

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REpubLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR & DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BLIDA
INSTITUT DE MECANIQUE

جامعة البليدة
معهد الميكانيك

MEMOIRE DE MAGISTER

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER EN GENIE MECANIQUE

OPTION : ENERGETIQUE

THEME

**ETUDE DU RENDEMENT VOLUMETRIQUE D'UN NOUVEAU
SYSTEME D'ADMISSION / ECHAPPEMENT POUR UN
MOTEUR A COMBUSTION INTERNE**

Etudié par : M^{elle} BENOUARED Ouahiba

Présenté devant le Jury constitué de :

Président	: Dr YOUBI, Z.	Maître de conférences	U.S.T. de Blida
Examineur	: Dr HARHAD, A.	Maître de conférences	U.S.T. de Blida
Examineur	: Dr BOUGHADAOU, M.	Chargé de cours	U.S.T. de Blida
Examineur	: Dr GHOUL, O.	Chargé de cours	C.U.de Chlef
Rapporteur	: Dr AIT MESSAOUDENE, N.	Maître de conférences	U.S.T. de Blida

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
 REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
 MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR & DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DE BLIDA

جامعة البليدة

INSTITUT DE MECANIQUE

معهد الميكانيك

MEMOIRE DE MAGISTER

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MAGISTER EN GENIE MECANIQUE

OPTION : ENERGETIQUE

THEME

**ETUDE DU RENDEMENT VOLUMETRIQUE D'UN NOUVEAU
 SYSTEME D'ADMISSION / ECHAPPEMENT POUR UN
 MOTEUR A COMBUSTION INTERNE**

Etudié par : M^{elle} BENOURED Ouahiba

Présenté devant le Jury constitué de :

Président	: Dr YOUBI, Z.	Maître de conférences	U.S.T. de Blida
Examineur	: Dr HARHAD, A.	Maître de conférences	U.S.T. de Blida
Examineur	: Dr BOUGHADAoui, M.	Chargé de cours	U.S.T. de Blida
Examineur	: Dr GHOUL, O.	Chargé de cours	C.U.de Chlef
Rapporteur	: Dr AIT MESSAOUDENE, N.	Maître de conférences	U.S.T. de Blida

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Dédicaces

A la mémoire de mon très cher père.

A la mémoire de ma belle sœur Maouiya.

A ma mère chérie celle qui m'a appris à lire et à écrire la première lettre alphabétique et qui ma soutenue et m'a encouragée à poursuivre mes études.

A mes frères et ma sœur mes belles - sœurs et mon beau-frère, ainsi qu'a tous mes neveux et mes nièces.

A tous ceux qui m'ont légué le sens du savoir, de la science et de la connaissance.

Je dédie mes honneurs

et mes remerciements.

Remerciements

Je tiens à remercier vivement, Monsieur le professeur Nour-eddine Ait- MESSAOUDENE, pour son dévouement et sa compréhension. Les discussions que nous avons eues avec lui ont toujours été profitables pour nous.

Notre gratitude va de plus à tous les enseignants qui ont contribué à notre formation dès notre première année scolaire.

Que Messieurs SASSI et AGOUNNE responsable du laboratoire moteur et de soudage trouve ici le témoignage de nos sincères reconnaissances.

Nous remercierons tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce humble travail.

Résumé

Dans le but de contribuer à l'amélioration des performances dans les moteurs à combustion interne, un nouveau système de distribution du type sans soupape a été proposé. Ce système est constitué de deux tubes rotatifs munis de lumières disposées au niveau de la culasse parallèlement à l'axe du vilebrequin assurant respectivement l'admission et l'échappement. Ces deux tubes tournent à la moitié vitesse de celle du vilebrequin. Une étude préliminaire a été faite, elle a montré que ce système dispose d'une section de passage des gaz assez appréciable par comparaison au système classique à soupape. Ceci nous a conduit à compléter et à approfondir cette étude en analysant un des facteurs de performance caractérisant la phase d'admission à savoir le rendement volumétrique.

Pour ce faire, une étude expérimentale et comparative a été réalisée en utilisant les deux modes de distribution afin de prouver l'efficacité et la qualité de cette nouvelle technique de distribution dite à tube rotatif à celle de la distribution classique dite à soupape.

L'hypothèse de ce travail est que l'évolution à l'intérieur du cylindre est adiabatique et isentropique. Les résultats obtenus semblent satisfaisants et confirment l'amélioration de performance de cette nouvelle technique de distribution.

ملخص

قصد المساهمة في تحسين نوعية المحركات ذات الاحتراق الداخلي - تقنية جديدة اقترحت في نظام توزيع الغازات أثناء عملية إدخال وانفلات الهواء - يتكون هذا النظام من أنبوبين أسطوانيين الدوارة ، مزودين بمنفذ ، موضوعين على رأس اسطوانة المحرك و يوازيان حامل محور المدور و يقومان على الترتيب بعملية إدخال وانفلات الغازات. كما أن هذين الأنبوبين يدوران بمنتصف سرعة المدور.

أفرزت دراسة أولية أن هذا النظام الجديد للتوزيع يتمتع بمساحة معتبرة لمرور الغازات أثناء مرحلة الإدخال ، مما دفعنا للاهتمام و التعمق أكثر لتحليل هذه المرحلة و دراسة أحد عوامل النوعية و المتمثل في المرود الحجمي.

للبرهان على فاعلية هذا النظام المقترح ، أقيمت تجربة واستعملت فيها كل من التقنية الجديدة و التقليدية (المعروفة بالصمامات). أما الفرضية المستعملة أثناء الدراسة هي اعتبار أن جريان الهواء داخل اسطوانة المحرك اديباتية و أن القصور الحراري ثابت ، والنتائج المحصل عليها كانت جد مرضية مما أكدت لنا نجاعة و كفاءة هذه التقنية الجديدة .

Abstract

A new exhaust and admission system without valves is being proposed in order to increase the performance of internal combustion engines. The system is composed of two tubes fitted with holes. The two tubes rotate in the head, parallel to the motor shaft and with half speed of the latter. A preliminary study has shown that this system offers a better passage for the intake or exhaust gases compared with the classical valve system. This leads us to compete and go deeper into this present study by analysing one of the performance factors which characterises the admission phase, that is to say the volumetric efficiency.

To do this, an experimental and comparative study has been conducted in order to show the improvement of in the intake phase with the new valveless system compared to the classical valve system.

For the calculation, the flow in the cylinder is supposed isentropic and adiabatic. The results are satisfactory and confirm the improvement of the performance of the new intake/exhaust system for the intake phase.

Nomenclature

Symboles	Signification	Unités
A	Section géométrique d'admission des gaz	m ²
A _p	Section du piston	m ²
A _{eff}	Section effective de l'orifice d'admission	m ²
A _{effm}	Section effective moyenne de l'orifice d'admission	m ²
c ₀	Vitesse de propagation de l'air à la pression atmosphérique	m/s
c	Vitesse de propagation de l'air	m/s
D _t	Diamètre du tube rotatif	m
D _p	Diamètre du piston	m
D	Diamètre de la canalisation	m
g	Accélération de la pesanteur	m/s ²
h	Levée de la soupape	m
L	Longueur de l'orifice d'admission	m
M _s	Index de Mach	
M _{in}	Mach moyen	
N	Vitesse de rotation du moteur	tr/min
p ₀	Pression atmosphérique	N/m ²
p	Pression à l'intérieur du cylindre	
Q _v	Débit volumétrique	m ³ /s
r _c	Rapport de compression	
R	Rayon de la manivelle	m
S	Section du cylindre	m ²
s _d	Section du diaphragme	m ²
s ₀	Section de référence	m ²
s _c	Section équivalente	m ²
T	Température absolue de l'air dans le cylindre	°C
t	Temps	s
U _p	Vitesse moyenne du piston	m/s
U	Vitesse	

V_p	Volume de la cylindrée	m^3
V_m	Volume mort	m^3
V	Volume d'air admis dans le cylindre	m^3
x	Déplacement du piston	m
β	Demi angle au sommet de l'orifice de la culasse	deg
γ	Demi angle au sommet de l'orifice du tube d'admission	deg
θ	Angle de rotation du vilebrequin	deg
ρ	Densité	
ρ_0	Densité à la pression atmosphérique	
ρ_f	Densité du fluide contenu dans le manomètre	
ΔH_d	Différence de hauteur au niveau du diaphragme	
ΔH_c	Différence de hauteur au niveau de la capacité	
σ	Coefficient de débit	
η_v	Rendement volumétrique	%

Indices

OA	Ouverture de l'orifice d'admission
FA	Fermeture l'orifice d'admission
C	Soupape classique
R	Tube rotatif

SOMMAIRE

Chapitre 1	Introduction	1
Chapitre 2	Etude des modes de distribution	4
2.1. Généralités sur les moteurs thermiques		4
2.1.1. Moteur à combustion externe		4
2.1.2. Moteur à combustion interne		5
2.2. Distribution dans les moteurs à quatre temps		9
2.2.1 Généralités		9
2.2.2 Différents types de distribution		10
2.2.3 La loi de levée		15
2.2.4 Efficacité		16
2.2.5 Section de passage des gaz à la soupape		17
Chapitre 3	Etude du nouveau système d'admission	21
3.1 Généralités		21
3.2 Géométrie et fonctionnement		21
3.3 Etanchéité du système		22
3.4 Culasse		24
3.5 Refroidissement		25
3.6 Lubrification		27
3.7 Cinématique		28
3.8 Surface des gaz		30
3.8.1- Section de passage des gaz en fonction de l'angle du vilebrequin		31
Chapitre 4	Etude de la phase d'admission	34
4.1 Généralités		34
4.2 Etude du remplissage		35
4.2.1 Hypothèses de calculs		35
4.2.2 Evaluation du débit massique		36
4.2.3 Expression du volume disponible aux gaz admis		37
4.2.4 Evolution de la pression dans le cylindre		39

4.2.5	Taux de remplissage	40
4.3	Paramètres influant sur le remplissage	41
4.3.1	Effets pulsatoires	41
4.3.2	Effets d'inertie	42
4.3.3	Index de Mach	43
<hr/>		
Chapitre 5	Expérimentation	48
<hr/>		
5.1	Introduction	48
5.2	Présentation du banc d'essais	48
5.2.1	Tube à tester	50
5.2.1.1	Soupape classique	50
5.2.1.2	Tube rotatif	52
5.2.1.3	Dimensionnement du tube rotatif	56
5.2.2	Capacité de tranquillisation	57
5.2.3	Organe déprimogène	57
5.2.4	La soufflerie	61
5.3	Méthode de calcul	62
5.3.1	Coefficient de débit rapporté à l'orifice d'admission	62
5.3.2	Coefficient de débit rapporté au diaphragme	64
5.4	Essais et méthodes de mesures	66
<hr/>		
Chapitre 6	Résultats et comparaison	68
<hr/>		
6.1	Variation de la section géométrique de passage des gaz admis	68
6.1.1	Distribution à soupape	68
6.1.2	Distribution à tube rotatif	68
6.2	Variation du coefficient de débit	69
6.2.1	Distribution à soupape	69
6.2.1	Distribution à soupape	69
6.3	Variation de la section effective de passage des gaz admis	70
6.4	Evolution de la pression dans le cylindre du moteur	70
6.5	Evolution de la masse admise et rendement volumétrique	71
<hr/>		
Chapitre 7	Conclusions	83
<hr/>		
Annexe 1	Etalonnage du diaphragme	86

C h a p i t r e

1

Introduction

INTRODUCTION

De part la diversité de leur fonction et de leur utilisation, les moteurs à combustion interne continuent à occuper une place majeure dans le domaine des transports. Si dans la propulsion aérienne ces moteurs ont été détrônés par les turbines à gaz, ils continuent de régner presque sans partage aussi bien dans le domaine de l'automobile que dans le domaine de la traction fluviale. De nombreuses études ont été développées en cette fin du XX^e siècle afin d'améliorer leur performance, leur sécurité et leur effet sur la protection de l'environnement, traduite par l'atténuation du degré de pollution et de bruit [1,2].

Dans cet axe de recherche et d'innovation et dans le but d'améliorer les performances du moteur, un nouveau système d'admission/échappement dans les moteurs à combustions internes a été proposé [3]. Ce système est constitué de deux tubes tournants munis de lumières disposées au niveau de la culasse parallèlement à l'axe du vilebrequin, assurant respectivement l'admission et l'échappement. Ces deux tubes tournent à la moitié de la vitesse du vilebrequin.

Un bon rendement thermique est assuré par une bonne compression dont il en résulte une meilleure combustion. Par conséquent, ce système exige une bonne étanchéité. Pour cela, deux types d'étanchéité sont respectivement assurés :

- L'étanchéité radiale : assurée par des segments rectilignes ou racleurs, son rôle est d'empêcher le phénomène de retour des gaz causé par la dispersion des gaz admis ou évacués entre le tube rotatif et la culasse.
- L'étanchéité axiale : assurée par des segments circulaires, son rôle est d'empêcher les fuites de gaz sortant du cylindre pendant la phase de compression par l'intermédiaire des jeux existants entre le tube rotatif et la culasse.

L'efficacité de cette étanchéité a été prouvée par une étude expérimentale qui a donnée des résultats satisfaisants [4].

La conception du système proposé, en comparaison aux systèmes déjà existants dispose d'une section de passage des gaz assez appréciable, ce qui nous a conduit à focaliser notre

C h a p i t r e

2

Etude des modes de distribution

ETUDE DES MODES DE DISTRIBUTION

2.1. Généralités sur les moteurs thermiques

Généralement, le terme " moteur thermique " s'applique à toute machine destinée à la conversion de la chaleur en travail, quels que soient leur mode de fonctionnement et la nature du fluide utilisé pour cette conversion.

On distingue deux catégories de moteur thermique :

- moteur à combustion externe ;
- moteur à combustion interne.

2.1.1. Moteur à combustion externe

En 1816 un écossais Robert Stirling breveta le moteur à air chaud [5]. Le fonctionnement de ce moteur repose sur les principes suivants (fig2.1) :

I - le piston est au point le plus bas, le balayeur est au point le plus haut, le gaz se trouve dans la chambre froide.

II - le balayeur est resté au point le plus haut, le piston a comprimé le gaz à basse température.

III - le piston est resté au point le plus haut, le balayeur a refoulé le gaz dans la chambre chaude par l'intermédiaire du refroidisseur, du régénérateur et du réchauffeur.

IV - le gaz chaud est détendu, le balayeur et le piston sont arrivés ensemble au point le plus bas. Ensuite le balayeur chasse le gaz dans la chambre froide par l'intermédiaire du réchauffeur, du régénérateur et du refroidisseur, tandis que le piston reste immobile, de sorte que la position I est atteinte à nouveau.

Le gaz évoluant en circuit fermé est de l'hélium ou de l'hydrogène. L'apport de chaleur extérieure permet d'utiliser plusieurs sources d'énergies sans qu'il soit nécessaire d'apporter des modifications substantielles. Parmi, les combustibles liquides ou gazeux utilisables, on peut citer : l'alcool, le mazout, gaz naturel etc.

L'idée fut reprise par Philips pour les utiliser comme des groupes propulseurs pour certains véhicules automobiles.

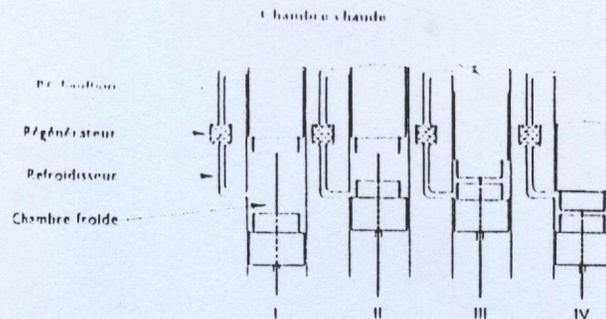


Fig. 2.1 – Schéma de principe du cycle de Stirling

2.1.2. Moteur à combustion interne

Les moteurs classés dans cette catégorie sont en nombre de trois :

- turbine à gaz ;
- moteur à piston rotatif ;
- moteur à piston alternatif.

a/ Turbine à gaz :

Le principe des turbines à gaz remonte à un temps immémorial. Le premier brevet relatif à ce type de machine fut délivré en 1791 à l'Anglais Jhon Barber.

De nombreux chercheurs ont contribué à son évolution et ce n'est qu'en 1940, que son application en automobile à vue le jour par des ingénieurs de la firme Rover. La première voiture dotée de ce principe était une Rover. Elle fut présentée en public en 1950.

Ce furent ensuite aux compagnies Ford et Général Motors de prendre le relais et s'y intéresser d'avantage.

Actuellement et à titre d'indication, les turbines à gaz d'automobile développent des puissances comprises entre 100 et 500 chevaux.

b/ Moteur rotatif Wankel

L'histoire de ce moteur remonte au XIV^e siècle. Ce fut l'ingénieur italien Ramelli qui publia en 1588 son livre sur les machines à piston rotatif. Beaucoup de savants se sont attachés à l'évolution de ce type de moteur. Les noms tels que : Keppler, 1760, Watt, 1782, et enfin Felix Wankel, 1926, qui a marqué son nom sur ce type de moteur[5].

Le principe de base du moteur de Wankel est à allumage commandé et fonctionne selon le cycle de Beau Rochas. Ce moteur est à son début de carrière, mais un succès probable peut-être envisagé vu les avantages qu'il présente :

- niveaux de vibration et de bruit faible ;
- encombrement et poids réduits.

Actuellement, beaucoup de firmes se sont intéressées à ce type de moteur dont la firme japonaise «MAZDA». Mais compte tenu du prix de revient excessif qu'il occasionne, cette dernière l'a mis en veilleuse en attendant une amélioration de sa compétitivité commerciale.

c / Moteur à mouvement alternatif

Le moteur à combustion interne à piston à mouvement alternatif est très ancien, au moins dans ses principes de fonctionnement.

L'idée de ces moteurs thermiques a fait l'objet des brevets pris par Hygon (1858) et Lenoir (1860). Le cycle, qu'on appelle habituellement cycle de Lenoir, est à deux temps mais ne comporte pas de compression préalable. Le moteur de Lenoir avait un rendement très bas, du fait de l'absence de cette dernière opération, et ne présente plus actuellement qu'un intérêt historique.

C'est Beau de Rochas qui a conçu le moteur à explosion ou l'allumage du combustible est précédé d'une compression de l'air comburant (1862). Son cycle, qui est à quatre temps, a été appliqué pour la première fois par OTTO (1867), et c'est encore lui qui caractérise le fonctionnement de la grande majorité des moteurs à explosion modernes .

Dans les moteurs à explosion, le combustible, qui est mélangé à de l'air préalablement comprimé, est allumé au moyen d'une étincelle produite par une bougie électrique ; l'allumage provoque un fort accroissement de pression et, par conséquent, une

poussée importante sur le piston. En fait, il ne s'agit là que d'une désignation conventionnelle, car la vitesse de propagation de la flamme dans un tel moteur est beaucoup plus faible que celle qui a lieu dans une combustion réelle. Ces moteurs sont également appelés moteurs à volume constant car, dans leur cycle théorique, la combustion est considérée comme instantanée et correspond, par conséquent, à une position fixe du piston, donc à une valeur fixe du volume occupé par le gaz [6].

Avec le moteur Diesel, une ère nouvelle s'ouvre pour les moteurs à combustion interne. Le brevet de Rudolf Diesel (1892) porte sur l'imagination et la conception d'un moteur à très forte compression doté d'un dispositif envoyant dans le cylindre, ou règne en fin de compression une température comprise entre 500 et 650°C, une quantité précisément dosé de combustible qui s'enflamme spontanément en arrivant au contact de l'air brûlant. Ainsi, le fonctionnement de ce moteur n'exige aucun dispositif d'allumage telle qu'une bougie, mais sous l'effet de l'échauffement de l'air dû à une forte compression de celui-ci, le combustible est introduit progressivement, et la combustion a lieu, au moins en partie, sous une pression invariable [7].

On divise habituellement les moteurs à combustion interne en deux classes. Cette classification est fondée sur le nombre de tours nécessaire pour la réalisation du cycle thermodynamique. Chaque tour du vilebrequin correspond évidemment à deux courses du piston (une course de chaque sens) ; or aussi bien dans le cas d'un moteur à volume constant que dans celui d'un moteur à pression constante, le cycle thermodynamique peut être décrit soit pendant un seul tour du vilebrequin (c'est à dire deux courses du piston), soit pendant deux tour (c'est à dire quatre courses du piston). On dit, dans le premier cas, le moteur est à deux temps et dans le second, qu'il est à quatre temps. Les premiers moteurs thermiques, à volume constant ou à pression constante, étaient presque tous à quatre temps ; actuellement, les deux types de moteurs sont couramment employés.

La figure 2.2 montre schématiquement la position des différents organes du moteur correspondant au quatre temps du cycle. Le moteur comporte un cylindre dans lequel se déplace le piston qui, par l'intermédiaire d'un mécanisme bielle – manivelle, fait tourner l'arbre du vilebrequin. Dans sa partie supérieure, le cylindre est muni d'une soupape d'admission, d'une soupape d'échappement et d'une bougie d'allumage.

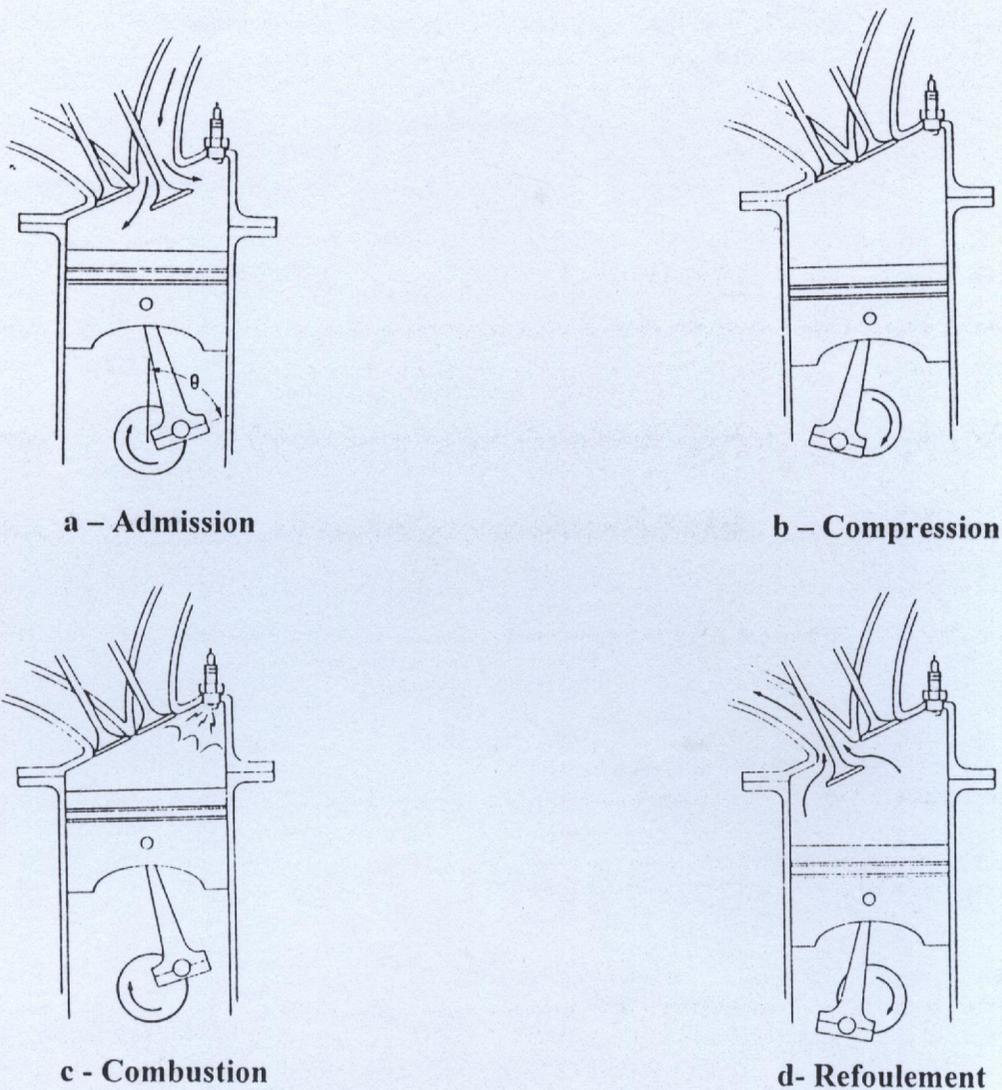


Fig. 2.2 – Schéma de principe du cycle à 4 temps

- **Premier temps - admission** : pendant cette opération, la soupape d'admission est ouverte, le mélange carburant est aspiré dans le cylindre. Le piston descend au point le plus bas (point mort bas) créant ainsi une dépression dans l'espace mort compris entre la partie supérieure de la soupape et le fond de la culasse.
- **Deuxième temps - compression** : la soupape d'admission se ferme, la soupape d'échappement repose toujours sur son siège. Le piston remonte au point le plus haut (point mort haut) en comprimant le mélange carburant dans le volume mort.

- **Troisième temps - combustion** : les deux soupapes sont fermées, une étincelle produite par la bougie enflamme le mélange comprimé ; c'est l'explosion. Ce phénomène repousse le piston vers le bas et les gaz subissent ainsi une détente.
- **Quatrième temps - échappement** : la soupape d'échappement s'ouvre, dans sa course ascendante le piston refoule les gaz brûlés vers l'extérieur du cylindre, ce qui correspond à un nouveau cycle.

2.2 Distribution dans les moteurs à quatre temps

2.2.1. Généralités

La distribution joue un rôle déterminant en ce qui concerne les performances du moteur. Elle définit la perméabilité du moteur et par conséquent son remplissage en fonction du régime. Elle doit permettre donc une évacuation aussi complète que possible des gaz brûlés et surtout l'admission aussi importante que possible de fluide frais :

- gaz carburé, s'il s'agit d'un moteur à explosion à carburateur ou à injection directe d'essence ;
- air pur, s'il s'agit d'un moteur Diesel ou à injection directe d'essence.

A un régime de rotation donné, surtout pour des grandes vitesses de rotation, il est d'ailleurs évident que le but que l'on veut atteindre peut être d'autant plus parfaitement approché que [8] :

- les orifices d'admission et d'échappement sont plus grand et mieux profilés du point de vue aérodynamique ;
- les orifices s'ouvrent et se ferment plus rapidement ;
- les moments choisis pour l'ouverture et la fermeture de l'admission et de l'échappement sont mieux adaptés au volume du cylindre considéré, à la vitesse de rotation dont il s'agit et aux dimensions des tubulures d'admissions et d'échappements considérés.

C'est la réalisation, aussi parfaite que possible de ces trois conditions que nous venons d'énoncer qui détermine en fait la qualité et le niveau technique de chaque distribution du point de vue des possibilités de puissance du moteur considéré. C'est en vertu de ces considérations que les distributions sans soupapes se montrent en général, plus

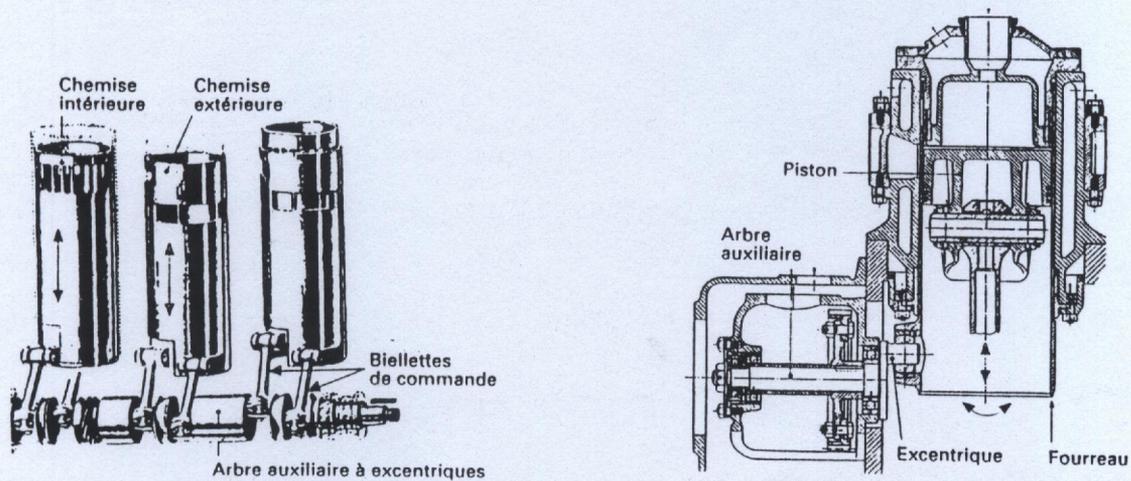
efficaces pour assurer l'écoulement des gaz à l'admission ou à l'échappement ou pendant le balayage que les distributions à soupapes.

2.2.2. Différents types de distribution

Depuis la conception des premiers moteurs thermiques, de nombreux systèmes de distributions ont été utilisés. Cependant, la recherche de puissances spécifiques toujours plus élevées, d'une fiabilité accrue, la diminution des coûts de production ont évincé successivement la plupart de ces solutions. Nous retenons, à titre d'indication, les distributions suivantes [8] :

a/ Distribution à chemises coulissantes et fourreaux louvoyants

Ces deux types de distribution appartiennent à la distribution sans soupapes, elles utilisent des lumières dans les parois du cylindre dont l'ouverture et la fermeture sont contrôlées non pas par le piston mais par une ou deux chemises mobiles, de faible épaisseur, coaxiales et guidées dans le cylindre.



a) Moteur automobile Panhard 4 cylindre à chemises coulissantes.

b) Moteur expérimental à Fourreau louvoyant.

Fig2.3 – Distribution par chemise et fourreau.

La cinématique de l'ensemble est contrôlée, à partir d'un arbre auxiliaire tournant à demi - régime du vilebrequin, par un système bielle - manivelle dans le cas des chemises coulissantes (fig.2.3a) ou par excentrique dans le cas des fourreaux louvoyants (fig2.3b).

Ces solutions ont été utilisées sur des moteurs à 4 temps pour l'automobile(Panhard) et pour l'aviation (Napier, Bristol). Les principaux inconvénients étaient le refroidissement du piston, le graissage des chemises ou fourreaux et les inerties élevées, sources de vibrations et de sollicitations mécaniques importantes.

b/ Distribution à mouvement rotatif

Cette distribution se distingue de celles décrites précédemment par le remplacement du mouvement de translation par un mouvement rotatif continu, ce qui permet de diminuer les vibrations et les contraintes mécaniques.

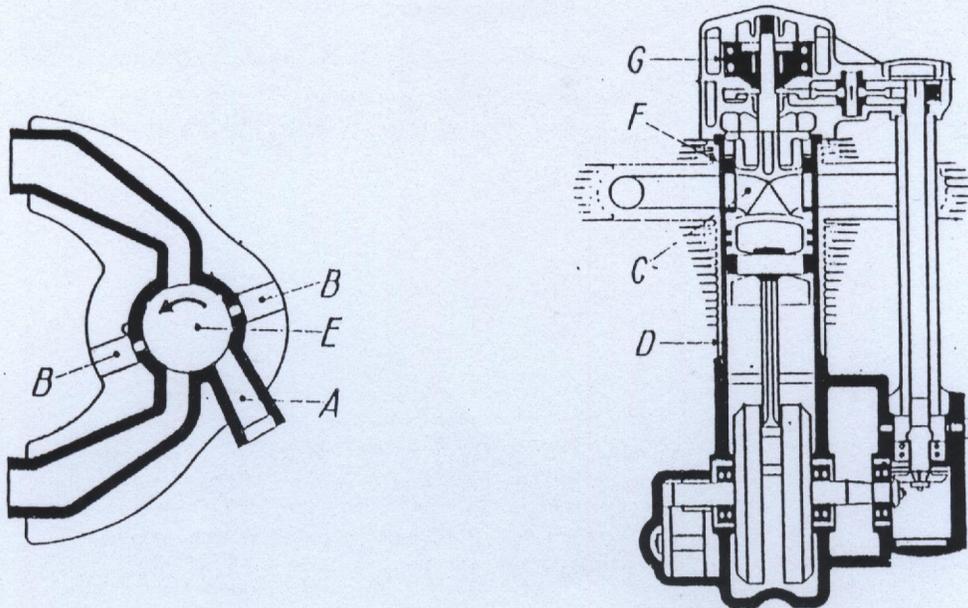
Cette solution consiste à appliquer sur le fond plat de la culasse, un disque tournant autour d'un axe à peu près confondu avec celui du cylindre, et comportant un orifice qui vient successivement se superposer à l'entrée de la canalisation d'échappement à l'aboutissement de la canalisation d'admission (pour rester ensuite obturé par son glissement sur une partie pleine du fond de culasse pendant la compression, la combustion et la détente). Cette idée a été reprise pendant la guerre 1939 – 1945 par les services d'études de Daimler-Benz pour la réalisation d'un moteur d'aviation à 12 cylindres en V.

En définitive, elle n'a pas été retenue du fait que la sécurité de fonctionnement n'a pu être portée au niveau nécessaire.

Une autre solution à tiroir animé d'une rotation de vitesse uniforme a été proposée par Croleak. Cette solution consiste, comme on le voit sur la figure 2.4, en une chemise rotative directement enfilée dans la partie supérieure du cylindre et permettant de mettre la chambre de combustion alternativement en communication avec les conduits d'admission et d'échappement.

Par conséquent, le système n'est pas viable pour les raisons suivantes :

- difficulté de réaliser une étanchéité correcte,
- risque d'usure et de grippage dus au mouvement de rotation dans des conditions de pressions et de températures élevées.



a) – Coupe par tête du cylindre

b) – Coupe longitudinale

Avec :

- A orifice unique d'admission
- B logement des bougies
- C chambre de combustion tout entière contenue dans le distributeur rotatif
Lequel est refroidi par un courant d'air
- D chemise du cylindre
- E tubulure d'échappement diamétralement opposée
- F boisseau rotatif vertical situé dans le haut du cylindre
- G butée à billes absorbant la poussée sur le distributeur

Fig.2.4 – Moteur à distribution sans soupapes système de Croleak

c/ Distribution à soupape

Actuellement, dans les moteurs à quatre temps, et en grande partie du fait que les orifices d'admission et d'échappement ne doivent s'ouvrir qu'une fois tous les deux tours, le type de distribution le plus fréquemment adopté est la distribution à soupapes.

A l'origine, les soupapes d'admission étaient non commandées, mais simplement ramenées vers la position de fermeture par un ressort plus ou moins flexible, on peut considérer que toute distribution à soupape pour le moteur à quatre temps, comporte aujourd'hui, tant pour l'admission que pour l'échappement :

- un arbre à came tournant à moitié vitesse de celle du vilebrequin ;
- un organe intermédiaire coulissant auquel l'arbre à came communique au moment voulu, un mouvement provoquant l'ouverture de la soupape en contrôlant son retour vers la position de fermeture ;
- une soupape opérant avec un siège généralement conique ;
- un ressort rappelant énergiquement la soupape vers sa position de fermeture .

Par contre, chaque soupape peut comporter trois dispositions principales par rapport aux cylindres :

- disposition latérale ;
- disposition en tête : la queue de la soupape étant orientée par rapport à la tête de soupape dans la direction opposée à celle de l'embellage;
- disposition inclinée : avec orientation de la queue de soupape encore plus ou moins opposée à celle de l'embellage , mais en formant un angle plus ou moins important avec la direction de l'axe du cylindre .

En ce qui concerne l'architecture, les principales variantes sont la disposition, le nombre de soupapes et le système de commande et de rappel. Les solutions les plus usuelles sont les suivantes [9] :

- **Distribution à attaque directe** avec la commande directe de soupape par la came via poussoir, c'est la solution qui adoptée pratiquement par tous les moteurs modernes (fig. 2.5) ;
- **Distribution à linguet ou basculeur** avec l'utilisation d'un composant intermédiaire ayant un mouvement oscillant (fig.2.6) ;
- **Distribution culbutée** avec la commande du basculeur par intermédiaire d'une tige et d'un poussoir supplémentaire (fig.2.7).

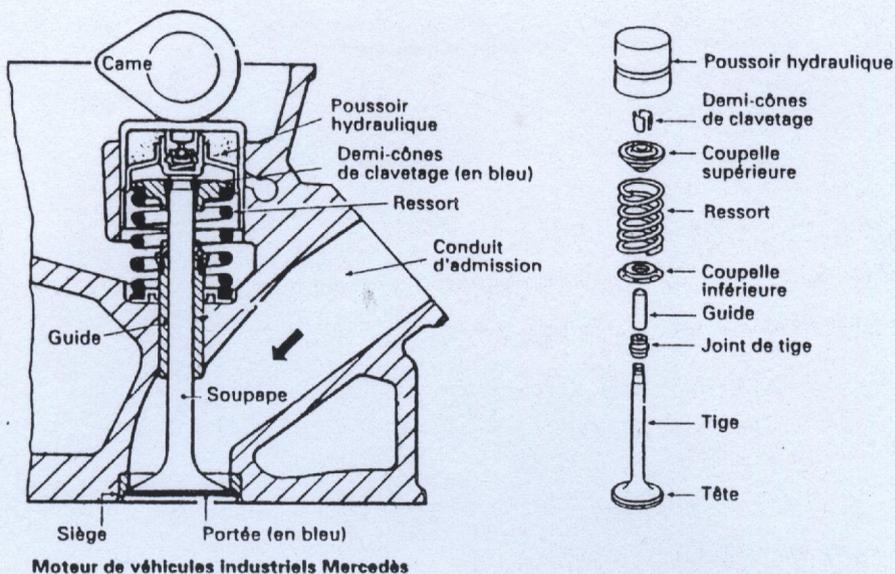


Fig.2.5 - Distribution à soupape en tête à attaque directe

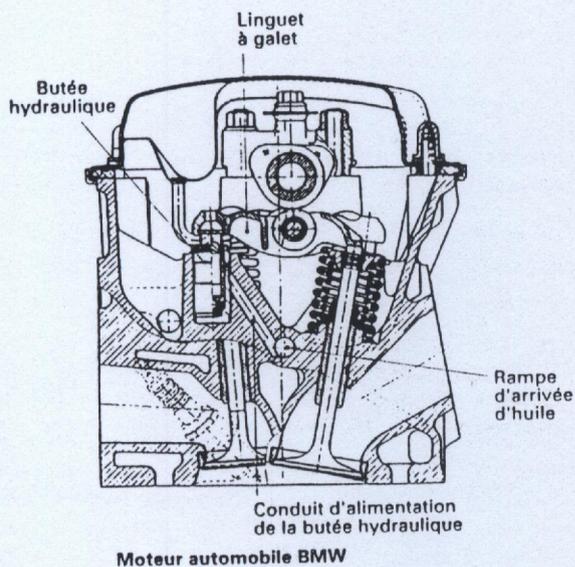


Fig.2.6 - Distribution à linguet

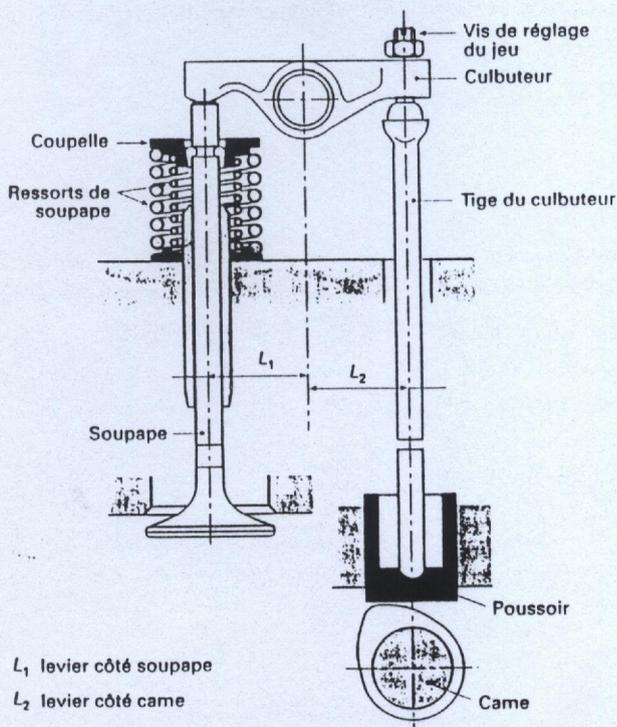


Fig.2.7- Distribution culbutée à arbre à came latéral

Le choix entre les différentes solutions résulte d'un compromis entre la puissance spécifique désirée et le coût de réalisation.

2.2.3. La loi de levée

La loi de levée de la soupape décrit le mouvement de la soupape en fonction de l'angle du vilebrequin, elle est aussi le facteur qui détermine l'évolution de la section de passage effective des gaz. La loi de levée de la soupape est décrite par des fonctions mathématiques qui permettent de satisfaire les conditions de continuités en tous points pour la levée, la vitesse et l'accélération, elles doivent être aussi compatibles avec un fonctionnement dynamique de la distribution acceptable. La vitesse étant nulle en début d'ouverture et également nulle à la levée maximale.

De nombreux modèles mathématiques ont été élaborés pour simuler la loi de levée en fonction de l'angle du vilebrequin. Dans notre présent travail nous avons opté pour le modèle de Torell "polydyne" [10] (fig.2.8) qui suffit de mentionner la levée maximale désirée et la variable c correspondante au demi - temps d'admission, la levée h en fonction de l'angle du vilebrequin θ est donné par :

$$h = h_{\max} + C_2\theta^2 + C_p\theta^p + C_q\theta^q + C_r\theta^r + C_s\theta^s \quad (2.1)$$

Où, p, q, r et s sont des constantes empiriques ($p=6, q=8, r=10, s=12$) et les coefficients C_2, C_p, C_q, C_r et C_s sont données par :

$$\begin{aligned} C_2 &= -pqrs.h_{\max} / [(p-2)(q-2)(r-2)(s-2)c^2] \\ C_p &= 2qrs.h_{\max} / [(p-2)(q-p)(r-p)(s-p)c^p] \\ C_q &= 2prs.h_{\max} / [(q-2)(q-2)(r-q)(s-q)(s-q)c^q] \\ C_r &= 2pqs.h_{\max} / [(r-2)(r-p)(r-q)(s-r)c^r] \\ C_s &= -2pqr.h_{\max} / [(s-2)(s-p)(s-q)(s-r)c^s] \end{aligned}$$

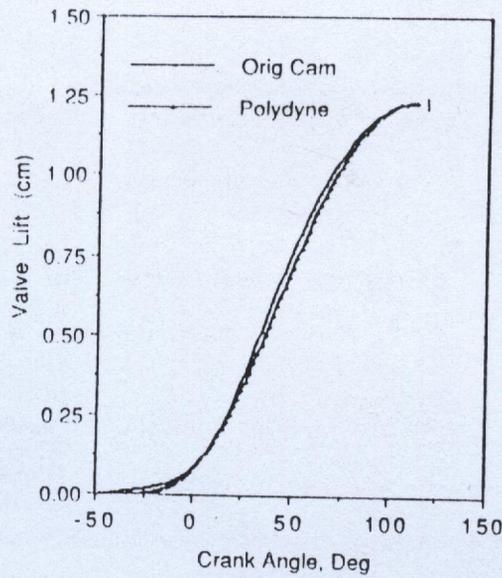


Fig. 2.8 – Simulation d’une loi de levée par la méthode polydyne [10]

Cependant, la vitesse et l'accélération des soupapes sont exprimées respectivement par les relations suivantes :

$$h' = 2C_2 \theta + pC_p \theta^{p-1} + qC_q \theta^{q-1} + sC_s \theta^{s-1} \tag{2.2}$$

$$h'' = 2C_2 + p(p-1)C_p \theta^{p-2} + q(q-1)C_q \theta^{q-2} + s(s-1)C_s \theta^{s-2} \tag{2.3}$$

On remarque lorsque $\theta=0$ $h'' = 2c_2$, cette valeur correspond à une accélération maximale négative de la soupape conformément au cas réel.

