - P_1) \left[\frac{N}{m^2} \right] = 9,81. (\Delta h)_{TU-1} [mmCE] \quad (3.4)$$

Avec un diamètre au col $D_1 = 150$ mm et la valeur déjà mentionnée de 1.22 m³/kg pour la masse volumique de l'air, le débit d'air se calcule comme suit:

$$\begin{aligned} Q \left[\frac{m^3}{s} \right] &= S_1 \cdot V_1 = \pi \cdot \frac{D_1^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P_0 - P_1)}{\rho}} = \pi \frac{(0.15)^2}{4} \sqrt{\frac{2(9,81 \cdot (\Delta h)_{TU-1})}{1.22}} \\ &= 0.07087 \sqrt{(\Delta h)_{TU-1} [mmCE]} \end{aligned} \quad (3.5)$$

III.4.2 Calcul des puissances et du rendement du ventilateur

La surpression totale imprimée à l'air par le ventilateur est mesurée à l'aide de deux tubes de Pitot qui transmettent les pressions totales d'entrée et de sortie aux deux branches d'un même tube en "U". Cette mesure est convertie en (Pa) de la même manière que ci-dessus à l'aide de la formule :

$$\Delta P_t [Pa] = 9,81. (\Delta h)_{TU-2} [mmCE] \quad (3.6)$$

La puissance transmise par le moteur d'entraînement au ventilateur, appelée ici "*puissance d'entraînement*" est égale au produit du couple mesuré par la vitesse de rotation:

$$\mathcal{P}_{ent} = \omega \cdot C = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} \cdot C = 0,10472 \cdot (C \cdot N) [W] \quad (3.7)$$

La puissance aéraulique transmise par le ventilateur à l'air, appelée ici "*puissance manométrique*" est donnée par le produit du débit volumique par la surpression totale imprimée par le ventilateur à l'air :

$$\mathcal{P}_{man} = Q \cdot \Delta P_t \quad (3.8)$$

Le rendement du ventilateur s'obtient alors par le rapport de ces deux puissances :

$$\eta = \frac{\rho_{man}}{\rho_{ent}} \quad (3.9)$$

III.4.3 Calcul des coefficients de débit φ des diaphragmes

L'équation de continuité de appliquée aux sections 1(col du Venturi) et 4 (sortie du diaphragme) permet d'écrire :

$$Q_1 = Q_4 \quad \text{avec} \quad Q_1 = V_1 S_1 \quad \text{et} \quad Q_4 = \varphi V_4 S_4$$

où S_4 est la section effective de l'orifice, V_4 la vitesse d'écoulement de l'air à travers cette section si la veine n'était pas contractée et s'il n'y avait pas de perte de charge à travers l'orifice et φ un coefficient qui tient compte de la perte de charge et de la contraction de la veine d'air à travers l'orifice du diaphragme.

En négligeant la vitesse au niveau du caisson par rapport à la vitesse à l'orifice, l'application du théorème de Bernoulli entre l'entrée et la sortie du diaphragme, on obtient :

$$V_4 = \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_3 - P_0)} \quad (3.10)$$

Finalement, le coefficient de débit du diaphragme se calcule comme suit:

$$\varphi = \frac{Q_1}{S_4 V_4} = \frac{Q_1}{S_4} \sqrt{\frac{\rho}{2(P_3 - P_0)}} = \frac{4Q_1}{\pi d_4^2} \sqrt{\frac{1.22}{2 \cdot 9.81 \cdot \Delta h_{U-3} [mmCE]}} = \frac{0.0225}{D_4^2} \sqrt{\frac{(\Delta h)_{TU-1}}{(\Delta h)_{TU-3}}} \quad (3.11)$$

Les résultats des calculs sont présentés dans les différents tableaux figurant à l'annexe III.

III.5 Présentation graphique des résultats et interprétation

III.5.1 Tracé des caractéristiques du ventilateur à différentes vitesses de rotation

Les courbes caractéristiques du ventilateur sont représentées ici par la surpression totale ΔP_t en fonction du débit. Les résultats ayant servi au tracé de ces courbes figurent aux tableaux AIII.1-5. Les courbes obtenues sont représentées à la figure III.2 ci-dessous. Par comparaison de ces courbes avec celles présentées dans la documentation technique pour différents types de ventilateurs, on peut déduire que nous avons à faire sur notre banc d'essais à un ventilateur centrifuge à aubes inclinées vers l'avant. Les mêmes tableaux ont servi à tracer les courbes de rendement de la figure III.3 et celles des puissances absorbées par le ventilateur à différentes vitesses de rotation de la figure III.4.

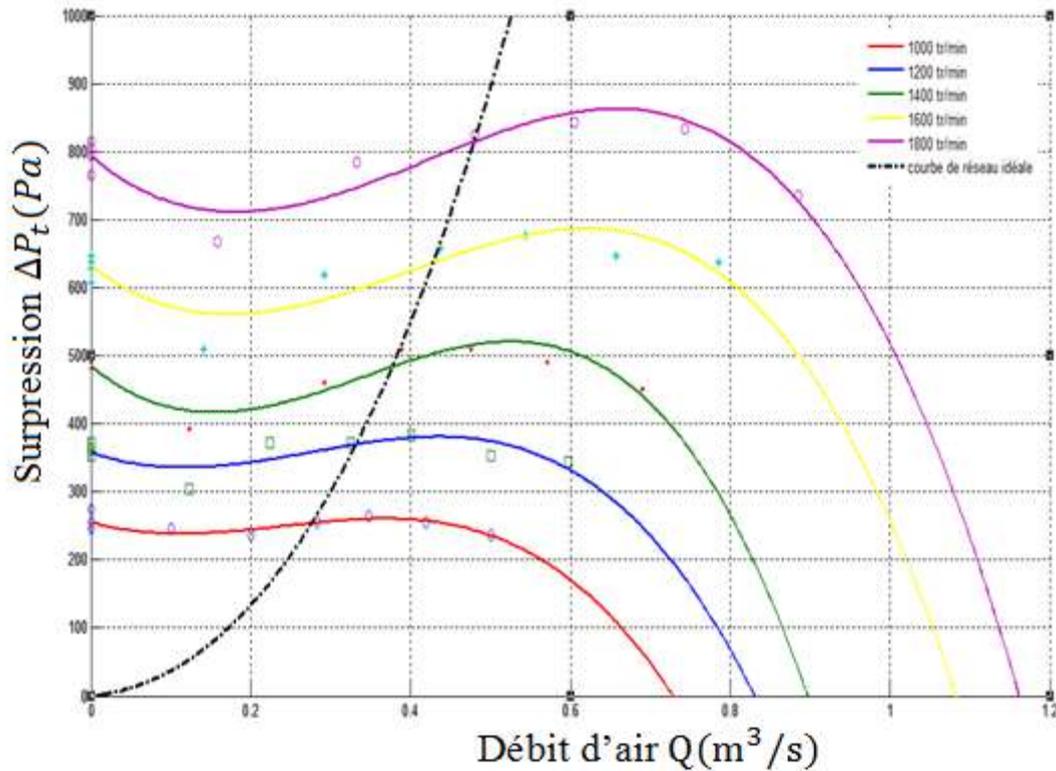


Figure III.2 : Courbes caractéristiques du ventilateur centrifuge tracées pour différentes vitesses de rotation

Par ailleurs, pour chaque vitesse de rotation, nous avons relevé le débit d'air et la surpression totale fournie par le ventilateur qui correspondent au point de rendement maximum. Ces paramètres sont réunis au tableau AIII.6 et sont représentés graphiquement à la figure III.2 ci-dessus par la courbe en trait mixte. Lorsqu'en modifiant la vitesse de rotation du ventilateur, son point de fonctionnement se déplace sur cette courbe le ventilateur opérera toujours à son point de rendement maximum, ce qui constitue le meilleur potentiel énergétique du ventilateur. Cette courbe représente donc la caractéristique idéale du réseau aéraulique.