2.2.4. Efficacité

L'efficacité d'une loi est définie par le rapport entre l'aire sous la partie active de la loi réelle et l'aire du rectangle (Fig.2.9). L'expression mathématique de l'efficacité est la suivante [9] :

$$e = \frac{A_2}{A_1} = \frac{\int_{\theta_o}^{\theta_f} h d\theta}{(\theta_f - \theta_o) h_{max}} \tag{2.4}$$

En général, les valeurs usuelles d'efficacité sont comprises entre 0.55 et 0.6. L'efficacité est une grandeur utile pour comparer des soupapes ayant la même levée

maximale. Plus l'efficacité est élevée, plus la levée moyenne et la section débitante sont importantes.

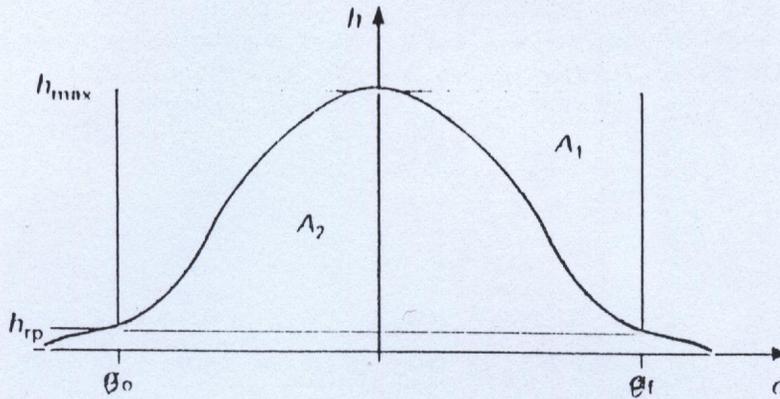


Fig. 2.9- Efficacité d'une loi de levée

Pour définir une loi de levée efficace, il faut que la vitesse maximale soit la plus grande possible et quelle soit obtenue le plutôt possible en début de levée. Ceci se traduit par :

- une accélération positive et élevée sur une courte durée,
- une accélération négative, au voisinage du sommet la plus faible que possible (en valeur absolue), sur une longue durée.

2.2.5. Section de passage des gaz à la soupape

La section débitante varie le long de la portée de la soupape. Elle est minimale au droit du diamètre minimal du siège. Pour une soupape de tête conique, de diamètre d_s , d'arête e , de levée h , présentant un angle de siège α . La section de passage des gaz entre la tête et le siège est comme suit [11] :

$$\text{A petite levée : } 0 < h < \frac{e}{\sin \alpha}$$

Pour une petite levée, la section minimale de passage des gaz correspond à la surface latérale d'un tronc de cône droit de génératrice (fig. 2.10)

$$BC = h \cos(\alpha) \quad (2.5)$$

et dont les bases ont pour diamètre respectifs d_s et :

$$d_s + 2CE = d_s + 2.BC \sin(\alpha) \quad (2.6)$$

et la surface minimale est donnée par :

$$Ac = \pi [d_s + h \cos(\alpha) \sin(\alpha)] h \cos(\alpha) \quad (2.7)$$

$$\text{à grande levée } h > \frac{e}{\sin(\alpha)}$$

A ce stade, la perpendiculaire en B à la portée de soupape ne rencontre plus le siège et la section minimale de passage des gaz devient la surface latérale du tronc de cône de génératrice BC_1 . C_1 correspond à la grande arête du siège.

$$BC_1 = \sqrt{BE^2 + C_1E^2} = \sqrt{h^2 + e^2 - 2he \sin(\alpha)} \quad (2.8)$$

le rayon du grand cercle de base devient :

$$\frac{d_s}{2} + C_1E = \frac{d_s}{2} + e \cos(\alpha) \quad (2.9)$$

Le rayon du petit cercle de base reste $d_s/2$.

d'où la section minimale de passage des gaz sera :

$$Ac = \pi \left(\frac{d_s}{2} + e \cos \alpha \right) \sqrt{h^2 + e^2 - 2he \sin \alpha} \quad (2.10)$$

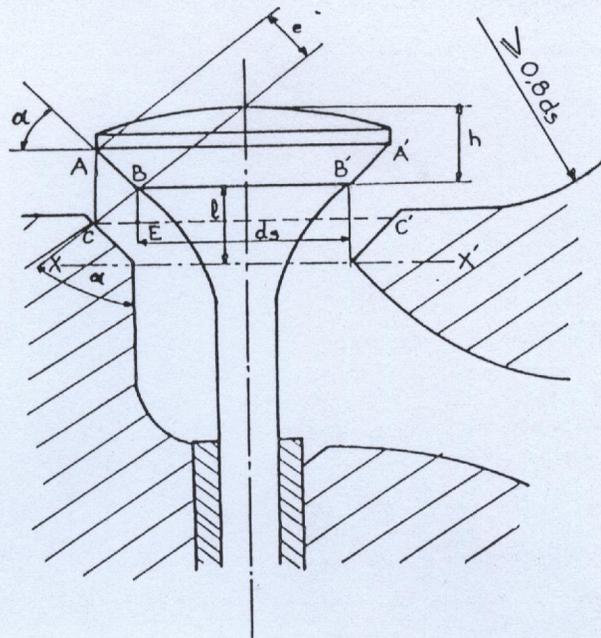


Fig.2.10 - Schéma de la section de passage des gaz

C h a p i t r e

3

*Etude du nouveau système de
distribution*

ETUDE DU NOUVEAU SYSTEME DE DISTRIBUTION

3.1. Généralités

Il est évident, que malgré le fonctionnement parfait auquel les moteurs thermiques sont parvenus, ils présentent quand même quelques inconvénients dus à leurs conceptions, à savoir :

- Le mouvement discontinu (alternatif) des soupapes ;
- L'échauffement trop important des têtes soupapes entraîne rapidement leurs usures.
- L'arbre à came très lourd et très coûteux.

C'est l'une des raisons qui nous a conduit à chercher des solutions dites sans soupape en dépit des propriétés d'étanchéité et de robustesse remarquable qui caractérisent les dispositifs à soupapes. La solution proposée est une distribution à tube rotatif [3].

3.2. Géométrie et fonctionnement

Sur le cylindre du moteur sont posés deux tubes munis d'orifices, tournant à la moitié vitesse de celle du vilebrequin et assurant respectivement l'admission et l'échappement.

Le tube d'admission ainsi conçu est alimenté à l'une de ses extrémités par le fluide frais, qui circule le long du tube. Le passage du fluide du tube rotatif au cylindre se fait par l'intermédiaire d'un orifice rectangulaire aux quatre coins arrondis pour diminuer toutes concentrations de contraintes. Ce dernier est appelé orifice d'alimentation (fig.3.1).

Ce même principe, est adopté pour l'échappement afin d'assurer la récupération des gaz brûlés du cylindre et leur évacuation vers l'extérieur.

Ces tubes rotatifs sont inclinés par rapport à l'axe du cylindre afin d'augmenter la longueur de leur orifice.

Le tube rotatif d'admission est en rotation par intermédiaire d'un arbre de petite dimension, lui-même, entraîné par une poulie, disposée à son extrémité, reliée au

vilebrequin par une courroie crantée. L'autre tube rotatif d'échappement est entraîné, à son tour, par le premier à l'aide d'un engrenage de rapport 1/1. L'admission et l'échappement ont lieu pendant la coïncidence des orifices disposés dans le tube avec ceux disposés dans la culasse en tête du cylindre.

Dans cette conception, le piston joue le même rôle dans l'aspiration de l'air ou le refoulement des gaz brûlés, comme dans le cas des soupapes classiques.

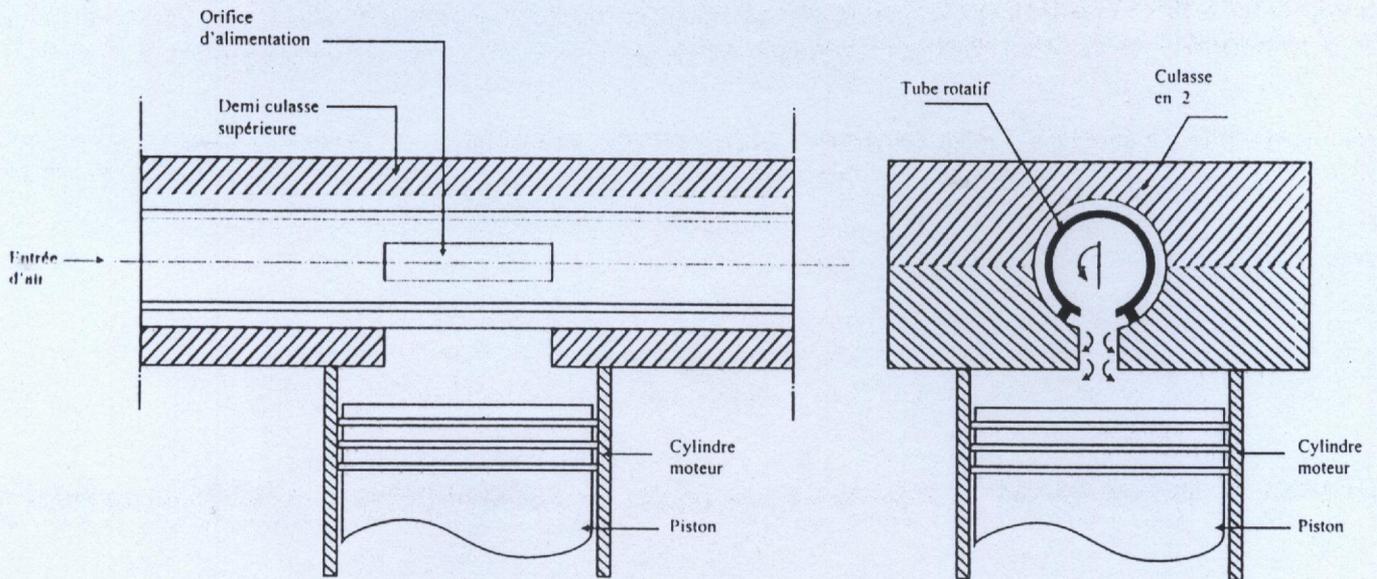


Fig. 3.1- Schéma du nouveau système de distribution

3.3. Etanchéité du système

Pour assurer un bon remplissage du cylindre. Ce système exige une bonne étanchéité. De ce fait, deux types d'étanchéité sont assurés.

- **L'étanchéité radiale** (fig. 3.2a, 3.2b) : assurée par des segments rectilignes à bord arrondis disposés dans des entailles usinées dans la culasse, le contact de ceux-ci avec le tube rotatif étant assuré par des ressorts posés dans les entailles.

Ces segments rectilignes ou racleurs ont pour rôle d'éviter le phénomène de retour des gaz une fois que la phase d'aspiration ou de refoulement est terminée.

- **L'étanchéité axiale** (fig. 3.2c) : assurée par des segments circulaires qui ont pour rôle de bloquer les fuites de gaz qui s'échappent hors du cylindre par l'intermédiaire du jeu existant entre le tube rotatif et la culasse. Ces déperditions engendrent un mauvais remplissage du cylindre du moteur ainsi que la carburation de l'huile de graissage.

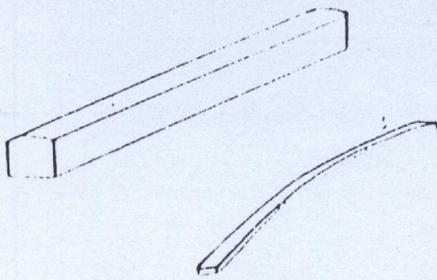


Fig. 3.2a - Segment rectiligne avec sa lame ressort

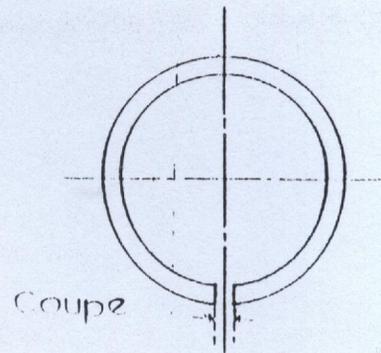


Fig. 3.2c - Segment circulaire

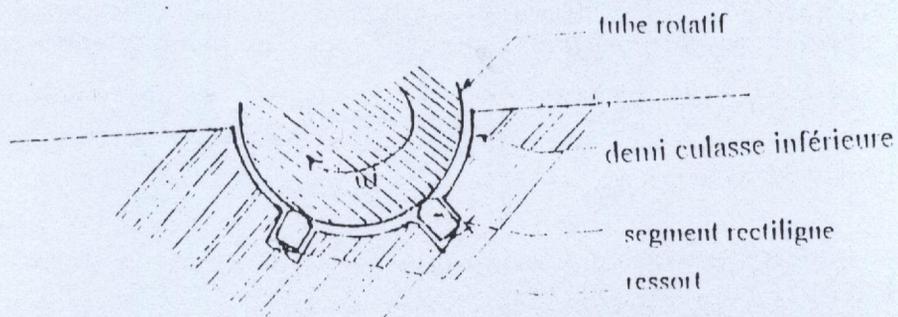


Fig. 3.2b - Logement des segments rectilignes

Ce système d'étanchéité a d'ailleurs déjà fait ces preuves dans les moteurs rotatifs de type Wankel dans des conditions beaucoup plus sévères où ils doivent assurer l'étanchéité à l'intérieur de la chambre de combustion et non pas à l'extérieur de celle-ci comme dans notre cas. Son adaptation à ce nouveau système de distribution a fait l'objet d'une étude expérimentale et les résultats sont satisfaisants[4].

3.4. La culasse

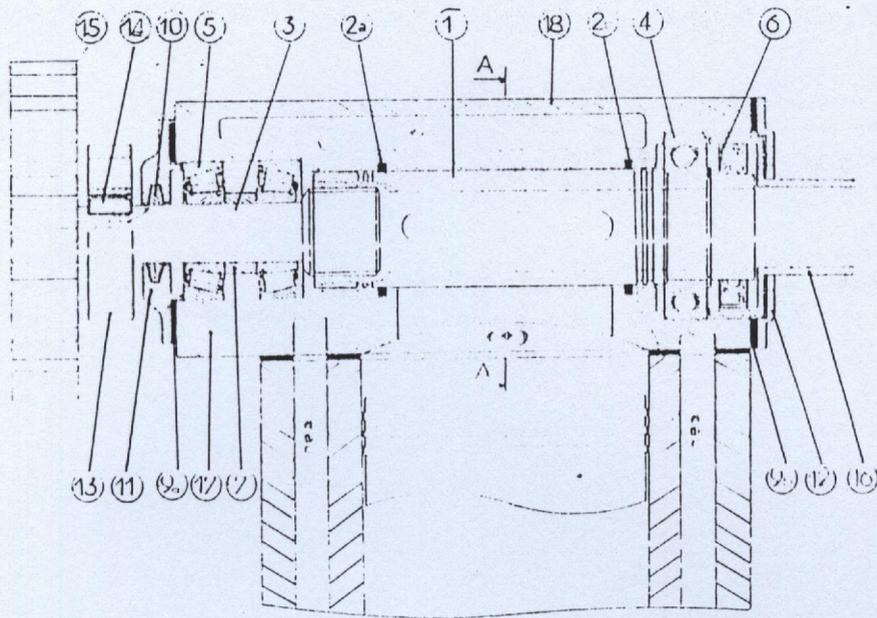
La culasse constitue la paroi fixe de la chambre de combustion, elle est portée sur la partie supérieure du bloc du cylindre. Comme les tubes rotatifs représentent eux-mêmes les conduits d'admission et d'échappement leur géométrie oblige de concevoir dans la culasse des logements cylindriques épousant parfaitement leurs formes tout en tenant compte du jeu entre les tubes rotatifs et la culasse.

Le débit d'air transvasé dans le cylindre se fait par l'intermédiaire des orifices dans la culasse semblables à ceux prévus dans les tubes rotatifs.

La culasse doit comporter des rainures dans le logement des tubes rotatifs pour pouvoir recevoir les segments d'étanchéité circulaires et rectilignes ainsi que leurs ressorts de maintien d'adhésion pour ces derniers. Ces rainures doivent assurer un bon jeu avec les segments.

La culasse doit aussi loger des roulements coniques sur lesquels l'arbre des tubes rotatifs doit reposer d'un côté et des roulements à billes de guidage et joins à lèvres dans l'autre côté. Enfin le logement de bougie doit aussi être prévu avec un espace nécessaire au montage et au démontage de la bougie. Pour les moteurs à injection le logement des injections doit aussi être prévu.

Enfin, pour éviter les problèmes de montage et le démontage et pour faciliter les opérations d'usinages, il nous a semblé préférable de concevoir une culasse comportant deux parties au lieu d'une culasse en un seul bloc qui va présenter énormément de problèmes (fig. 3.3).

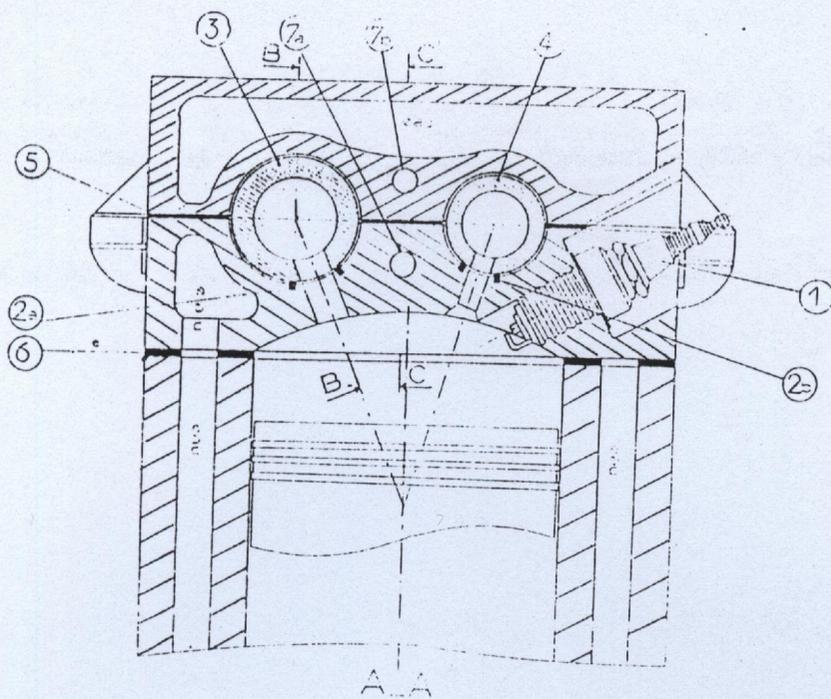


- | | |
|----------------------------------|------------------------------|
| 1- tube rotatif | 10- feutre |
| 2a , 2b- segment circulaire | 11, 12- flasque |
| 3- arbre | 13- roue dentée |
| 4-roulement à billes | 14- clavette longitudinale |
| 5-roulement à rouleaux coniques | 15- poulie |
| 6- joint cinétique à deux lèvres | 16- collecteur |
| 7- entretoise | 17- demi- culasse inférieure |
| 8- circlips | 18- demi- culasse supérieure |
| 9a, 9b - joint | |

Fig. 3.3 – Schéma des deux culasses

3.5. Refroidissement

On sait que le fonctionnement du moteur réalise un cycle dont les températures en certains points dépassent 2000°C. L'élévation de températures des parois du bloc cylindre et de la culasse entraîne une diminution du taux de remplissage dû au réchauffement excessif du mélange combustible ce qui réduit la puissance du moteur.



- | | |
|-------------------------------|---------------------------------------|
| 1- bougie | 5-joint de culasse |
| 2a 2b - segment rectiligne | 6- joint |
| 3- tube rotatif d'admission | 7a - trou de graissage d'alimentation |
| 4- tube rotatif d'échappement | 7b- trou de graissage de retour |

Fig. 3.4 – Dispositif de refroidissement

Pendant , il est indispensable de prévoir un dispositif de refroidissement au niveau du bloc cylindre et de la culasse pour limiter d'une part l'échauffement général à une valeur que l'on chiffre souvent à 120°C , et d'autre part pour que l'huile de graissage conserve ses propriétés lubrifiants .

De plus, pour avoir aussi un bon refroidissement, il faudra concevoir un circuit simple et peu ramifié et passant en même temps par les points les plus chauds de la culasse.

Le circuit que nous avons proposé à pour souci de répondre au plus à ces critères. Les chemises d'eau ont une forme géométrique qui ne présente pas beaucoup de ramifications ce qui devrait faciliter l'écoulement d'eau en maintenant une vitesse d'écoulement assez uniforme (voir fig. 3.3 et 3.4).

L'eau froide venant du ventilateur pénètre par la demi-culasse supérieure, traverse la partie supérieure des logements de tubes rotatifs jusqu'à la paroi latérale de la bougie, pénètre dans la chemise du piston par l'intermédiaire de trous. Ensuite, cette eau remonte dans la culasse par des trous de l'autre côté de la paroi latérale du côté de la pompe à eau et sort enfin par la paroi latérale côté demi-culasse inférieure (fig. 3.4).

3.6. Lubrification

Lorsque deux corps solides sont en contact et animés d'un mouvement de rotation, une partie de leurs efforts qui leur est appliqué est absorbée par des frottements, et tôt ou tard, il se produit un grippage. En introduisant un lubrifiant entre les deux surfaces de contacts les résistances passives, l'échauffement et l'usure sont nettement diminués.

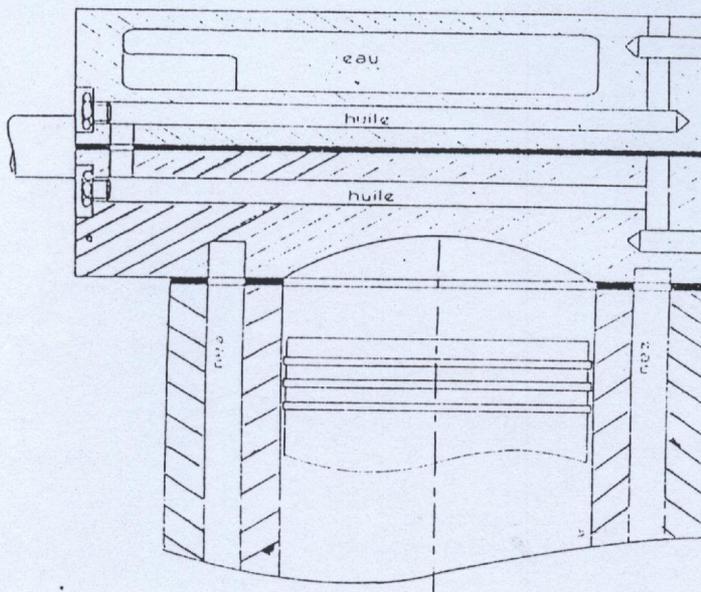


Fig. 3.5 – dispositif de graissage

Dans notre système les pièces qui doivent être nécessairement lubrifiées sont les roulements. Le dispositif de graissage que nous avons proposé comporte une conduite

extérieure venant de la pompe à huile qui est branché au trou d'entrée par un graisseur six pans. Une deuxième conduite de retour est branchée sur le trou de sortie toujours par un graisseur six pans. Le graissage se fait par l'intermédiaire de canaux de très faibles diamètres, 1.5 mm pour l'allée et 2 mm pour le retour, liant le trou de graissage aux points à lubrifier. Cette huile joue aussi un rôle important dans le refroidissement du pont entre les tubes rotatifs et la partie de la culasse soumise à de fortes concentrations de contraintes thermiques (fig. 3.5).

3.7. Cinématique

Soit θ l'angle de rotation du vilebrequin, 2γ l'angle au sommet de l'orifice du tube rotatif et 2β l'angle au sommet de l'orifice de la culasse. (Fig. 3.6).

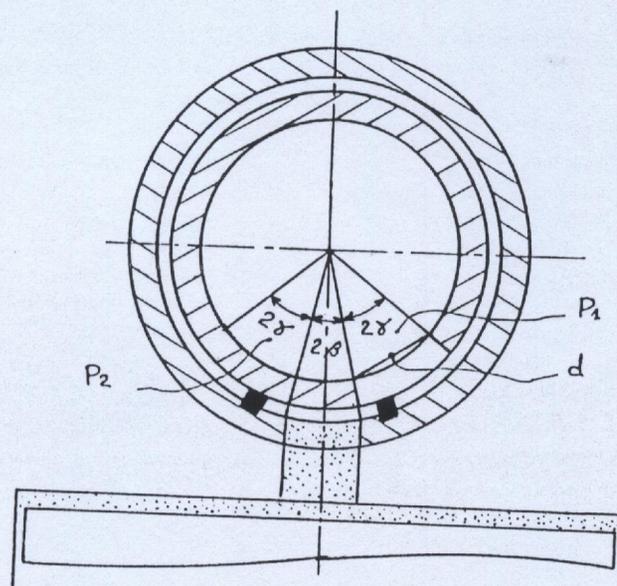


Fig. 3.6 - Schéma de principe

Si on désigne par α_1 l'angle entre la verticale et le centre de l'orifice du tube rotatif, et par P_1 , la position du tube rotatif pour laquelle, le piston est au point mort haut (P.M.H). On aura alors :

$$\theta_1 = 0^\circ \qquad \alpha_1 = 180^\circ - 2(\beta + \gamma) \qquad (3.1)$$

Après une rotation du vilebrequin de 180° , le piston descend au point mort bas (P.M.B). Le tube rotatif est fermé, il est dans la position P_2 , l'admission de l'air dans le cylindre est supposée complète. On aura ainsi :

$$\theta_2 = 180^\circ \qquad \alpha_2 = 180^\circ + 2(\beta + \gamma) \qquad (3.2)$$

La variation de l'angle du vilebrequin est :

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 = 180^\circ \qquad (3.3)$$

La variation du tube rotatif est :

$$\Delta\alpha = \alpha_2 - \alpha_1 = 2(\beta + \gamma) \qquad (3.4)$$

Le rapport des deux quantités est :

$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta\theta} = \frac{2(\beta + \gamma)}{180} \qquad (3.5)$$

Rapport que nous pouvons écrire autrement :

$$\frac{\Delta\alpha}{\Delta\theta} = \frac{\Delta\alpha}{\Delta t} \frac{\Delta t}{\Delta\theta} \qquad (3.6)$$

Si α' et ω représentent respectivement, la vitesse rotation du tube rotatif et celle du vilebrequin l'équation 3.6 devient :

$$\frac{\alpha'}{\omega} = \frac{(\beta + \gamma)}{90} \qquad (3.7)$$

Une course du piston correspond à :

$$\Delta\theta = 180^\circ \qquad \text{et} \qquad \Delta\alpha = 2(\beta + \gamma)$$

Et, un cycle correspond à 4 courses, donc :

$$\Delta\alpha /_{\text{cycle}} = 4.2(\beta + \gamma) = 8(\beta + \gamma) \quad (3.8)$$

Nous voulons que lorsque le vilebrequin fait deux tours, le tube rotatif fera un seule tour c'est à dire :

$$8(\beta + \gamma) = 360^\circ$$

D'où :

$$\beta + \gamma = 45^\circ \quad (3.9)$$

Pour des orifices semblables ,on aura :

$$\beta = \gamma = 22.5^\circ \quad (3.10)$$

3.8. Surface de passage des gaz

Pour le nouveau système, la section de l'orifice est rectangulaire au milieu et demi-circulaire aux extrémités. (Fig. 3.7).

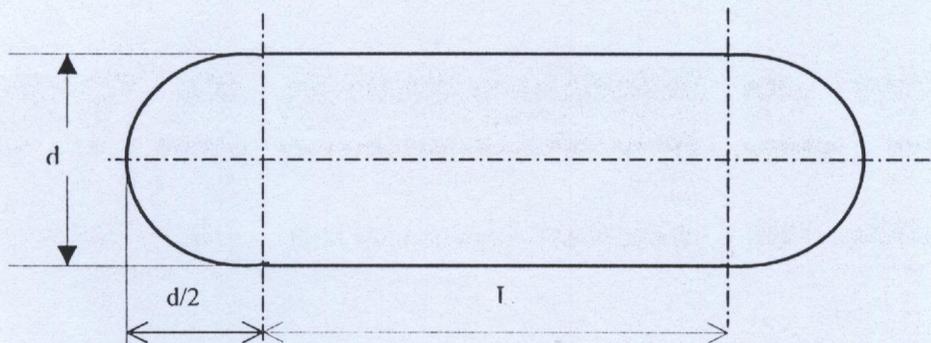


Fig. 3.7 - Orifice du nouveau système

La surface offerte aux gaz est :

$$A_R = L.d + \frac{\pi.d^2}{4} \quad (3.11)$$

Avec : L Longueur de l'orifice

- d La corde
 D_t diamètre intérieur du tube rotatif

Comme : $d = D_t \cdot \sin \gamma$ (3.12)

Donc: $A_R = L \cdot D_t \cdot \sin \gamma + \pi \frac{(D_t \sin \gamma)^2}{4}$ (3.13)

3.8.1. Section de passage des gaz en fonction de l'angle du vilebrequin

La section effective de passage des gaz, pendant la phase d'admission, est égale à l'intersection de l'orifice du tube rotatif avec celui du tube culasse (fig. 3.8).

$$A_R(\xi) = L \cdot d' + \pi \frac{d'^2}{4} \quad (3.14)$$

d' : représente la corde de l'arc dont l'angle au sommet est égale ξ .

$$d'^2 = D_t \cdot \sin\left(\frac{\xi}{2}\right) \quad (3.15)$$

Avec :

$$\xi = \alpha_1 - \alpha_0 = 0^\circ \text{ à } 45^\circ$$

$$A_R(\xi) = L \cdot D_t \cdot \sin(\xi/2) + \pi \frac{[D_t \cdot \sin(\xi/2)]^2}{4} \quad (3.16)$$

$$A_R(\alpha) = L \cdot D_t \cdot \sin\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}\right) + \pi \frac{\left[D_t \cdot \sin\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_0}{2}\right)\right]^2}{4} \quad (3.17)$$

or :

$$\alpha_1 - \alpha_0 = \frac{\theta}{2} = \frac{180 \omega \cdot t}{\pi \cdot 2}$$

- Avec θ angle de rotation du vilebrequin ;
 ω vitesse de rotation du moteur exprimée en rad/s

D'où :

$$A_R(t) = L.D_t \sin\left(\frac{180 \omega.t}{\pi 4}\right) + \pi \frac{\left[D_t \sin\left(\frac{180 \omega.t}{\pi 4}\right)\right]^2}{4} \quad (3.18)$$

Ainsi, la section effective de passage des gaz en fonction de l'angle du vilebrequin est donnée par :

$$A_R(\theta) = L.D_t \sin\left(\frac{\theta}{2}\right) + \pi \frac{[D_t \sin(\theta/2)]^2}{4} \quad (3.19)$$

Avec :

$$\theta = 0^\circ \text{ à } 90^\circ$$

Cependant, la vitesse d'ouverture de la section effective de passage des gaz admis à travers le tube rotatif est obtenue en dérivant une seule fois la relation (3.19)

L'équation de la vitesse d'ouverture de la section d'admission est donnée par la relation suivante :

$$\frac{dA_R(\theta)}{dt} = L.D_t \cdot \frac{180 \omega}{\pi 4} \cos\left(\frac{180 \omega.t}{\pi 4}\right) + \frac{\pi D_t^2}{2} \sin\left(\frac{180 \omega.t}{\pi 4}\right) \cos\left(\frac{180 \omega.t}{\pi 4}\right) \quad (3.20)$$

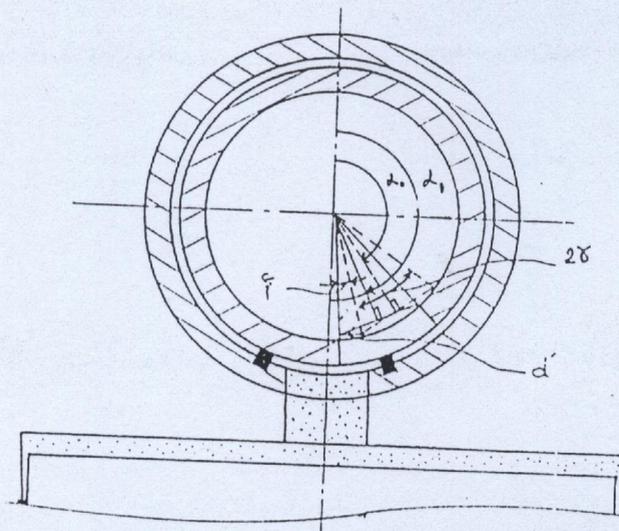


Fig.3.8

C h a p i t r e

4

Etude de la phase d'admission

ETUDE DE LA PHASE D'ADMISSION

4.1. Généralités

Le phénomène d'admission des gaz vers les cylindres est généralement un peu plus simple dans le moteur Diesel que dans le moteur à explosion. Ceci est dû au fait que le fluide entrant est de l'air pur et qui peut être puisé directement dans l'atmosphère ou simplement à travers un filtre ou un silencieux d'admission avec interposition éventuelle de tubulures courtes et de fortes sections.

C'est pour cette raison, qu'il nous a semblé préférable, dans cette présente étude, de considérer le calcul de l'admission dans la théorie des moteurs Diesel. Cependant, il est bien évident que le problème de l'admission n'est pas très différent dans le moteur à explosion, par rapport à ce qu'il est dans le moteur Diesel et qu'il peut même se présenter sous une forme à peu près identique si on a affaire à des moteurs à explosion à injection de carburant.

Dans tous les cas, l'écoulement des gaz pendant la phase d'admission, dans les moteurs à quatre temps peut être considéré de deux points de vue [12] :

- Le point de vue aérodynamique : celui de la distribution des vitesses du fluide aux différents points et aux différents instants considérés.
- Le point de vue mécanique des fluides : celui de l'évaluation des vitesses moyennes et des débits volumétriques ou pondérés moyens se produisant dans une section donnée du canal d'admission à un instant donné, avec comme aboutissement l'évaluation de la masse ou du poids de fluide admis dans le cylindre à un instant donné.

Il se trouve heureusement, que la connaissance de la masse de gaz contenue dans le cylindre et la pression correspondante à chaque instant et plus particulièrement en fin d'admission sont les paramètres les plus importants pour nous. La répartition des vitesses

fluides dans le cylindre n'a d'utilité que dans la mesure ou elle peut contribuer à prévoir plus correctement les conditions dans lesquelles s'effectuera la combustion.

C'est donc pratiquement les variations de pression et de la masse des gaz admis qui servent à la détermination du rendement volumétrique qui retiendra toute notre attention dans ce qui suit.

4.2. Etude du remplissage

4.2.1. Hypothèses de calculs

Pour un écoulement ou l'effet des frottements internes est négligé et en supposant que le gaz évoluant dans le cylindre du moteur est parfait, c'est à dire de composition invariable et dont les capacités thermiques à pression constante c_p et à volume constant c_v et donc le rapport $\gamma = \frac{c_v}{c_p}$ sont des valeurs fixes et indépendantes de la température et de la pression et en absence des tubulures d'admission.

L'état de l'air à l'intérieur du cylindre peut s'exprimer par la relation suivante [13] :

$$\frac{1}{p} \frac{dp}{dt} + \frac{1}{V} \frac{dV}{dt} - \frac{1}{m} \frac{dm}{dt} + \frac{1}{T} \frac{dT}{dt} = 0 \quad (4.1)$$

Avec : p pression de gaz contenue dans le cylindre ;
 V le volume occupé par ce gaz ;
 m masse de ce gaz contenue dans le cylindre ;
 T température de ce gaz ;
 t temps.

en supposant, que les transformations constituant le cycle thermodynamique sont supposées adiabatiques et réversibles, ce qui signifie que l'évolution à l'intérieur du cylindre est isentropique, l'expression (4.1) devient :

$$\frac{1}{p} \frac{dp}{dt} + \frac{\gamma}{V} \frac{dV}{dt} - \frac{\gamma}{m} \frac{dm}{dt} = 0 \quad (4.2)$$

4.2.2. Evaluation du débit massique

a) Évaluation de la vitesse d'écoulement :

Pour évaluer la vitesse u résultante de l'écoulement de l'air entre l'orifice d'admission (soupape ou tube rotatif) et son siège sous l'influence de la différence de pression ($p_0 - p$) existant entre l'atmosphère et l'intérieur du cylindre, nous admettons :

- D'une part qu'on peut, sans grande erreur, appliquer la formule de Saint-Venant relative au mouvement permanent (bien qu'il s'agisse en fait d'un mouvement variable) [12].
- D'autre part que le rapport de pression $\frac{p_0}{p}$ est inférieur à la valeur critique pour laquelle il y a col (écoulement subsonique à l'admission), ce qui est presque toujours le cas en pratique.

Tenant compte de ces deux hypothèses, on voit qu'on ne commettra pas en générale, une grande erreur en calculant la vitesse du fluide u donnée par Saint-Venant :

$$u^2 = \frac{2C_0^2}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{C}{C_0} \right)^2 \right] \quad (4.3)$$

Comme l'évolution à l'intérieur du cylindre est isentropique :

$$\frac{p}{\rho^\gamma} = \text{cte}$$

c'est à dire :

$$\frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^\gamma \quad (4.5)$$

On aura :

$$\left(\frac{C}{C_0} \right)^2 = \frac{p}{p_0} = \left(\frac{\rho}{\rho_0} \right)^{\gamma - 1} \quad (4.6)$$

En remplaçant (4.5) dans (4.3), on aura :

$$u^2 = \frac{2C_0^2}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right] \quad (4.7)$$

b) Détermination de la masse admise

Soient ρ et u représentent respectivement la masse volumique et la vitesse dans la section contractée de section Λ et σ son coefficient de débit, le débit massique est donné par :

$$\frac{dm}{dt} = \sigma \Lambda \rho \cdot u \quad (4.8)$$

Après manipulation algébrique des équations (4.5), (4.7) dans (4.8), on aura :

$$\frac{dm}{dt} = \sigma \Lambda \rho_0 C_0 \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \sqrt{\frac{2}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right]} \quad (4.9)$$

4.2.3 – Expression du volume disponible aux gaz

a) Volume balayé par le piston

On sait que, si on considère une manivelle de longueur R égale à la demi - course du piston et une bielle de longueur λR , le déplacement x du piston à partir du point mort haut, en désignant par θ l'angle de la manivelle et par γ l'obliquité de la bielle, peut s'écrire :

$$x = R(1 - \cos \theta) + \lambda R(1 - \cos \gamma) \quad (4.10)$$

On a, d'autre part, d'après la figure (4.1)

$$\sin \theta = \frac{CB}{R} \quad \text{et} \quad \sin \gamma = \frac{CB}{\lambda R}$$

$$\text{D'où} \quad \sin \gamma = \frac{\sin \theta}{\lambda}$$

Et on tire :

$$x = R(1 - \cos\theta) + \lambda R \left[1 - \sqrt{1 - \frac{\sin^2 \theta}{\lambda^2}} \right] \quad (4.11)$$

Si V_p le volume balayé par le piston à partir du point mort haut et S la section du cylindre, on a :

$$V_p = S.x \quad (4.12)$$

Avec : x le déplacement du piston

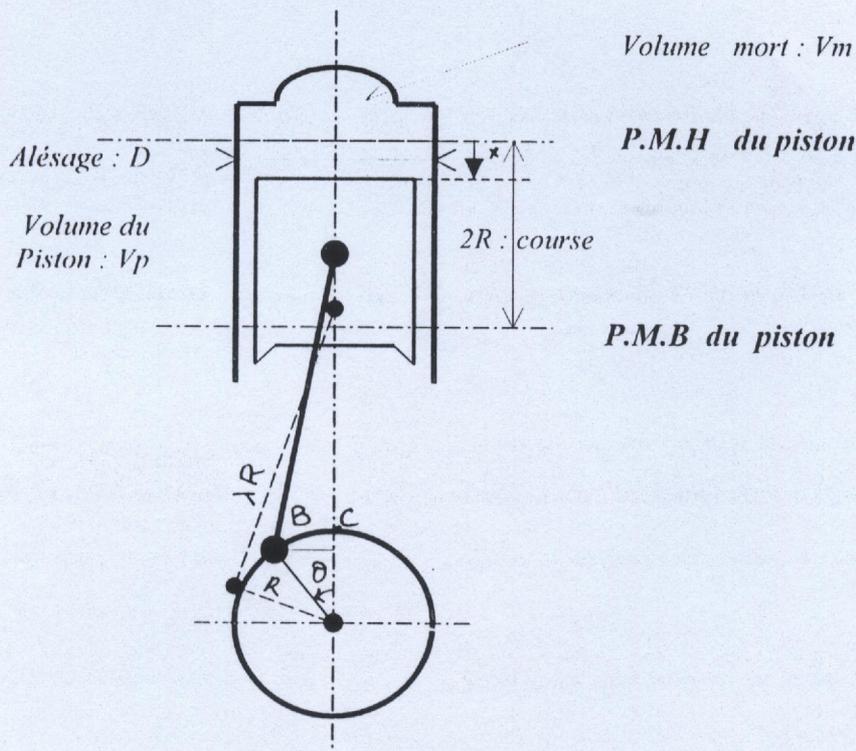


Fig. 4.1 – Déplacement du piston

b) Volume disponible aux gaz en fonction du temps

Si on désigne par V_m et V_p respectivement le volume mort existant dans le cylindre et le volume de la cylindrée, le volume offert aux gaz pendant la phase d'aspiration est exprimé par :

$$V = V_m + V_p \quad (4.13)$$

Avec
$$V_m = \frac{V_p}{r_c - 1}$$

Où r_c représente le rapport de compression

En remplaçant, V_p et V_m par leur valeur dans l'expression (4.13), on aura :

$$V = S.x + \frac{V_p}{r_c - 1}$$

Or : $V_p = 2.R.S$

D'où :

$$V = \frac{V_p}{2} \left[\frac{x}{R} + \frac{2}{r_c - 1} \right]$$

$$V = R.S \left[\frac{x}{R} + \frac{2}{r_c - 1} \right] \quad (4.14)$$

Or $dV = S dx$

d'où :

$$\frac{dV}{V} = \frac{dx}{R} \frac{1}{\frac{2}{r_c - 1} + \frac{x}{R}} \quad (4.15)$$

4.2.4. Evolution de la pression dans le cylindre

La masse contenue dans le cylindre est définie par :

$$m = \rho V$$

En prenant les différentielles logarithmiques, on aura :

$$\frac{dV}{V} = \frac{dm}{\rho V} - \frac{d\rho}{\rho} \quad (4.16)$$

Or l'écoulement est isentropique, ce qui nous permet d'écrire :

$$\frac{d\rho}{\rho} = \frac{1}{\gamma} \frac{dp}{p} \tag{4.17}$$

A l'instant t, la vitesse angulaire est égale à :

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\pi.N}{30} \tag{4.18}$$

et:

$$\frac{dm}{\rho.V} = \frac{30}{\pi.N} \sigma.A.c_0 \sqrt{\frac{2}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} \cdot \frac{d\theta}{R.S \left[\frac{x}{R} - \frac{2}{r_c - 1} \right]} \tag{4.19}$$

En reportant (4.15), (4.17) et (4.19) dans (4.16) et en exprimant la vitesse angulaire en radian, nous obtenons :

$$\frac{dp}{d\theta} = \frac{\gamma.p}{R \left[\frac{x}{R} - \frac{2}{r_c - 1} \right]} \left\{ \frac{30}{\pi.N.S} \sigma.A.c_0 \sqrt{\frac{2}{\gamma-1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} \right]} - \frac{dx}{d\theta} \right\} \tag{4.20}$$

La relation (4.20) permet de donner l'évolution de la pression dans le cylindre du moteur à une pression extérieure donnée. La méthode utilisée pour la résolution de cette équation est celle de Runge- Kutta d'ordre 4.