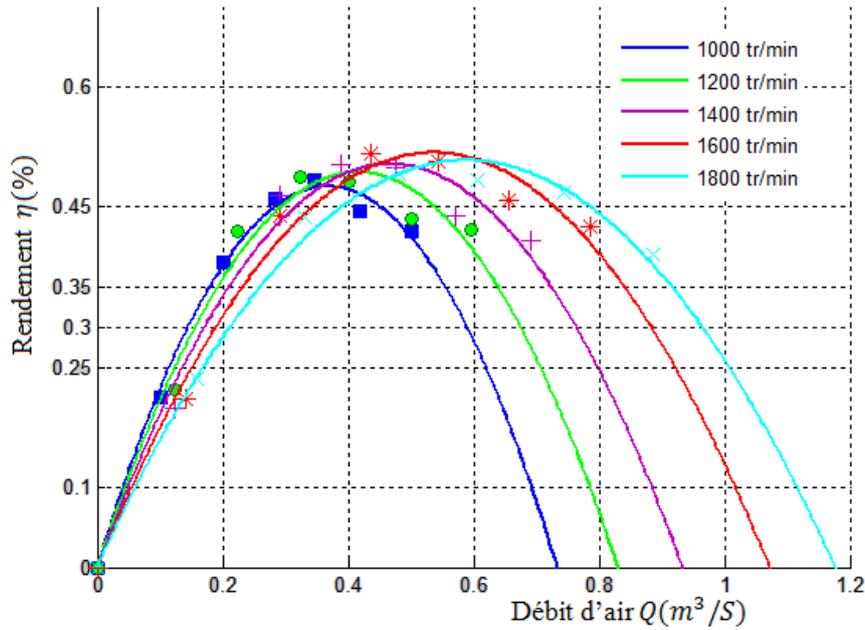


Figure III.3 : Courbes des rendements à différentes vitesses de rotation

Les courbes de puissance montrent que la puissance absorbée par le ventilateur croît logiquement avec le débit et la vitesse de rotation et qu'à débit nul il y a une puissance consommée pour compenser les pertes mécaniques sur les paliers et les pertes par frottement entre la roue du ventilateur et l'air.

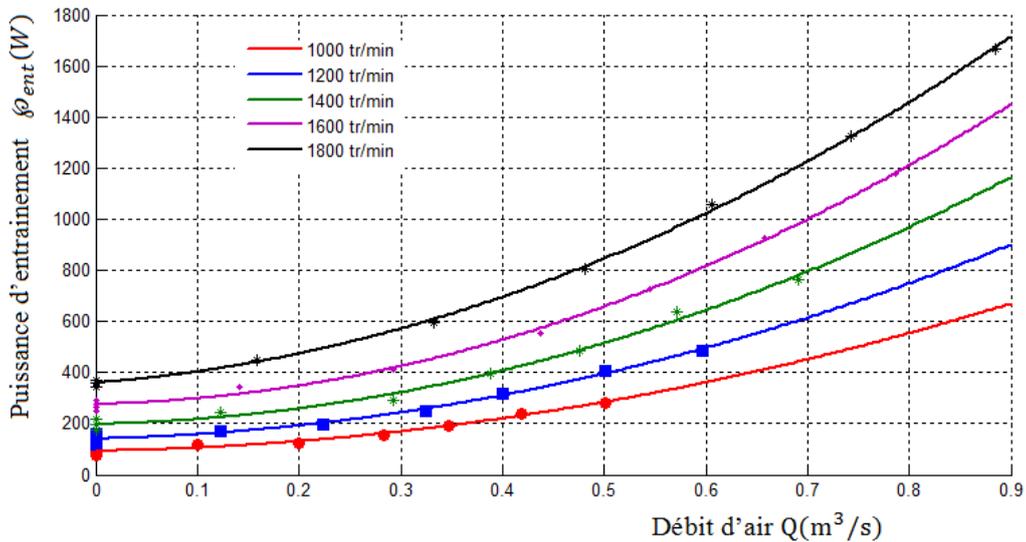


Figure III.4 : Courbes des puissances à différentes vitesses de rotation

Le jeu des caractéristiques est complété par le tracé du réseau des courbes d'iso-rendement. A partir des caractéristiques $\eta(Q)$, on relève pour chaque valeur de la vitesse de

rotation N les valeurs du débit qui correspondent à une valeur donnée du rendement. Ensuite, à partir des caractéristiques $\Delta P_t(Q)$, on relève les valeurs de ΔP_t correspondant aux mêmes débits et à la même vitesse de rotation. On procède ainsi avec différentes valeurs du rendement et on porte les résultats dans le tableau AIII.7. A partir de ces données les courbes d'iso-rendement sont tracées et montrées à la figure III.5 ci-dessous où les caractéristiques principales $\Delta P_t(Q)$ pour différentes valeurs de la vitesse de rotation ont été reproduites à partir de la figure III.2 pour conférer à la représentation une allure qui ressemble à la documentation technique que fournissent les fabricants.

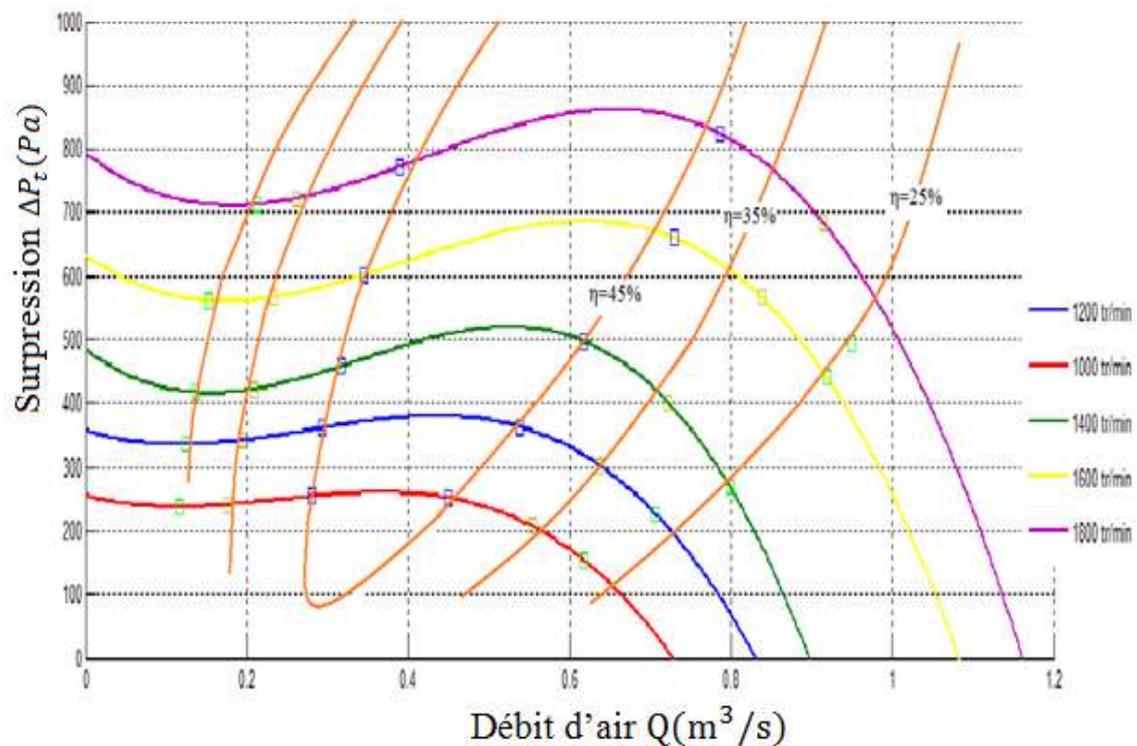


Figure III.5 : Courbes des iso-rendements du ventilateur.

Nous savons que les lois de similitude impliquent pour une turbomachine à fluide incompressible, $\Delta P_t \propto N^2$ et $Q \propto N$, ce qui signifie que si l'on faisait fonctionner la machine à des vitesses de rotation différentes, la fonction $(\Delta P_t/N^2) = f(Q/N)$ restera la même quelque soit la vitesse de rotation. Ces lois ont été déduites en négligeant l'influence du nombre de Reynolds, alors qu'une similitude complète entre deux régimes de fonctionnement de la machines suppose l'égalité des nombre de Reynolds. Cependant l'influence du nombre de Reynolds ne peut être ignorée que si les écoulements sont très fortement turbulents, ce qui est loin d'être le cas sur notre banc, notamment pour les diaphragmes de très faible diamètre. Ceci se traduit par la dissociation des courbes caractéristiques du ventilateur en coordonnées

réduites de la figure III.6 ci-dessous. Ces courbes sont dissociées, car $(\Delta P_t/N^2)$ n'est pas seulement fonction de Q/N , mais également du nombre de Reynolds, qui de toute évidence varie dans notre cas avec la vitesse de rotation.

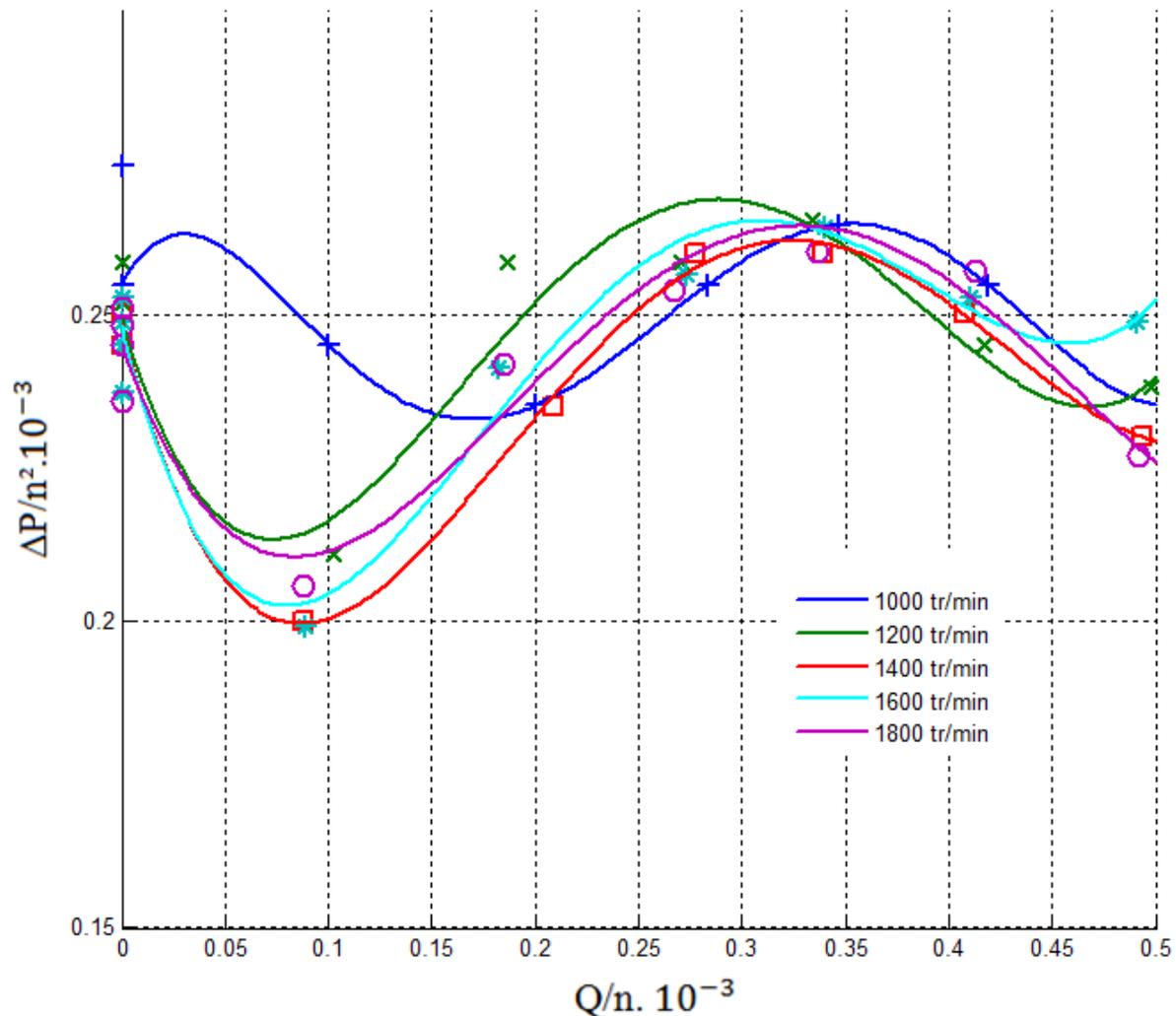


Figure III.6 : Courbes caractéristiques du ventilateur en coordonnées réduites

III.6 Remarque concernant les orifices de diamètre inférieur à 100 mm

Notons sur les tableaux des mesures de l'annexe II et ceux des résultats de l'annexe III, que pour les orifices de diamètre égal ou inférieur à 64 mm, le tube en "U" monté sur le Venturi ne détecte aucune chute de pression statique permettant de calculer le débit. Des tests effectués sur les prises du tube de Pitot à la sortie du ventilateur ont révélé que la pression totale et la pression statique sont identiques à cet endroit, alors qu'à la sortie de l'orifice on détecte bien un écoulement. Lors du tracé des courbes caractéristiques, nous n'avons donc pas pu tenir compte des mesures effectuées avec les diaphragmes en question car nous étions

incapables d'évaluer leur débit à l'aide de l'instrumentation installée. Cette situation pourrait être imputable à la présence du phénomène de pompage qui tend à inverser le sens de l'écoulement lorsque la pression dans le caisson de refoulement devient supérieur à celle dont est capable le ventilateur.