4.2.5. Taux de remplissage

La phase d'admission conditionne la masse d'air (ou de mélange air/ combustible) admise à chaque cycle dans le cylindre, et par conséquent la pression moyenne indiquée. Le problème qui se pose à pleine ouverture d'admission étant généralement d'obtenir la puissance la plus grande possible, il est nécessaire de chercher à utiliser au maximum le volume de la cylindrée [15]. Ceci conduit à définir un paramètre qui caractérise la performance de la phase d'admission à savoir : le rendement volumétrique ou taux de remplissage.

Par définition le rendement volumétrique est le rapport entre la masse d'air admise et celle qu'occuperait la cylindrée dans les conditions d'état du gaz qui règne dans le

milieu ambiant. La masse introduite étant m , ρ_0 étant la masse volumique de l'air ambiant et V_p la cylindrée balayée, nous aurons pour la phase d'aspiration :

$$\eta_v = \frac{m}{\rho_0 \cdot V_p} \quad (4.21)$$

où m est déterminée par l'expression suivante :

$$m = \int_{\theta_{OA}}^{\theta_{FA}} dm \quad (4.22)$$

Avec θ_{OA} et θ_{FA} représentent les angles d'ouvertures et de fermetures des orifices d'admission.

Les relations (4.10), (4.21) et (4.22) donnent :

$$\eta_v = \frac{30}{\pi \cdot N \cdot V_p} c_0 \int_{\theta_{OA}}^{\theta_{FA}} \sigma \cdot A \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{1}{\gamma}} \left\{ \frac{2}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} \right] \right\}^{\frac{1}{2}} d\theta \quad (4.23)$$

La connaissance de (p/p_0) et de σA en fonction de θ nous permettent d'évaluer η_v en fonction de θ .

La résolution numérique et graphique de la variation de pression ainsi de la masse des gaz admis à l'intérieur du cylindre et enfin le rendement volumétrique η_v a été faite en utilisant le logiciel technique MATLAB version 5.1 sous Windows (1997).

4.3 – Paramètre influant sur le rendement volumétrique

Le phénomène d'admission est le résultat des mouvements conjugués piston – orifice d'admission. C'est pourquoi, l'écoulement des gaz est non stationnaire et la conduite d'admission est le siège de pression progressive et instationnaire.

Cependant, des paramètres plus ou moins empiriques ont montré leur influence sur le remplissage du moteur. Ces derniers sont en nombres de trois : effets pulsatoires, effets d'inertie et index de Mach.

4.3.1 – Effets pulsatoires

La conduite d'admission constitue sur le plan acoustique un oscillateur à air. Ce phénomène est causé par le mouvement périodique du piston (fig4.2).

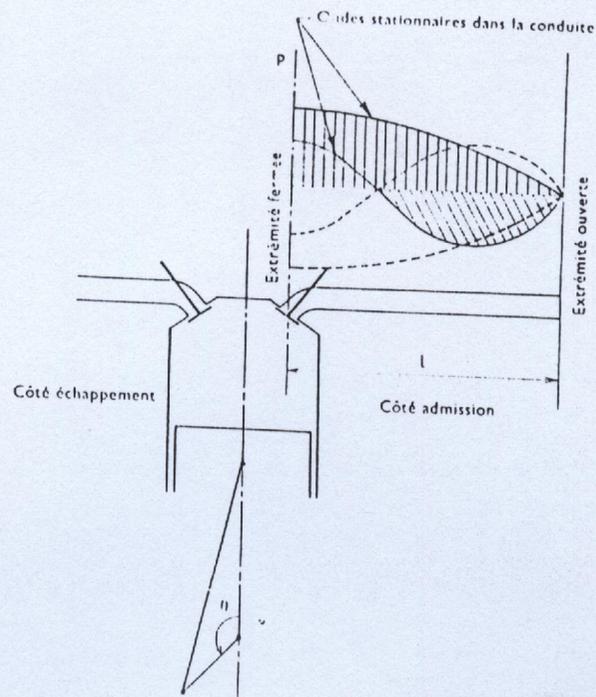


Fig. 4.2 – Effet pulsatoire dans la conduite d'admission [5]

On sait qu'un oscillateur a la propriété de vibrer naturellement sur sa fréquence propre fondamentale. La fréquence propre fondamentale de la conduite d'admission dépend de la longueur de la conduite, des conditions aux limites et de la température des gaz contenue dans cette conduite. C'est pourquoi le remplissage est largement influencé par les effets pulsatoires [5].

4.3.2 – Effets d'inertie

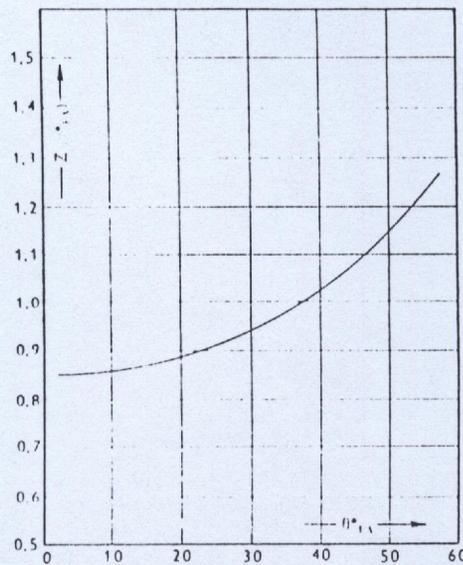
La colonne de gaz contenue dans la veine d'admission est soumise à une accélération en début de la course du piston et à un ralentissement en fin de course. La force d'inertie due au ralentissement du piston entraîne une élévation de pression et donc de masse volumique, des gaz admis, en fermeture d'admission.

En utilisant les effets d'inertie dans le conduit d'admission, il est possible d'obtenir des taux de remplissage supérieur à 100%. Le professeur T. Asanuma a défini un nombre sans dimension, index de suralimentation noté par Z , pour définir la qualité des effets d'inertie [14].

$$Z(\theta_{FA}) = \frac{\pi \cdot N}{30} \frac{1}{c_0} \sqrt{\frac{V_p \cdot l_s}{\bar{\sigma} \cdot A}}$$

- Avec l_s longueur effective le long du conduit ;
 $\bar{\sigma} \cdot A$ section effective moyenne de l'orifice d'admission ;
 θ_{FA} angle de rotation du vilebrequin après le P.M.B.

La figure 4.3 donne la relation expérimentale de $Z(\theta_{FA})$ en fonction de θ_{FA} . Il est donc facile, compte tenu de cette relation, de déterminer par le calcul le régime de rotation pour lequel l'effet d'inertie est maximal.



Relation entre l'index de suralimentation et le diagramme de distribution (d'après Shizuo Yagi)

Fig. 4.3 – Relation entre l'index de suralimentation et le diagramme de distribution [14]

4.3.3- Index de Mach

L'index de Mach M_s , qui caractérise l'efficacité de l'orifice d'admission, est égal à la vitesse d'écoulement moyenne mesurée au niveau de l'orifice d'admission rapporté à la vitesse de propagation du son c_0 dans les conditions standard de température.

- Soient : u vitesse d'écoulement ;
 $\bar{\sigma} \cdot A$ section moyenne de l'orifice d'admission ;
 U_p, A_p représentent respectivement la vitesse moyenne et la section du piston.

$$u = U_p \frac{A_p}{A \cdot \sigma}$$

On aura :

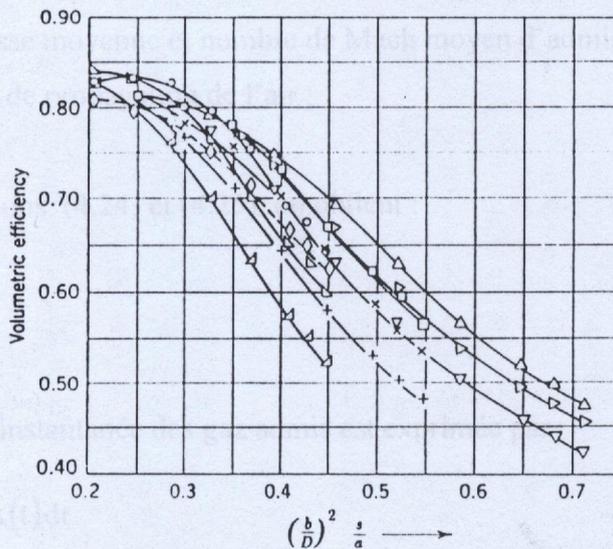
$$M_s = \left(\frac{D_p}{d} \right)^2 \frac{U_p}{c_0 \sigma}$$

Avec :

$$\sigma = \frac{1}{\theta_{FA} - \theta_{OA}} \int_{\theta_{OA}}^{\theta_{FA}} \sigma \cdot d\theta \quad \text{et} \quad U_p = \frac{2 \cdot R \cdot N}{30}$$

Cet index de Mach possède une signification pour les moteurs où les effets d'inertie sont très limités ce qui est le cas des tubulures courtes. Des travaux ont montré que le rendement volumétrique chute brutalement quand l'index de Mach M_s approche la valeur 0.5 (fig4.4).

Ainsi, toute modification dans le dessin du conduit d'admission ou de l'orifice d'admission tendant à augmenter la valeur de σ conduit généralement à l'amélioration du taux de remplissage.



D (n)	Lift (in) →			Design
	0.208	0.238	0.262	
1.050	△	▽	○	A
0.950	+	x	□	
0.830	▽	▷	△	
1.050			◇	B

Fig. 4.4 – Relation entre l'index de Mach et le rendement volumétrique [19]

Contrairement aux travaux entrepris par Taylors ; qui a montré que le rendement volumétrique chute quand l'index de Mach s'approche de la valeur 0.5, Fukutani & al. [20] ont récemment prouvé que ce rendement volumétrique chute brutalement lorsque le nombre de Mach moyen s'approche de la valeur 0.5. En utilisant différents modèles de moteurs thermiques, ils ont trouvé que pour les petits moteurs, le rendement volumétrique commence à décroître quand l'index de Mach s'approche de la valeur $M_s=0.3$ (Fig4.5). Par contre, pour les grands moteurs, ce dernier commence à chuter si M_s est au voisinage 0.7 (Fig4.6.). Parallèlement, avec les même moteurs, ils ont montré que le rendement volumétrique ne chute que si le nombre de Mach moyen s'approche de la valeur 0.5 (Fig4.6).

Le nombre de Mach moyen est exprimé par la relation suivante :

$$M_{in} = \frac{v_{im}}{c} \quad (4.24)$$

$$v_{im} = \frac{V_p \cdot \eta_v}{A(t) \cdot 100} \quad (4.25)$$

Avec v_{im} , M_{in} vitesse moyenne et nombre de Mach moyen d'admission ;

c : vitesse de propagation de l'air ;

t : temps.

En combinant les relations (4.24) et (4.25), on obtient :

$$M_{in} = \frac{V_p \cdot \eta_v}{A(t) \cdot 100 \cdot c} \quad (4.26)$$

Or la section effective instantanée des gaz admis est exprimée par

$$\begin{aligned} A(t) &= \int_{t_{OA}}^{t_{FA}} \sigma(t) \cdot A(t) \cdot dt \\ &= A_m(t) \cdot (t_{FA} - t_{OA}) \\ &= A_m \cdot \frac{\theta_{FA} - \theta_{OA}}{6 \cdot N} \end{aligned} \quad (4.27)$$

Après manipulation algébrique des équations (4.24), (4.26) et (4.27), on obtient :

$$M_{in} = \frac{V_p \cdot \eta_v \cdot 6 \cdot N}{c \cdot A_{eff} \cdot (\theta_{FA} - \theta_{OA}) \cdot 100} \quad (4.28)$$

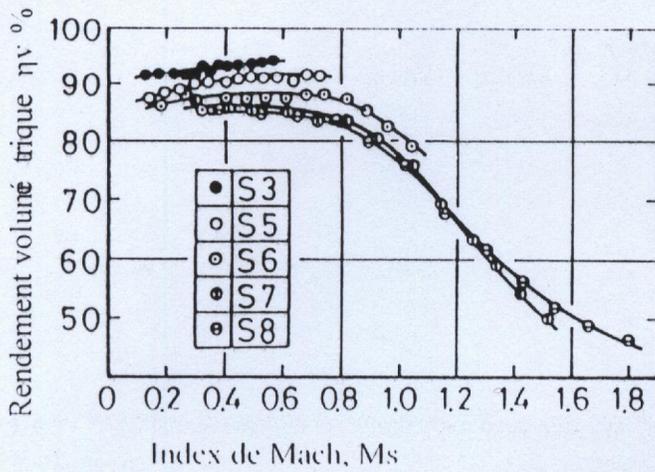


Fig. 4.5 – Relation entre le rendement Volumétrique et l'index de Mach (petit moteur S) [21]

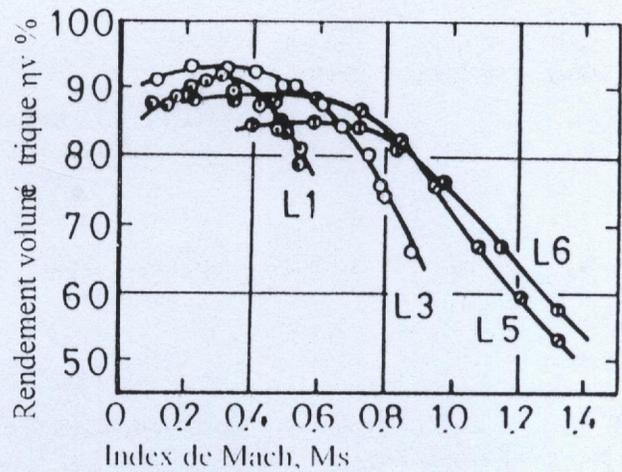


Fig. 4.6 - Relation entre le rendement Volumétrique et l'index de Mach (grand moteur L) [21]

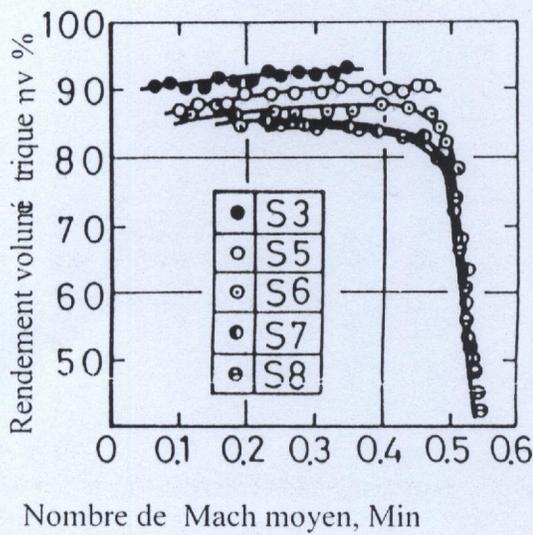


Fig.4.7 – Relation entre le rendement Volumétrique et le Mach moyen (petit moteur S) [21]

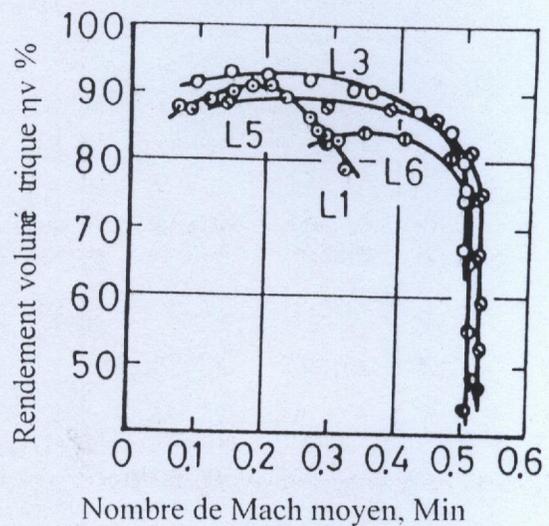


Fig.4.8 - Relation entre le rendement volumétrique et le Mach moyen (grand moteur L) [21]

C h a p i t r e

5

Expérimentation

EXPERIMENTATION

5.1- Introduction

Dans cette partie, on s'est intéressé à une étude comparative du phénomène de remplissage du cylindre pendant la phase d'admission d'un moteur à combustion interne entre la distribution classique, dite à soupape, et celle proposée, dite tube rotatif.

Le rendement volumétrique étant l'un des paramètres les plus importants pour les performances d'un moteur, celui-ci est l'objet principal de la comparaison. Pour cela, une étude expérimentale est menée afin de mesurer le coefficient de débit.

$$\eta_v = \frac{30}{\pi \cdot N \cdot V_p} c_0 \int_{\theta_{\text{ov}}}^{\theta_{\text{ov}}} \sigma \cdot A \left(\frac{p}{p_0} \right)^\gamma \left\{ \frac{2}{\gamma - 1} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^\gamma \right] \right\}^{\frac{1}{2}} d\theta$$

Cette méthode est en effet beaucoup plus fiable que les simples données empiriques qui ne peuvent pas rendre compte de toutes les conditions opératoires.

Au départ, on a procédé à la conception et à la réalisation des parties constituant le banc d'essai pour les deux types d'expériences (système classique – tube rotatif).

La réalisation du banc d'essai, ainsi que les mesures ont été faites à l'institut de mécanique de l'université de Blida dans le laboratoire des moteurs à combustion internes - M.C.I -

5.2- Présentation du banc d'essais

Le calcul du transvasement, et plus précisément l'évaluation du rendement volumétrique, exige, comme on a relevé dans le chapitre précédent, l'introduction le coefficient de débit (voir la formule 4.23).

Dans cette optique, la mesure du coefficient de débit à travers les orifices d'admissions a été réalisée sur un banc d'essais où deux dispositifs ont été adaptés :

- a) La distribution à soupape (fig. 5.1)

b) La distribution à tube rotatif : ce dispositif est analogue au précédent à l'exception des transformations faites au niveau du conduit à tester pour l'adapter au nouveau type de distribution (fig. 5.2)

L'installation complète comporte les éléments suivants :

A : Conduit à tester

B : Capacité de tranquillisation

C : Diaphragme

D : Manomètre

E : Soufflerie

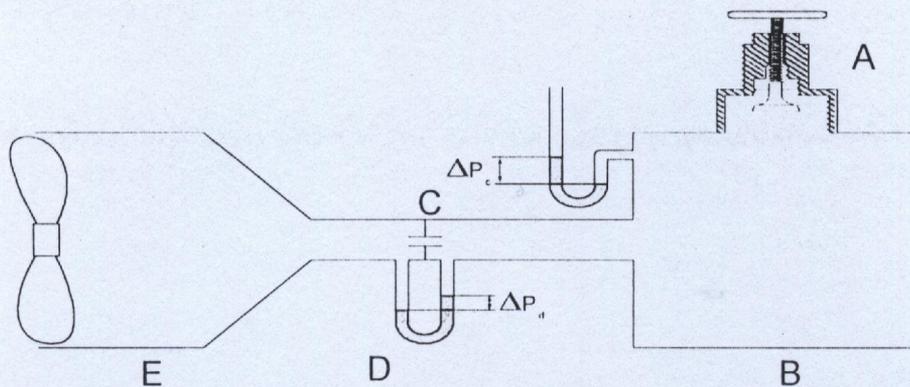


Fig. 5.1 - Schéma du banc d'essai avec le dispositif à soupape classique

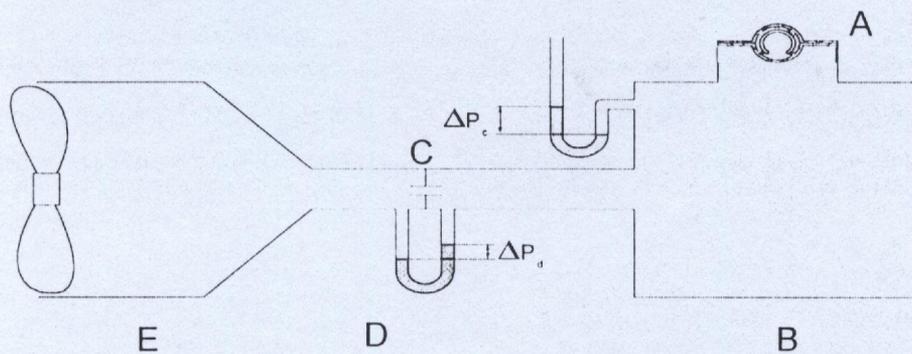


Fig. 5.2 - Schéma du banc d'essai avec le dispositif à tube rotatif



5.2.1. Conduit à tester :

5.2.1.1. Soupape classique :

Le conduit à tester est une soupape d'admission du moteur A dont les caractéristiques ont été citées dans le tableau 5.1. Cette soupape repose au centre d'une culasse en fonte de dimension (200 x 2000 x 6) mm. A son tour, cette culasse est fixée sur le banc d'essai à l'aide de boulons afin de faciliter le montage et le démontage.

Tableau 5.1 - Caractéristiques du moteur A

Volume de la cylindrée	357.10 cc
Alésage	8.3 cm
Course du piston	6.6 cm
Longueur de la bielle	11.55 cm
Diamètre de la tête de soupape d'admission	2.6 cm
Levée	0.75 cm
Angle de siège	45°

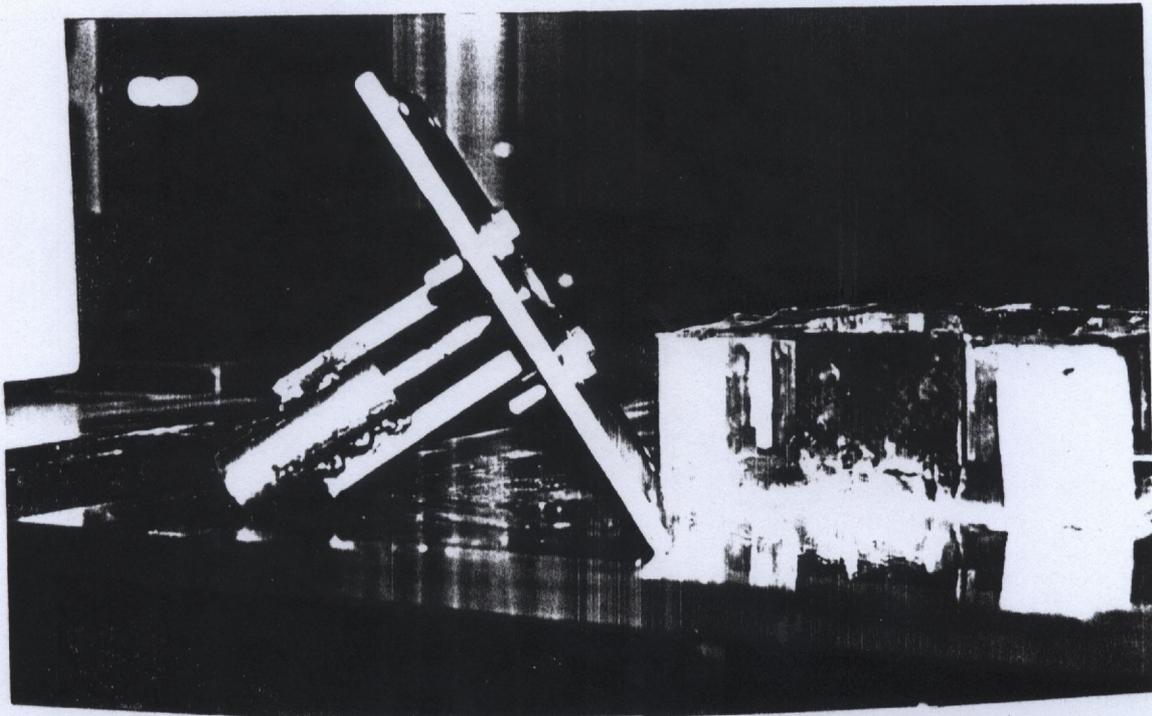


Fig. 5.3.a – Photo du tube à tester - Soupape classique-

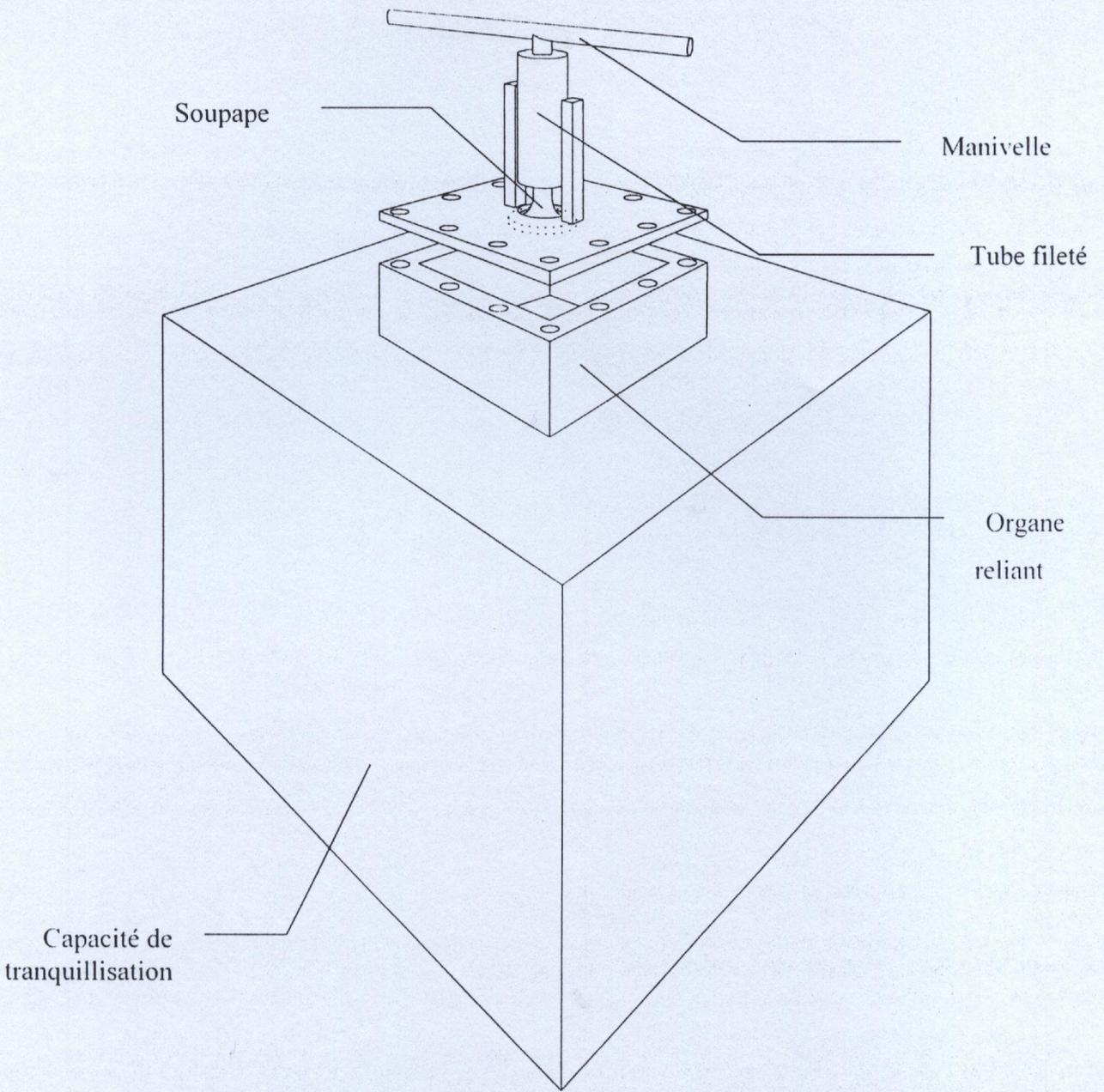


Fig. 5.3.b – Schéma de l'ensemble à soupape monté sur la capacité

Pour faciliter le déplacement de la soupape de bas en haut, un dispositif de type vis-écrou a été réalisé. Ce système est employé pour transformer le mouvement de rotation de la manivelle, fixée sur la tête de la vis, en un mouvement de translation de la soupape fixée à son tour sur la queue de cette vis (fig. 5.3.a). La fixation de la manivelle ainsi que la soupape est assurée à l'aide d'une soudure point par point.

Le diamètre nominal de vis employée est égal à 10 mm, le profil du filetage est du type I.S.O, cependant d'après les normes NF E03 013 le pas de la vis est égal à 1.5 mm [5], ainsi un tour de la manivelle correspond à une levée de soupape égale au pas de la vis.

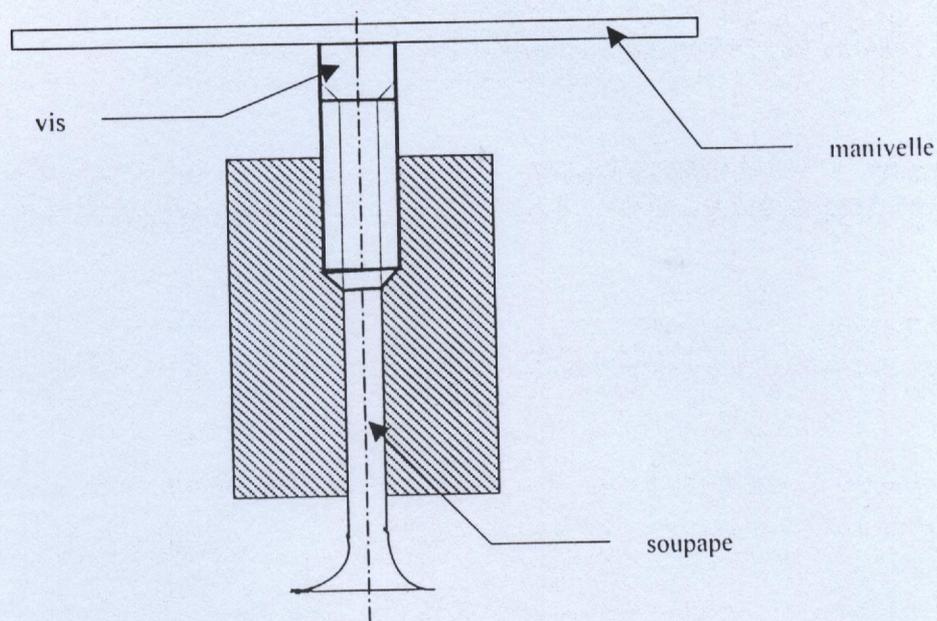


Fig. 5.3a – Schéma du dispositif vis - écrou

5.2.1.2. Tube rotatif :

Le conduit à tester pour le deuxième banc d'essai est un tube en aluminium ayant un orifice à sa périphérie. Ce tube rotatif est placé entre deux demi-culasses. Ces dernières sont constituées de deux demis tubes en acier avec des tôles soudées à leurs extrémités et fixées sur le banc d'essai à l'aide de boulons (fig. 5.4).

Pour une bonne performance, il faut retenir que le système présenté exige une bonne étanchéité afin d'éviter le phénomène de retour des gaz causé par la dispersion des gaz admis ou évacués entre le tube rotatif et la culasse. Cependant, les deux types d'étanchéité adoptés sont (fig. 5.5) :

- L'étanchéité radiale assurée par des segments rectilignes ;
- L'étanchéité axiale assurée par des segments circulaires.

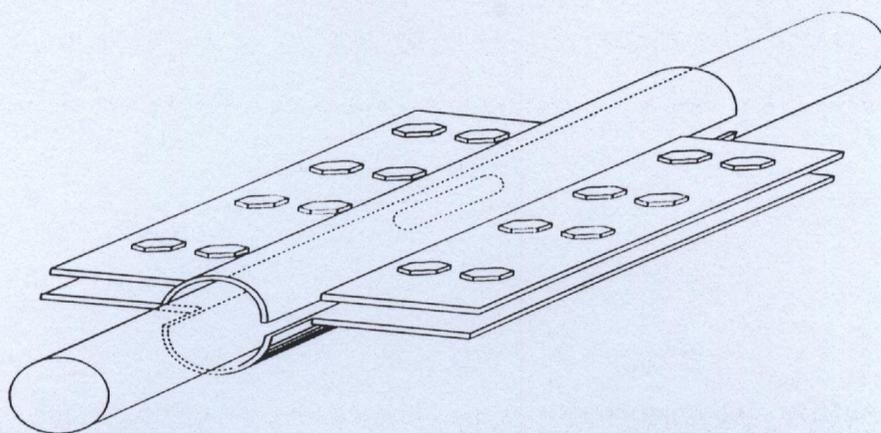
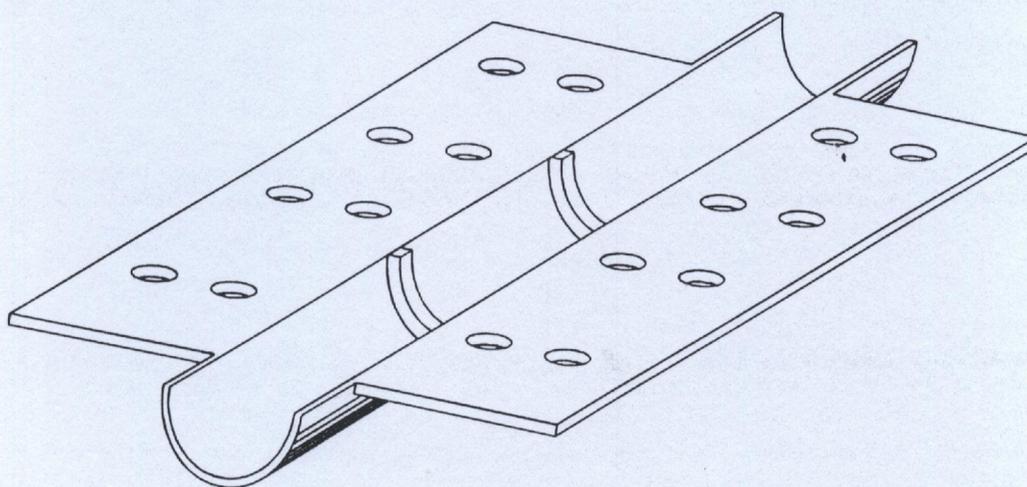
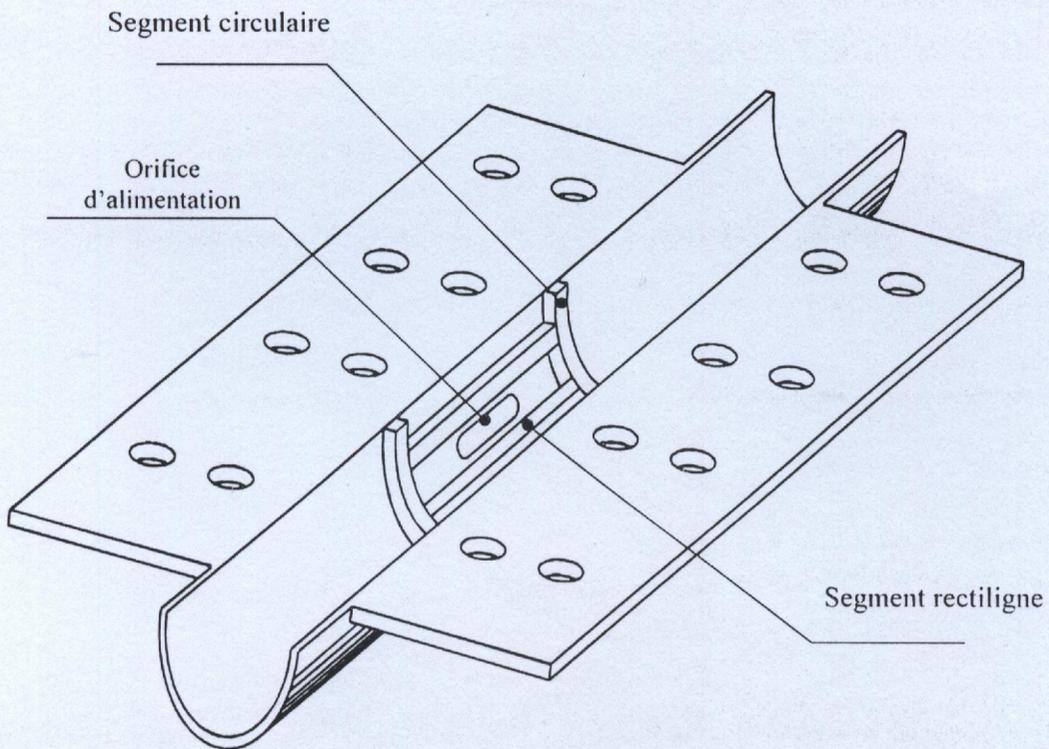


Fig. 5.4 – Tube rotatif avec culasse



a) Demi-culasse supérieure



b) Demi- culasse inférieure

Fig. 5.5 - Schéma des deux demi-culasse

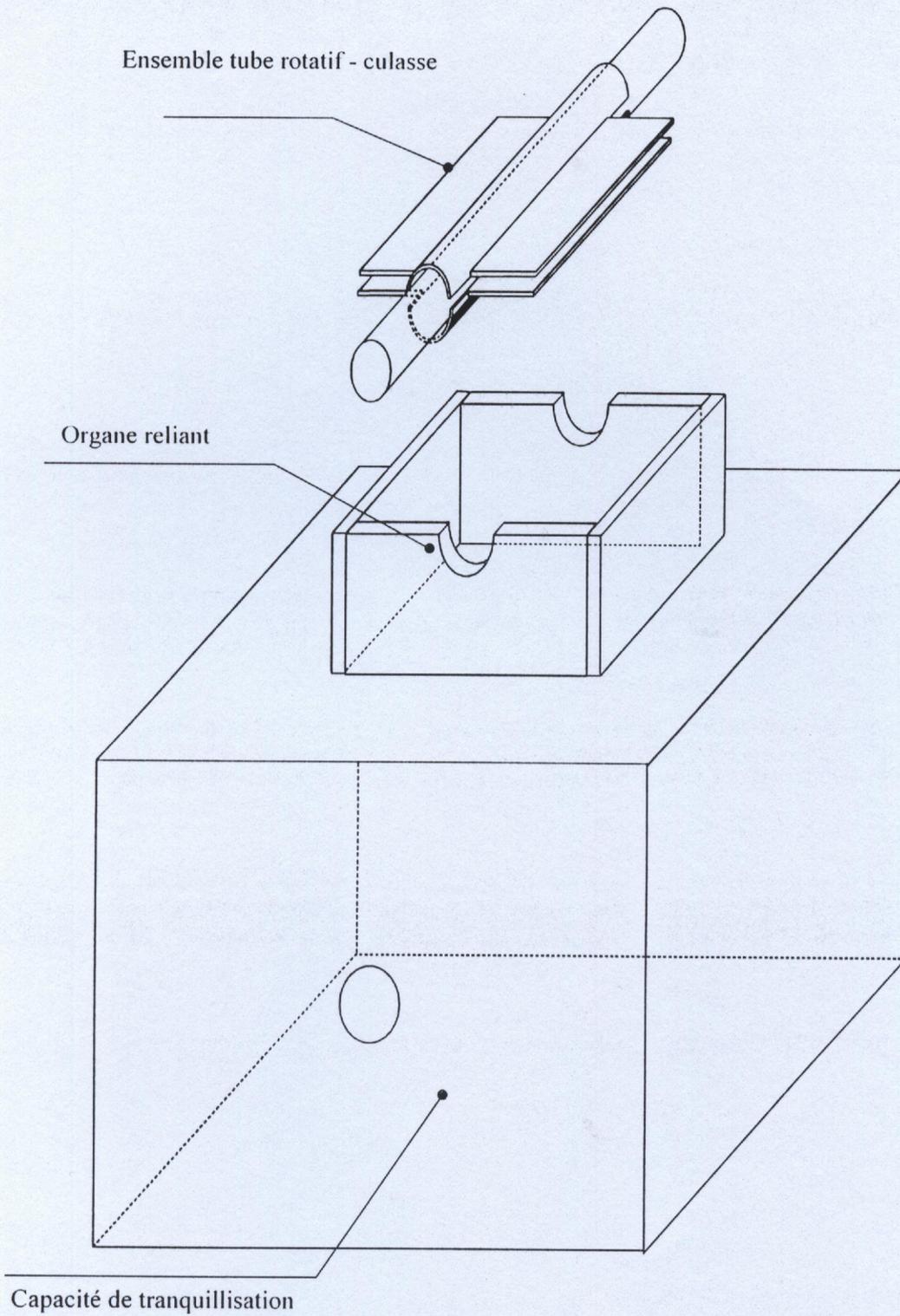


Fig. 5.6 - Schéma de l'ensemble à tube rotatif monté sur la capacité

5.2.1.3. Dimensionnement du tube rotatif

L'objectif visé par cette étude comparative est l'évaluation du rendement volumétrique pour les deux types de distribution (tube rotatif et soupape) ayant tous les deux la même section géométrique maximale de passage des gaz.