III.7 Conclusion

L'étude expérimentale du ventilateur centrifuge nous a permis de déterminer ses caractéristiques de surpression, de puissance et de rendement. Le tracé de ces caractéristiques, par leur ressemblance aux caractéristiques publiées par les constructeurs du même type de ventilateur, montre que le banc d'essai méritait d'être réhabilité afin que les étudiants puissent disposer dans l'avenir d'un outil de travaux pratiques très intéressant pour l'étude des turbomachines. Nous avons également pu vérifier l'absence de similitude complète entre les différents régimes de fonctionnement du ventilateur, à cause de l'influence qu'exerce le nombre de Reynolds sur les régimes d'écoulement du banc d'essai qui ne sont pas fortement turbulents.

Conclusion Générale

Les objectifs assignés à la présente étude ont été réalisés pour le grand bien de nos camarades étudiants qui auront désormais la possibilité d'appliquer leurs connaissances théoriques en turbomachines pour l'étude du comportement, sous différents régimes de fonctionnement, d'un ventilateur centrifuge dans un système aéraulique qui reproduit dans une large mesure les conditions qui prévalent dans les systèmes de ventilation réels. Ils auront également la possibilité de comprendre le fonctionnement des machines électriques, puisqu'elles sont plusieurs sur le banc : moteurs et génératrices, à courant continu et à courant alternatif.

Le talon d'Achille du banc d'essai est justement son groupe Ward-Leonard, qui est aujourd'hui vieillissant et risque de tomber en panne à tout moment. Il est également très énergivore comparativement à d'autres systèmes de réglage de la vitesse qui réalisent de manière statique les mêmes opérations avec des performances supérieures.

Pour garantir la durabilité du banc d'essai, nous recommandons donc de l'améliorer dans le cadre de travaux futurs. A commencer par étudier les différentes possibilités de remplacement du dispositif actuel de réglage de la vitesse. Les voies à explorer sont les suivantes :

- *Remplacement du groupe Ward-Léonard par un variateur de vitesse électronique à courant continu.*

Le variateur de vitesse électronique est un redresseur de type contrôlé, il est alimenté sous une tension fixe à partir du réseau alternatif et fournit au moteur une tension continue variable.

- *Remplacement du moteur à courant continu par un moteur asynchrone auquel sera adapté un variateur de vitesse.*

Cette solution se base sur le fait que le moteur asynchrone est aujourd'hui devenu plus économique, de plus l'intérêt de cette solution est la disponibilité du moteur asynchrone sur le banc d'essai. Il suffira donc de le déconnecter du groupe Ward-Leonard, de le coupler au ventilateur à la place du moteur à courant continu et de lui adapter un variateur électronique. Ce moteur peut fournir une puissance de 8.1 KW qui couvre très largement la puissance du moteur à courant continu actuel qui est seulement de 3.7 KW.

Habituellement, la régulation de la vitesse d'un moteur alternatif s'obtient en faisant varier la fréquence de son alimentation, la fréquence (f) de la tension (U) aux bornes est modifiée de façon à maintenir un rapport U/f constant afin d'éviter la sursaturation du

moteur. Cette méthode est une technique répandue depuis quelques dizaines d'années. Dans un variateur électronique, la tension d'alimentation alternative du réseau est convertie en une tension et un courant continus à l'aide d'un redresseur. La tension et le courant continus sont filtrés, avant d'être acheminés vers un onduleur ou ils sont convertis en tension et courant de fréquences alternatives variables.

- *Remplacement du moteur d'entraînement par un moteur électrique neuf doté d'un variateur de vitesse*

Cette solution implique l'abandon de toutes les machines électriques du banc d'essais pour écarter tout risque de panne causée par leur vieillissement, qui pourrait entraîner un arrêt du banc d'essais. Cette solution présente l'avantage de disposer d'un banc d'essai plus performant, équipé d'une nouvelle technologie qui garantit la durabilité et le bon fonctionnement, la souplesse lors de la manipulation et la fiabilité des résultats. Elle permet également de réduire la consommation d'énergie sur le banc d'essai.

Une autre perspective d'amélioration concerne l'instrumentation : on pourrait envisager de doter l'installation de capteurs électroniques de pression, de vitesse, de couple et de débit. Ces capteurs pourraient ensuite être reliés à un système d'acquisition et de traitement des données.

Mais en attendant, pour protéger l'installation actuelle, il ne serait pas vain de veiller aux points suivants :

- Envisager très sérieusement de demander qu'on fasse évacuer le transformateur hors d'usage, abandonné là depuis très longtemps, c'est comme si personne n'y pense alors qu'il constitue un réel danger pour les personnes qui fréquentent les lieux ;
- Recouvrir de housses les machines électriques afin de les protéger de la poussière et de l'humidité ;
- Vérifier périodiquement l'état des charbons et collecteurs des machines électriques, les nettoyer et éventuellement les remplacer si nécessaire ;
- Lubrifier régulièrement les paliers des machines.

Bibliographies

- [1] **Mark Brown, Jawahar Rawtani, Dinesh Patil.** Maintenance électrotechnique équipements électriques et circuits de commande. Edition DUNOD, 2005.
- [2] **Guy Chateigner, Michel Boès, Daniel Bouix, Jacques Vaillant, Daniel Verkindère.** Manuel de génie électrique. Edition DUNOD, Paris 2006.
- [3] **Théodore WILDI, Gilbert Sybille.** Electrotechnique. Quatrième édition, 2005.
- [4] **Documentation Schneider Electric.** Démarreurs et variateurs de vitesse électroniques, novembre 2003.
- [5] **Max Marty, Daniel Dixneuf, Delphine Garcia Gilabert.** Principes d'électrotechnique. Edition DUNOD, Paris, 2005.
- [6] **F.Castellazzi, D.Cogniel, Y.Gangloff.** Mémotech maintenance industrielle. Edition CASTEILLA, 1998, Paris.
- [7] **Energie mines ressource Canada,** Série de la gestion de l'énergie. Ventilateur et pompes.
- [8] **Bill Cory.** Fans and ventilation A practical guide, edition ELSEVIER, 2005.
- [9] **Jean-Marie MÉRIGOUX.** Ventilateurs, compresseurs. Technique d'ingénieur BM 4 500
- [10] **Frank P.Bleier.** Fan Handbook selection, application, and design, éditeur McGraw-Hill, 1976

Annexe I

*Manuel De Travaux Pratiques Sur Le Banc
D'Essai Du Ventilateur Centrifuge*

RATEAU VP235

1. Introduction

Le laboratoire d'énergétique du département de Génie Mécanique a pour ambition de permettre aux étudiants d'aborder sous l'aspect expérimental des concepts et des problèmes relatifs aux différents domaines de l'Energétique. Dans celui qui a trait aux turbomachines, le banc d'essai du ventilateur centrifuge RATEAU VP235, permettra aux étudiants de se familiariser avec certains aspects pratiques de l'utilisation des ventilateurs centrifuges.

2. Objectif de la manipulation

Les manipulations exécutées sur le banc d'essai du ventilateur centrifuge ont pour but de :

- Déterminer le réseau des caractéristiques du ventilateur.
- Etudier la continuité des caractéristiques obtenues en coordonnées réduites avec la loi de similitude.
- Déterminer le coefficient de contraction que subit une veine d'air au passage par un orifice en mince paroi.

3. Généralités :

Le ventilateur est une turbomachine entraînée par un moteur livrant un couple $C [N.m]$ à la vitesse de rotation $\omega [s^{-1}]$, produisant un écoulement d'air (ou d'un tout autre gaz) au débit volumique $Q [m^3.s^{-1}]$ et élevant la pression de moins de $10 kPa [\cong 1000 mm H_2O]$. Cette surpression est matérialisée par la différence $\Delta P_t [N.m^{-2} = Pa]$ entre la pression totale (somme des pressions statiques et dynamiques) à la sortie et la pression totale à l'entrée du ventilateur.

La puissance \wp_{man} transmise au fluide se calcule par le produit du débit volumique Q par la surpression ΔP_t fournie par le ventilateur.

$$\wp_{man} [W] = Q \left[\frac{m^3}{s} \right] \cdot \Delta P_t [Pa]$$

La puissance d'entraînement du ventilateur se calcule quant à elle par le produit du couple appliqué par le moteur d'entraînement C par la vitesse de rotation ω .

$$\wp_{ent} [W] = C [N.m] \cdot \omega [s^{-1}]$$

Le rapport des puissances précédemment calculées donne la valeur du rendement du ventilateur :

$$\eta = \frac{\wp_{man}}{\wp_{ent}}$$

Les caractéristiques usuelles des ventilateurs sont établies en coordonnées $(\Delta P, Q)$ pour des vitesses de rotation constantes. Les caractéristiques sont complétées par les courbes de rendement et celles de la puissance d'entraînement.

Le point de rendement maximum doit correspondre au point nominal de travail. Les courbes caractéristiques d'un ventilateur centrifuge sont plus plates que celles d'un ventilateur axial.

Afin de représenter les écoulements du fluide dans un rotor de turbomachine, on construit les triangles des vitesses constitués par une vitesse absolue C , une vitesse relative W et une vitesse d'entraînement périphérique U . Dans le cas de ventilateurs appartenant à la même famille géométrique (vérifiant donc la similitude géométrique) et tournant à des vitesses différentes, les triangles des vitesses sont semblables.

Les lois de similitude sont applicables également à un même ventilateur (c'est le cas du TP) pour des conditions de rotation différentes. Dans ce cas, U_1 (vitesse d'entraînement à l'entrée du rotor) et U_2 (vitesse d'entraînement à la sortie du rotor) sont proportionnelles à la vitesse angulaire et la similitude géométrique implique des vitesses W et C également proportionnelles.

En conclusion pour avoir des conditions de similitude il faut une proportionnalité entre le débit volumique et la vitesse de rotation. On peut déduire par l'intermédiaire de l'équation d'Euler que l'augmentation de pression ΔP est proportionnelle au carré de la vitesse de rotation. Donc on a pour les conditions de similitude :

$$Q = K_Q \cdot N \quad \Delta P = K_p \cdot N^2$$

Si la similitude était entière, alors pour $N_2 = K \cdot N_1$ et $Q_2 = K \cdot Q_1$, on pourrait assurer, par un étranglement approprié de l'écoulement à la sortie du ventilateur l'égalité :

$$\Delta P_2 = K^2 \cdot \Delta P_1$$

Les différentes pertes dans le ventilateur (fuites, frottements, tourbillons.....) dont les valeurs relatives changent avec la vitesse de rotation modifient la loi de similitude qui n'est satisfaite que partiellement, il n'y a pas similitude de Reynolds, c'est pourquoi les caractéristiques réduites : abscisse Q/N et ordonnée $\Delta P/N^2$ ne sont plus identiques pour différentes vitesses de rotation.

Dans le banc d'essai, le fluide passe à travers un orifice en mince paroi placé entre un caisson où on néglige la vitesse d'écoulement et où la pression est P_3 et l'atmosphère où la pression est P_0 et la vitesse est V_4 juste à l'endroit où la veine d'air est à P_0 . A cet endroit la

veine est contractée et sa section est inférieure à celle de l'orifice S_4 . En supposant l'air incompressible on pourrait écrire d'après le théorème de Bernoulli :

$$P_3 = P_0 + \rho \frac{V_4^2}{2} \text{ d'où on a, } V_4 = \sqrt{\frac{2(P_3 - P_0)}{\rho}}$$

Si le débit volumique d'air Q venant de l'orifice est connu, on s'aperçoit donc que :

$$V_4 \cdot S_4 > Q \longrightarrow Q = \varphi \cdot V_4 \cdot S_4 \text{ Avec } 0 < \varphi < 1$$

φ Étant un coefficient de débit qui tient compte d'un phénomène dit de contraction de la veine expliqué par une convergence de l'écoulement. Ce phénomène est négligeable dans la tuyère de Venturi

4. Description du banc d'essai

L'installation comprend un ventilateur centrifuge RATEAU VP235 entraîné par un moteur à courant continu à excitation séparée. Le moteur (dynamo- frein) est alimenté par un groupe Ward-Leonard et le changement de vitesse de rotation du moteur s'effectue par la variation de l'excitation de la de génératrice et de celle du moteur. Le moteur est monté sur une balance Trayvou afin d'assurer la mesure de son couple. La vitesse de rotation est mesurée périodiquement à l'aide d'un tachymètre.

Le ventilateur est connecté avec la gaine d'admission et celle de refoulement. Dans la gaine d'admission est placée une tuyère-venturi avec un tube en U ($TU - 1$) pour mesurer la différence de pression $P_0 - P_1$ entre un caisson d'entrée et le col de la tuyère. Deux tubes de Pitot placés à l'entrée et à la sortie du ventilateur reliés aux deux branches d'un même tube en U ($TU - 2$) permettent de mesurer la surpression totale ΔP_t imprimée à l'air par le ventilateur. En aval se trouve un diffuseur qui se termine par un deuxième caisson. Son échappement comporte un diaphragme interchangeable monté en mince paroi. La pression dans le caisson est mesurée par un autre tube en U ($TU - 3$).