Pour cela, le dimensionnement de l'orifice du tube rotatif a été réalisé par comparaison à celui de la soupape classique du moteur A.

En appliquant la relation (2.10), on remarque que le système classique dispose d'une section géométrique maximale de passage égale à :

$$A_s = 497 \text{ mm}^2 \quad (5.1)$$

Pour le nouveau système, on a :

$$A_R = L \cdot d + \frac{\pi d^2}{4} \quad (5.2)$$

En égalant (5.1) et (5.2), nous obtenons les dimensions de l'orifice du tube rotatif. Selon la disponibilité des tubes creux existants sur le marché, nous avons opté pour des tubes ayant les dimensions suivantes :

$$D_{\text{ext}} = 51 \text{ mm.}$$

$$D_{\text{int}} = 48 \text{ mm.}$$

D'après les résultats du chapitre 2, on a trouvé :

$$\gamma = 22.5^\circ \quad \text{et} \quad d = D_{\text{int}} \cdot \sin \gamma.$$

avec γ : demi-angle au sommet du tube rotatif ;

L : longueur de l'orifice du tube rotatif.

L'application numérique nous donne : $d = 18.36 \text{ mm}$

Le seul outil de tournage adéquat à notre dimensionnement n'a pu être que celui ayant un diamètre $d = 19 \text{ mm}$. Ainsi:

$$\gamma = \sin^{-1}\left(\frac{d}{D_{\text{int}}}\right) \quad (5.3)$$

L'application numérique donne : $\gamma = 23.31^\circ$

De la relation (2.) , nous obtenons :

$$L = \frac{S - \pi \frac{d^2}{4}}{d} \quad (5.4)$$

Ainsi, en combinant (5.1) et (5.2), on obtient : $L=11.23 \text{ mm}$.

Enfin, le dimensionnement du tube rotatif est comme suit :

$$D_{\text{int}} = 48 \text{ mm}$$

$$L = 11.23 \text{ mm}$$

$$\gamma = 23.31^\circ$$

5.2.2. Capacité de tranquillisation

La capacité de tranquillisation est une chambre cubique faite en plexiglas assurant, comme son nom l'indique, la stabilisation de l'écoulement avant son passage vers l'organe déprimogène. Pour son dimensionnement, on s'est basé sur des travaux faits par Fukutani et Watanabe [21].

Vu, la similitude de ces travaux au notre, nous avons opté pour le même volume de capacité qui est de l'ordre de 0.2m^3 .

5.2.3. Organe déprimogène

a) Généralité :

Tout d'abord, nous devons souligner l'impressionnante diversité des méthodes d'essais telles qu'il semble ressortir des travaux publiés.

Cette diversité ne doit pas surprendre, puisque la nécessité de données précises sur le coefficient de débit intéresse les milieux scientifiques et industriels les plus variés.

Les débitmètres à organe déprimogène sont les plus utilisés en industrie, ils permettent le calcul de la valeur du débit de fluide dans une conduite donnée, par la mesure de la différence de pression entre deux points de cette conduite.

Ces débitmètres sont constitués de deux dispositifs mécaniques réunis par des tubes de liaisons :

- un organe déprimogène ou élément primaire : créant une différence de pression .
- un organe de mesure ou élément secondaire : donnant la mesure permanente de cette différence de pression en vue de donner la valeur instantanée du débit.

Les débitmètres utilisés sont principalement en nombre de trois :

- Le diaphragme ;
- La tuyère ;
- Le venturi.

Avec, comme un quatrième type, le venturi - tuyère qui est une combinaison des deux types précédants.

Parmi, les organes déprimogène sus - cités, on a opté pour le diaphragme du fait qu'il est le plus utilisé dans ce type d'expérience.

b) Description du diaphragme

□ organe déprimogène

La figure (5.7) extraite de la norme NF X10- 102 donne la coupe schématique de la plaque diaphragme valable quel que soit le type de prise.

Cette plaque est montée entre des brides perpendiculairement à l'axe de la conduite. La pression différentielle utilisée pour le calcul du débit dépend des prises en amont et en aval.

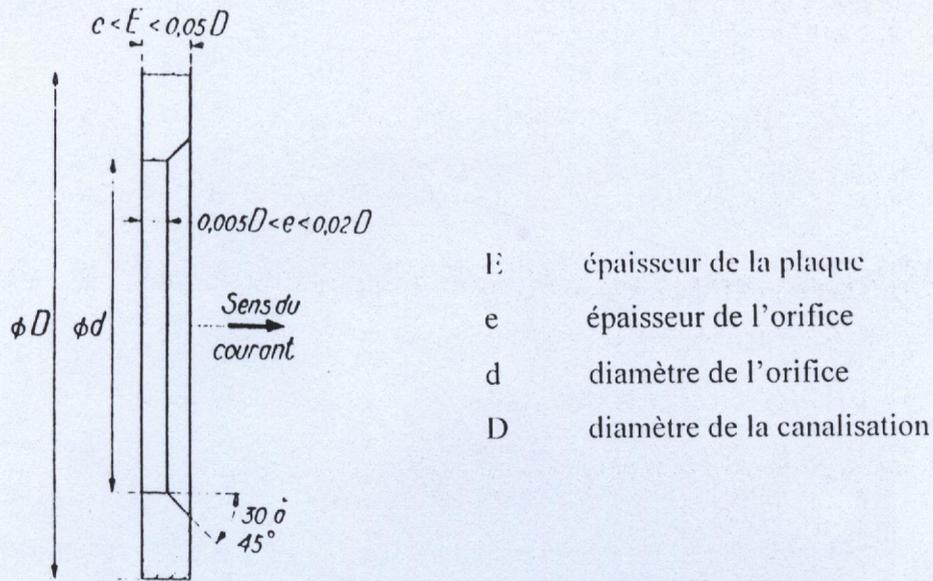


Fig. 5.7 - schéma du diaphragme

Trois types de prises sont actuellement utilisés de façon courante :

- A la bride : les prises de pression sont situées à 25 mm de part et d'autre du diaphragme.
- Dans l'angle : les prises sont situées au ras du diaphragme.
- A la section contractée ou vena contracta : la prise amont et aval est à $D/2$ du diaphragme [AFNOR NF X10- 102 de 1980].

Dans la présente étude, nous avons opté pour la disposition à bride du fait de meilleures possibilités de réalisation avec les moyens disponibles. Le diaphragme utilisé a les dimensions suivantes :

$$D = 50 \text{ mm}$$

$$d_d = 32 \text{ mm}$$

$$\beta = \frac{d_d}{D} = 0.64$$

$$E = 2.5 \text{ mm}$$

$$e = 1 \text{ mm}$$

$$\alpha = 45^\circ$$

Quant à ses limites d'emploi, elles sont citées dans le tableau 5.2.

Tableau 5.2 - limites d'emploi du diaphragme - prise à la bride-

distance de prise amont	25.4 ± 1 mm
distance de prise aval	25.4 ± 1 mm
diamètre de l'orifice d_d	≥ 1.25 mm
diamètre de la canalisation D	$50 \leq D \leq 760$ (mm)
$\beta = \frac{d_d}{D}$	$0.2 \leq \beta \leq 0.75$
Re_D	$1260 \beta^2 D \leq Re_D \leq 10^8$; D (mm)

Pour une meilleure stabilisation de l'écoulement le long du conduit avant son arrivé au diaphragme, il s'est avéré nécessaire, en plus de la capacité de tranquillisation d'utiliser des stabilisateurs plats perforés (fig. 5.8). Des études ont été faites récemment par Laws et Ouazzane (1996) [17], ont montré que ces stabilisateurs peuvent atteindre le régime établi à une longueur de l'ordre de $10D$.

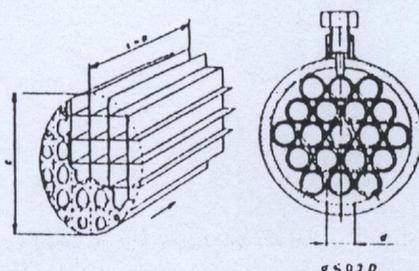


Fig. 5.8 - Schémas des stabilisateurs plats perforés.

□ Capteur de pression différentielle

Pour la mesure de la pression différentielle, on a utilisé un manomètre qui mesure la différence de pression en fonction de la différence de hauteur du liquide contenu dans les colonnes du manomètre (fig. 5.9)

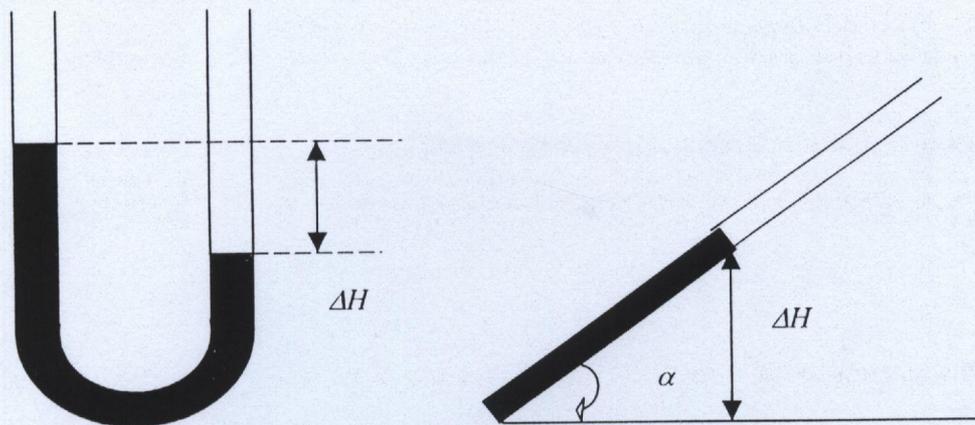


Fig. 5.9 - Schéma du manomètre

Par simple application de la loi fondamentale de la statique des fluides, on a :

$$\Delta p = \rho_f \cdot g \cdot \Delta H \quad (5.5)$$

Il est clair, d'après la relation (5.5) que la nature du fluide (lourd ou léger) et la disposition du manomètre (droit ou incliné) influent sur l'élargissement de la plage de mesure de la différence de pression ainsi :

- Pour des pressions importantes, on utilise des fluides lourds comme le mercure et en position verticale.
- Pour des pressions faibles, on utilise, généralement, des fluides légers tel que l'eau ou l'alcool.

Dans le cas de notre étude, et comme nous avons affaire à de faibles pressions, nous avons utilisé l'alcool de densité $\rho_f = 810 \text{ kg/m}^3$ et une inclinaison de 45° du tube en U pour amplifier la lecture.

5.2.4. La soufflerie

La puissance délivrée par la soufflerie existante au sein de l'institut de mécanique (Blida) s'est montrée très insuffisante pour notre expérience.

Pour cela, une capacité jouant le rôle de soufflerie a été réalisée.

La soufflerie réalisée est une soufflerie axiale. Elle est munie à son extrémité d'un ventilateur, ce dernier est entraîné par un moteur électrique de vitesse de rotation de 2800tr/min avec une puissance de 2.8 kW.

La soufflerie conçue est illustrée sur la figure suivante (fig. 5.10) :

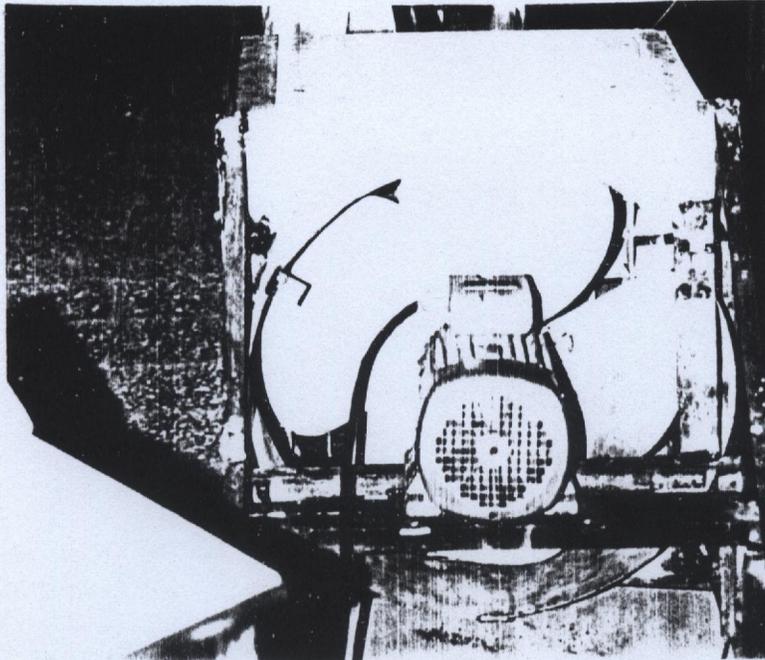


Fig. 5.10 - Schéma de la soufflerie.

5.3. Méthode de calcul

La méthode utilisée, pour le calcul du coefficient de débit, est généralement appliquée au voisinage de l'orifice d'admission car l'écoulement est considéré comme quasi- stationnaire et incompressible du fait du faible écart de pression à travers l'orifice.

5.3.1 coefficient de débit rapporté à l'orifice d'admission

Soit S_d la section du diaphragme et σ_d son coefficient de débit.

Soit S_c la section équivalente en paroi mince du conduit à mesurer et S_0 une section de référence.

Le coefficient de débit est donné par :

$$\sigma = \frac{S_c}{S_0}$$

En première approximation, si on néglige les variations de pression et de température, en écoulement incompressible le débit volumétrique devient :

$$Q_v = S_d \cdot \sigma \cdot v_d \quad (5.6)$$

Avec : v_d la vitesse de l'air dans la section contracté donnée par :

$$v_d = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_d}{\rho}} \quad (5.7)$$

On a donc :

$$Q_v = \sigma_d \cdot S_d \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_d}{\rho}} \quad (5.8)$$

De même :

$$Q_v = S_c \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p_c}{\rho}} \quad (5.9)$$

D'où :

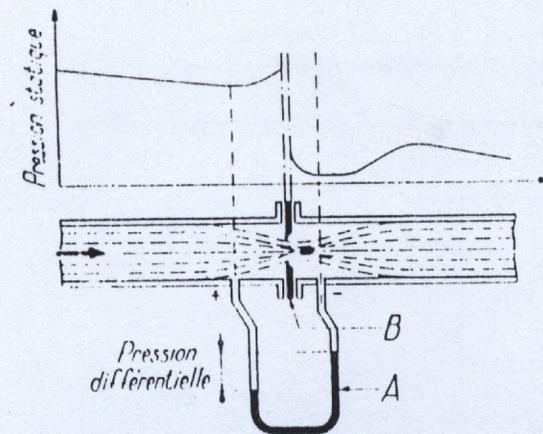
$$S_c = \sigma_d \cdot S_d \sqrt{\frac{\Delta p_d}{\Delta p_c}} \quad (5.10)$$

On tire le coefficient de débit rapporté σ à la section de référence S_0 .

$$\sigma = \sigma_d \frac{S_d}{S_0} \sqrt{\frac{\Delta p_d}{\Delta p_c}} \quad (5.11)$$

Généralement, on prend comme section de référence la section géométrique maximale de l'orifice d'admission [16].

5.3.2 Coefficient de débit rapporté au diaphragme :



+,- prises de pression amont et aval

A appareil de mesure

B organe déprimogène

Fig. 5.11- schéma de l'écoulement à travers le diaphragme.

A la traversée du diaphragme, l'expérience montre que la contraction maximale ne se produit pas dans le même plan du diaphragme, mais un peu plus en aval (fig. 5.11).

Pour un fluide incompressible, l'équation de Bernoulli s'écrit :

$$\frac{v^2}{2} + gh + \frac{p}{\rho} = \text{Cte} \quad (5.12)$$

Avec: g : accélération de la pesanteur.

h : Altitude.

p : pression du fluide.

v : vitesse moyenne du fluide.

ρ : masse volumique du fluide circulant dans la conduite (l'air).

En supposant h constante (conduite horizontale, prises situées pratiquement à la même altitude) la conservation d'énergie entre les deux sections, 1 amont de l'organe déprimogène et 2 avals, s'écrit :

$$\frac{v_1^2}{2} + \frac{1}{\rho} p_1 = \frac{v_2^2}{2} + \frac{1}{\rho} p_2 \quad (5.13)$$

Soit D, S_1 le diamètre et la section de la canalisation aux conditions de service.

d_d, S_d e diamètre et la section de l'orifice aux conditions de service .

$$\beta = d_d / D$$

S_2 , section de la veine contractée en (2)

$$S_1 \cdot v_1 = S_2 \cdot v_2 \quad (5.14)$$

D'où :

$$v_1 = \frac{S_2 \cdot v_2}{v_1} \quad (5.15)$$

$$v_1 = \frac{S_2 \cdot v_2 \cdot S_d}{S_1 \cdot S_d}$$

$$v_1 = \mu \left(\frac{d_d}{D} \right)^2 \cdot v_2 \quad (5.16)$$

$$v_1 = \mu \cdot \beta^2 \cdot v_2 \quad (5.17)$$

Avec:

$$\mu = S_2 / S_d \quad \text{coefficient de contraction .}$$

La combinaison des équations (5.13) et (5.17) donne, après manipulation algébrique, l'expression du débit volumétrique :

$$Q_v = \left[\frac{\epsilon \cdot \mu}{\sqrt{1 - \mu^2 \beta^4}} \right] S_d \sqrt{2 \frac{p_2 - p_1}{\rho}} \quad (5.18)$$

- mesure du coefficient de débit pour différentes positions du tube rotatif correspondantes à des angles bien déterminés du vilebrequin .

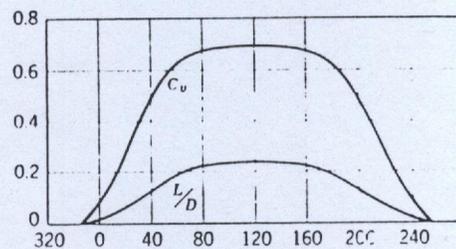
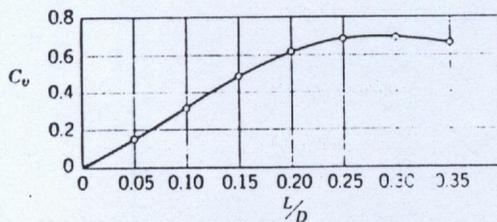
Pour chaque position du tube ou de la soupape, le manomètre indique les différences de hauteurs suivantes :

Δh_c : différence de hauteur indiquant la pression différentielle dans la capacité.

Δh_p : différence de hauteur indiquant la pression différentielle au niveau du diaphragme.

Le coefficient de débit est obtenu, en chaque position de l'orifice d'admission, par application de la relation (5.11).

Les figures 5.12a et 5.12b montrent la variation du coefficient de débit ressortis des travaux de Linveegood et Wood [18,19].



a) Variation du coefficient de débit C_v en fonction du rapport L/D .

b) Variation du coefficient de débit C_v et du rapport (L/D) en fonction de l'angle de rotation du vilebrequin .

(L : la levée de la soupape, D : diamètre de la soupape)

Fig. 5.12- Variation du coefficient de débit [18,19]

C h a p i t r e

6

Résultats & comparaisons

RESULTATS ET COMPARAISONS

6.1- Variation de la section géométrique de passage des gaz :

Les figures 6.1.a et 6.1.b schématisent respectivement le diagramme de la section de passage des gaz admis dans le cylindre du moteur.

6.1.1- Distribution à soupape (fig.6.1.a)

La section géométrique de passage des gaz a été calculée en considérant la loi de levée schématisée sur la figure 6.2. Cette loi se base sur l'utilisation des polynômes. Un des avantages découlant de l'utilisation de la méthode polynomiale est qu'elle peut être adaptée au mouvement réel de la soupape. Cette méthode est appelée " polydyne " et est fréquemment utilisée [5,10].

La figure 6.1.a, représente la distribution à soupape. On constate que l'allure de la section de passage des gaz admis est une courbe sinusoïdale. La vitesse de la soupape est pratiquement nulle au début de l'aspiration, puis elle recommence à prendre une valeur appréciable qu'après $\theta=15^\circ$ (un angle du vilebrequin) (fig.6.3), ce qui implique une ouverture très lente de la soupape et par la suite une admission des gaz presque négligeable dans le cylindre du moteur.

6.1.2 - Distribution à tube rotatif

Contrairement à la distribution à soupape, la section de passage des gaz admis est nettement meilleure dans le cas de l'utilisation d'un tube rotatif. Cela est dû à la vitesse d'ouverture de la section de passage des gaz admis dA_R/dt qui commence à prendre de la valeur dès le début de l'aspiration (fig.6.5). Ceci engendre une ouverture rapide et instantanée du tube rotatif donnant un bon remplissage au début. D'où l'explication de l'allure linéaire de la courbe.

6.2 – Variation du coefficient de débit

Pour les deux modes de distributions étudiés, les figures 6.6.a. et 6.6.b illustrent respectivement la variation du coefficient de débit au niveau de l'orifice d'admission en fonction de l'angle de rotation du vilebrequin.

6.2.1 - Distribution à soupape (fig. 6.6.a)

Nous remarquons que l'allure de la courbe du coefficient de débit est sinusoïdale. Cette allure concorde effectivement avec les résultats trouvés lors de notre recherche bibliographique [16,18].

La forme sinusoïdale est expliquée comme suit :

- A petite levée, l'écoulement des gaz reste attaché à la tête de la soupape et à son siège. Cependant, au niveau de la section contractée, l'écoulement devient turbulent. Le nombre de Reynolds est important provoquant ainsi le décroissement du coefficient de débit.
- A grande levée, l'écoulement se détache de la soupape et de son siège, la section de passage tend vers sa valeur maximale. Le coefficient de débit croit et atteint son maximum $\sigma = 0.56$ pour un angle du vilebrequin égale à 90° . A ce stade, le nombre de Reynolds ne dépend pas de σ .

6.2.2 - Distribution à tube rotatif (fig. 6.6.b)

Contrairement à la distribution à soupape, l'allure de la courbe représentant le coefficient de débit est linéaire. Ceci s'explique par le fait qu'au début de l'admission, la vitesse de la section des gaz admis est appréciable provoquant ainsi un détachement rapide de l'écoulement des gaz au niveau du tube culasse et du tube rotatif. Cela induit un accroissement rapide du coefficient de débit σ . Sa valeur maximale est de l'ordre de $\sigma = 0.62$.

6.3- Variation de la section effective de passage des gaz

Le diagramme de la section effective des gaz admis dans le cylindre du moteur pour les deux modes de distribution (tube rotatif – soupape) est donné simultanément par les figures 6.7.a et 6.7.b.

Pendant la phase d'admission, la section effective des gaz avec le tube rotatif est largement supérieure qu'avec la distribution à soupape. La section effective moyenne de passage des gaz pour la distribution à soupape est 1.0061 cm^2 , par contre pour le tube rotatif, elle est 1.2987 cm^2 .

Ce résultat est prévisible du fait que la section effective n'est qu'une combinaison entre les deux grandeurs (coefficient de débit et section géométrique de passage)

6.4- Evolution de la pression dans le cylindre

Pour les deux modes de distribution, les figures 6.8.a et 6.8.b représentent les valeurs calculées de l'évolution de la pression à l'intérieur du cylindre en utilisant la relation (4.20) et cela pour différentes vitesses de rotation du moteur $N=2000 \text{ tr/min}$, $N=4000 \text{ tr/min}$ et $N=6000 \text{ tr/min}$ avec un taux de compression $rc=8$.

La pression à l'intérieur du cylindre est décroissante, ce phénomène est dû à la détente provoquée par la descente du piston du point mort haut (P.M.H) au point mort bas (P.M.B). Comme la vitesse instantanée du piston est proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur, il est bien évident, que le minimum de pression est atteint pour les grandes vitesses de rotation ($N= 6000 \text{ tr/min}$) comme il est montré sur les figures citées ci-dessus. Une fois ce minimum atteint, la pression devient presque constante du fait de l'équilibre de pression entre les gaz admis et ceux déjà existant dans le cylindre du moteur.

La figure 6.9 montre l'évolution de la pression dans le cylindre du moteur tournant à une vitesse de rotation de l'ordre de 4000 tr/min pour les deux types de distribution.

6.5- Evolution de la masse admise et du rendement volumétrique

Les figures 6.10.a et 6.10.b montrent les valeurs calculées de la masse admise pendant la phase d'aspiration pour différentes vitesses de rotation du moteur (relation 4.19). On constate d'après la lecture des graphes, que le maximum de masse admise est obtenu pour les plus faibles vitesses de rotation ($N=2000\text{tr/min}$). Par contre, pour les grandes vitesses de rotation ($N=6000\text{tr/min}$), cette masse admise est minimale.

Ce phénomène est expliqué par le fait que l'écoulement devient sonique au niveau de la section contractée (c.à.d atteint la vitesse du son), provoquant ainsi un défaut d'admission.

D'après les valeurs du rendement volumétrique obtenues pour différentes vitesses de rotation, il est à remarquer que ce rendement est inversement proportionnel à la vitesse de rotation du moteur. En effet, comme le montre le tableau 6.1, ce rendement volumétrique, pour la distribution à soupape régresse de la valeur $\eta_v = 89.37\%$ pour $N=2000\text{ tr/min}$ à la valeur $\eta_v = 29.79\%$ pour $N=6000\text{ tr/min}$. Par contre pour la distribution avec le tube rotatif, ce dernier décroît de la valeur $\eta_v = 91.87\%$ pour $N=2000\text{ tr/min}$ à la valeur $\eta_v = 37.85\%$ pour $N=6000\text{ tr/min}$.

Tableau 6.1 – Variation du rendement volumétrique

	$N=2000\text{ tr/min}$	$N=4000\text{ tr/min}$	$N=6000\text{tr/min}$
Soupape	$\eta_v = 89.37\%$	$\eta_v = 47.46\%$	$\eta_v = 29.79\%$
Tube rotatif	$\eta_v = 91.8\%$	$\eta_v = 58.6\%$	$\eta_v = 37.85\%$

La chute brutale du rendement volumétrique η_v , pour les deux types de distribution, est justifiée par le passage de l'écoulement du subsonique au supersonique car pour les grandes vitesses de rotation $N=4000\text{tr/min}$ le nombre de Mach moyen dépasse la valeur 0.5 (Min = 0.59 pour la soupape, Min = 0.61 pour le tube rotatif)

Ces résultats concordent bien avec les travaux de Fukutani & al [21]. Leurs travaux ont montré que le rendement volumétrique chute brusquement quand le nombre de Mach moyen s'approche de la valeur 0.5.

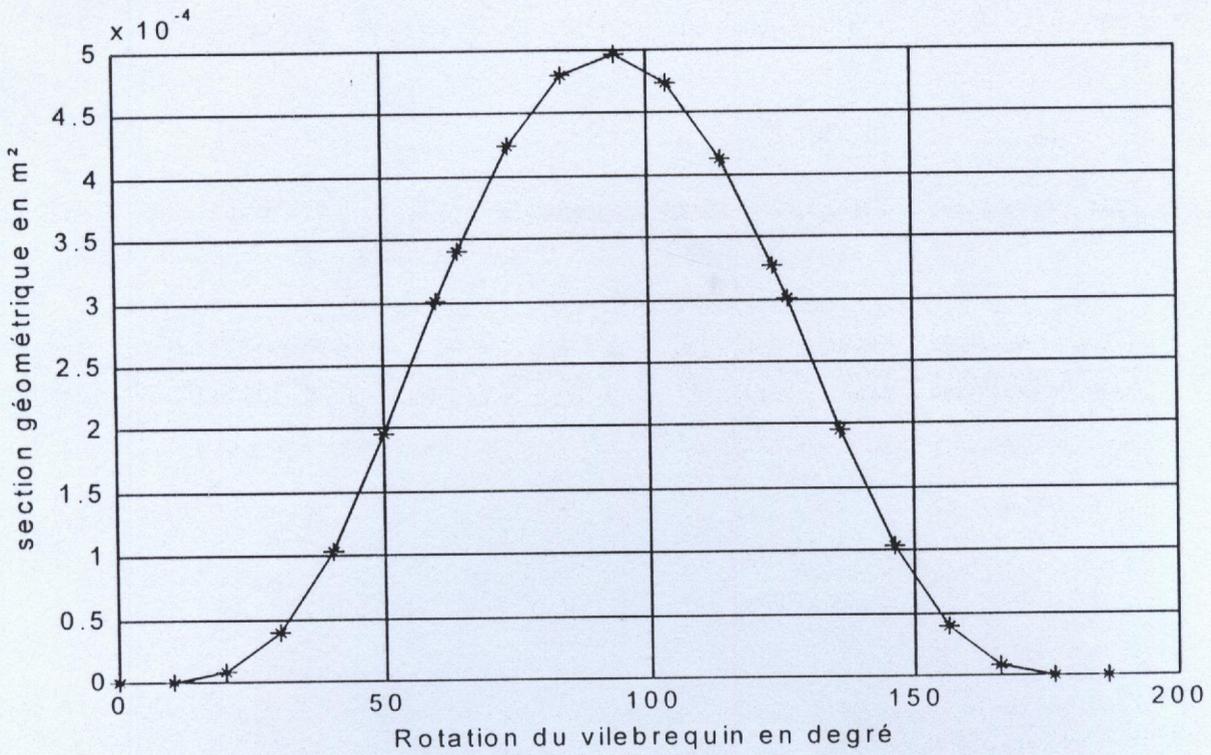
Dans cette optique, une corrélation a été établie par les mêmes auteurs permettant le calcul direct du rendement volumétrique pour différents régimes de rotation. Cette relation est de la forme suivante :

$$\frac{\eta_v \cdot N}{100} = \frac{c \cdot A_{eff_m} \cdot \text{Min}(\theta_{FA} - \theta_{OA})}{6 \cdot V_p} \quad (6.1)$$

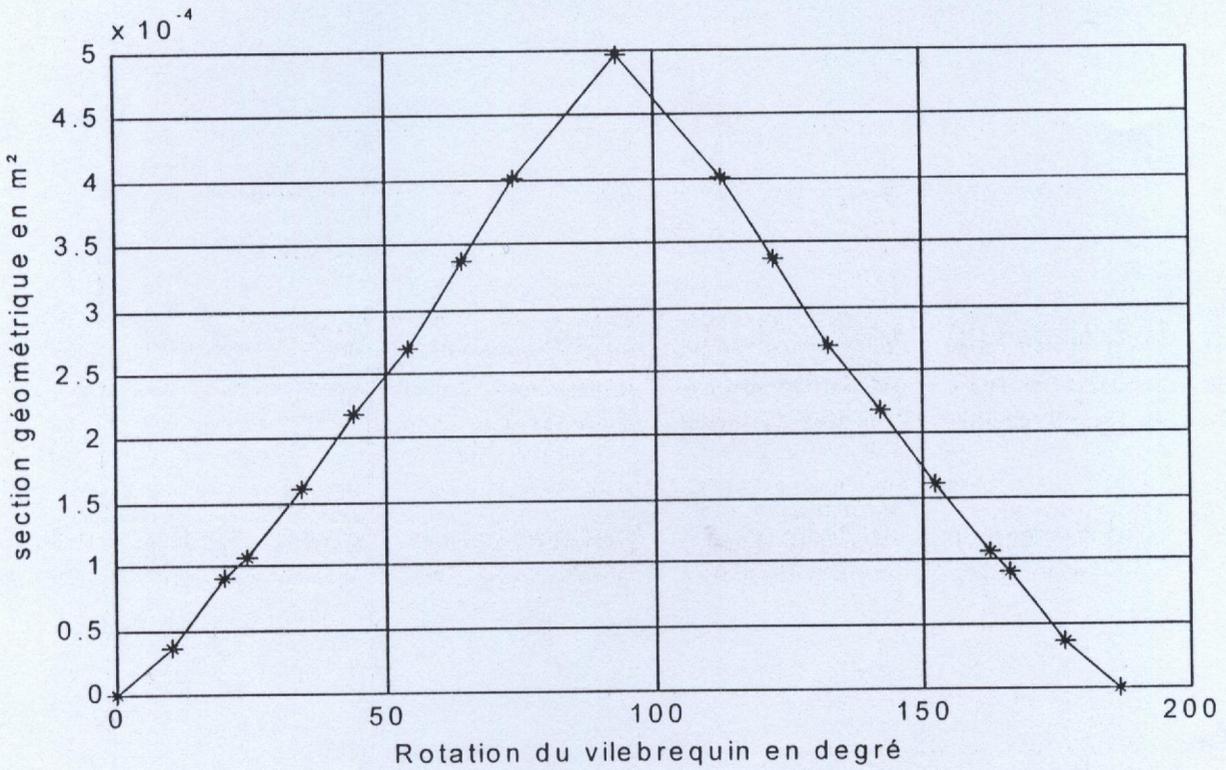
Cette corrélation a montré aussi que le rendement volumétrique décroît hyperboliquement avec l'accroissement de la vitesse de rotation.

L'évolution de la masse admise dans le cylindre du moteur, en considérant les deux distributions, avec une vitesse de rotation $N=4000$ tr/min, et un taux de compression $rc=8$ est illustrée sur la figure 6.11.

On remarque que le rendement volumétrique du tube rotatif est supérieur à celui de la distribution à soupape. Il est à noter que ce rendement, pour la même vitesse de rotation ($N=4000$ tr/min) et pour le même taux de compression ($rc=8$), est de $\eta_v=58.67\%$ pour le tube rotatif et de $\eta_v=47.46\%$ pour la soupape. Cet écart est expliqué par le fait que la distribution retenue dispose d'une section de passage nettement plus appréciable ce qui implique un débit massique plus important. Comme on sait aussi, que la puissance développée par un moteur est directement proportionnelle au débit d'air transvasé, on peut donc s'attendre à une amélioration des performances avec le nouveau dispositif d'admission.