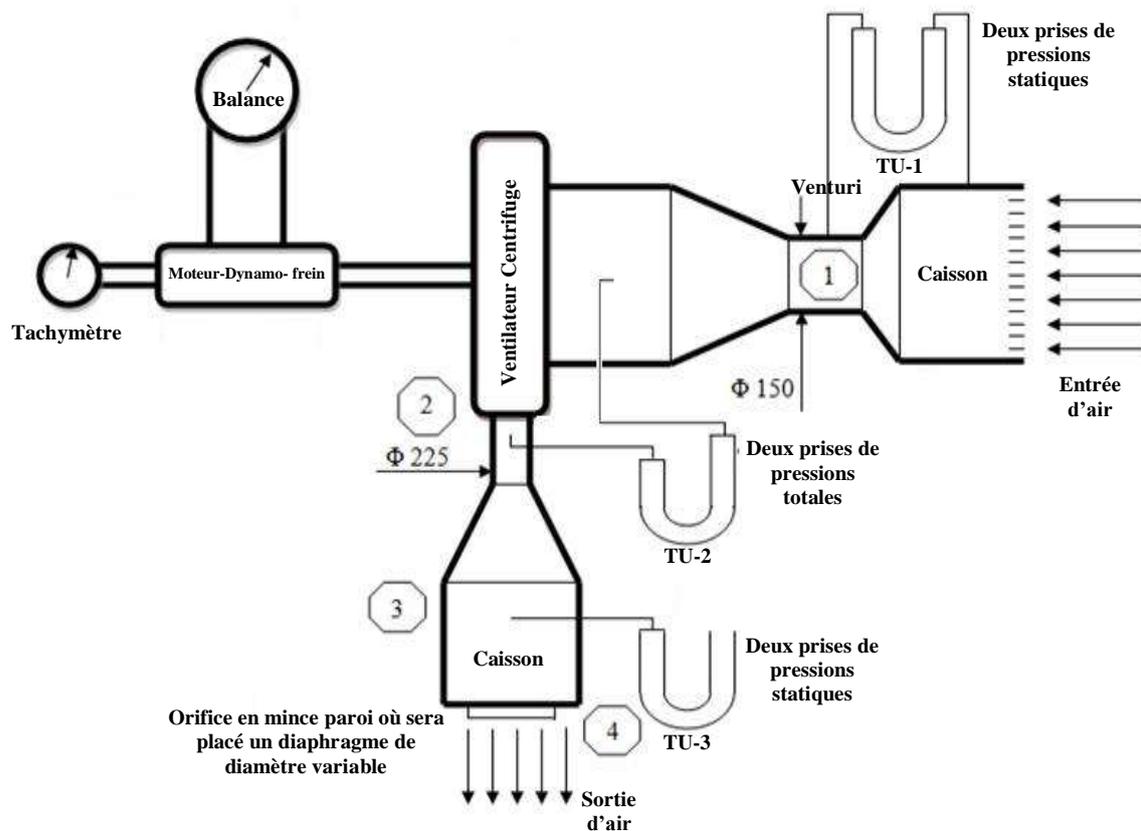


Figure1 : Banc d'essai du ventilateur centrifuge RATEAU VP2 35.

5. Manipulations

Consignes impératives à suivre pour la mise en marche et l'arrêt du système

Avant le démarrage du moteur asynchrone, vérifier la position de l'interrupteur d'excitation de la dynamo-frein. Elle doit toujours être sur « MARCHE ».

Ajuster les potentiomètres d'excitation comme suit.

- Celui de l'excitatrice au minimum
- Celui de la génératrice au minimum
- Celui de la dynamo-frein au maximum

Appuyer sur le bouton « MARCHE » du moteur triphasé

Augmenter l'excitation de l'excitatrice lentement jusqu'à la valeur 110 V

Augmenter l'excitation de la génératrice jusqu'à la valeur 150 V

Diminuer l'excitation de la dynamo-frein jusqu'à l'obtention de la vitesse désirée (pour obtenir des vitesses plus faibles il faudra éventuellement diminuer l'excitation de la génératrice)

Pour l'arrêt suivre rigoureusement l'ordre inverse.

6. Mesure :

Installer le diaphragme de diamètre 220 mm sur l'orifice et effectuer une série de mesures pour les vitesses de rotation $1000, 1200, 1400, 1600$ et 1800 tr. mn^{-1} .

Noter les indications des appareils de mesure sur un tableau comme celui présenté ci-dessous.

$N = \dots\dots\dots\text{ tr/min}$				
D_4 (mm)	C' (kg.m)	TU – 1	TU – 2	TU – 3
		Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh_3 (mm)
220				
200				
180				
160				
132				
100				
64				
50				
40				
32				
24				
0				

Remarque :

D_4 doit être placé dans une plage de $\pm 1\%$ de la valeur indiquée. Noter les valeurs réellement lues. La lecture du couple C' doit être effectuée sur l'échelle noire au cadran de la balance. Pour les trois tubes en U faire la lecture des deux niveaux et les noter.

Répéter les séries de mesures pour les diaphragmes $200, 180, 160, 132, 100\text{ mm}$ jusqu'à l'obturation complète de l'orifice.

7. Calculs et présentation des résultats :

Les résultats des calculs doivent être présentés dans un tableau comme suit :

N°	Q (m ³ /s)	ΔP _t (Pa)	C (N.m)	φ _{ent} (W)	φ _{man} (W)	η (%)	Q/N	P/N ²	φ
1									
2									
3									
4									
5									
6									

Le débit Q se calcule au niveau du Venturi :

$$Q = V_1 S_1 = \pi \cdot \frac{D_1^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P_0 - P_1)}{\rho}}$$

$$\text{avec } (P_0 - P_1)[Pa] = \rho_m [kg/m^3] \cdot g \cdot (\Delta h)_{TU-1} [mCE] = 9,81 \cdot (\Delta h)_{TU-1} [mmCE]$$

ρ : masse volumique d'air $\cong 1,22 \frac{kg}{m^3}$;

ρ_m : masse volumique du fluide manométrique, ici l'eau = $1000 \frac{kg}{m^3}$

$D_1 = 150 \text{ mm} = 0,15 \text{ m}$ (Diamètre intérieur au col du Venturi)

Qui donne :

$$Q \left[\frac{m^3}{s} \right] = 0,07087 \cdot \sqrt{(\Delta h)_{TU-1} [mmCE]}$$

De même la surpression fournie par le ventilateur est calculée par :

$$\Delta P_t \left[\frac{N}{m^2} \right] = 9,81 \cdot (\Delta h)_{TU-2} [mmCE]$$

L'étalonnage de la balance a montré qu'il faut pour obtenir le couple en $N \cdot m$, multiplier la lecture effectuée sur la balance par le coefficient 7.9 :

$$C [N \cdot m] = 7,9 \cdot C' [kg \cdot m]$$

La puissance d'entraînement est calculée comme suit :

$$\phi_{ent} = \frac{2 \cdot \pi \cdot N}{60} \cdot C = 0,10472 \cdot C \cdot N [W]$$

Tandis que la puissance manométrique transmise à l'écoulement d'air par le ventilateur sera :

$$\phi_{man} = Q \cdot \Delta P_t$$

Le rendement du ventilateur s'obtient alors aisément par le rapport de ces deux puissances :

$$\eta = \frac{\phi_{man}}{\phi_{ent}}$$

En tenant compte de la contraction de la veine d'air au niveau de l'orifice, l'équation de continuité s'écrit pour les sections 1 (col du Venturi) et 4 (orifice) :

$$\pi \cdot \frac{D_1^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P_0 - P_1)}{\rho}} = \varphi \cdot \pi \cdot \frac{D_4^2}{4} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (P_3 - P_0)}{\rho}}$$

En tenant compte des données déjà utilisées pour le diamètre D_1 et la masse volumique de l'air ρ , le coefficient de débit φ du diaphragme dont l'orifice présente un diamètre D_4 donné s'obtient aisément par les seules mesures effectuées sur les deux tubes en "U" TU-1 et TU-3 :

$$\varphi = \frac{0,0225}{D_4^2 [m]} \sqrt{\frac{(\Delta h)_{TU-1} [mmCE]}{(\Delta h)_{TU-3} [mmCE]}}$$

La présentation des résultats doit s'appuyer sur le tracé des graphes suivants :

- Tracer le réseau des caractéristiques du ventilateur centrifuge dont chaque courbe représente ΔP_t en fonction de Q pour une vitesse de rotation donnée.
- Tracer un réseau identique pour le rendement η en fonction du débit Q .
- Tracer le réseau des caractéristiques réduites $\left(\frac{\Delta P_t}{N^2}\right) = f\left(\frac{Q}{N}\right)$ pour différentes valeurs de la vitesse de rotation N .

8. Questions pour interpréter les résultats

Quelle est l'allure des courbes caractéristiques du ventilateur étudié ? Comment change-telle avec la variation de la vitesse de rotation ? Quelle est la répartition des courbes sur le plan ? Peut-on parler d'une similitude complète des courbes ? S'ils existent, quels sont les écarts en fonction de la vitesse ? Les maxima du rendement différent-ils fortement avec un changement de la vitesse de rotation ?

Ajouter aux courbes existantes sur les diagrammes une courbe reliant les maxima du rendement pour les différentes valeurs de la vitesse. Avec quelle caractéristique de perte de charge du réseau ce ventilateur travaillerait le plus économiquement en admettant la régulation par variation de la vitesse de rotation ?

Le coefficient de débit φ varie avec le débit et avec le diamètre de l'orifice. Quel facteur influence plus fortement la variation ? Quel est le plus grand changement ?

Annexe II

Mesures Obtenues Lors des Essais

Tableau AII.1 : correspondances entre les valeurs du couple appliqué lues sur le cadran de la balance et les valeurs du couple d'équilibrage déterminées par le calcul.

Poids (Kg)	0	0.50	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00	4.50	5.00
Valeur calculée du couple d'équilibrage (N.m)	0	1.47	2.94	4.42	5.89	7.35	8.83	10.30	11.77	13.24	14.72
Valeur du couple lue sur le cadran de la balance (Kg.m)	0	0.18	0.36	0.54	0.76	0.94	1.13	1.30	1.50	1.71	1.90

Tableaux AII.2-6 : Mesures effectuées pour différentes vitesses de rotation et différents diamètres de l'orifice.**Tableau II.2** : $N = 1000 \text{ tr/min}$

D_n (mm)	C' (kg.m)	TU – 1	TU – 2	TU – 3
		Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh_3 (mm)
220	0.34	50	24	20
200	0.29	35	26	21
180	0.23	24	27	25
160	0.19	16	26	25
132	0.15	8	24	23
100	0.14	2	25	20
64	0.11	0	25	21
50	0.11	0	25	20
40	0.11	0	26	21
32	0.12	0	26	21
24	0.13	0	28	20
0	0.09	0	26	20

Tableau II.3 : $N = 1200$ tr/min

D_n (mm)	C' (kg.m)	TU – 1	TU – 2	TU – 3
		Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh_3 (mm)
220	0.49	71	35	30
200	0.41	50	36	32
180	0.32	32	39	35
160	0.25	21	38	35
132	0.20	10	38	34
100	0.17	3	31	29
64	0.14	0	36	28
50	0.14	0	37	29
40	0.14	0	36	30
32	0.15	0	36	29
24	0.16	0	38	29
0	0.12	0	37	30

Tableau II.4 : $N = 1400$ tr/min

D_n (mm)	C' (kg.m)	TU – 1	TU – 2	TU – 3
		Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh_3 (mm)
220	0.66	95	46	40
200	0.55	65	50	45
180	0.42	45	52	47
160	0.34	30	52	49
132	0.25	17	47	46
100	0.21	3	40	40
64	0.17	0	49	40
50	0.17	0	49	40
40	0.17	0	50	40
32	0.17	0	50	40
24	0.19	0	50	40
0	0.15	0	50	40

Tableau II.5 : $N = 1600$ tr/min

D_n (mm)	C' (kg.m)	TU – 1	TU – 2	TU – 3
		Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh_3 (mm)
220	0.89	123	65	54
200	0.7	86	66	60
180	0.55	59	69	65
160	0.42	38	67	63
132	0.31	17	63	60
100	0.26	4	52	52
64	0.21	0	62	52
50	0.21	0	64	52
40	0.20	0	66	51
32	0.21	0	66	52
24	0.22	0	66	53
0	0.19	0	65	52

Tableau II.6 : $N = 1800$ tr/min

D_n (mm)	C' (kg.m)	TU – 1	TU – 2	TU – 3
		Δh_1 (mm)	Δh_2 (mm)	Δh_3 (mm)
220	1.12	156	75	67
200	0.89	110	85	76
180	0.71	73	86	80
160	0.54	46	84	80
132	0.40	22	80	76
100	0.30	5	68	65
64	0.25	0	78	67
50	0.24	0	81	66
40	0.24	0	81	65
32	0.24	0	82	65
24	0.25	0	82	67
0	0.23	0	83	65

Annexe III

Résultats Des Calculs

Tableaux AIII.1-5 : Résultats obtenus pour le tracé des caractéristiques du ventilateur à différentes vitesses de rotation

Tableau AIII.1 : N = 1000 tr/min

D_n (mm)	ΔP_t (N/m ²)	Q (m ³ /s)	ρ_{man} (W)	C (N.m)	ρ_{ent} (W)	η (%)	ϕ
220	235.44	0.5011	117.9686	2.6860	281.2779	41.94	0.7182
200	255.06	0.4192	106.9246	2.2910	239.9135	44.57	0.7150
180	264.87	0.3471	91.9474	1.8170	190.2762	48.32	0.6743
160	255.06	0.2834	72.2942	1.5010	157.1847	45.99	0.6989
132	235.44	0.2004	47.1874	1.1850	124.0932	38.03	0.7591
100	245.25	0.1002	24.576	1.1060	115.8203	21.21	0.7108
64	245.25	0	0	0.8690	91.0017	0	0
50	245.25	0	0	0.8690	91.0017	0	0
40	255.06	0	0	0.8690	91.0017	0	0
32	255.06	0	0	0.9480	99.2746	0	0
24	274.68	0	0	1.0270	107.5474	0	0
0	255.0600	0	0	0.7110	74.4559	0	0

Tableau AIII.2 : N = 1200 tr/min

D_n (mm)	ΔP_t (N/m ²)	Q (m ³ /s)	ρ_{man} (W)	C (N.m)	ρ_{ent} (W)	η (%)	ϕ
220	343.35	0.5971	205.0064	3.8710	486.4453	42.14	0.6996
200	353.16	0.5011	176.9529	3.2390	407.0257	43.47	0.6929
180	382.59	0.4008	153.3592	2.5280	317.6786	48.27	0.6583
160	372.78	0.3247	21.0496	1.9750	248.1864	48.77	0.6770
132	372.78	0.2241	83.5322	1.5800	198.5491	42.07	0.6984
100	304.11	0.1227	37.3244	1.3430	168.7668	22.12	0.7230
64	353.16	0	0	1.1060	138.9844	0	0
50	362.97	0	0	1.1060	138.9844	0	0
40	353.16	0	0	1.1060	138.9844	0	0
32	353.16	0	0	1.1850	148.9118	0	0
24	372.78	0	0	1.2640	158.8393	0	0
0	362.97	0	0	0.9480	119.1295	0	0