a) Distribution à soupape



b) Distribution avec le tube rotatif

Fig.6.1 – Diagramme de la section géométrique de passage des gaz

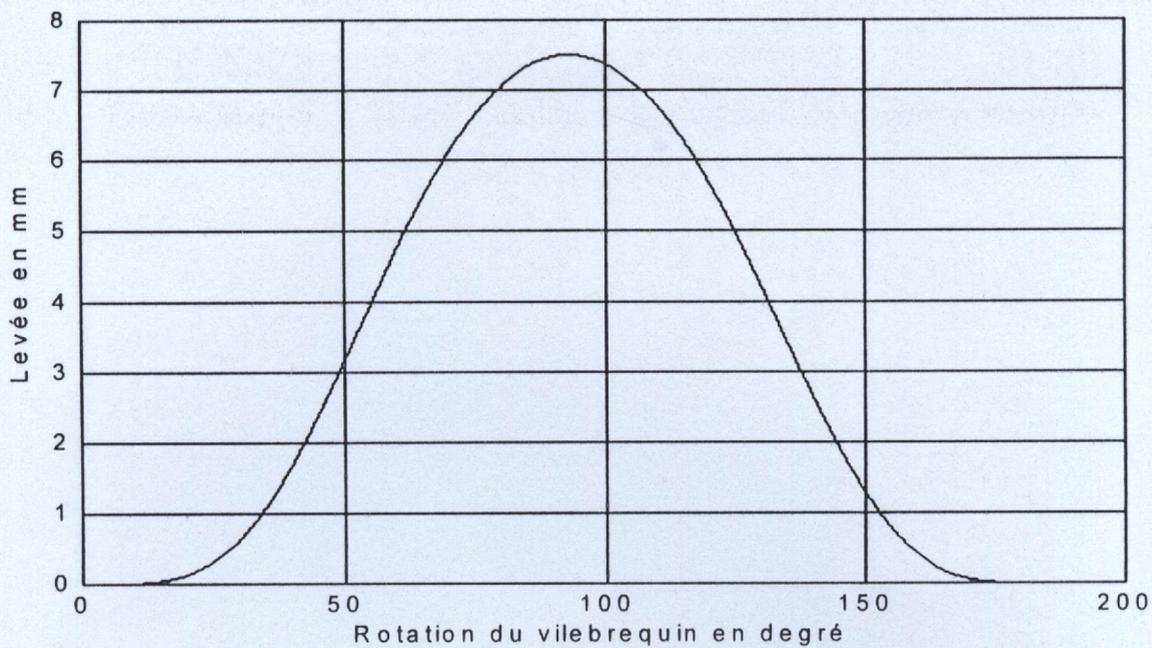


Fig. 6.2 - Diagramme de la levée soupape

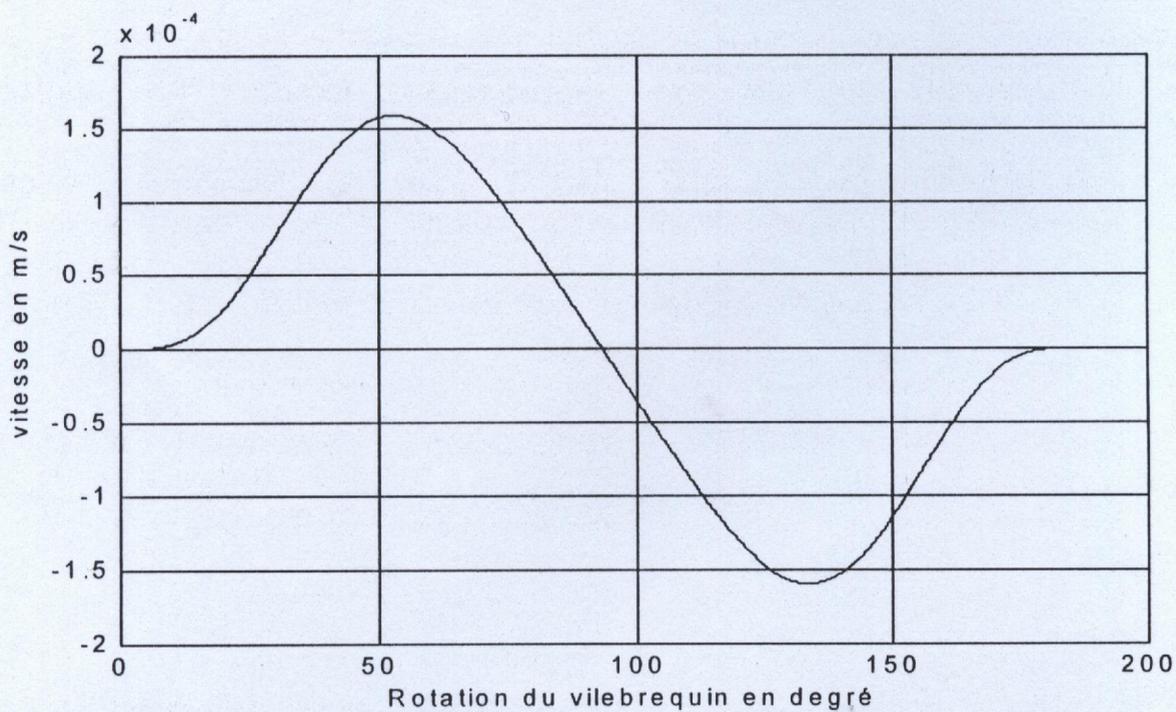


Fig.6.3 – Diagramme de vitesse de la soupape

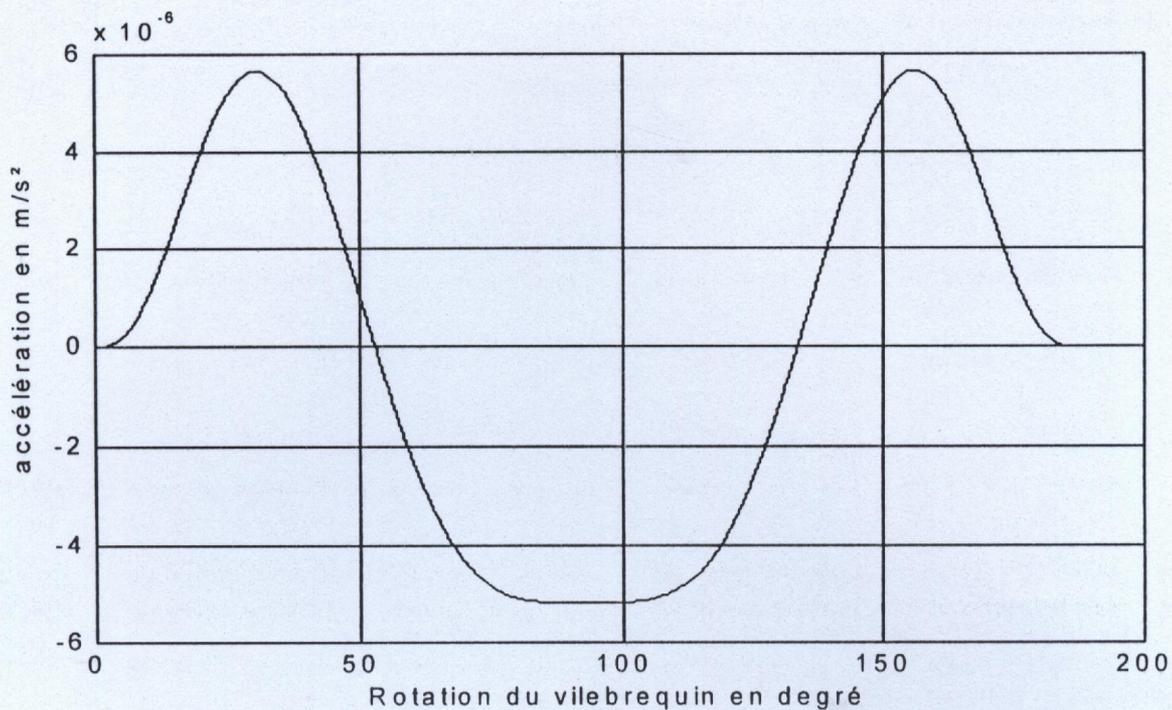


Fig. 6.4 – Diagramme de l'accélération de la soupape

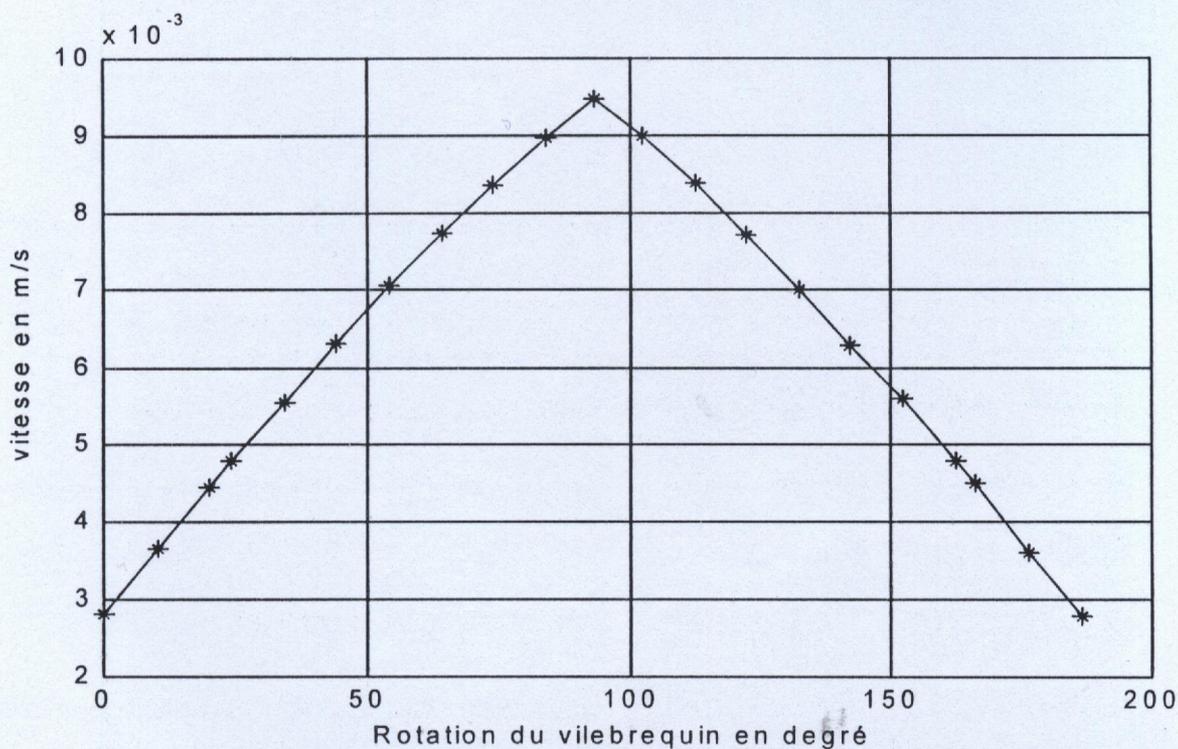
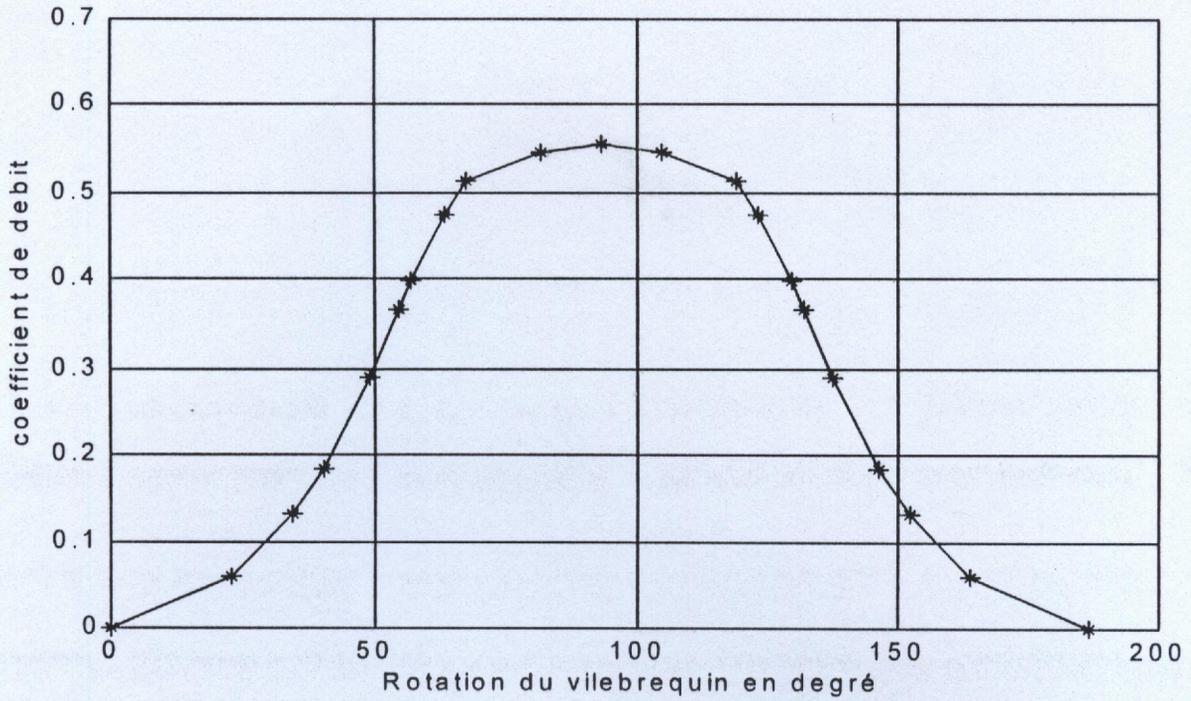
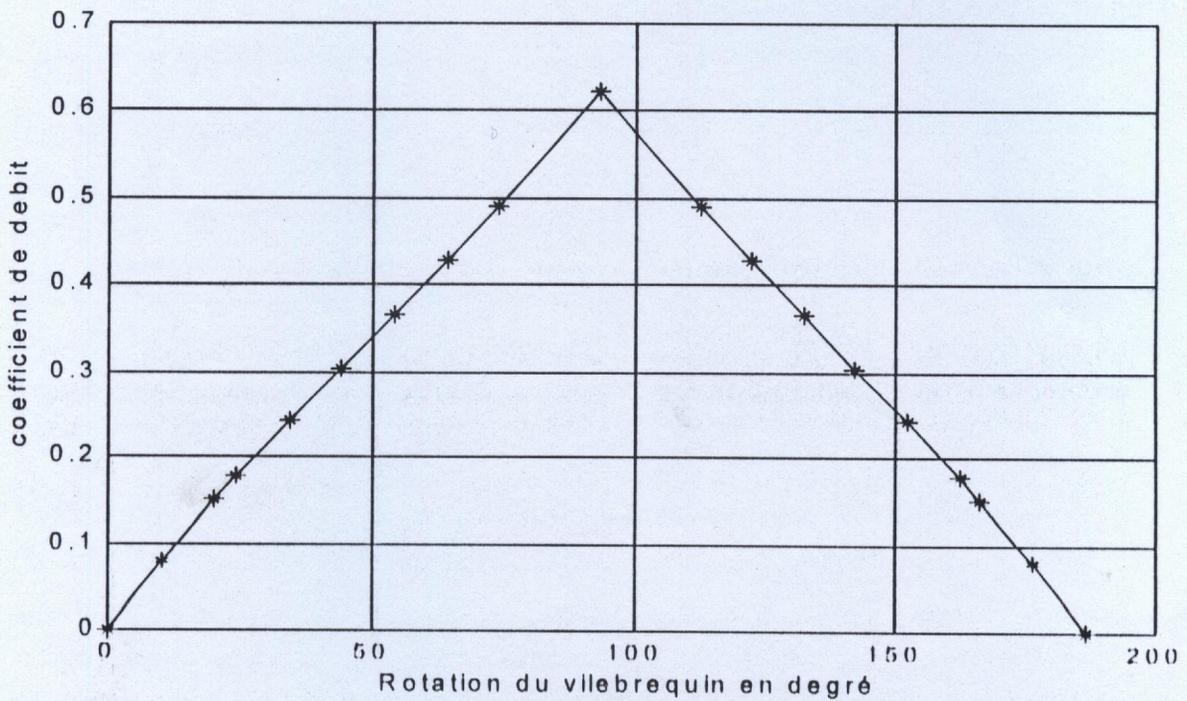


Fig. 6.5 – Diagramme d'ouverture de vitesse de la section de passage des gaz
(tube rotatif)

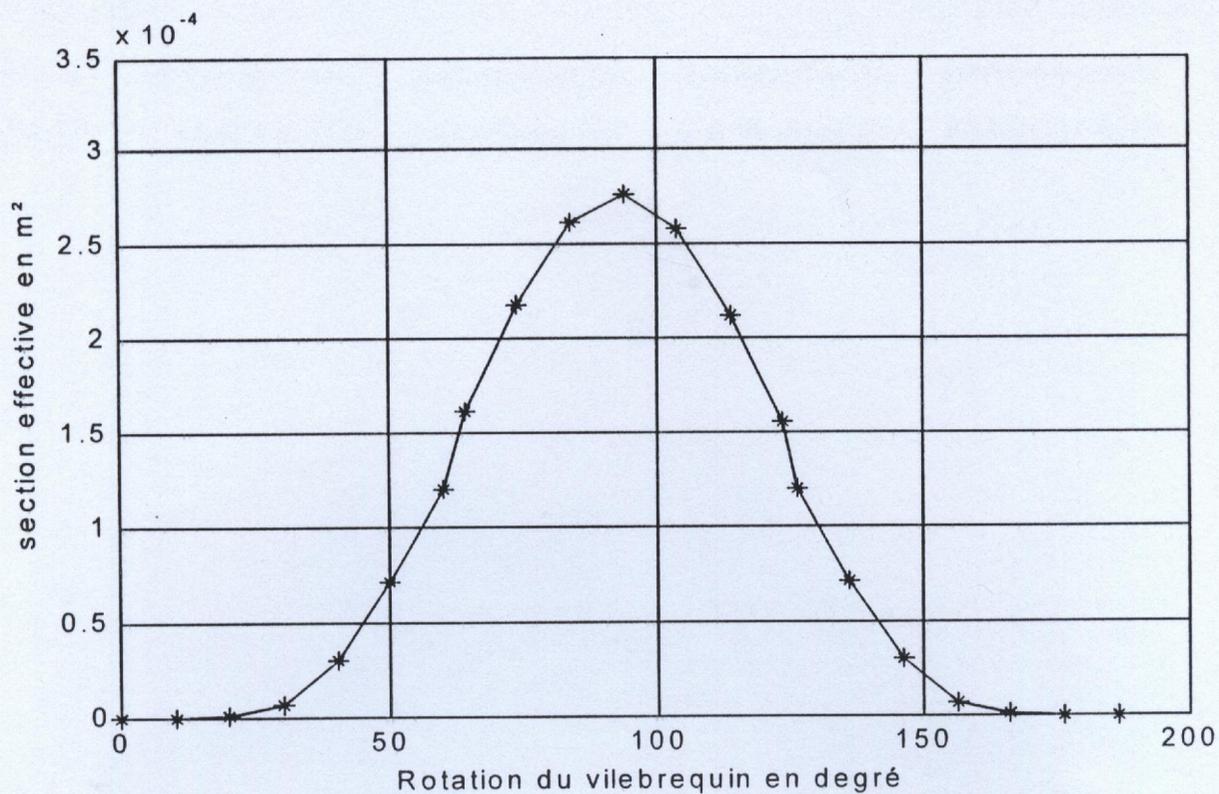


a) avec la soupape

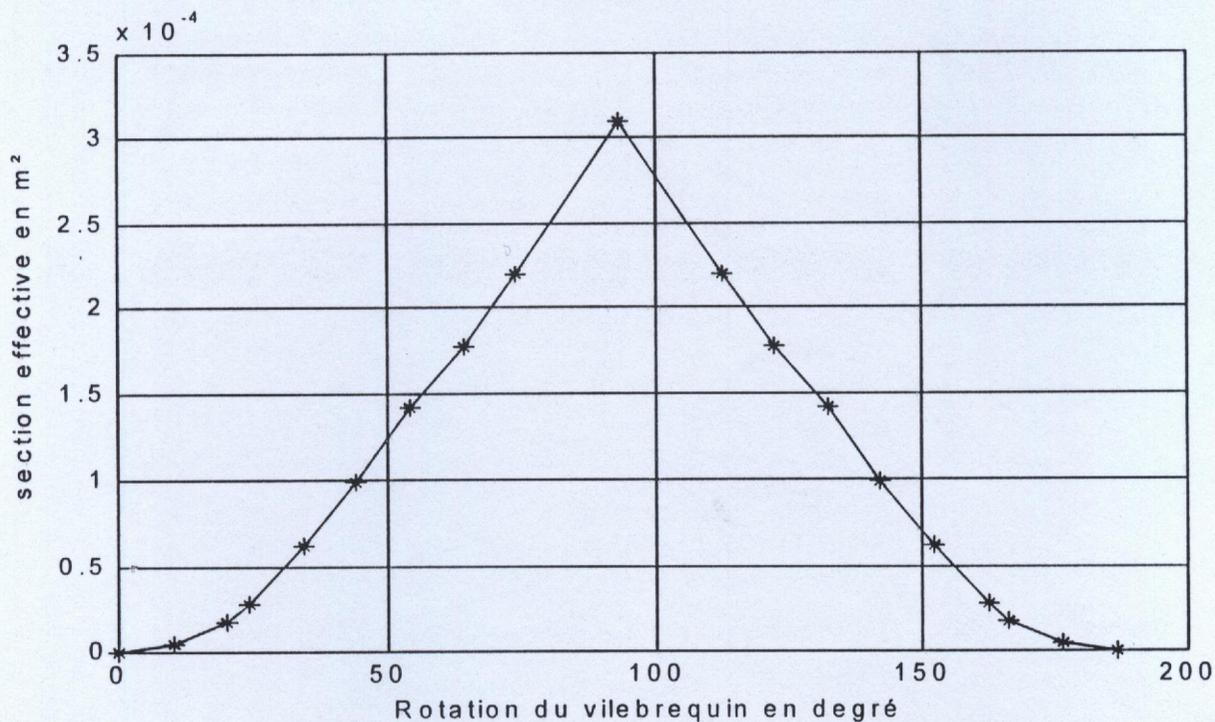


b) avec le tube rotatif

Fig. 6.6 – Variation du coefficient de débit

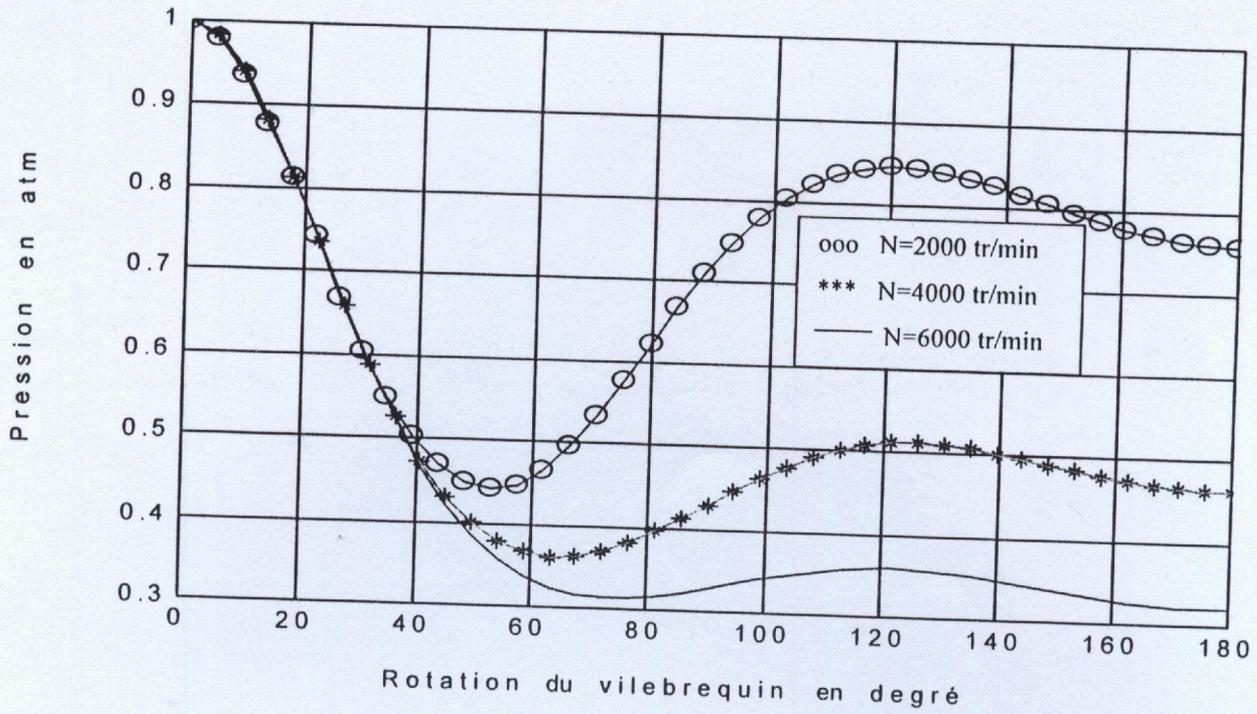


a) avec la soupape

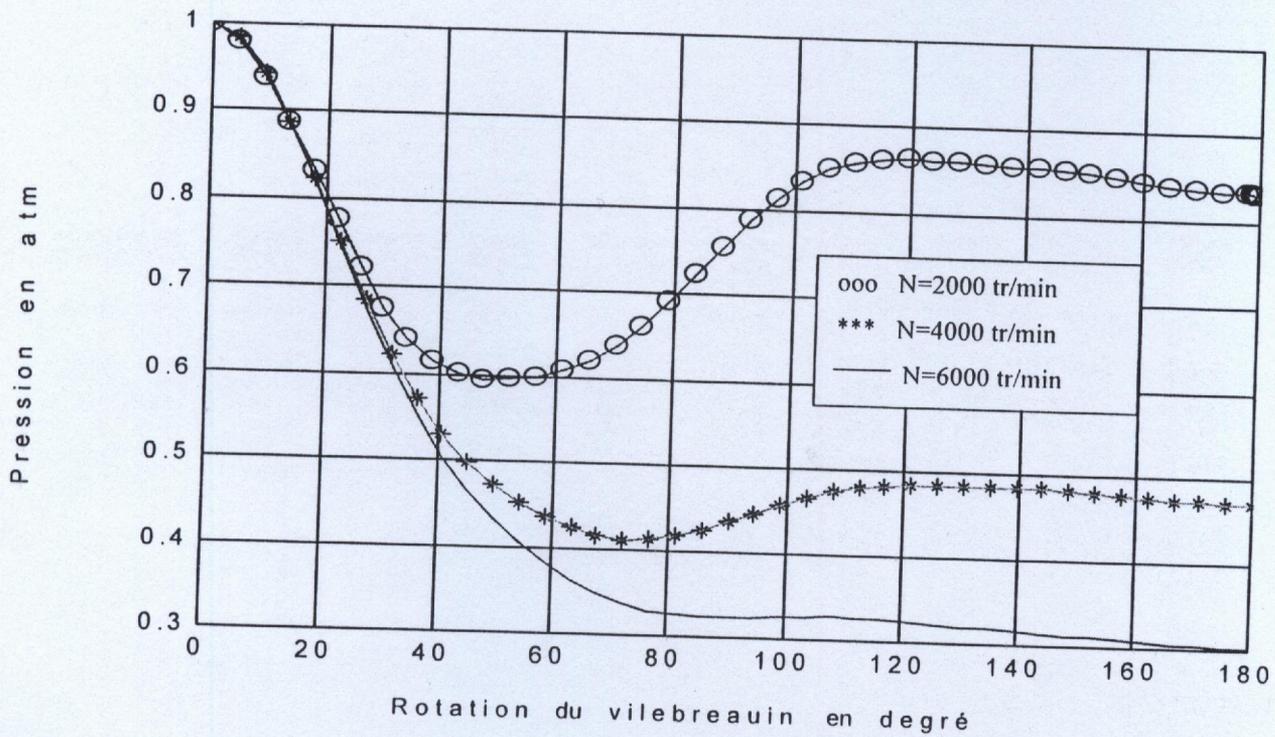


b) avec le tube rotatif

Fig.6.7 – Variation de la section effective des gaz



a) avec la soupape



b) avec le tube rotatif

Fig. 6.8- Evolution de la pression dans le cylindre avec les deux types de distribution

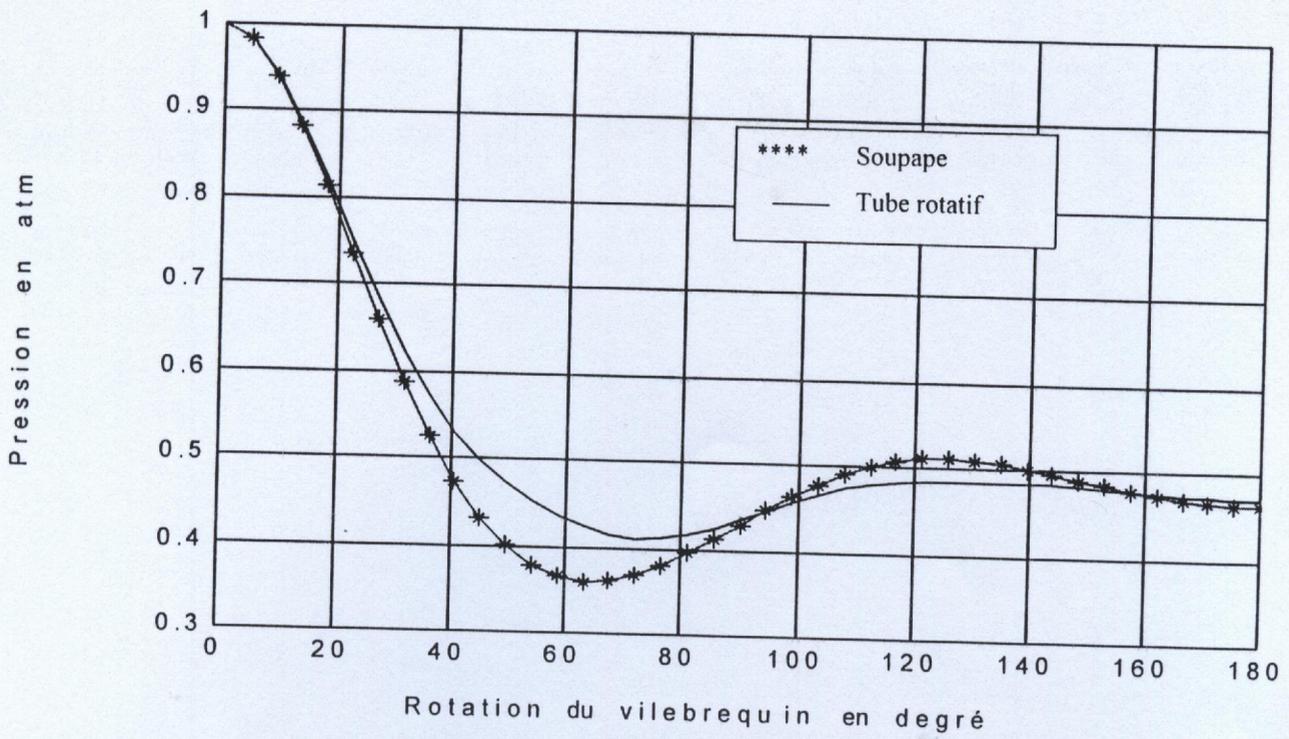
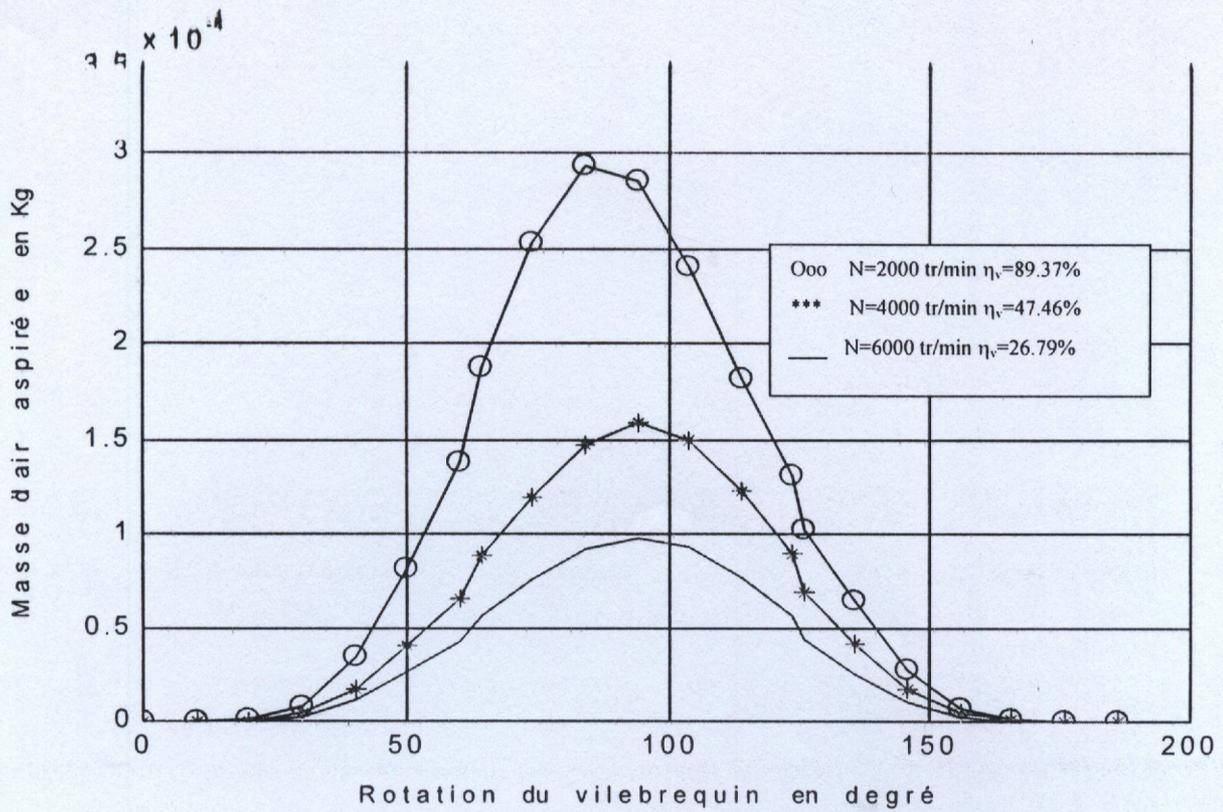
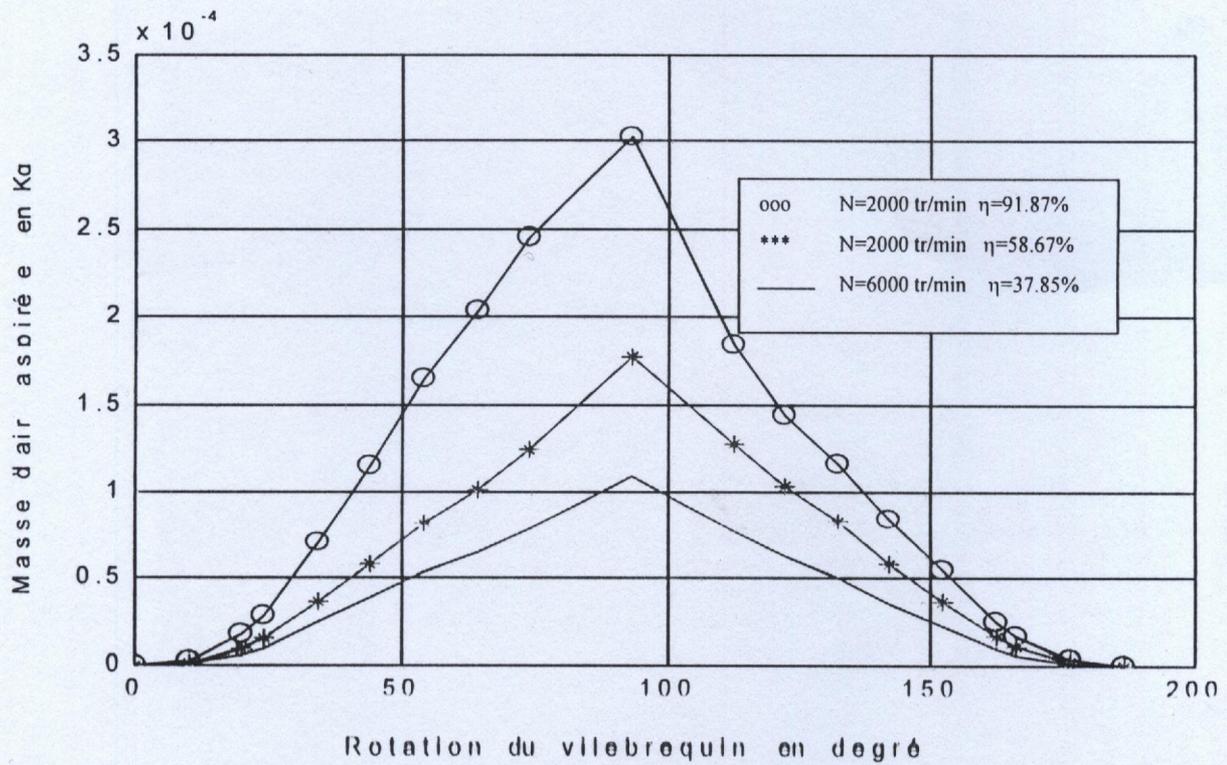


Fig. 6.9- Comparaison de la pression des gaz admis dans le cylindre pour N=4000 tr/min et rc=8



a) avec la soupape



b) avec le tube rotatif

Fig.6.10 – Evolution de la masse admise dans le cylindre

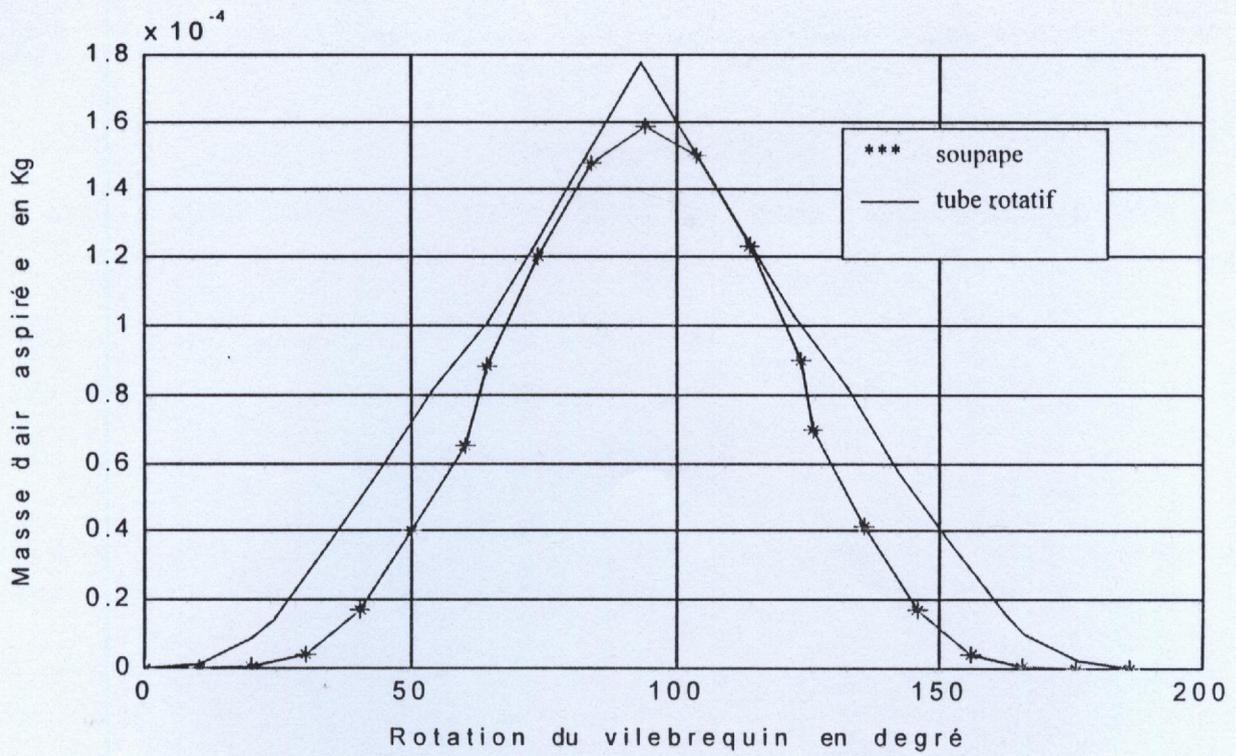


Fig. 6.11 – Comparaison de la masse admise dans le cylindre pour N=4000 tr/min et rc=8

C h a p i t r e

7

Conclusions

CONCLUSIONS

Devant certains inconvénients, sur le plan économique (prix de revient) et technologique (poids, encombrement) que représente le moteur à combustion interne dans sa conception actuelle, plusieurs solutions ont été envisagées en vue d'augmenter ses performances d'améliorer son fonctionnement et de réduire les émissions polluantes. Certains chercheurs sont allés jusqu'à changer radicalement sa conception pour finalement aboutir à la suppression de tout mouvement alternatif. C'est le cas du moteur Wankel. Par contre d'autres se sont intéressés seulement à substituer la distribution à soupape par une distribution appelée sans soupape.

Dans la présente étude, nous avons proposé et conçu un système de distribution à mouvement rotatif disposant des avantages suivants :

- Un mouvement très rapide du fait que les orifices d'admission travaillent en rotation ;
- Une suppression de pièces lourdes et coûteuses et difficiles à réaliser telle que : arbre à cames, le culbuteur, ressorts, soupape ;
- Une réduction considérable du bruit.

Par ailleurs, ce système possède les inconvénients suivants :

- Segments fonctionnant à sec ;
- Encombrement des tubes rotatifs causant ainsi des problèmes dans les moteurs à injection ;
- Vibration du tube rotatif dans le cas des moteurs à 4 cylindres.

Afin de confirmer les améliorations de performance éventuelles engendrées par cette nouvelle distribution, on s'est intéressé à l'étude d'un des facteurs de performance caractérisant la phase d'admission, à savoir le rendement volumétrique. Cette étude comparative entre le nouveau système d'admission à tube rotatif et le système classique à soupape a été réalisée en considérant un moteur à combustion interne fonctionnant à quatre temps et sans tenir compte des effets pulsatoires, de transfert thermique et de frottements.

En confrontant les résultats expérimentaux trouvés par les deux dispositifs (à tube rotatif et à soupape), on peut résumer les principales conclusions comme suit :

- La variation du coefficient de débit pour le tube rotatif est linéaire, contrairement à celle de la soupape qui est sinusoïdale ;
- La section effective de passage des gaz, pendant la phase d'admission, est nettement meilleure avec le tube rotatif qu'avec la soupape ;
- Le rendement volumétrique est nettement amélioré pour le dispositif à tube, ceci est dû à l'effet d'augmentation de la section effective de passage des gaz ;
- Le rendement volumétrique, avec l'utilisation de la distribution à tube rotatif, est meilleur ;
- Le rendement volumétrique, pour une section donnée, est inversement proportionnel à la vitesse de rotation du moteur pour les deux dispositifs ;
- Le rendement volumétrique chute brutalement lorsque le nombre de Mach moyen s'approche de la valeur 0.5, et cela pour les grandes vitesses de rotation du moteur pour les deux dispositifs.

Le présent travail constitue une étape dans l'étude approfondie du nouveau système proposé ainsi que des comparaisons avec le système classique à soupape. Ces travaux doivent être poursuivis et nous recommandons les points suivants :

- De prendre en considération que, l'écoulement au niveau des orifices d'admission est : Rotatif, compressible et instationnaire et turbulent au début de l'admission ;
- D'étudier les autres phases du cycle thermodynamique et par la suite calculer le rendement thermique et le comparer avec celui obtenu pour une distribution à soupape.
- Une étude qui détermine la faisabilité, la fiabilité et les avantages et les inconvénients du système proposé ;
- La réalisation d'un moteur réel muni de ce dispositif qui ferait l'objet d'une étude poussée des performances à différents régimes de rotation sur un banc d'essai moteur.

Annexe

1

Etalonnage du diaphragme

Étalonnage du diaphragme

A- Courbe d'étalonnage [23]

L'étalonnage du débitmètre a été établi en utilisant le tube de pitot. Ce tube n'est qu'une sonde qui permet de mesurer localement la pression totale et la pression statique (fig.a.1). L'équation de Bernoulli nous permet de calculer la vitesse de l'écoulement :

$$\frac{1}{2} \rho \cdot v^2 = \rho_f \cdot g \cdot \Delta H_d = p_0 - p$$

Où p_0 : Pression totale

p : pression statique

ρ_f : masse volumique du fluide contenu dans le manomètre

ΔH_d : différence de hauteur indiquant la pression différentielle au niveau du diaphragme

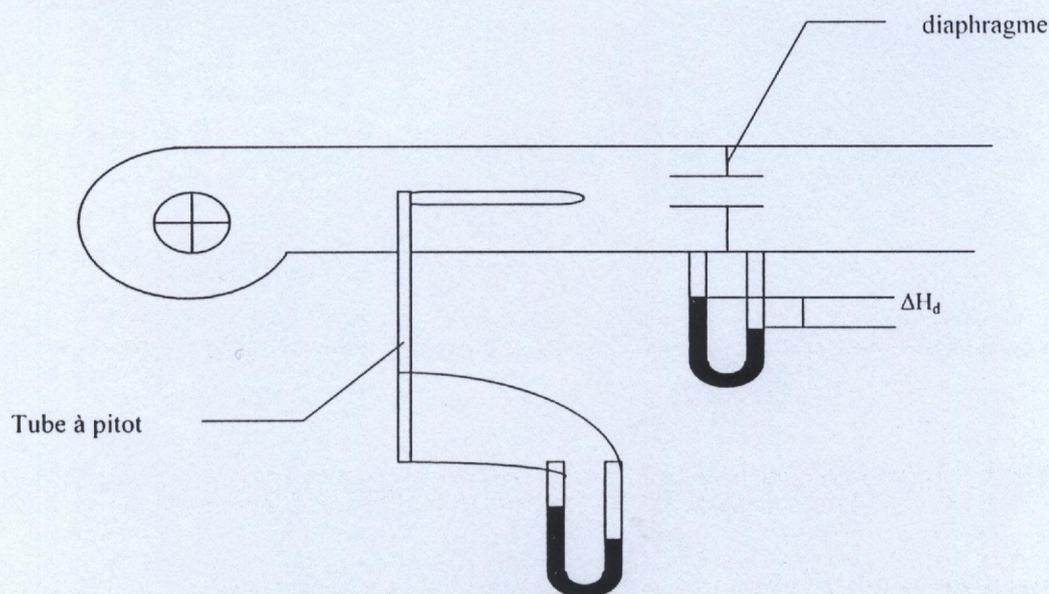


Fig. a.1 – Étalonnage du diaphragme

Le tracé de la courbe d'étalonnage a été effectué pour une variation de ΔH_d de 0 à 140mm par pas de 10mm. Pour chaque pas, une série de mesures à été faite à l'aide tube à pitot pour déterminer le profil de vitesse. Ainsi les valeurs de débit sont obtenues par intégration de ce profil de vitesse (fig.a2).

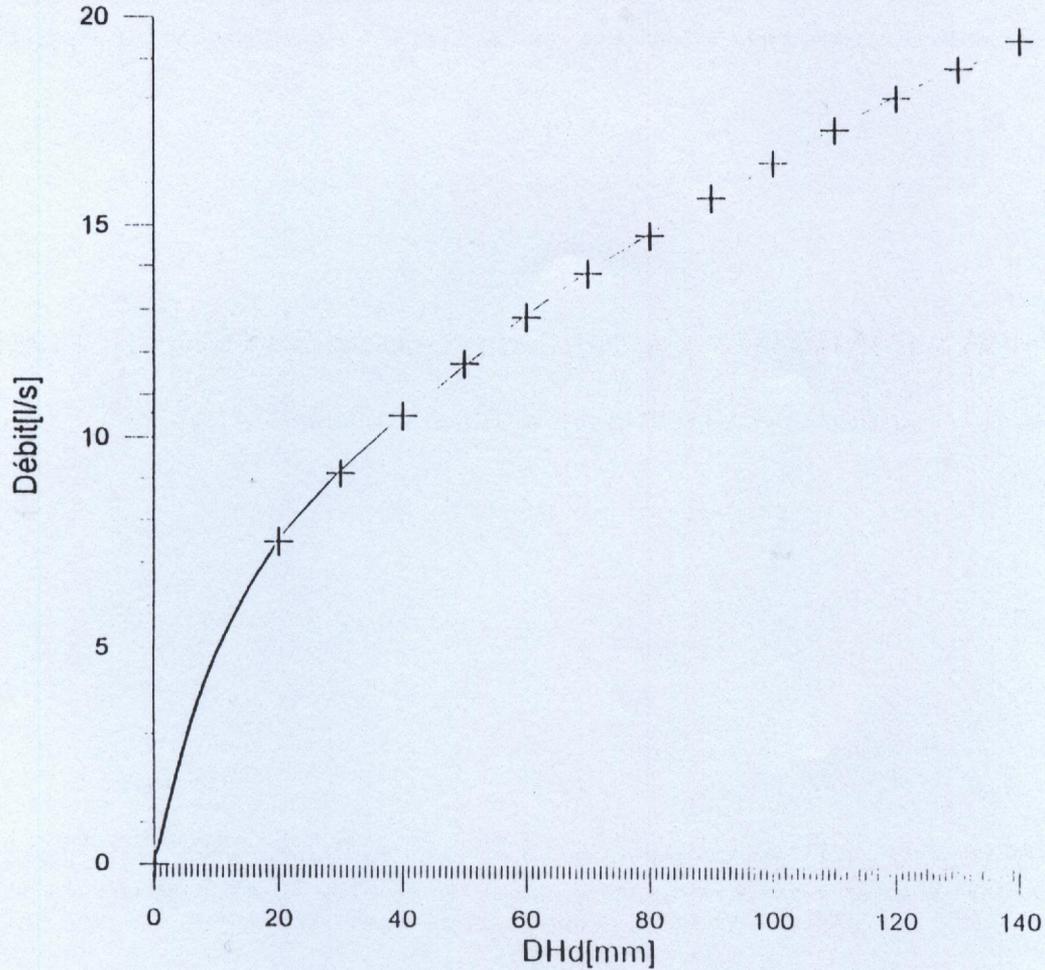


Fig.a.2 - Courbe d'étalonnage du diaphragme

□ Procédé de calcul

Pour une section élémentaire donnée (fig.a3), le débit est donné par la relation suivante :

$$dQ = v(r)ds$$

$$ds = r dr d\theta$$

d'où $dQ = r.v(r).dr.d\theta$

$$dQ = 2\pi \int_0^R r.v(r)dr$$

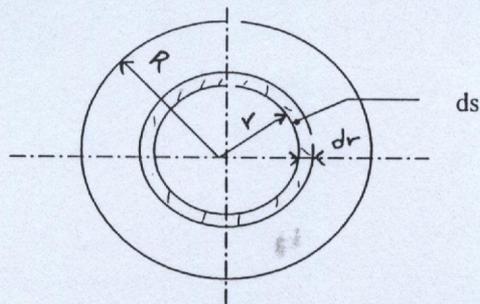


Fig.a.3 – Schéma de la section élémentaire.

□ Fiabilité du diaphragme

La figure a.4 montre les valeurs de débit obtenus par les formules approchées (Stolz) et celle obtenues par le tube à pitot. On remarque que pour des valeurs de $20\text{mm} < \Delta H_d < 140\text{mm}$, la moyenne de l'erreur est de 4.7%. Cependant, on peut parler d'une bonne réalisation de l'organe déprimogène surtout dans cette page de ΔH_d .

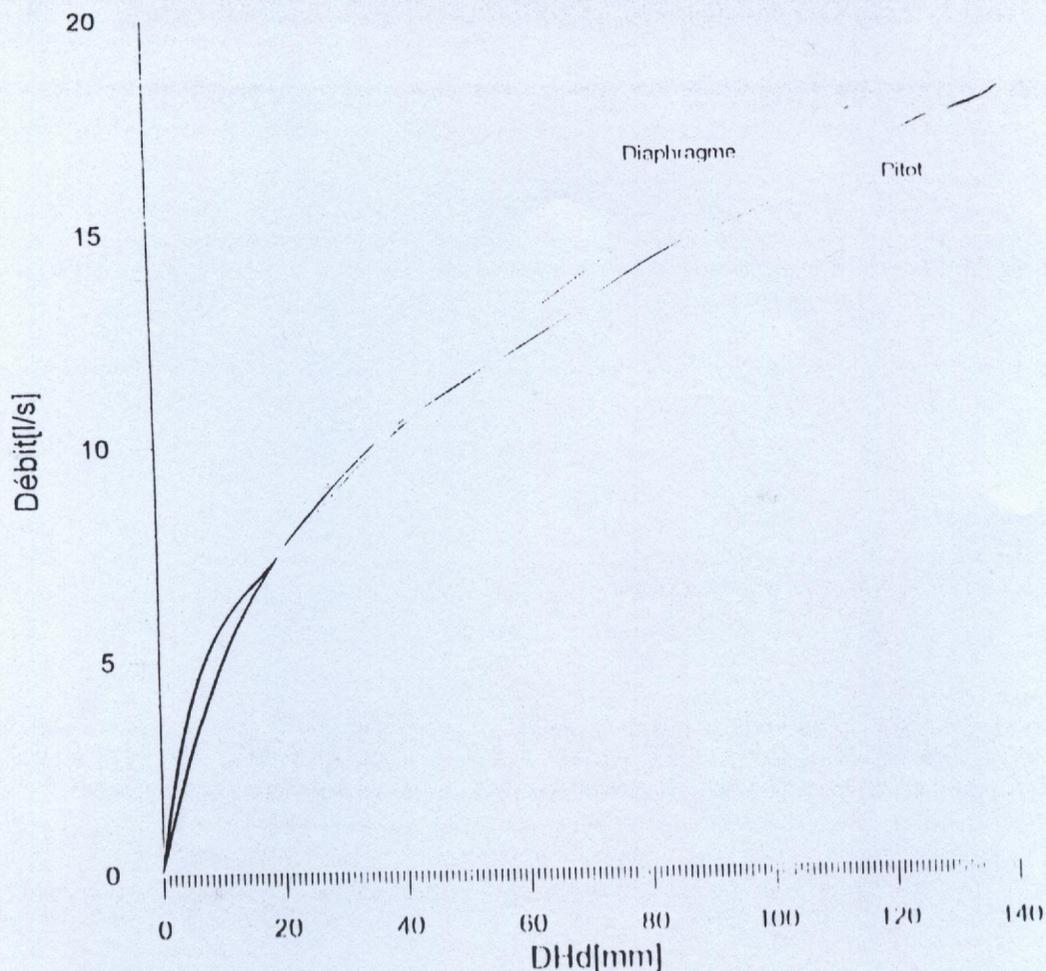


Fig.a.4 – Comparaison des valeurs de débit obtenue par le tube à pitot et les formules approchées

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Okuno,T ; Mase,Y et Naritni,T- *Development of a new 12 valve 4 cylinder engine-* S.A.E journal (transactions) N°881776, pp. 1436-1447 , 1989.
- [2] Brwne,K.R ; Partridge,I.M et Greeves,G – *Fuel property effects on fuel/air mixing in an experimental Diesel engine* – S.A.E journal N°860223, pp.336-357, 1980.
- [3] Salemkour,M – *Proposition et étude d'un nouveau système d'admission de soupape avec sa culasse* – Mémoire d'ingénieur d'état (Institut de Mécanique , Université de Blida), Juin 1990.
- [4] Dhaouahira,Z ; Bouderghouma,M.A- *Réalisation d'un banc d'essai d'étanchéité d'un système d'alimentation d'un moteur à combustion interne* - Mémoire d'ingénieur d'état (Institut de Mécanique, Université de Blida), Décembre 1993.
- [5] Encyclopédie des sciences industrielles Quillet — *Constructions mécaniques , le moteur-* Tome 1 et 3, pp.217 –219 et pp.305-338 ,Librairie Aristide Quillet , Juillet 1983.
- [6] Heywood, J.B – *Fluid motion within the cylinder of internal combustion engines-* Journal of Fluids Engineering, Volume 109 ,pp. 3-35, Mars 1987.
- [7] Marroselli,J.C- *L'automobile et ses grands problèmes-* Librairie Larousse, pp. 198-342, Paris 1958.
- [8] Serruys,M – *Distribution dans les moteurs à combustion interne* – Techniques de l'ingénieur. B371, Edition Thecnip,1983.
- [9] Geoffroy,B - *Distribution à soupape* – Techniques de l'Ingénieur.B2.805 ,Edition Thecnip,1993 .
- [10] Assanis,D.N ; Polishack,M- *Valve event optimisation in spark ignition engine* – Journal of Engineering for Gas Turbine and Power , volume 112, pp.341-47, Juillet. 1990.
- [11] Kastner,L.J ; Williams,T.J et White,J.B – *Poppet inlet valve characteristics and their influence on the induction process* – Proceeding Institute of Mechanical Engineering ,Volume 178, Part1, N°36, pp.955- 978, Janvier.1964.
- [12] Serruys,M – *L'écoulement des fluides dans les moteurs* – Revue Générale de Mécanique , Fascicule N°6 , Juin 1949.
- [13] Beson , R.S ; Garg,R.D et Woollatt, D – *A numerical solution of unsteady flow problems* –Journal of Mechanical Science, Volume 6, pp. 117-144, Juin 1964 .

- [14] Yagi,S ; Ishizuka,A ; Fujit,I – *Research and development of high speed ,high performance small displacement Honda engine* – S.A.E paper N° 700122, pp. 640-659, Mars 1965.
- [15] Serruys(M)- *Contribution à l'interprétation des écoulements pulsatoir des gaz dans les tubulures des moteurs* – C. R .Académie des Sciences ,Fascicule 278 ,pp. 219-230, 1974.
- [16] Taylor,C.F- *The internal combustion engine in theory and practice* – volume I ,2nd.Edition , M.I.T Press, Cambridge, Massachusetts,1966.
- [17] Laribi, B ; Aichouni, M- *Etude du développement longitudinal et de l'établissement des écoulements des gaz* pp.176-178, Comagep3, Algérie (Tamansasset), Mai 1998.
- [18] Wood, G.B ; Hunter, D.U ; Taylor,E.S et Taylor,C.F – *Air flow through intake valve* – SAE journal (Transactions) , Volume 50, N°6 , pp. 213-252, Juin 1942.
- [19] Livengood, J.C ; Stanitz,D – *The effect of the inlet valve design ,size ,and lift on the air capacity and output of a four stroke engine* – NACA TN 915,pp.172-198, Février 1943.
- [20] Livengood, J.C ; Regwaski,A.R et Taylor,C.F – *The volumetric efficiency of four-stroke engines* –SAE Transactions, Volume 6, N°4, pp.617-633 , octobre 1952.
- [21] Fukutani, I ; Watanabe,E – *An analysis of the volumetric efficiency characteristics of 4 stroke cycle engine using the mean inlet Mach number Min* – S.A.E. journal (Transactions) N°790484 , S.A.E.,Inc, pp. 1756-1786,1980.
- [22] Gailledreau,C – *Débitmètre à organe déprimogène* -Techniques de l'Ingénieur, R2220 ,Edition Thecnip,1992.
- [23] Boumcied,M ; Souna,F- *Etude expérimentale du coefficient de débit d'un système d'alimentation de M.C.I* - Mémoire d'ingénieur d'état (Institut de Mécanique, Université de Blida), Juin 1996.

تمت بحمد الله

Chapitre 3

Modélisation et Simulation de
l'association
moteur asynchrone-onduleur

INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à l'étude de l'association moteur asynchrone-onduleur. A l'aide de la transformation triphasé-diphasé, les équations électriques qui régissent le fonctionnement du moteur sont déterminées dans le repère de Park. L'équation de la vitesse, qui traduit la conversion électromécanique de l'énergie est donnée pour compléter la représentation.

L'onduleur d'alimentation est modélisé dans le cas idéal, cas dans lequel les interrupteurs sont considérés comme parfaits.

Le modèle de l'ensemble moteur asynchrone-onduleur est ainsi établi, il permet l'étude par simulation de cette association.

1/ MODELISATION DU MOTEUR ASYNCHRONE [26,27]

1.1/ Description – Hypothèses simplificatrices.

La machine asynchrone dont nous allons étudier la mise en équation correspond à la structure de principe représentée par la figure 3.1 (voir page 63), dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation, dans l'hypothèse bipolaire. Il sera toujours possible, par une transformation convenable, de passer à une machine q-polaires (q étant pair).

Les armatures magnétiques du rotor et du stator sont toutes deux cylindriques et munies chacune d'un enroulement triphasé. Dans le cas du moteur à cage, il est possible de considérer un bobinage triphasé équivalent, et de là son étude pourra se ramener à celle du moteur bobiné.

Pour l'écriture du modèle de la machine, certaines hypothèses simplificatrices sont faites :

- Le moteur est symétrique et à entrefer constant.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- L'effet de peau est négligeable.

1.2/ Equations électriques

Les six enroulements "a_s", "b_s", "c_s", "a_r", "b_r" et "c_r" obéissent aux équations électriques suivantes:

$$\begin{vmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{vmatrix} = d/dt \begin{vmatrix} \Phi_{as} \\ \Phi_{bs} \\ \Phi_{cs} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{vmatrix} \quad (III.1)$$

$$\begin{vmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{vmatrix} = d/dt \begin{vmatrix} \Phi_{ar} \\ \Phi_{br} \\ \Phi_{cr} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{vmatrix} \begin{vmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{vmatrix} \quad (III.2)$$

1.3/ Modèle de Park [19]

En respectant les hypothèses simplificatrices citées ci-dessus, il est possible de réaliser la transformation diphasée de Park avec un système d'axe perpendiculaires d-q quelconque (Fig 3.1, voir page 63).

Le modèle mathématiques généralisé peut être décrit de la façon suivante:

$$V_{sd} = R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \Phi_{sd} - \dot{\Psi} \Phi_{sq}$$

$$V_{sq} = R_s I_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{sq} - \dot{\Psi} \Phi_{sd}$$

(III.3)

$$V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d}{dt} \Phi_{rd} - (\dot{\Psi} - \dot{\Theta}_e) \Phi_{rq}$$

$$V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d}{dt} \Phi_{rq} - (\dot{\Psi} - \dot{\Theta}_e) \Phi_{rd}$$

avec

$\Psi = \omega_s t$, $\Psi' = \omega_s$: pulsation des courants statoriques.

ω_s : vitesse du champ tournant statorique.

$\Theta = \Theta_{e0} + \omega_e t$, $\Theta'_e = \omega_e$: vitesse de rotation électrique.

Θ_e : position angulaire électrique.

$\Psi' - \Theta'_e = \omega_s - \omega_e = \omega_r$: pulsation des courants rotoriques.

Les tensions V_{sd} et V_{sq} s'expriment, en fonction du système triphasé alimentant le moteur, par :

$$\begin{vmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} +\cos\Psi & +\cos(\Psi-2\Pi/3) & +\cos(\Psi-4\Pi/3) \\ -\sin\Psi & -\sin(\Psi-2\Pi/3) & -\sin(\Psi-4\Pi/3) \end{vmatrix} \begin{vmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{vmatrix} \quad (III.4)$$

Les expressions des différents flux sont :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s I_{sd} + m I_{rd} \\ \Phi_{sq} = L_s I_{sq} + m I_{rq} \end{cases} \quad \begin{cases} \Phi_{rd} = L_r I_{rd} + m I_{sd} \\ \Phi_{rq} = L_r I_{rq} + m I_{sq} \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

En injectant les équations III.5 et III.6 dans le système III.3 et tenant compte du fait que le rotor est en court-circuit ($V_{rd} = V_{rq} = 0$); on peut présenter le modèle de la machine avec comme variable les courants statoriques et rotoriques. Ce modèle écrit sous forme matricielle donne

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s \cdot d/dt & L_s \cdot \omega_s & m \cdot d/dt & -m \cdot \omega_s \\ L_s \cdot \omega_s & R_s + L_s \cdot d/dt & m \cdot \omega_s & m \cdot d/dt \\ m \cdot d/dt & m \cdot \omega_r & R_r + L_r \cdot d/dt & L_r \cdot \omega_r \\ -m \cdot \omega_r & m \cdot d/dt & -L_r \cdot \omega_r & R_r + L_r \cdot d/dt \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix}$$

On transforme ce système sous la forme d'une équation d'état :

$$\frac{d}{dt} X = A X + B V \quad (\text{III.7})$$

On prend comme vecteur d'état le vecteur des courants $[I]$ et le vecteur de tension $[V]$ comme vecteur de commande d'où:

$$\frac{d[I]}{dt} = A \cdot [I] + B \cdot [V] \quad (\text{III.8})$$

$$[I]^t = [I_{sd} \ I_{sq} \ I_{rd} \ I_{rq}] \quad (\text{III.9})$$

$$[V]^t = [V_{sd} \ V_{sq}] \quad (\text{III.10})$$

Ainsi, on obtient :

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_s L_r - m^2} \begin{bmatrix} -L_r \cdot R_s & \omega_r \cdot m^2 & m \cdot R_s & \omega_r \cdot L_r \cdot m \\ -\omega_r \cdot m^2 & -L_r \cdot R_s & -\omega_r \cdot L_r \cdot m & m \cdot R_r \\ m \cdot R_s & -\omega_r \cdot L_s \cdot m & -L_s \cdot R_r & -\omega_r \cdot L_s \cdot L_r \\ \omega_r \cdot L_s \cdot m & m \cdot R_s & \omega_r \cdot L_s \cdot L_r & -L_s \cdot R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \\ -m & 0 \\ 0 & -m \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

La matrice [V] qui est la matrice de commande, sera déterminée par la modélisation de l'onduleur et de la stratégie de commande adoptée.

1.4/ Equation mécanique

La partie mécanique qui intervient dans la mise en équation du système est représentée par l'équation de la vitesse angulaire. Cette vitesse est donnée par :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = \Gamma_{em} - \Gamma_r \quad (\text{III.12})$$

Γ_r : couple résistant, constitué par le couple de charge T_r et le couple de frottement T_f .

Le couple électromagnétique fourni par la machine s'exprime comme :

$$\Gamma_{em} = qm(I_{rd} I_{sq} - I_{rq} I_{sd}) \quad (\text{III.13})$$

L'équation III.12 devient :

$$\frac{d\Omega}{dt} = q \frac{m}{J} (I_{rd} I_{sq} - I_{rq} I_{sd}) - \left(\frac{T_r + T_f}{J} \right) \Omega \quad (\text{III.14})$$

2/ MODELISATION DE L'ONDULEUR

2.1/ Introduction

Le montage donné à la figure 3.2 (voir page 63) représente un onduleur de tension triphasé. Il est composé de six interrupteurs aux bornes desquels sont montées, en antiparallèle, des diodes de récupération.

Les signaux logiques de commande C_i et C_i' ($i=a,b,c$) fixent les états des interrupteurs, supposés parfaits (pas de temps morts à la commutation) et à commandes complémentaires ($C_a = \overline{C_a'}$, $C_b = \overline{C_b'}$, $C_c = \overline{C_c'}$). Ils sont définis comme suit :

$$C_i = \begin{cases} 1 & \text{si l'interrupteur est fermé.} \\ 0 & \text{si l'interrupteur est ouvert.} \end{cases}$$

Les relations qui lient la tension continue E, à l'entrée de l'onduleur, aux tensions de ligne délivrées par ce dernier sont :

$$\begin{aligned} V_{ab} &= E.(C_a - C_b) \\ V_{bc} &= E.(C_b - C_c) \\ V_{ca} &= E.(C_c - C_a) \end{aligned} \quad (III.15)$$

Tandis que le courant à l'entrée de l'onduleur est donné par :

$$i_0 = C_a \cdot i_a + C_b \cdot i_b + C_c \cdot i_c \quad (III.16)$$

2.2/ Mise en équation

Le cas de l'onduleur de tension alimentant un moteur triphasé couplé en étoile est envisagé (Fig.3.2). Le système étant triphasé équilibré :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (III.17)$$

L'expression des tensions simples aux bornes du moteur (Fig 3.2) en fonction de la tension d'entrée de l'onduleur E et des commandes C_i ($i=a,b,c$) est la suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = (E/3) \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix} \quad (III.18)$$

L'étude du moteur se fait dans un repère lié au stator. L'application de la transformation de Park $P(\Psi = 0)$ aux tensions V_{an} , V_{bn} et V_{cn} permet de déterminer V_{sd} et V_{sq}

$$[V] = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = P(0) \cdot \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad (III.19)$$

Il est plus intéressant d'exprimer la matrice $[V]$ à l'aide des signaux de commande C_a , C_b et C_c , d'où:

$$[V] = \begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = 2/3 \cdot E \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_a \\ C_b \\ C_c \end{bmatrix} \quad (III.20)$$

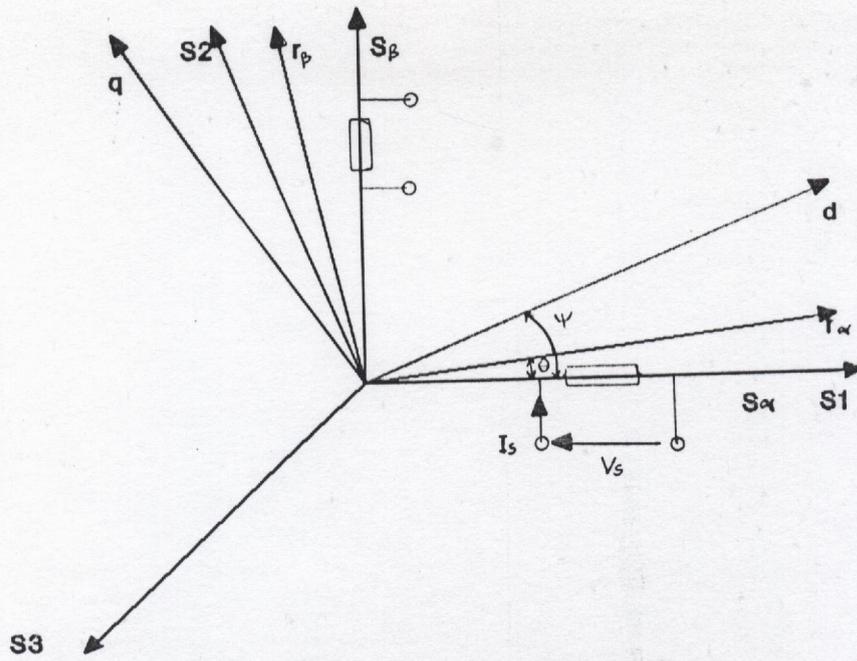


Fig3.1 Transformation triphasé-diphasé
(Transformation de Park)

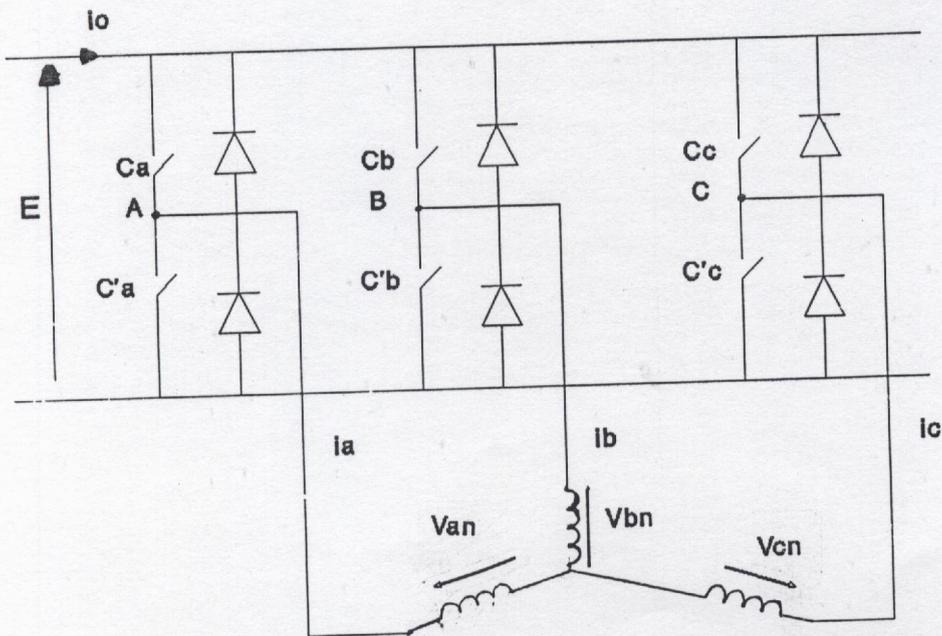


Fig3.2 Onduleur avec charge

3/ MODELE DE L'ENSEMBLE MOTEUR ASYNCHRONE- ONDULEUR

Le modèle électrique représentant l'association moteur asynchrone-onduleur écrit dans un repère lié au stator est donné par l'équation d'état :

$$\frac{d[I]}{dt} = A. [I] + B. [U] \quad (\text{III.21})$$

avec

$$[I] = [I_{sd} \ I_{sq} \ I_{rd} \ I_{rq}] \quad (\text{III.22})$$

$$[U] = [C_a \ C_b \ C_c] \quad (\text{III.23})$$

où

$$A = \frac{1}{L_s \cdot L_r - M^2} \begin{bmatrix} -L_s \cdot R_s & m^2 \cdot q \cdot \Omega & m \cdot R_s & m \cdot L_r \cdot q \cdot \Omega \\ -m^2 \cdot q \cdot \Omega & -L_s \cdot R_s & m \cdot L_r \cdot q \cdot \Omega & m \cdot R_s \\ m \cdot R_s & m \cdot L_s \cdot q \cdot \Omega & -L_s \cdot R_r & -L_s \cdot L_r \cdot q \cdot \Omega \\ m \cdot L_s \cdot q \cdot \Omega & m \cdot R_s & -L_s \cdot L_r \cdot q \cdot \Omega & -L_s \cdot R_r \end{bmatrix}$$

et

$$B = \frac{E \cdot 2/3}{L_s \cdot L_r - m^2} \begin{bmatrix} L_r & -1/2 \cdot L_r & -1/2 \cdot L_r \\ 0 & \sqrt{3}/2 \cdot L_r & -\sqrt{3}/2 \cdot L_r \\ -m & 1/2 \cdot m & 1/2 \cdot m \\ 0 & -\sqrt{3}/2 \cdot m & \sqrt{3}/2 \cdot m \end{bmatrix}$$

A cette représentation électrique, s'ajoute l'équation mécanique donnant la vitesse angulaire Ω (Equation III.14).

Finalement, le modèle de connaissance de l'association moteur asynchrone - onduleur est donné par le système d'équations formé par III.14 et III.21.

4/ SIMULATION

4.1/ Principe

L'étude de l'association onduleur - moteur asynchrone a permis de déterminer un modèle de connaissance constitué par les équations III.14 et III.21. Il s'agit d'un système d'équations différentielles du premier ordre, non linéaires et à coefficients constants. Différentes méthodes de résolution pour ce type de système existent [22]. Une intégration numérique par la méthode de Runge-Kutta a été retenue.

4.2/ La méthode de Runge-Kutta [36, 37, 38, 39]

Le but de la méthode de Runge-Kutta est d'obtenir une solution numérique approchée d'une équation, ou d'un système d'équations, différentielles ordinaires, tel que:

$$\frac{dY_j(t)}{dt} = F_j(t, Y_1(t), Y_2(t), \dots, Y_n(t)) \quad ; \quad j=1, \dots, n \quad \text{(III.25)}$$

avec les conditions initiales:

$$Y_j(t_0) = Y_{j0}$$

Nous cherchons à déterminer les valeurs $Y_j (t_0 + DT)$. Où DT est un accroissement de la variable indépendante t . La méthode de Runge-Kutta est un algorithme établi pour approcher la somme de la série de Taylor, mais à l'opposé de cette somme formelle, cette méthode ne fait pas appel à la définition explicite, non plus qu'au calcul des dérivées d'ordre supérieure à 1. On obtient la formule approchée à l'aide de plusieurs évaluations des dérivées premières. Dans la méthode classique d'ordre 4, il faut réaliser quatre évaluations des dérivées premières pour obtenir une valeur approchée à l'ordre DT^4 de la somme de la série de Taylor [37]. L'approche théorique de la méthode permet d'aboutir à un système d'équations à deux degrés de liberté (les démonstrations sont données par [37, 38]). L'une des solutions de ce système est celle donnée par l'algorithme classique d'ordre 4 de Runge-Kutta.

La méthode de Runge-Kutta est convergente et stable, elle donne de très bons résultats numériques [36]. Cette méthode s'amorce seule, c'est à dire qu'il suffit de connaître les valeurs des fonctions en un seul point pour pouvoir déterminer les valeurs aux points suivants.

4.3/ L'algorithme de Runge-Kutta d'ordre 4

C'est un algorithme itératif qui nécessite la connaissance des valeurs initiales des variables. Les valeurs des variables au pas $i+1$ sont déterminées en utilisant celles du pas i , moyennant le calcul de quatre termes intermédiaires k_1, k_2, k_3 et k_4 . Réécrivons le système (III.22) sous la forme suivante :

$$\frac{dY_j}{dt} = F_j(t, Y_1, Y_2, Y_3, Y_4, Y_5) \quad ; \quad j=1, \dots, 5 \quad (\text{III.26})$$

L'utilisation de l'algorithme de Runge-Kutta d'ordre 4 permet d'écrire:

$$Y_j(i+1) = Y_j(i) + \frac{1}{6}(k_{1j} + 2.k_{2j} + 2.k_{3j} + k_{4j}) \quad (\text{III.27})$$

où

$$k_{1j} = DT.F_j(t_i, Y_1(i), Y_2(i), Y_3(i), Y_4(i), Y_5(i)) \quad (\text{III.28a})$$

$$k_{2j} = DT.F_j\left(t_i + \frac{DT}{2}, y_1(i) + \frac{k_{11}}{2}, y_2(i) + \frac{k_{12}}{2}, y_3(i) + \frac{k_{13}}{2}, y_4 + \frac{k_{14}}{2}, y_5(i) + \frac{k_{15}}{2}\right) \quad (\text{III.28b})$$

$$k_{3j} = DT.F_j\left(t_i + \frac{DT}{2}, y_1(i) + \frac{k_{21}}{2}, y_2(i) + \frac{k_{22}}{2}, y_3(i) + \frac{k_{23}}{2}, y_4 + \frac{k_{24}}{2}, y_5(i) + \frac{k_{25}}{2}\right) \quad (\text{III.28c})$$

$$k_{4j} = DT.F_j\left(t_i + DT, y_1(i) + \frac{k_{31}}{2}, y_2(i) + \frac{k_{32}}{2}, y_3(i) + \frac{k_{33}}{2}, y_4 + \frac{k_{34}}{2}, y_5(i) + \frac{k_{35}}{2}\right) \quad (\text{III.28d})$$

4.4/ Organigramme général

La simulation nécessite la connaissance des paramètres de la machine, de la condition d'arrêt, dans notre cas il s'agit de la borne supérieure d'intégration T_f , et du pas d'intégration DT .

Le pas d'intégration est un paramètre important, il influe sur la précision de la méthode. Généralement, il est choisi petit et les résultats du calcul sont alors stockés tous les T_1 ($T_1 = n \cdot DT$, n entier).

L'onduleur peut être commandé avec différentes lois de commande. Le comportement du moteur pourra être étudié, par simulation, pour ces différentes lois. En fonction de la loi de commande choisie, et à chaque pas d'intégration, les états adéquats des interrupteurs (ouverts ou fermés) sont déterminés, permettant ainsi de calculer la tension appliquée à la machine. La figure 3.3 donne l'organigramme de simulation de l'ensemble moteur asynchrone-convertisseur.

3.5/ PROGRAMME

Un programme, écrit en langage Pascal, a été mis au point. Il offre la possibilité de simuler le comportement de l'ensemble moteur asynchrone - onduleur pour différentes lois de commande.

La machine est représentée, dans un repère diphasé, par un système d'équations différentielles qui sont intégrés numériquement par l'algorithme de Runge-Kutta d'ordre 4. Les résultats de la simulation (courants de phase, courant à l'entrée de l'onduleur, vitesse angulaire, couple, ..etc) sont stockés dans des fichiers pour une exploitation ultérieure.

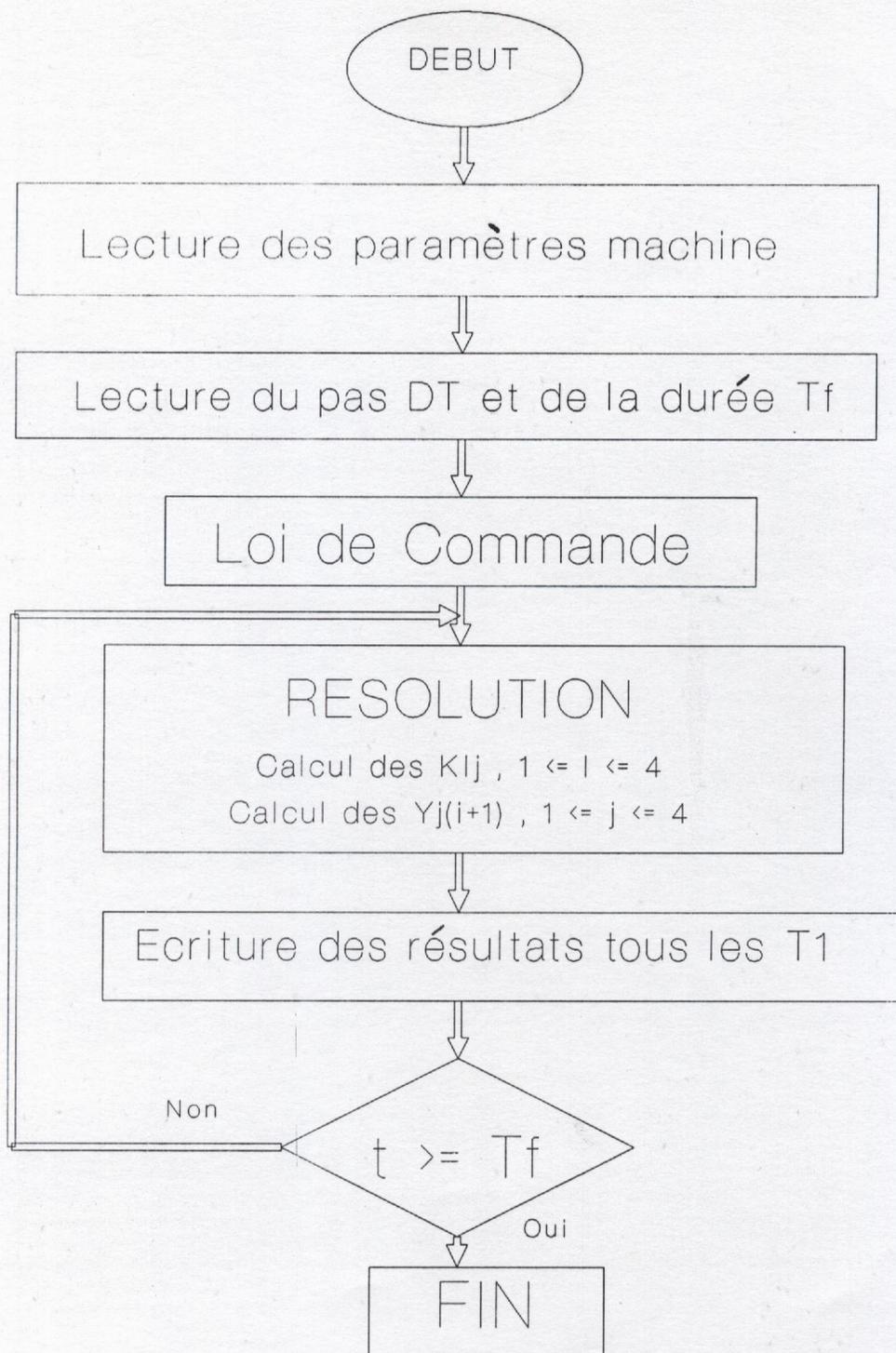


Fig3.3 Simulation de l'association Onduleur-MAS

Ce programme est interactif et offre à l'utilisateur un certain nombre de facilités.
Les procédures suivantes sont mises en oeuvre

-Procédure INITMACH

Elle permet d'introduire les paramètres de machine à étudier : R_s, L_s, R_r, L_r, M et le moment d'inertie J .

-Procédure Loi de commande

Elle permet de déterminer le vecteur de commande constitué par C_a, C_b et C_c à chaque pas d'intégration et pour la loi de commande choisie.

-Procédure CALCUL

Elle permet de réaliser l'implémentation de l'algorithme de Runge-Kutta d'ordre 4 donné par les équations III.27 et III.28. Cette implémentation est faite pour le système d'équations différentielles constitué par les équations III.14 et III.21. Les résultats de l'intégration numérique sont stockés dans des fichiers.

4.6/ Remarques

L'utilisation de la méthode de Runge-Kutta pose deux problèmes:

- le premier concerne le temps d'exécution (ou de calcul),
- le second est relatif à la précision des résultats numériques obtenus.

Ces deux problèmes sont liés et dépendent, tous les deux, du pas d'intégration DT .

La puissance du micro-ordinateur utilisé (fréquence d'horloge, type de microprocesseur dont il est équipé, ... etc) a une très grande influence. Plus il est puissant, plus le temps de calcul est court.

La précision des résultats numériques, dépend et de l'algorithme utilisé et du langage de programmation. Pour Turbo Pascal, le type Real est codé sur six octets dont cinq pour la mantisse. Ceci autorise une précision de dix chiffres significatifs. La méthode de Runge-Kutta d'ordre 4 est stable et convergente, moyennant un pas approprié [36]. Elle donne une valeur approchée à l'ordre DT^4 de la somme de la série de Taylor. Ceci montre que plus le pas est petit, plus la précision est meilleure. D'un autre côté, si le pas est trop petit, le temps d'exécution est long. Donc le choix du pas d'intégration est primordial. On a opté pour un pas qui assure la convergence et la stabilité au détriment du temps de calcul.

5/ RESULTATS ET COMMENTAIRES

La simulation de l'ensemble machine asynchrone-onduleur a été effectuée avec deux stratégies de commande, la stratégie dite en créneau et la stratégie suboptimale. Les résultats donnés de la page 72 à la page 74 illustrent les régimes transitoire et permanent, pour une fréquence de travail de 50 Hz. Les caractéristiques de la machine sont données en annexe 4.

5.1/ Simulation de l'association avec la stratégie en Créneau

La figure 3.4 (voir page 72) donne les résultats relatifs aux régimes transitoire et permanent. Pendant la phase de démarrage, le courant absorbé par la machine est important (Fig 3.4a et Fig 3.4b), alors que le couple présente une grande amplitude et des oscillations (Fig 3.4c). La vitesse angulaire croît jusqu'à atteindre la valeur nominale (Fig 3.4 d).

Le régime permanent est illustré par la figure 3.5 (voir page 73), le courant à phase $I_a(t)$ présente des pics très prononcés (Fig 3.5c), cela est dû à la nature inductive de la charge, qui est alimentée par des créneaux de tension (Fig 3.5a, Fig 3.5b). Le courant à l'entrée de l'onduleur est haché, et contient des parties négatives (Fig 3.5d). Le couple électromagnétique est pulsatoire (Fig 3.5e). Les effets néfastes de la

présence des harmoniques de bas rang dans le signal de commande apparaissent clairement dans ces résultats.

5.2/ Simulation de l'association avec la stratégie Suboptimale

Les figures 3.6 et 3.7 (voir pages 74 et 75) illustrent le comportement de l'association commandée par la stratégie suboptimale.

Les figures 3.6a et 3.6b donnent les courants à l'entrée de l'onduleur et de la phase A, intégrés sur un intervalle qui englobe les régimes transitoire et permanent. Ces figures montrent qu'un très fort courant est consommé par le moteur pendant la phase transitoire de démarrage. La figure 3.6b montre des pics de courants dont l'amplitude est presque six (06) fois celle du régime permanent. Cela s'explique par le fait qu'il faut fournir beaucoup d'énergie, sous forme de courant, pour vaincre l'inertie représentée par la masse du rotor. Ceci a une importance particulière, dans le sens où il faut que l'onduleur soit capable de fournir ce courant de démarrage, il est alors nécessaire de surdimensionner les interrupteurs, ou bien effectuer un démarrage graduel. La figure 3.6c montre le couple électromagnétique, qui présente des oscillations au démarrage puis il se stabilise. Les figures 3.6a, 3.6b et 3.6c montrent l'intérêt et la nécessité du démarrage graduel. La vitesse angulaire croît régulièrement jusqu'à atteindre la vitesse nominale, où elle devient pratiquement constante (Fig 3.6d).

La figure 3.7 (voir page 75) permet de mieux voir ce qui se produit en régime permanent. Le courant de phase $I_a(t)$ a une forme très proche de la sinusoïde bien qu'ils présentent des petites variations, dues à la commutation (Fig 3.7c). Le courant $I_0(t)$, à l'entrée de l'onduleur est très fortement haché, et présente des pics négatifs (Fig 3.7d). Ces pics négatifs correspondent à la récupération et démontrent l'intérêt des diodes placées en parallèle avec les interrupteurs (Fig 3.2, page 63). Ce courant nécessite un filtrage adéquat qui sera d'autant plus difficile que le filtre est soumis à une fréquence variable du côté de la machine. Les figures 3.7a et 3.7b donnent les tensions de ligne V_{ab} et V_{ca} , reconstituées à partir du vecteur de commande, formé par C_a , C_b et C_c . La tension d'alimentation E est supposée constante.