Tableau AIII.3 : $N = 1400$ tr/min

D_n (mm)	ΔP_t (N/m ²)	Q (m ³ /s)	ρ_{man} (W)	C (N.m)	ρ_{ent} (W)	η (%)	ϕ
220	451.26	0.6907	311.6663	5.2140	764.4141	40.77	0.7008
200	490.50	0.5713	280.2185	4.3450	637.0118	43.99	0.6670
180	510.12	0.4753	242.4821	3.3180	486.4453	49.85	0.6734
160	510.12	0.3881	197.9858	2.6860	393.7891	50.28	0.6837
132	461.07	0.2922	134.7077	1.9750	289.5508	46.52	0.7823
100	392.40	0.1227	48.1605	1.6590	243.2227	19.80	0.6157
64	480.69	0	0	1.3430	196.8945	0	0
50	480.69	0	0	1.3430	196.8945	0	0
40	490.50	0	0	1.3430	196.8945	0	0
32	490.50	0	0	1.3430	196.8945	0	0
24	490.50	0	0	1.5010	220.0586	0	0
0	490.50	0	0	1.1850	173.7305	0	0

Tableau AIII.4 : $N = 1600$ tr/min

D_n (mm)	ΔP_t (N/m ²)	Q (m ³ /s)	ρ_{man} (W)	C (N.m)	ρ_{ent} (W)	η (%)	ϕ
220	637.65	0.7859	501.1291	7.0310	1178.1	42.54	0.6869
200	647.46	0.6571	425.4460	5.5300	926.6	45.92	0.6644
180	676.89	0.5443	368.4312	4.3450	728.0	50.61	0.6560
160	657.27	0.4368	287.0955	3.3180	555.9	51.64	0.6787
132	618.03	0.2922	180.5884	2.4490	410.3	44.01	0.6855
100	510.12	0.1417	72.2840	2.0540	344.2	21.00	0.6236
64	608.22	0	0	1.6590	278.0	0	0
50	627.84	0	0	1.6590	278.0	0	0
40	647.46	0	0	1.5800	264.7	0	0
32	647.46	0	0	1.6590	278.0	0	0
24	647.46	0	0	1.7380	291.2	0	0
0	637.65	0	0	1.5010	251.5	0	0

Tableau AIII.5 : $N = 1800$ tr/min

D_n (mm)	ΔP_t (N/m ²)	Q (m ³ /s)	ρ_{man} (W)	C (N.m)	ρ_{ent} (W)	η (%)	ϕ
220	735.7500	0.8850	651.1387	8.8480	1667.8	39.04	0.6942
200	833.8500	0.7432	619.7173	7.0310	1325.3	46.76	0.6676
180	843.6600	0.6054	510.7518	5.6090	1057.3	48.31	0.6577
160	824.0400	0.4806	396.0336	4.2660	804.1	49.25	0.6629
132	784.8000	0.3324	260.8675	3.1600	595.6	43.80	0.6929
100	667.0800	0.1584	105.6655	2.3700	446.7	23.65	0.6236
64	765.1800	0	0	1.9750	372.3	0	0
50	794.6100	0	0	1.8960	357.4	0	0
40	794.6100	0	0	1.8960	357.4	0	0
32	804.4200	0	0	1.8960	357.4	0	0
24	804.4200	0	0	1.9750	372.3	0	0
0	814.2300	0	0	1.8170	342.5	0	0

Tableau AIII.6 : Performances du ventilateur au point de rendement maximum à différentes valeurs de la vitesse de rotation

n (tr/min)	η_{max} (%)	Q (m ³ /s)	ΔP_t (N/m ²)	ρ_{man} (W)
1000	48.32	0.3471	264.87	91.9474
1200	48.77	0.3247	372.78	121.0496
1400	50.28	0.3881	510.12	197.9858
1600	51.64	0.4368	657.27	287.0955
1800	49.25	0.4806	824.04	396.0336

Tableau AIII.7 : Relevés des coordonnées nécessaires pour le tracé des courbes d'iso-rendement

N (tr/min)	$\eta=25(\%)$		$\eta=30(\%)$		$\eta=35(\%)$		$\eta=40(\%)$		$\eta=45(\%)$		$\eta=50(\%)$	
	ΔP_t (N/m ²)	Q (m ³ /s)	ΔP_t (N/m ²)	Q (m ³ /s)	ΔP_t (N/m ²)	Q (m ³ /s)	ΔP_t (N/m ²)	Q (m ³ /s)	ΔP_t (N/m ²)	Q (m ³ /s)	ΔP_t (N/m ²)	Q (m ³ /s)
1000	238	0.1164	239	0.1445	241	0.1766	247	0.2207	254	0.2809	/	/
	154	0.6181	180	0.5900	207	0.5538	230	0.5137	252	0.4495	/	/
1200	336	0.1244	337	0.1565	342	0.1936	350	0.2368	362	0.2930	/	/
	227	0.7064	247	0.6742	303	0.6381	379	0.4019	364	0.5378	/	/
1400	417	0.1365	417	0.1725	422	0.2087	453	0.6783	459	0.3171	503	0.4294
	269	0.7987	339	0.7625	402	0.7224	436	0.2569	498	0.6181	519	0.5057
1600	561	0.1525	535	0.1886	566	0.2328	592	0.2809	602	0.3452	650	0.6341
	441	0.9191	760	0.887	566	0.8388	642	0.7906	659	0.7304	673	0.4375
1800	713	0.2129	713	0.2127	722	0.2609	739	0.3117	772	0.3893	829	0.5137
	494	1.0070	598	0.9632	683	0.9151	760	0.8589	824	0.7866	862	0.6622

Tableau AIII.8 : Résultats des calculs utilisés pour le tracé des caractéristiques du ventilateur en coordonnées réduites pour différentes vitesses de rotation

D_n (mm)	1000 tr/min		1200 tr/min		1400 tr/min		1600 tr/min		1800 tr/min	
	Q/N	$\Delta P/N^2$								
	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}
220	0.5011	0.2354	0.4976	0.2384	0.4934	0.2302	0.4912	0.2491	0.4917	0.2271
200	0.4192	0.2551	0.4176	0.2453	0.4081	0.2503	0.4107	0.2529	0.4129	0.2574
180	0.3471	0.2649	0.3340	0.2657	0.3395	0.2603	0.3402	0.2644	0.3363	0.2604
160	0.2834	0.2551	0.2706	0.2589	0.2772	0.2603	0.2730	0.2567	0.2670	0.2543
132	0.2004	0.2354	0.1867	0.2589	0.2087	0.2352	0.1826	0.2414	0.1847	0.2422
100	0.1002	0.2453	0.1023	0.2112	0.0876	0.2002	0.0886	0.1993	0.0880	0.2059
64	0	0.2453	0	0.2453	0	0.2453	0	0.2376	0	0.2362
50	0	0.2453	0	0.2521	0	0.2453	0	0.2453	0	0.2453
40	0	0.2551	0	0.2453	0	0.2503	0	0.2529	0	0.2453
32	0	0.2551	0	0.2453	0	0.2503	0	0.2529	0	0.2483
24	0	0.2747	0	0.2589	0	0.2503	0	0.2529	0	0.2483
0	0	0.2551	0	0.2521	0	0.2503	0	0.2491	0	0.2513