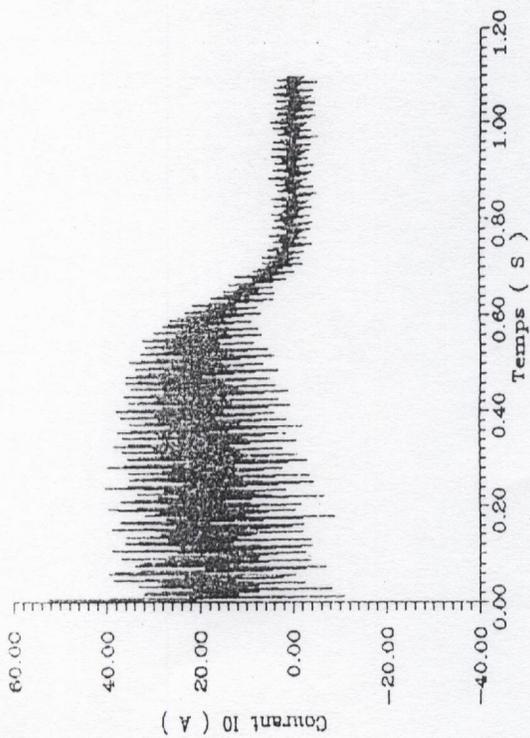


Fig3.4a : Courant I_0

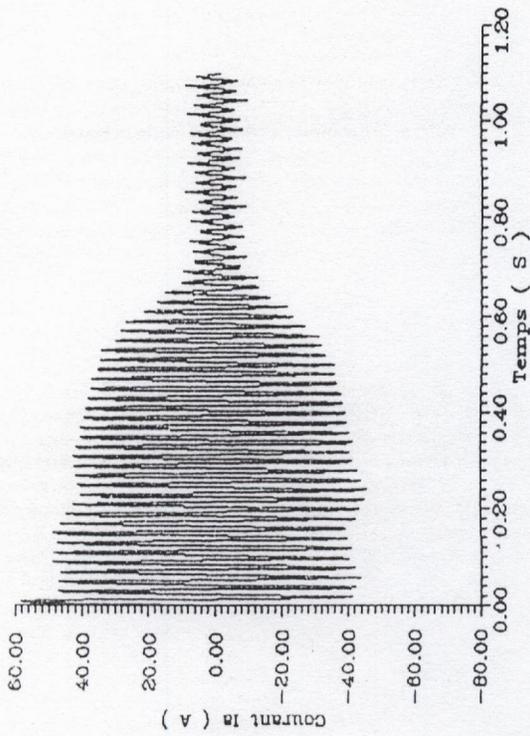


Fig3.4b : Courant I_a

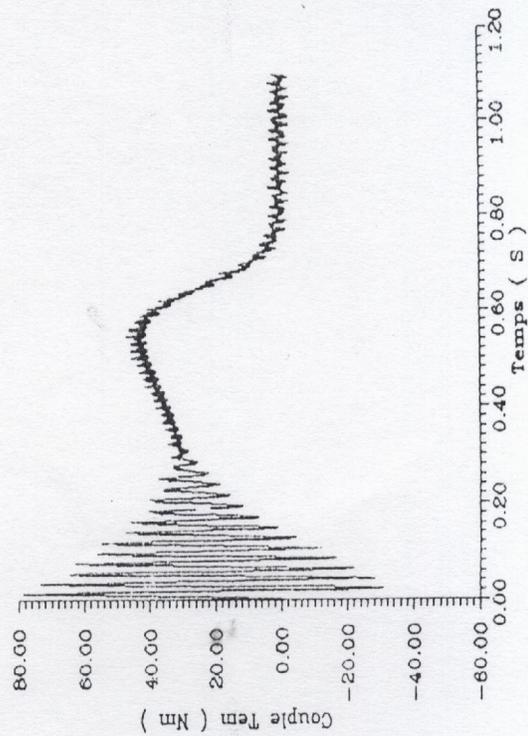


Fig3.4c: Couple électromagnétique

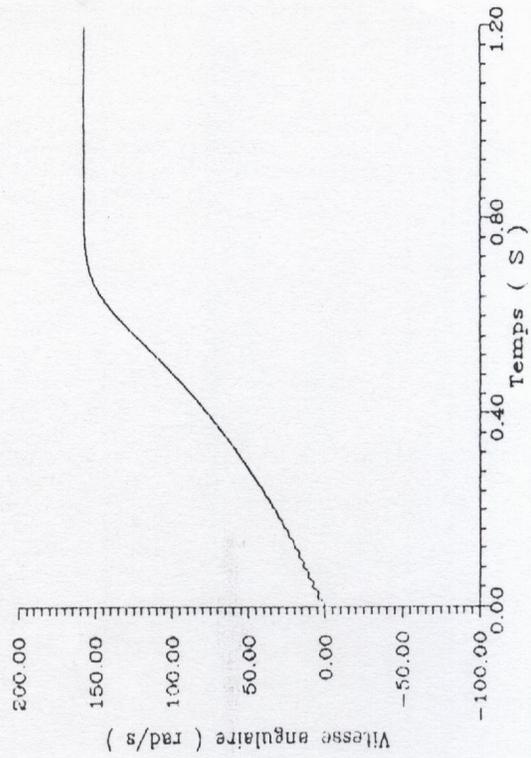


Fig3.4d : Vitesse angulaire

Fig 3.4 : Simulation de la stratégie en créneau
(Régimes transitoire et permanent, $f=50$ Hz)

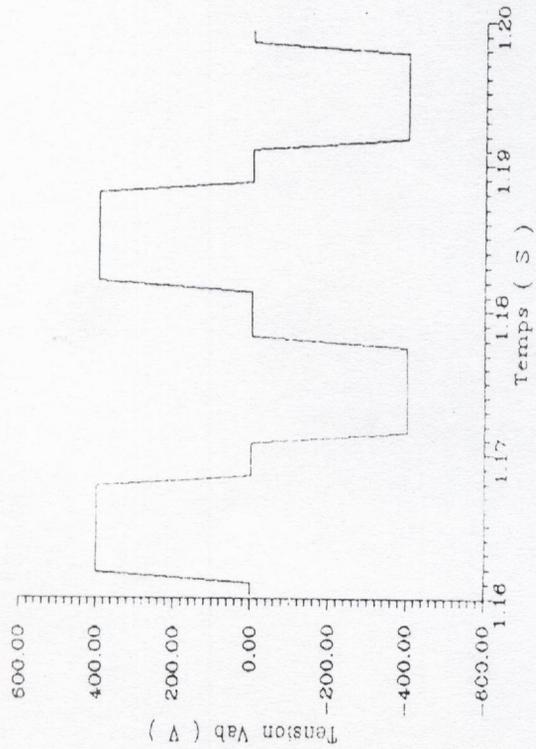


Fig3.5a : Tension de ligne

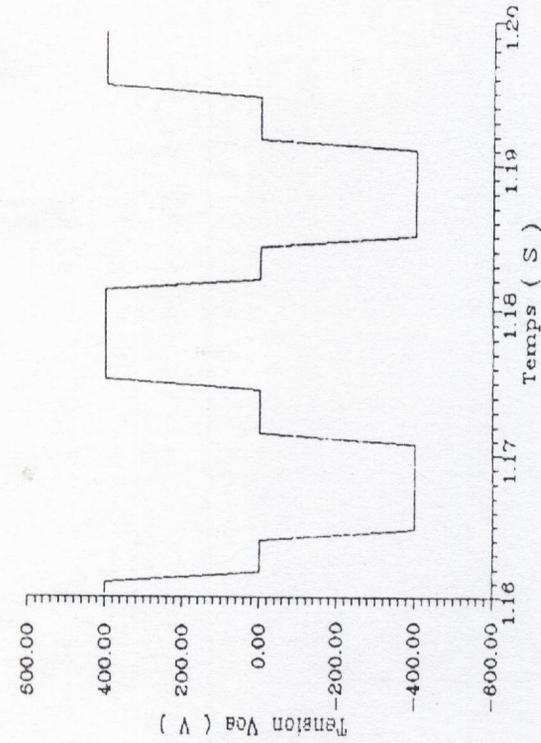


Fig3.5b : Tension de ligne V_{ca}

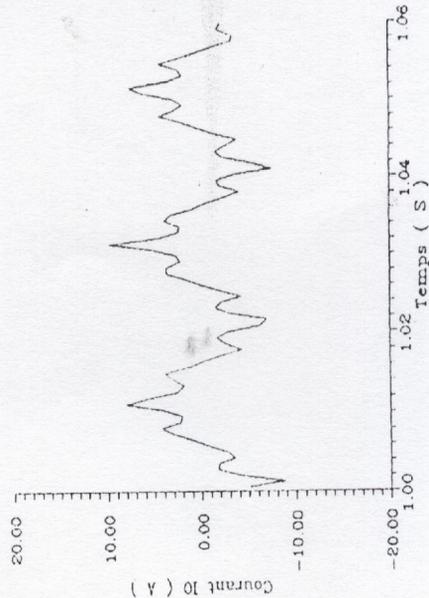


Fig3.5c : Courant $I_a(t)$

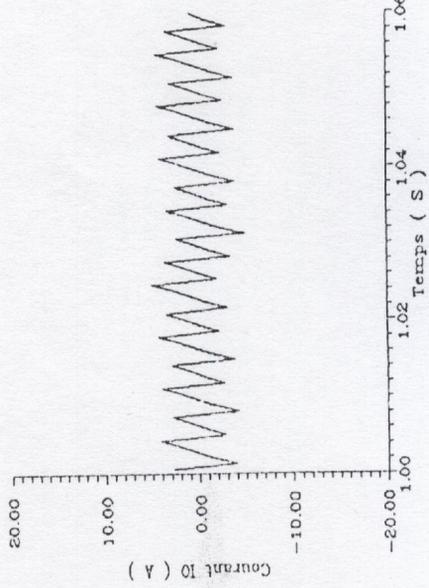


Fig3.5d : Courant $I_o(t)$

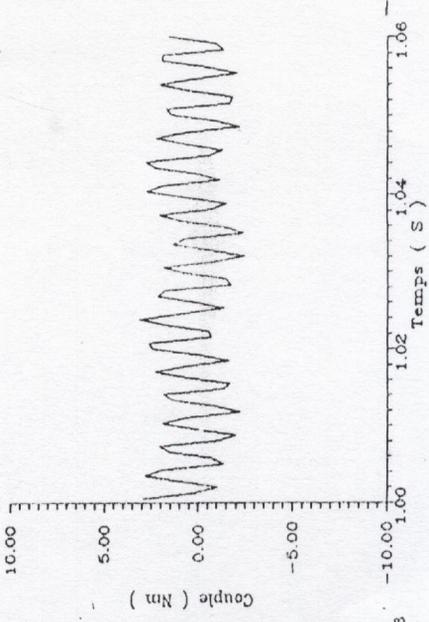


Fig3.5e: Couple électromagnétique

Fig 3.5 : Simulation de la stratégie en créneau
(Régime permanent , $f=50$ Hz)

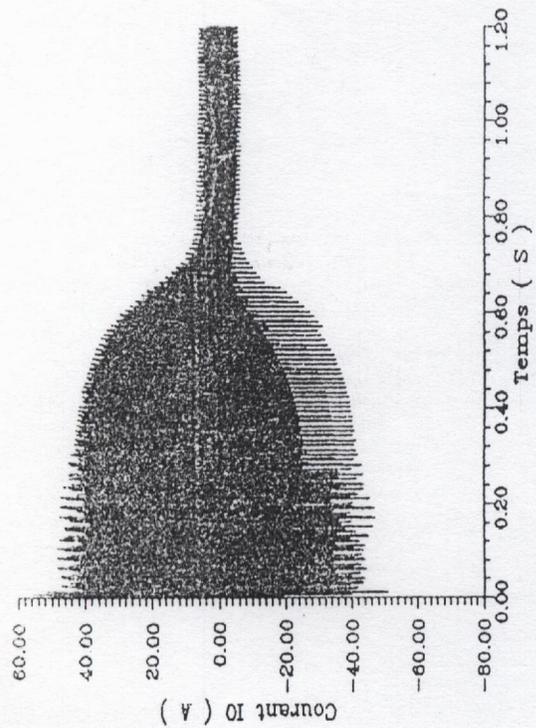


Fig3.6a : Courant I_0

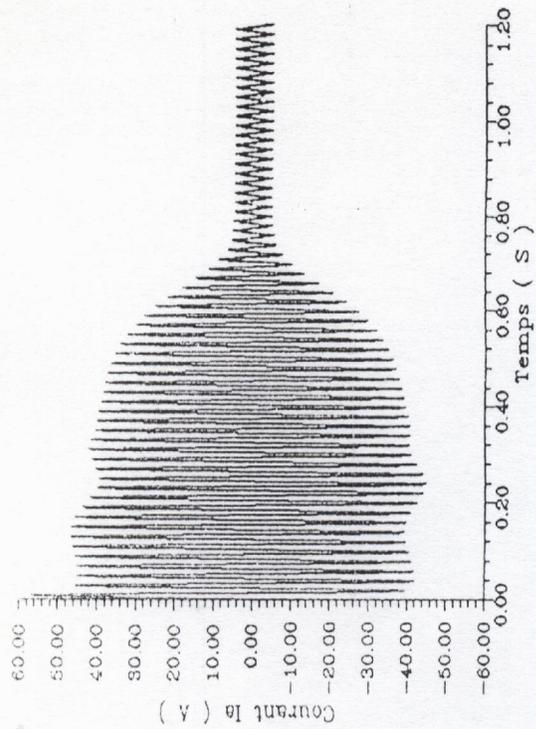


Fig3.6b : Courant I_a

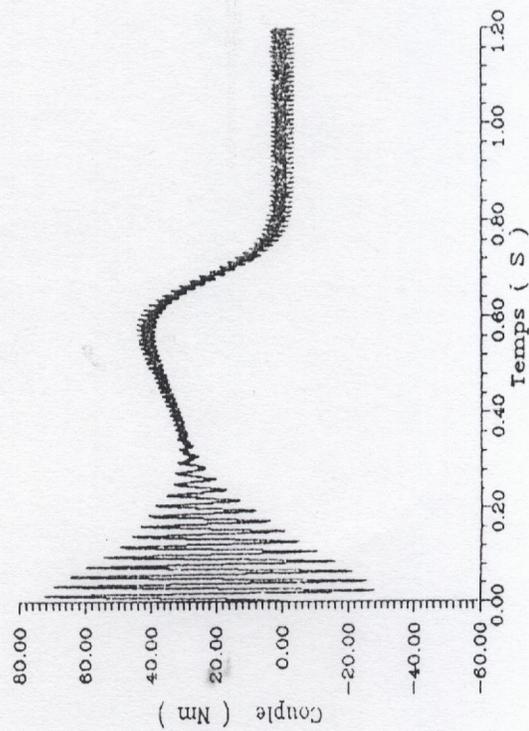


Fig3.6c: Couple électromagnétique

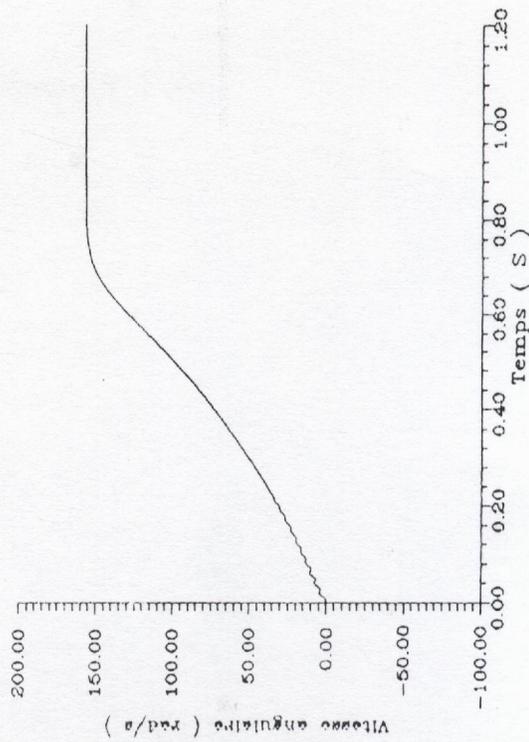


Fig3.6d : Vitesse angulaire

Fig 3.6 : Simulation de la stratégie Suboptimale
(Régimes transitoire et permanent, P=27, f=50 hz)

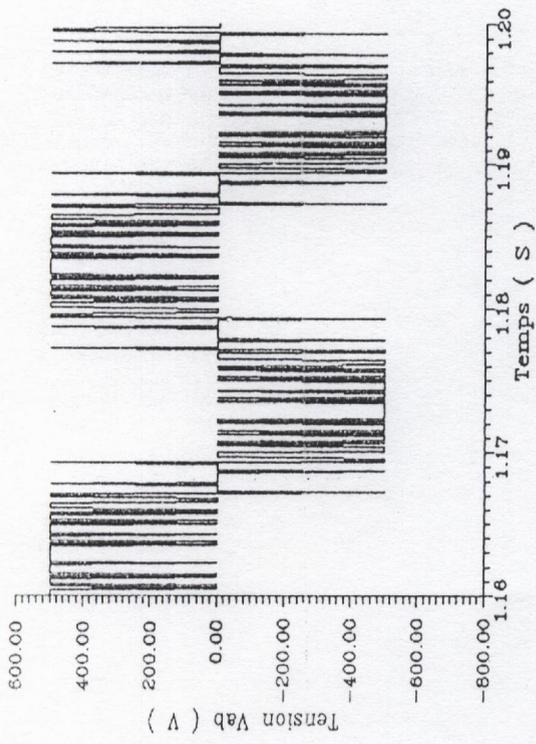


Fig3.7a : Tension de ligne V_{ab}

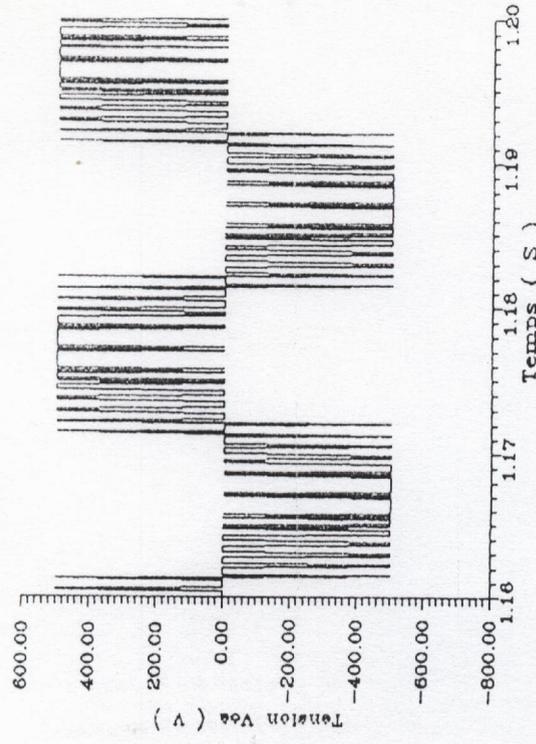


Fig3.7b : Tension de ligne V_{ca}

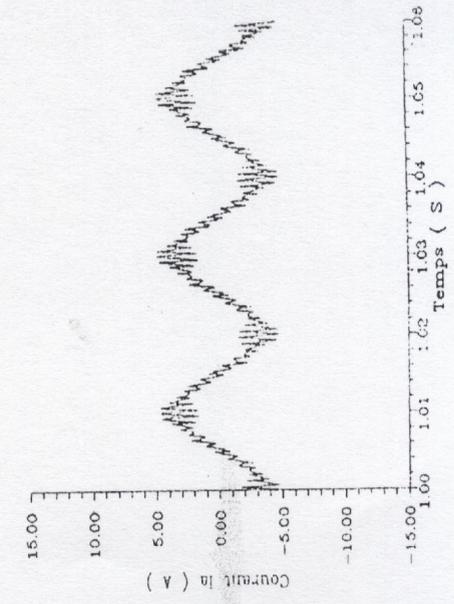


Fig3.7c : Courant $I_a(t)$

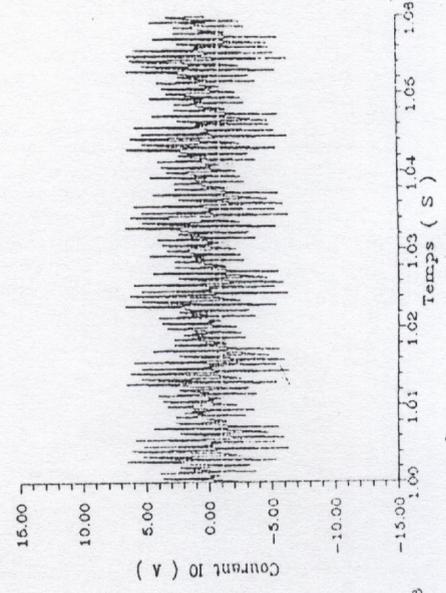


Fig3.7d : Courant $I_0(t)$

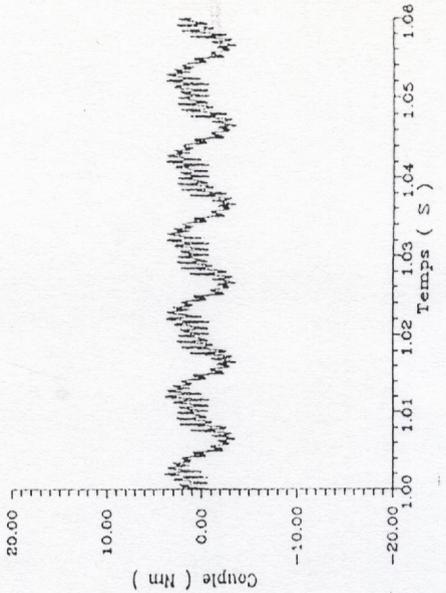


Fig3.7e: Couple électromagnétique

Fig 3.6 : Simulation de la stratégie Suboptimale (Régimes transitoire et permanent, P=27, f=50 hz)

CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à la présentation de l'association moteur à induction – onduleur. Le moteur à induction est décrit à l'aide du modèle de Park en tenant compte de certaines hypothèses simplificatrices. L'association moteur–onduleur a été étudiée. Pour l'onduleur d'alimentation, un simple gain a été retenu, en effet, les interrupteurs actifs sont considérés comme parfaits : les chutes de tension à leurs bornes ainsi que les temps morts dus à la commutation ont été négligés. La résolution des équations différentielles régissant le fonctionnement de cette association a été effectuée à l'aide de l'algorithme de Runge–Kutta d'ordre 4. Un programme de simulation, écrit en langage Pascal, a été mis au point.

La simulation a permis de comparer le comportement de l'ensemble moteur à induction–onduleur, commandé par deux stratégies différentes : la stratégie suboptimale et la stratégie en créneau. Les résultats obtenus avec la stratégie suboptimale sont meilleures, en particulier, les courants de phase ne présentent pas de pics et ont une allure sinusoïdale tandis que le couple est plus régulier. Ceci montre l'intérêt de cette stratégie, dont l'implémentation fait l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 4

Réalisation de la maquette expérimentale

INTRODUCTION

Dans ce chapitre est abordée la réalisation de la maquette expérimentale. Elle est constituée de deux parties; la première est consacrée à l'électronique de commande, la seconde à l'électronique de puissance.

En ce qui concerne la première partie, l'implémentation à base de microprocesseur de la stratégie suboptimale est effectuée. Le principe de la solution retenue est discuté, puis, la carte de commande qui a été conçue et réalisée pour implémenter cette stratégie est décrite. Pour la deuxième partie, on s'intéresse à l'étude et la réalisation du convertisseur alternatif-alternatif. Celui-ci est un maillon très important dans la chaîne du variateur de vitesse.

1/ CONCEPTION ET REALISATION DE LA CARTE A MICROPROCESSEUR

1.1/Principe

Parmi les différentes méthodes qui existent pour générer le signal de commande PWM, voici le principe de celle que nous avons retenu et qui est basée sur l'utilisation de la configuration microprocesseur-mémoire-timer

Les différentes valeurs de $t_p(k)$ et $t_o(k)$ nécessaires pour décrire un cycle de l'onde PWM, sont converties convenablement et stockées dans une table de données en mémoire. Trois pointeurs, relatifs chacun à une phase, sont positionnés dans cette table et permettent de la parcourir séquentiellement. Un timer constitué de trois décompteurs, dont chacun est réservé à une phase, est utilisé. Chacun des décompteurs est chargé par une valeur adéquate, qui provient de la table de données. Une horloge pilote le décomptage, lorsque le contenu de l'un des décompteurs atteint zéro, sa sortie change d'état. Ce signal est utilisé pour provoquer une interruption. Le microprocesseur acquitte l'interruption en chargeant la valeur suivante, lue dans la table de données, dans le décompteur considéré et met à jour le port de sortie. Lorsqu'une nouvelle fréquence est demandée, une nouvelle table est préparée tout en continuant à générer le signal PWM à partir de l'ancienne table. Une fois remplie, la nouvelle table prend la place de l'ancienne. La figure 4.1 donne le schéma de génération de l'onde PWM par cette méthode.

1.2/Implémentation de la stratégie suboptimale

Pour implémenter la stratégie suboptimale, nous avons adopté une structure analogue a celle de la figure 4.1. Avant d'aborder les aspects matériels et logiciels qui permettent de matérialiser cette stratégie, discutons la manière utilisée pour former la table de données en mémoire, qui est l'une des tâches principales dans le processus de génération du signal PWM.

Les équations donnant les durées des états hauts et bas sont:

$$t_p(k) = \frac{T_c}{2} + M \frac{T_c}{4} [F(T_{2k-2}) + F(T_{2k-1})] \quad (\text{IV.1})$$

$$t_o(k) = \frac{T_c}{2} - M \frac{T_c}{4} [F(T_{2k}) + F(T_{2k-1})] \quad (\text{IV.2})$$

Chacune de ces deux équations contient deux multiplications. Deux solutions sont possibles :

-faire appel à un multiplieur intégré externe. Cette solution est onéreuse et complique la réalisation.

-effectuer l'opération de multiplication par programme. Lorsque le jeu d'instruction du microprocesseur ne contient pas d'instruction de multiplication, il devient nécessaire d'écrire un programme pour la réaliser. Cependant, les contraintes de génération en temps réel ne peuvent tolérer qu'un temps de retard très réduit. Le système perd de son efficacité et cette solution est à écarter.

Ces contraintes nous ont conduit à chercher une structure matérielle et logicielle, permettant d'implémenter ces équations, tout en évitant les multiplications.

Dans l'hypothèse de commande à flux constant, et en remplaçant $F(T_k)$, T_c et M par leurs valeurs respectives, les équations IV.1 et IV.2 s'écrivent:

$$t_p(k) = \frac{1}{2Pf} + \frac{0.02}{4P} [\sin(2(k-1)\frac{\Pi}{P}) + \sin((2k-1)\frac{\Pi}{P}) + 0.25(\sin(6(k-1)\frac{\Pi}{P}) + \sin(3(2k-1)\frac{\Pi}{P}))] \quad (\text{IV.3})$$

et

$$t_o(k) = \frac{1}{2Pf} - \frac{0.02}{4P} [\sin(2k\frac{\Pi}{P}) + \sin(2k-1)\frac{\Pi}{P}) + 0.25(\sin(6k\frac{\Pi}{P}) + \sin(3(2k-1)\frac{\Pi}{P}))] \quad (\text{IV.4})$$

Ces équations peuvent être écrites sous la forme suivante :

$$t_p(k) = A(f) + B(k) \quad (IV.5)$$

$$t_o(k) = A(f) - C(k) \quad (IV.6)$$

avec

$$A(f) = 1/2Pf \quad (IV.7)$$

et

$$B(k) = \frac{0.02}{4P} \left[\sin\left(2(k-1)\frac{\pi}{P}\right) + \sin\left((2k-1)\frac{\pi}{P}\right) + 0.25\left(\sin\left(6(k-1)\frac{\pi}{P}\right) + \sin\left(3(2k-1)\frac{\pi}{P}\right)\right) \right] \quad (IV.8)$$

$$C(k) = \frac{0.02}{4P} \left[\sin\left(2k\frac{\pi}{P}\right) + \sin\left((2k-1)\frac{\pi}{P}\right) + 0.25\left(\sin\left(6k\frac{\pi}{P}\right) + \sin\left(3(2k-1)\frac{\pi}{P}\right)\right) \right] \quad (IV.9)$$

Pour un ratio de fréquence P fixé, seule A(f) dépend de f alors que B(k) et C(k) dépendent uniquement de k.

Les valeurs de A(f) sont calculées pour une plage de fréquence allant de zéro à la valeur nominale avec un pas donné. Chaque valeur de A(f) sera stockée sur deux octets dans une table, appelée TAB1, en mémoire. Pour un pas de 0.5 Hz et une fréquence nominale de 50 Hz, TAB1 nécessite 200 octets.

k étant un nombre entier compris entre 1 et P, le nombre de valeurs possibles pour B(k) et C(k) est donc limité à 2P valeurs. Chaque valeur de B(k) ou de C(k) sera stockée sur deux octets dans une table, nommée TAB2, en mémoire. TAB2 nécessite un espace de 4P octets.

Pour répondre à une demande de l'opérateur, correspondant à une fréquence f particulière, les différentes valeurs de $t_p(k)$ et $t_o(k)$ nécessaires pour décrire un cycle du signal de commande seront reconstruites à partir de TAB1 et TAB2 et stockées dans une table TAB3 en mémoire vive (RAM). Trois pointeurs sont positionnés dans TAB3, qui sera parcourue séquentiellement par le microprocesseur, utilisé en mode interruptible, pour générer le signal PWM triphasé. Pour TAB3 deux tables sont, en réalité, nécessaires, TAB3a et TAB3b. Ceci est dû au fait que lorsqu'une nouvelle fréquence est

introduite , la table en cours d'utilisation reste valide jusqu' à la formation complète de la nouvelle table.

1.3/Remarques

-Avec cette méthode, il sera possible d'implémenter toutes les stratégies basées sur l'échantillonnage précédemment analysées.

-Pour implémenter la loi suboptimale, qui dispose d'une double symétrie, il suffit de calculer $(P+1)/4$ valeurs de $B(k)$ et $C(k)$ et de les stocker dans TAB2. Ceci réduit l'espace mémoire utilisé par TAB2 et le temps nécessaire pour réactualiser TAB3.

-Pour piloter un onduleur triphasé, la carte de commande doit générer six signaux (A , \bar{A} , B , \bar{B} , C et \bar{C}) qui sont complémentaires deux à deux et lors de la commutation des signaux d'un même bras, un temps mort doit être inclus pour éviter de court-circuiter la source continue. Pour réaliser ce temps mort pour la phase A, la solution retenue consiste à multiplier, à l'aide d'une logique cablée, les signaux A et \bar{A} avec un signal généré, à travers le port parallèle, par la routine d'interruption correspondante. Il en sera fait de même pour les phases B et C.

2/ REALISATION MATERIELLE DE LA CARTE DE COMMANDE

2.1/ Description

La carte conçue et réalisée (Fig.4.2) est batie autour du microprocesseur 8085 d'Intel. Ce microprocesseur possède un bus de données de huit bits, un bus d'adresses de seize bits, dont les bits de poids faible sont multiplexés avec le bus de données, et un bus de contrôle regroupant l'ensemble des signaux de dialogue avec la périphérie. A noter aussi que le 8085 possède cinq niveaux d'interruption hiérarchisés. Un latch 74100 permet de reconstituer le bus d'adresses en le séparant du bus de données. Ce latch est piloté par le signal ALE issu du microprocesseur.

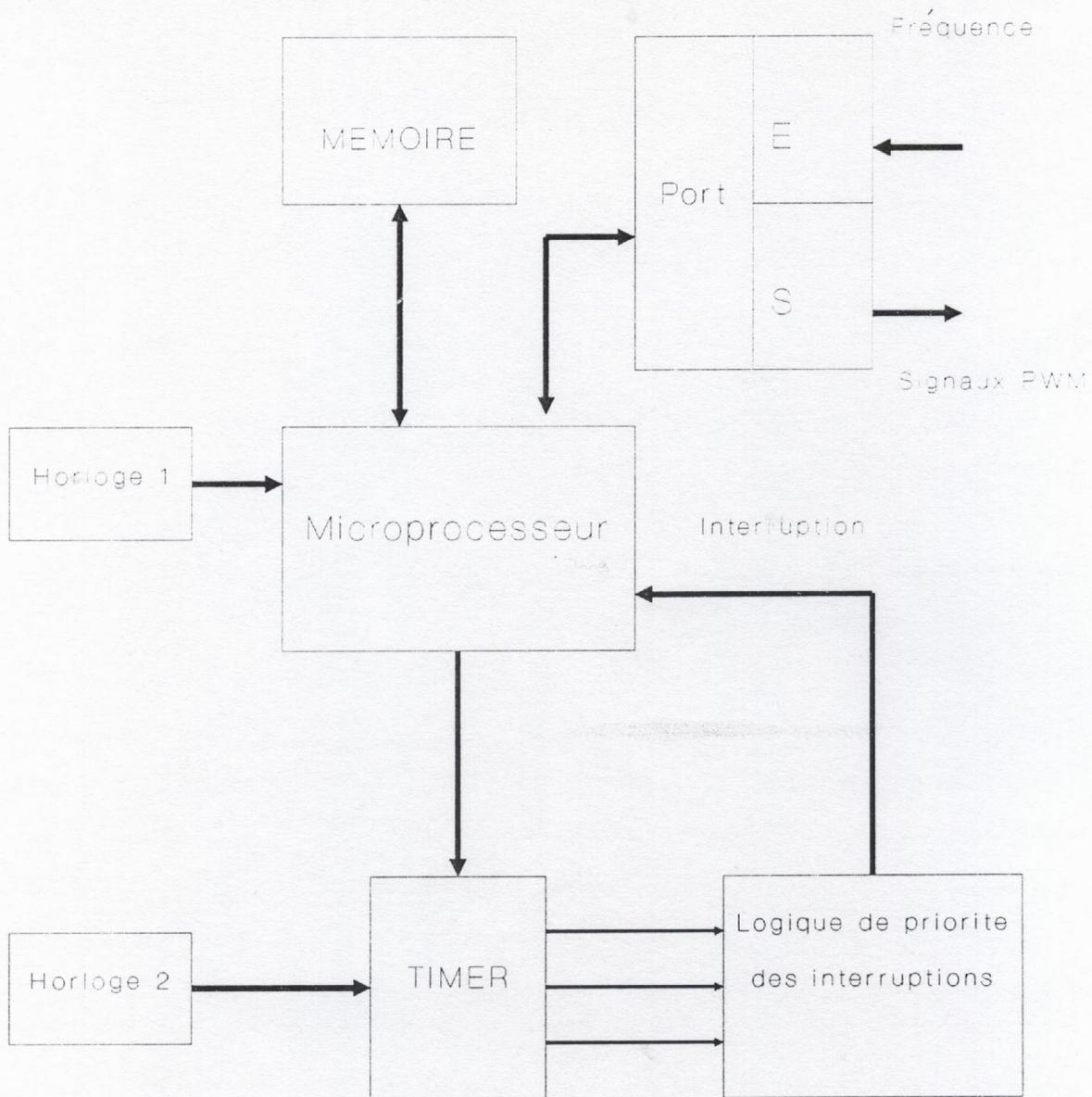


Fig4.1 Schéma synoptique de la carte de commande

Trois lignes d'adresses A15, A14 et A13 passent à travers un décodeur 3 vers 8; pour fournir huit signaux de sélection de boîtiers, permettant ainsi de diviser l'espace mémoire total en huit bancs de huit Kilo-octets. Quatre de ces signaux sont utilisés pour la sélection d'une **EPROM 2716**, d'une **RAM 9128**, d'un **timer 8253** et d'un port d'entrée/sortie **PPI 8255**. Les signaux restants sont laissés pour d'éventuelles extensions.

EPROM 2716 : mémoire morte programmable de deux Kilo-octets, elle contient le programme de gestion de la carte et les tables de données. Les adresses allant de 0000H à 07FFH lui sont réservées. Le tableau 1 montre l'occupation de cette mémoire par le programme et les tables de données.

RAM 9128 : mémoire vive de deux Kilo-octets, elle est destinée à recevoir les tables de données modifiables et la pile. Certains emplacements sont réservés comme zone de travail. Elle occupe l'espace mémoire entre 4000H et 47FFH.

PPI 8255 : port parallèle, il contient trois ports d'entrée/sortie à huit bits chacun et un registre de commande. Différents modes de programmation sont possibles. Le mode zéro est choisi.

Timer 8253 : temporisateur programmable, constitué de trois décompteurs programmables à seize bits et d'un registre de commande. Différents mode d'utilisation sont possibles. Le mode zéro est retenu.

Le tableau 1 donne l'organisation de l'EPROM tandis que le tableau 2 donne les adresses des différents registres du PPI et du timer.

On reconstitue à partir des signaux de contrôle IO/M, RD et WR émis par le microprocesseur, les quatre signaux de contrôle suivants :

- Lecture et écriture mémoire,
- Lecture et écriture périphérique.

Le microprocesseur dispose d'un oscillateur interne pilotée par un quartz. La

fréquence du quartz doit être double de celle de travail du microprocesseur. Cette fréquence est disponible sur la broche 37 du microprocesseur pour une utilisation externe. Elle sert à piloter le timer.

2.2/ Réalisation de la carte version 1

Le schéma de la figure 4.2 a été réalisé. Les signaux de commande PWM sont générés à travers le port de sortie (PPI 8255). Le quartz utilisé oscille à une fréquence de 4.43 Mhz. L'horloge interne du microprocesseur élabore un signal à 2.21 Mhz qui le pilote. Ce même signal sert à piloter le timer.

A partir de la table de données en RAM, les décompteurs du timer sont chargés. Lorsque l'un d'eux atteint zéro, sa sortie change d'état. Ce signal est utilisé pour provoquer une interruption. La routine d'interruption permet au microprocesseur d'inverser les signaux de commande de la phase correspondante, à travers le port de sortie, et de charger dans le décompteur concerné la valeur suivante, lue dans la table de données.

Cette configuration présente un inconvénient majeur qui est le suivant : pour une fréquence donnée f , le cycle de l'onde PWM générée s'allonge. Ce phénomène est plus net pour les fréquences élevées. A titre d'exemple, pour une fréquence affichée de 50 Hz (20 mS), le signal observé a une période de 25 mS, soit 40 Hz. La raison de cette allongement du cycle est due aux temps d'exécution des différentes routines d'interruption. En effet, durant un cycle, le sous-programme d'interruption est exécuté 54 fois ($P = 27$) pour une phase. Ce temps s'ajoute au cycle normal de l'onde.

Pour palier à ce défaut, les solutions suivantes sont proposées:

- augmenter la fréquence de travail du microprocesseur,
- optimiser les sous-programmes d'interruption de manière à réduire leurs durées d'exécution.
- utiliser les signaux d'interruption pour configurer les signaux de phase, sans passer par le port de sortie.

0000	Initialisation du système
0040	Programme principal
0178	
0200	SP7
0251	
0255	SP6
02A8	
02AA	SP5
02FB	
0400	TAB 1
0435	
0500	TAB 2
05C7	
0800	
0840	
07FF	

Tableau1:Organisation de l'EPROM

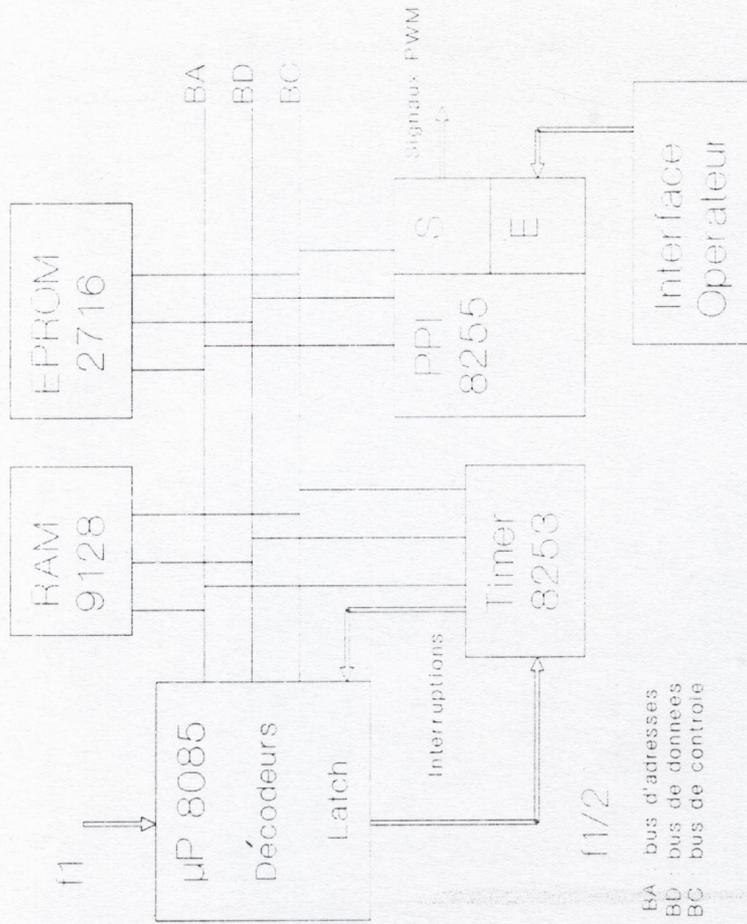


Fig4.2:Synoptique de la carte de commande: Version1

Composant	Registre	Adresse
PPI 8255	Registre de commande	83
	Port A	80
	Port B	81
	Port C	82
Timer 8253	Registre de commande	A3
	Compt 0	A0
	Compt 1	A1
	Compt 2	A2

Tableau2:Adresses du PPI et du Timer

Ces solutions ont été retenues pour la réalisation de la version 2 de la carte de commande. D'autres solutions existent telles que :

- utiliser un microprocesseur plus puissant.
- utiliser une structure de la carte capable de réduire le nombre des interruptions.

2.3/ Réalisation de la carte version 2

Pour améliorer les performances de la carte , il a été jugé utile de faire appel à la logique câblée, qui est plus rapide, tout en gardant les avantages de la logique programmée. Le principe exposé pour la réalisation de la version 1 a été gardé. Des modifications sont apportées au niveau de :

- la fréquence de travail du microprocesseur,
- la génération des signaux de commande,
- le traitement des signaux issus des trois décompteurs du timer.

Pour cette version, le schéma synoptique de la figure 4.3 a été adopté. Les signaux issus du timer sont envoyés sur les lignes d'interruption du microprocesseur et sur les entrées du circuit logique. La fréquence du quartz étant passée à 8 Mhz, celle de travail du microprocesseur est à 4 Mhz. Il est alors nécessaire de la diviser par deux pour piloter le timer 8253, qui ne peut pas travailler à une fréquence supérieure à 2.5 Mhz.

Le circuit logique (Fig.4.3) reçoit sur ses entrées trois signaux issus du timer et trois signaux générés par le microprocesseur à travers le PPI 8255. Chacun d'eux est relatif à une phase et est activé par le sous programme d'interruption correspondant. En sortie, il génère les six signaux de commande, qui sont complémentaires deux à deux et pour les quels un temps mort est inclus. Ce circuit logique reçoit, toujours à travers le PPI, un signal d'initialisation qui permet de mettre à zéro les signaux de commande (A, \bar{A} , B, \bar{B} , C, \bar{C}).

2.4/ Interface opérateur

Le rôle de l'interface opérateur est de permettre la communication entre le système conçu et l'opérateur. Ce dernier transmet la fréquence de travail désirée, et par l'intermédiaire de commutateurs, il fait progresser, s'arrêter ou diminuer celle-ci. La valeur de la fréquence est lue sur trois afficheurs sept segments et sa variation se fait par pas de 0.5 Hz entre 00.0 et 60.0 Hz. L'opérateur peut sélectionner la progression ou la diminution par un commutateur, il peut aussi, à travers un bouton de marche / arrêt, figer la valeur affichée.

Le schéma synoptique de cette carte est donné à la figure 4.4.

Pour réaliser cette carte, nous avons utilisé trois compteurs / décompteurs décimaux CD 4029, dont deux sont reliés en cascade pour travailler entre 00 et 99 et sont réservés à la partie entière de la fréquence. Le troisième compteur est réservé à la partie fractionnaire. Leurs sorties sont reliées à trois afficheurs à sept segments (TIL 309).

Une horloge à base de NE 555 pilote les compteurs et une circuiterie logique permet de :

- envoyer l'horloge adéquate aux compteurs.
- inhiber le comptage à une valeur de 60.0 et le décomptage à 00.0.

Cette carte est reliée au microprocesseur à travers le port d'entrée / sortie. Huit bits sont nécessaires pour la partie entière et un bit pour la partie fractionnaire de la fréquence. Au début de chaque séance de travail, un signal d'initialisation est émis par le microprocesseur, à travers le port A, en direction de l'interface opérateur.

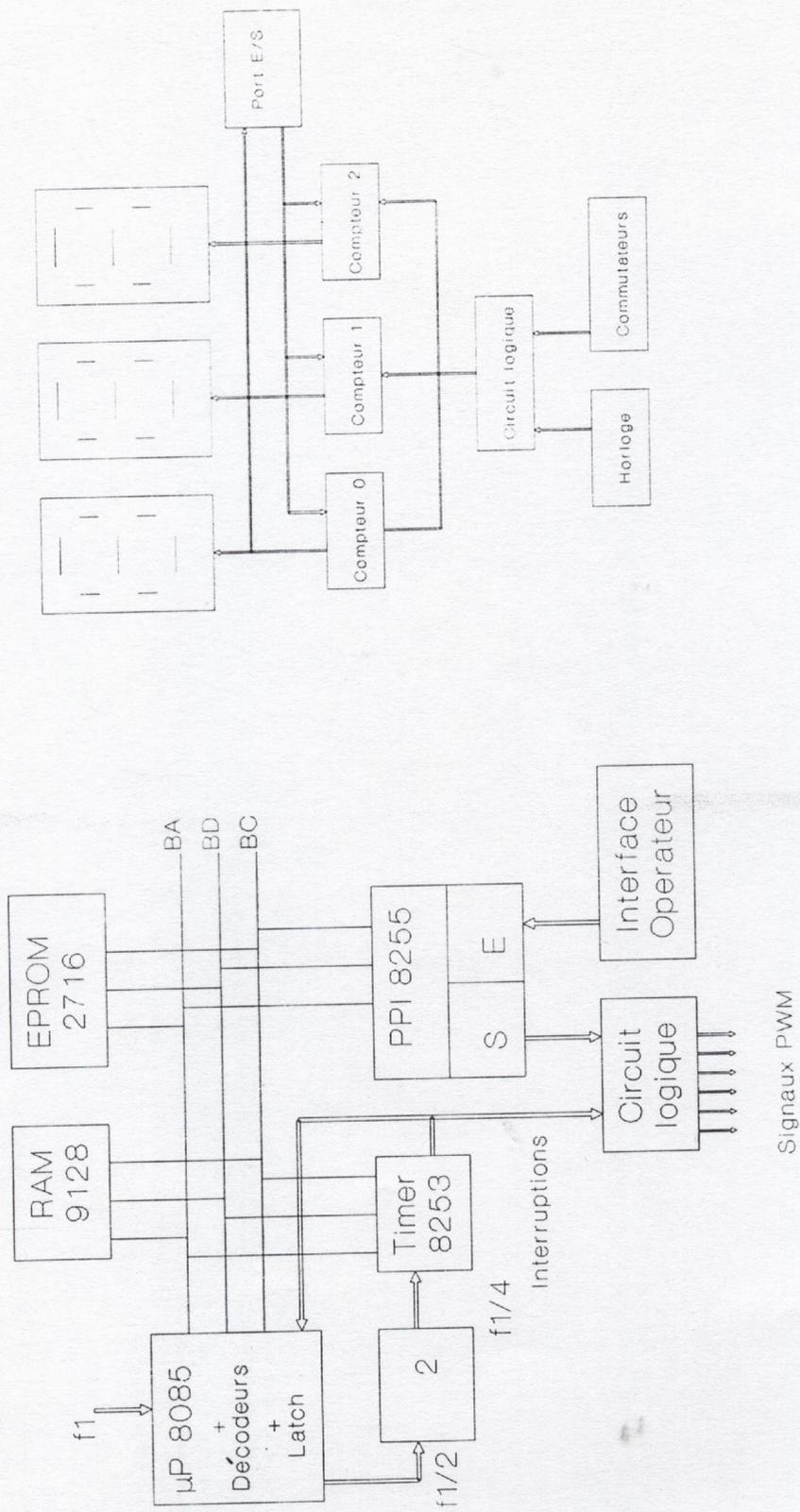


Fig4.4 Interface Opérateur

Fig4.3 Synoptique de la carte de commande version2

3/ REALISATION LOGICIELLE DE LA CARTE DE COMMANDE

3.1/ Description

Pour générer l'onde PWM correspondant à la stratégie suboptimale disposant d'une double symétrie, il faut calculer les durées des états hauts $t_p(k)$ et des états bas $t_o(k)$ et cela pour la moitié du cycle de cette onde. Ce calcul est fait à partir des tables de données TAB1 et TAB2 en EPROM. Le résultat est stocké dans l'une de deux tables, TAB3a ou TAB3b, en RAM.

Un programme en langage assembleur a été développé, il est constitué du programme principal et de sous-programmes relatifs aux interruptions. L'organigramme donné à la figure 4.5 illustre les différentes étapes de déroulement de ce programme.

La tâche du programme principal consiste à :

- **initialiser** le système
- **lire** la fréquence introduite par l'opérateur
- **former** la table de données en RAM, qui contient les $t_p(k)$ et les $t_o(k)$ correspondants à la fréquence lue.
- **générer** les six signaux de commande PWM grâce aux interruptions du timer.
- **scrûter** le port d'entrée, lorsqu'une nouvelle fréquence est introduite, une nouvelle table de données est formée, tout en continuant à générer l'onde PWM à la fréquence précédente. Passer à l'utilisation de la nouvelle table lorsque cette dernière est complètement formée. Un indicateur permet de guider le microprocesseur vers la génération des signaux de commande à partir de la table adéquate.

Le programme principal gère aussi les interruptions et active les sous-programmes correspondants. Les sous-programmes SP7, SP6 et SP5 relatifs respectivement aux interruptions RST7.5, RST6.5 et RST5.5 génèrent les signaux relatifs aux phases A, B et C. Lorsqu'ils sont sollicités, ils chargent la valeur suivante, lue dans la table de données, dans le décompte correspondant du timer et activent les signaux nécessaires pour générer le temps mort.

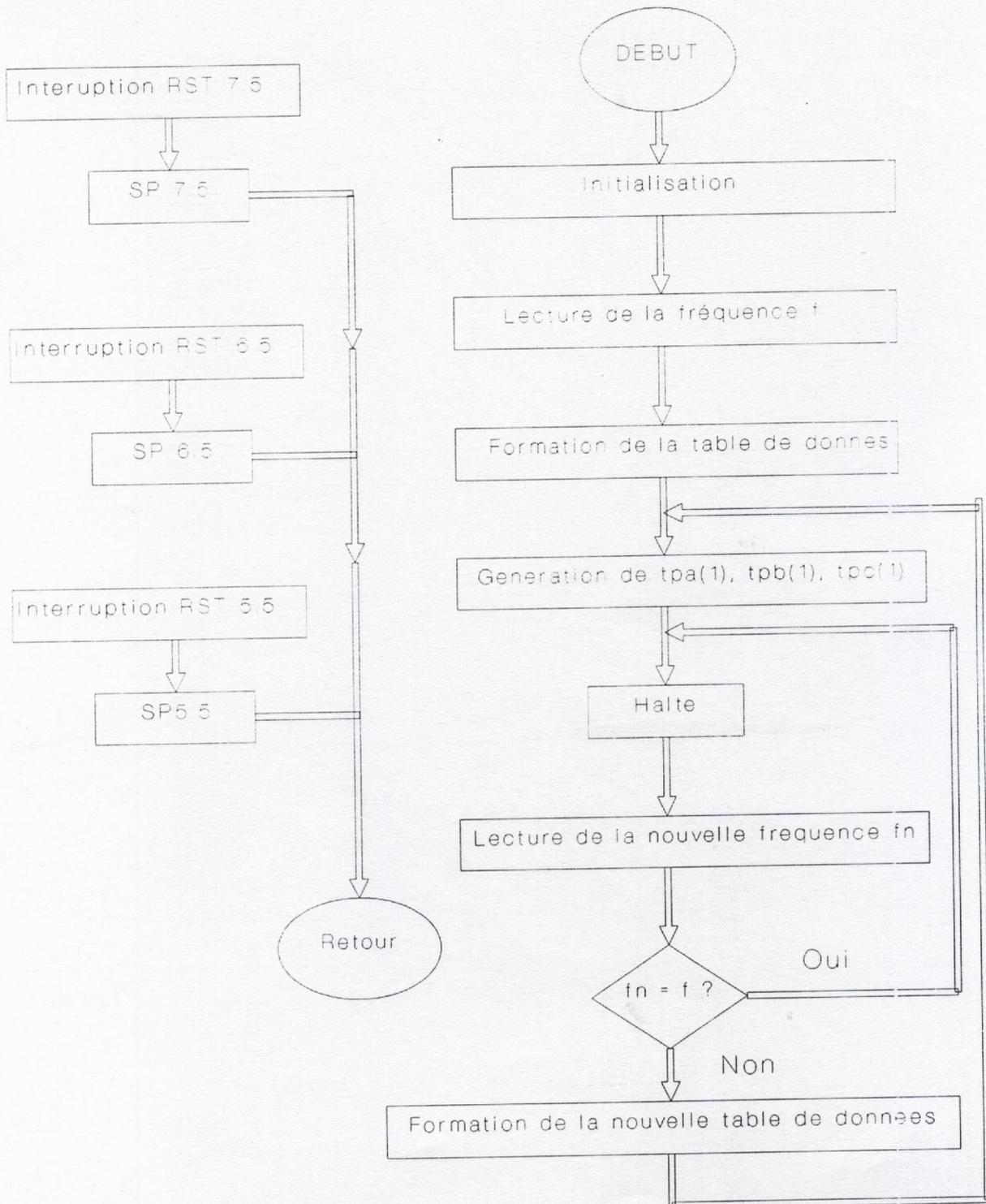


Fig4.6 Organigramme Principal (Assembleur)

3.2/ Initialisation

Elle consiste à configurer correctement l'ensemble des circuits constituant la carte de commande. Le timer 8253 est programmé en mode zéro, c'est à dire trois décompteurs à 16 bits. Le port d'entrée/sortie PPI 8255 est configuré en mode d'entrée/sortie de base (mode zéro). Le port A est programmé en sortie et les ports B et C en entrée. Le pointeur de pile est chargé par une adresse adéquate se trouvant en RAM. Certaines cases mémoire sont réservées comme zone de travail du microprocesseur et sont donc initialisées. Une mise à zéro des afficheurs de l'interface opérateur et des six signaux de commande (A, \bar{A} , B, \bar{B} , C, \bar{C}) est effectuée.

3.3/ Lecture de la fréquence

La lecture de la fréquence permet de générer l'onde PWM voulue par l'opérateur. Elle se fait par scrutation des ports B et C du PPI. Elle servira à déterminer la position en TAB1, dans laquelle est stockée la valeur correspondante de A(f). l'adresse cherchée est formée de deux octets. l'octet poids fort est fixe et la lecture de la fréquence permet de déterminer l'octet poids faible. La valeur de l'octet poids faible est définie par Pos :

$Pos = 4f - 2$, si la fréquence lue est entière.

$Pos = 4f$, sinon

Le port B fournit la partie entière de la fréquence, codée en hexadécimal sur huit bits. Il faut la convertir en son équivalent décimal. Diverses solutions existent. On a opté pour la conversion en utilisant une table de données, appelée TAB4, qui se trouve en mémoire EPROM. Cette méthode offre l'avantage de la rapidité.

Le port C permet de savoir si la fréquence lue contient une partie fractionnaire. Pour cela un seul bit de ce port suffit.

On a imposé à la fréquence d'évoluer entre 0 et 50 Hz, ainsi l'onde générée aura une fréquence de 50 Hz même si la valeur lue est supérieure à cette limite. Une fois la

fréquence lue et l'adresse calculée, on passe à la formation de la table de données, TAB3a ou TAB3b, située en RAM, qui sera utilisée pour générer l'onde PWM.

3.4/ Formation de la table de données

La formation de la table de données en RAM se fait en utilisant les valeurs stockées dans TAB1 et TAB2. TAB1 contient les valeurs de $A(f)$ donnée par l'équation VI.7, et TAB2 celles de $B(k)$ et de $C(k)$ données par les équations IV.8 et IV.9. TAB2 est organisée de la manière suivante :

B(1), C(1), B(2), C(2), ..., B(7), C(7), B(6), ..., C(1),B(1).

et cela, pour utiliser les propriétés de symétrie dont dispose la loi suboptimale.

L'addition ou la soustraction des valeurs de TAB1 et de celles de TAB2 permet de former l'une des tables TAB3a ou TAB3b en RAM. Les trois paires de registres dont dispose le 8085 sont utilisées comme pointeurs dans ces tables. La figure 4.6 résume l'organisation de ces tables.

3.5/ Sous-programme d'interruption

Les sous-programmes relatifs aux interruptions RST7.5, RST6.5 et RST5.5 sont identiques. Chacun d'eux est associé à une phase et permet de générer la paire de signaux de commande correspondants.

Pour générer une phase, la paire de registre HL est utilisée comme pointeur dans la table de données, TAB3a ou TAB3b selon l'état d'un indicateur testé à chaque appel du sous-programme, et permet d'y accéder de manière séquentielle. La valeur pointée est lue par le microprocesseur et est transférée dans le décompteur correspondant du timer. Le sous-programme a aussi pour tâche l'activation d'un signal, généré à travers le port A, qui, traité de manière convenable par une logique externe, permet de créer le temps mort de commutation. La figure 4.7 donne l'organigramme relatif au sous-programme de l'interruption RST7.5.

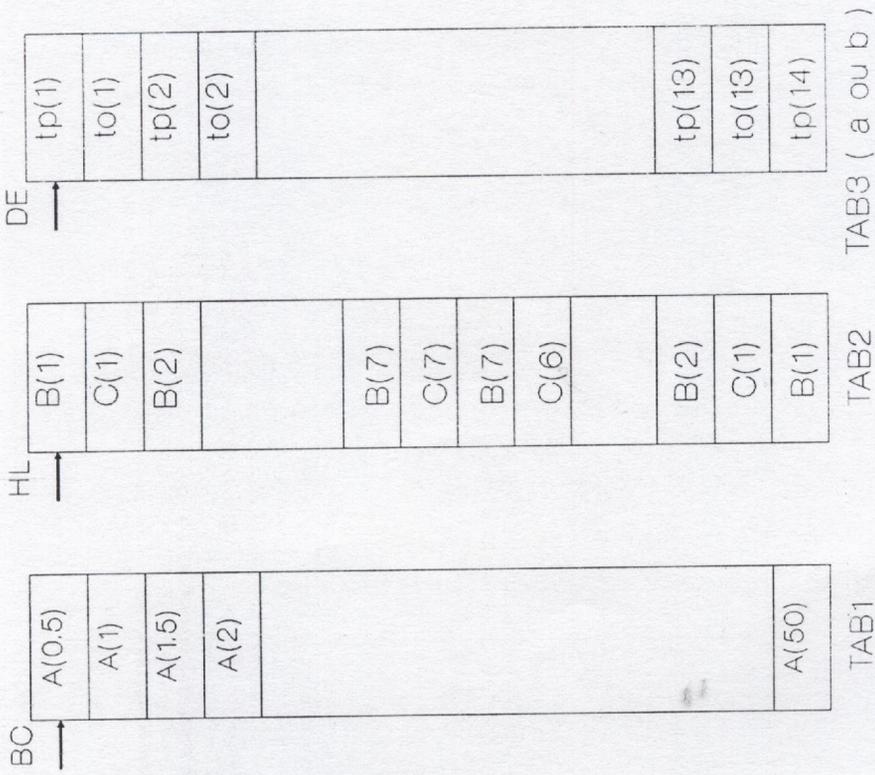


Fig4.6 Organisation des tables de données

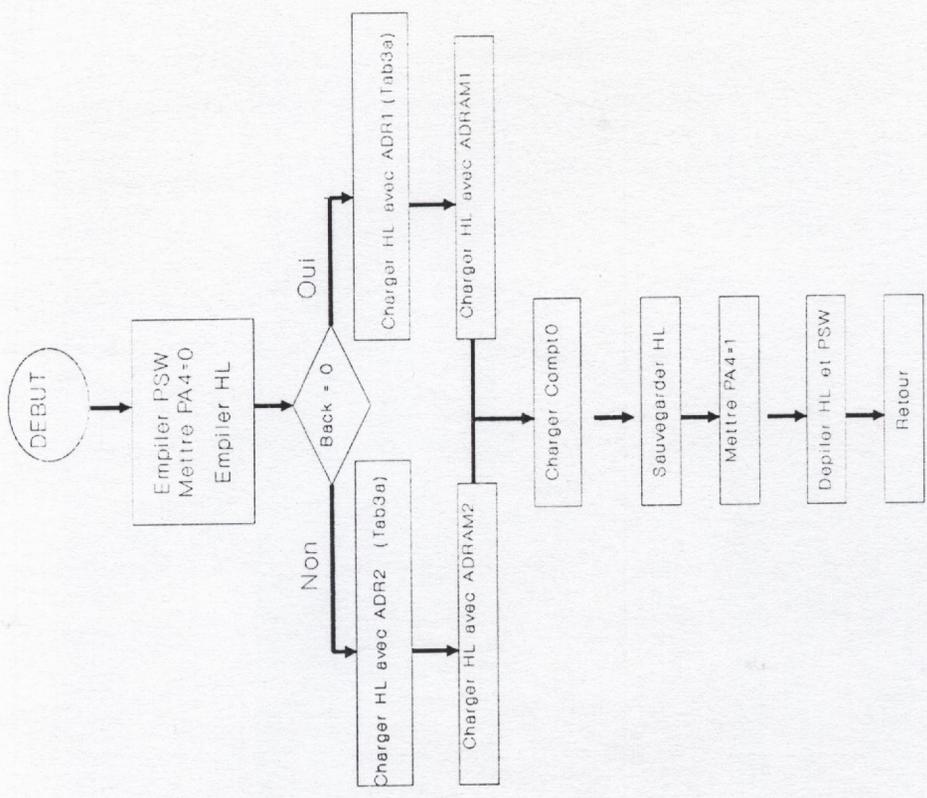


Fig4.7 : Organigramme du sous programme d'interruption RST 7.5

4/ REALISATION DU CONVERTISSEUR ALTERNATIF-ALTERNATIF

4.1/ Principe

Le schéma de principe de l'alimentation de puissance est donné à la figure 4.8. Il s'agit d'un convertisseur alternatif – alternatif à deux étages. Le premier étage est consacré à la conversion alternatif – continu et est constitué du pont redresseur suivi du filtre. Le deuxième est l'étage de conversion continu-alternatif, constitué par l'onduleur.

4.2/ Conversion alternatif-continu

4.2.1/ Redressement

Il s'agit de redresser le secteur triphasé, pour cela un pont triphasé double (PD3) est utilisé (Fig.4.8). L'avantage du PD3 est de fournir une tension redressée dont la valeur moyenne est la plus élevée et dont l'ondulation est la plus faible, comparativement aux autres montages redresseurs (P3 ou PD2). Le développement en série de Fourier de la tension redressée fournie par le PD3 donne une valeur moyenne V_{moy} et des harmoniques. Le premier harmonique est à la fréquence $6f_s$ où f_s est la fréquence du secteur.

$$V_{moy} = 3 \sqrt{3} V_{max} / \Pi ; \text{ avec } V_{max} : \text{ amplitude maximale de la tension de phase.}$$

En contrepartie, les diodes doivent supporter une tension inverse plus importante, égales à $2 V_{max}$.

Des diodes SKN 100/12 sont utilisées pour réaliser ce pont.

4.2.2/ Filtrage

Le filtrage de la tension fournie par le PD3 est réalisé à l'aide d'un filtre LC. L'inductance L est nécessaire pour lisser le courant, le condensateur C permet de limiter les variations de la tension.

Ce filtre est soumis à une fréquence variable du côté de la machine ce qui pose certains problèmes pour sa réalisation. Ainsi, le courant fourni à l'entrée de l'onduleur

peut présenter une ondulation importante. L'amplitude de l'ondulation et sa forme dépendent aussi bien de la stratégie de commande adoptée que des conditions de fonctionnement. La tension qui doit être aussi proche que possible de celle d'une source idéale, présente des fluctuations.

Le filtre peut influencer sur la dynamique de l'ensemble onduleur – machine, pour cela, certains travaux en tiennent compte lors de la simulation [24].

Dans [25] a été présentée une procédure qui permet de dimensionner le filtre moyennant un compromis entre les différents paramètres, aux exigences contradictoires, du système.

Nous avons pris un condensateur C de 2000 μF , constitué par la mise en parallèle de 4 condensateurs de 500 μF et une bobine d'inductance (mesurée) de 18.8 mH. Le filtre ainsi constitué est un court-circuit à la fréquence $6 \cdot f_s$.

4.3/ Conversion continu-alternatif : Onduleur [31, 32, 33, 34, 35]

4.3.1/ Principe

Un onduleur est un convertisseur statique continu-alternatif. L'énergie électrique est acquise à partir d'une source continue et est transmise, de manière contrôlée, vers une charge à travers des interrupteurs permettant ainsi d'obtenir une grandeur alternative.

Dans les variateurs de vitesse, cette charge est représentée par un moteur alternatif, alimenté en tension ou en courant. l'alimentation doit se faire à amplitude et fréquence variables.

La figure 4.9 donne le schéma de principe d'un onduleur de tension triphasé constitué par six interrupteurs (dans ce cas des transistors) aux bornes des quels sont montées en antiparallèle des diodes. Ces diodes servent à assurer la continuité du courant dans la charge supposée inductive.

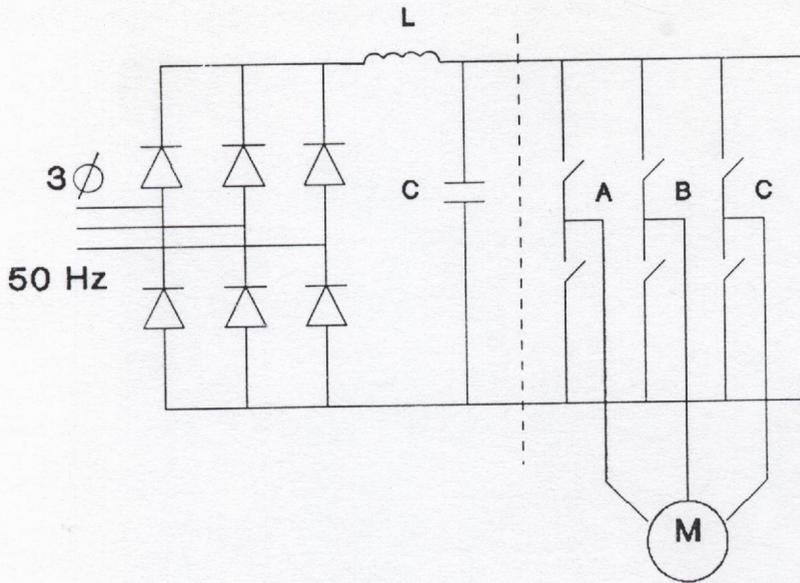


Fig4.8 : Schéma de l'alimentation de puissance

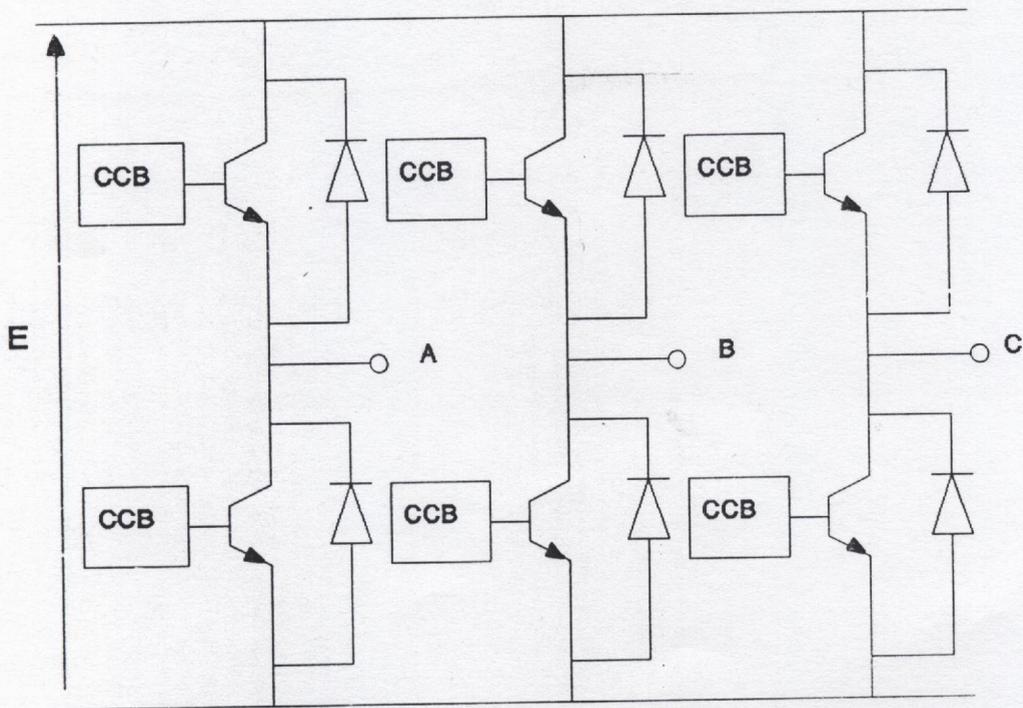


Fig4.9 Onduleur de tension
CCB : carte de commande de base

4.3.2/ Interrupteur de puissance

L'interrupteur de puissance est l'élément clef dans la conception de l'onduleur. L'application, notamment la fréquence de commutation et la puissance mise en jeux, dicte le choix d'une configuration, d'un type particulier d'interrupteur et le type de commande.

Les progrès réalisés dans le domaine des semi-conducteurs, surtout, l'amélioration du temps de commutation, des tensions supportées par l'interrupteur ainsi que le courant qui le traverse, ont permis de mettre à la disposition du concepteur un large choix de composants. Ce sont les progrès réalisés dans le domaine de la fabrication des circuits intégrés qui ont le plus favorisé la technologie des composants semi-conducteurs de puissance dont l'évolution (amélioration des performances) et la diversification (nouveaux composants) ont été importantes [22, 23].

La référence [22] présente une étude détaillée sur les composants de puissance et résume dans un tableau, l'ensemble des caractéristiques qui peuvent servir comme base de comparaison pour le choix d'un composant.

Pour notre part, nous avons opté pour le transistor de puissance, vu la commande PWM que nous avons retenue et la gamme de puissance de la charge.

4.3.3/ Le transistor de puissance

En électronique de puissance, on ne considère que le fonctionnement du transistor en régime de commutation, c'est à dire le transistor est soit bloqué, soit saturé. Quatre limites sont à prendre en considération :

- limites en courant,
- limites en tension,
- limites en second claquage,
- limites en température.

Ces limites permettent de déterminer l'aire de sécurité de fonctionnement du composant.

Lorsque le transistor est saturé, il est traversé par un courant et la tension à ses bornes, $V_{ce\ sat}$, est faible. Quand il est bloqué, il n'est parcouru que par un courant de fuite, qui est faible, et est soumis à une tension V_{ce} élevée. Lors de la commutation, courant et tension peuvent exister en même temps, d'où risque de destruction du transistor.

Les paramètres importants qui interviennent dans le choix d'un transistor sont le courant de collecteur I_c , admissible en régime saturé, la tension V_{ce} supportée par le transistor bloqué, ces paramètres sont en relation directe avec la puissance fournie à la charge, et les temps de commutation qui sont liés à la fréquence maximale que peut atteindre l'onduleur. Ces paramètres sont fournis par le fabricant.

En régime de saturation, le gain en courant du transistor de puissance, $\beta = I_c/I_b$, est faible (de l'ordre de 5 à 10). Ceci nécessite, parfois, d'utiliser le montage Darlington, dont le gain β est plus important et où le courant de base fourni par le transistor pilote au transistor de puissance est puisé de la source continue de haute tension.

Le transistor est un interrupteur commandable à l'ouverture et à la fermeture. Sa commande se fait par la base.

4.3.4/ Commande de base

La commande de base doit fournir un courant de base suffisant à la saturation du transistor lors de la fermeture, et extraire un courant lors de l'ouverture (ce courant est constitué par les charges stockées). La figure 4.10a donne la forme du courant qui doit être fourni par la commande de base pour obtenir un fonctionnement correct du transistor comme interrupteur:

- il faut fournir un courant I_{bsat} pendant la phase de conduction.
- pendant la phase transitoire de mise en conduction, le courant de base doit avoir un $d(i_b)/dt$ très grand avec dépassement de la valeur de I_{bsat} . Ceci permet une fermeture rapide.
- pendant la phase transitoire de blocage, les deux jonctions doivent s'ouvrir simultanément et donc la forme du courant de base doit être adaptée. L'application d'une

tension négative à la base permet d'extraire rapidement les charges stockées et assure une meilleure tenue en tension du composant.

La figure 4.10b donne le schéma de la commande de base adoptée. En entrée, se trouve l'optocoupleur qui assure l'isolation galvanique entre la partie commande logique (TTL) et la partie puissance. En sortie, un étage push-pull à transistor fournit des signaux amplifiés en courant et en tension. Lorsqu'un signal logique haut est appliqué à l'entrée de l'optocoupleur, les transistors T1, T2 et T3 sont saturés alors que T4 est bloqué. Un courant de base est alors fourni au transistor de puissance, permettant sa mise en conduction. Pour diminuer le temps de mise en conduction, le circuit constitué par R8, R9 et C2 est placé à la sortie de l'étage push-pull. Si un signal de bas niveau se trouve à l'entrée de l'optocoupleur, les transistors T1, T2 et T3 sont bloqués tandis que T4 est saturé. Une tension négative est appliquée à la base du transistor de puissance, et permet d'évacuer les charges stockées à travers le courant collecteur de T4. Ce courant est limité par la résistance bobinée R7.

Cette carte est alimentée avec deux tensions continue l'une positive (+8 V) et l'autre négative (-5 V).

4.3.5/ Le circuit d'aide à la commutation: CALC

Le transistor de puissance n'est pas vulnérable dans les états de saturation (passage du courant seul) ou de blocage (application d'une tension seule). Par contre, lors de la commutation, c'est à dire le passage d'un état vers l'autre, il est traversé par un courant en présence d'une tension, ce qui entraîne des pertes importantes et risque de porter le point de fonctionnement hors de l'aire de sécurité.

Le rôle des réseaux d'aide à la commutation (CALC) est de limiter la variation du courant, $d(i_c)/dt$ lors de la fermeture, et la variation de tension $d(v_{ce})/dt$ lors de l'ouverture, pour permettre au transistor une commutation sans danger.

La limitation du courant est obtenue à l'aide d'une bobine montée en série avec l'interrupteur, celle de la tension à l'aide d'un condensateur monté en parallèle avec



l'interrupteur.

Dans notre cas, la nature inductive de la charge permet de se passer CALC à la fermeture.

4.3.6/ Alimentations stabilisées

Une tension continue stabilisée est nécessaire pour alimenter la carte de commande de base. En effet, celle-ci reçoit les signaux TTL issus de la carte de commande logique et doit les amplifier, surtout en courant, avant d'attaquer les transistors de puissance.

Une alimentation stabilisée classique a été adoptée, où la régulation se fait par un régulateur intégré (Fig.4.11). Cette alimentation fournit deux tensions (+8 V) et (-5 V).

A noter que pour un onduleur triphasé, il faut au moins quatre alimentations stabilisées indépendantes et cela afin d'éviter le court-circuit de la charge et la destruction des interrupteurs. Il faut alors utiliser le concept de masses flottantes, d'où l'emploi d'autant d'alimentation. Nous avons utilisé quatre alimentations stabilisées, dont trois sont identiques et serviront à alimenter les étages de préamplification des interrupteurs de haut (Fig.4.9). La quatrième est dimensionnée pour fournir plus de courant, pour alimenter les étages préamplificateurs des interrupteurs de bas (Fig.4.9).

4.3.7/ Dimensionnement des transistors

L'alimentation de puissance doit fournir une tension de 500 V, le courant par phase doit être de l'ordre de 7 A, donc le courant I_{max} est de l'ordre de 10 A. La fréquence maximale de commutation est : $F = f \cdot P = 50 \cdot 27 = 1350$ Hz.

Le transistor à choisir doit être rapide, avoir un I_{csat} supérieur à 12.5 A et un V_{cex} supérieur à 500 V. Le BUV 48 A convient, en effet ses caractéristiques sont :

$$V_{cesus} = 450 \text{ V}; V_{cex} = 1000 \text{ V}; I_{csat} = 15 \text{ A pour } I_b = 4 \text{ A.}$$

$t_f = 0.4 \mu\text{S}$ (temps d'ouverture); $t_s = 4 \mu\text{S}$ (temps de stockage).

Le montage Darlington et la commande à V_{be} négative sont nécessaires. Le transistor pilote doit avoir des caractéristiques analogues à celles du transistor de puissance. Le BU426A est choisi, ses caractéristiques sont :

$V_{cesus} = 400 \text{ V}$; $V_{cex} = 900 \text{ V}$; $I_{csat} = 6 \text{ A}$ pour $I_b = 2 \text{ A}$.

$t_f = 0.15 \mu\text{S}$ (temps d'ouverture); $t_s = 2 \mu\text{S}$ (temps de stockage).

La paire de transistors complémentaires de l'étage push-pull de la commande de base, le BD139 et le BD140 dont le I_{csat} est de 1.5 A, sont suffisants pour commander le BU 426A.

Les diodes de roue libre et du CALC doivent avoir les mêmes caractéristiques en courant et en tension que le transistor de puissance et surtout être très rapides.

Le CALC utilisé sert lors de l'ouverture du transistor. Le choix des valeurs de R_c et C_c est soumis à certaines contraintes, la constante de temps $R_c C_c$ doit être inférieure à t_{min} , la plus courte durée d'impulsion, pour que le condensateur ait le temps de se décharger avant la prochaine impulsion. Un facteur de 3 est utilisé ($3 R_c C_c \leq t_{min} = 41.5 \mu\text{S}$). C_c est choisi de manière qu'au bout d'un temps t_f sa charge ne soit pas totale et que la tension à ses bornes n'a pas encore atteint la valeur de la tension d'alimentation. Les valeurs suivantes sont prises

$C_c = 0.1 \mu\text{F}$ et $R_c = 100 \Omega$.

4.3.8/ Schéma de l'interrupteur

La figure 4.12 donne le schéma électrique de l'interrupteur adopté. Il est constitué de deux transistors T_d et T_p , montés en Darlington. La diode D_{rl} assure la continuité du courant lors du blocage du transistor de puissance. La diode D_e est utilisée pour équilibrer la répartition des courants entre les transistors T_d et T_p . La diode D_c , la résistance R_c et le condensateur C_c assurent la fonction du CALC.

Pour l'onduleur triphasé six interrupteurs sont nécessaires, le schéma complet est donné en annexe 3.

CONCLUSION

Ce chapitre a été consacré à la réalisation de la carte de commande et de l'alimentation de puissance. Dans un premier temps, l'implémentation par microprocesseur de la stratégie suboptimale a été abordée. L'utilisation de la configuration microprocesseur - mémoire - timer permet d'implémenter efficacement cette stratégie. Ensuite, le convertisseur statique, formé de deux parties, l'une consacrée à la conversion alternatif - continu, l'autre à l'onduleur a été étudiée et réalisée.

L'étude expérimentale du variateur de vitesse fait l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 5

Vérification expérimentale

INTRODUCTION

Ce chapitre est consacré à la vérification expérimentale de la maquette réalisée. La carte de commande à base de microprocesseur est testée. Pour l'aspect logiciel, les durées d'exécution de certaines parties vitales du programme sont évaluées. Pour l'aspect matériel, les signaux PWM générés par cette carte sont donnés pour deux valeurs de la fréquence, 5 Hz et 40 Hz, respectivement et pour un ratio de fréquence P égal à 27. Ensuite, est présentée, l'amplification de ces signaux par la carte de commande de base. Un interrupteur de puissance est testé en charge et les formes des signaux obtenus dans deux cas, charge R et charge R-L, sont donnés. Finalement, les essais de l'association carte de commande-onduleur-moteur asynchrone, qui constitue le variateur de vitesse, sont effectués.

1/ TEST DE LA CARTE DE COMMANDE

1.1/ Déroulement du programme

Les plus importantes tâches logicielles que la carte doit réaliser sont les suivantes:

-**La génération des signaux PWM triphasés.** Cette tâche se traduit par l'exécution des sous-programmes d'interruption SP7, SP6 et SP5. Le microprocesseur, pour ne pas déformer les signaux générés, doit exécuter chacun de ces sous-programmes en un temps minimal. La durée d'exécution de l'un d'eux est de $231 T$, où T est le cycle machine de base. Cela se produit dans le cas le plus défavorable, c'est à dire, lorsque, pour les instructions, telles que celles de saut, dont les durées d'exécution peuvent être différentes, la durée maximale est considérée. Dans notre cas le microprocesseur est piloté par une horloge de 8 MHz et le cycle de base est alors de $0.25 \mu\text{S}$. La durée d'exécution de l'un de ces sous programmes est de **$57.75 \mu\text{S}$** .

-**La formation d'une table de données en RAM.** Cette tâche est effectuée lorsqu'un changement, de la fréquence voulue par l'opérateur, est détecté. Elle nécessite $2478 T$, soit **$619.5 \mu\text{S}$** et cela toujours dans le cas le plus défavorable.

Il faut noter que :

-**Les sous-programmes SP7, SP6 et SP5 sont identiques.** Ceci permet de générer des signaux de commande aussi fidèles que possible et de là, garder la symétrie du système triphasé.

-Lors de la formation de la table de données en RAM, la table en cours d'utilisation reste valide. Le changement est effectué lorsque la nouvelle table est entièrement remplie.

1.2/ Génération des signaux de commande

Les photos F1 et F2 (voir page 108) donnent les **signaux de commande (TTL)** générés par la carte à microprocesseur. Ils correspondent à la phase A (en haut) et à la phase B (en bas) et sont pris simultanément. Pour la photo F1, ils ont une fréquence égale à 5 Hz et elle est égale à 40 Hz pour F2. Ces signaux sont identiques et déphasés. Le déphasage est plus net pour F2. Ceci permet de dire que la carte à microprocesseur fonctionne correctement et pour toute la plage de la fréquence (0 à 50 Hz).

2/ TEST DE LA CARTE DE COMMANDE DE BASE

Le rôle de la carte de commande de base est de fournir les signaux adéquats pour attaquer l'interrupteur de puissance. Ce sont les signaux générés par la carte de commande, amplifiés à +8 Volts (pour fermer l'interrupteur) et à -5 Volts (pour l'ouvrir). Les photos F3 et F4 (vor page 109) donnent les signaux fournis par cette carte, pour 5 Hz et 40 Hz respectivement.

Ces photos montrent le bon fonctionnement de la préamplification (carte de commande de base). Le trait continu horizontal sur F3 et F4 indique le zéro Volt, pris comme référence, pour montrer les niveaux positif (+8 V) et négatif (-5 V).

3/ TEST DE L'INTERRUPTEUR

3.1/ Test sur charge R

L'interrupteur a été testé avec une charge R, il a très bien fonctionné. Ses transistors, qui sont montés en Darlington, ont répondu correctement à la commande PWM qui leur est appliquée. Les photos F5 et F6 (voir page 110), prises pour une charge R (résistance bobinée de puissance de valeur 84Ω) et une tension continue d'alimentation d'environ 200 V et pour deux valeurs de la fréquence modulante (f égale à 5 Hz pour F5 et f égale à 40 Hz pour F6) illustrent le bon fonctionnement de cet interrupteur. Aux bornes de la charge,

la valeur moyenne mesurée de la tension est de 107 V alors que le courant est de 1.2 A.

Ces photos montrent des pics de tension qui se produisent lors de la commutation et sont plus prononcés lors de la fermeture. Ces pics proviennent des différentes inductances parasites du montage et peuvent être dangereux si leur amplitude dépasse la valeur tolérée par les transistors.

3.2/ Test sur charge R-L

Une bobine d'inductance L de 0.4 H et de résistance 10Ω est placée en série avec la charge R précédente.

Les photos F7 et F8 (voir page 111) donnent la forme du signal obtenu aux bornes de cette charge R-L. Ces photos montrent l'influence de la bobine sur la création des pics de tension, très prononcés dans ce cas.

4/ TEST DE LA SOURCE CONTINUE D'ALIMENTATION

La source continue d'alimentation formée d'un pont redresseur suivi d'un filtre LC a été testée dans le cas d'une charge R .

La photo F9 (voir page 112) montre la tension continue délivrée par cette source. Cette tension est lisse, mais en réalité, elle présente des fluctuations. Pour mettre en évidence les ondulations, la photo F10 (voir page 112) a été prise avec l'oscilloscope branché en mode alternatif, pour éliminer la composante continue. Les ondulations, bien que présentes, ont une faible amplitude. Ces ondulations sont causées par la charge-décharge du condensateur C .

Pour la charge R de 84Ω , les valeurs mesurées sont un courant de 3.8 A, qui la traverse, alors que la tension entre phases, à l'entrée du pont redresseur, est de 300 V.

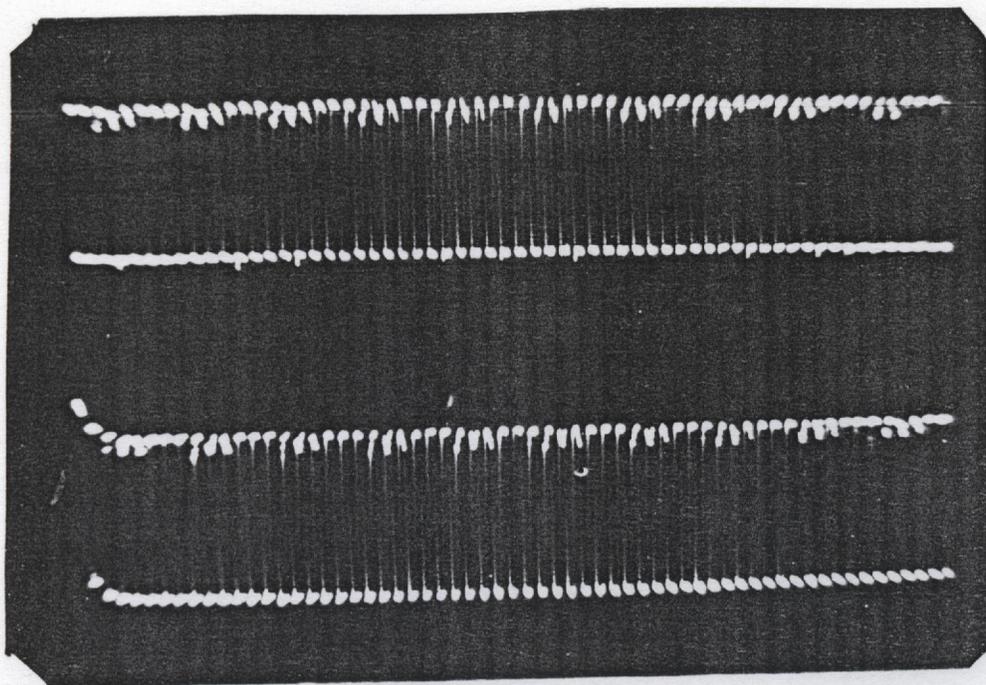


Photo F1 Signaux des phases A et B
 $f = 5 \text{ Hz}$

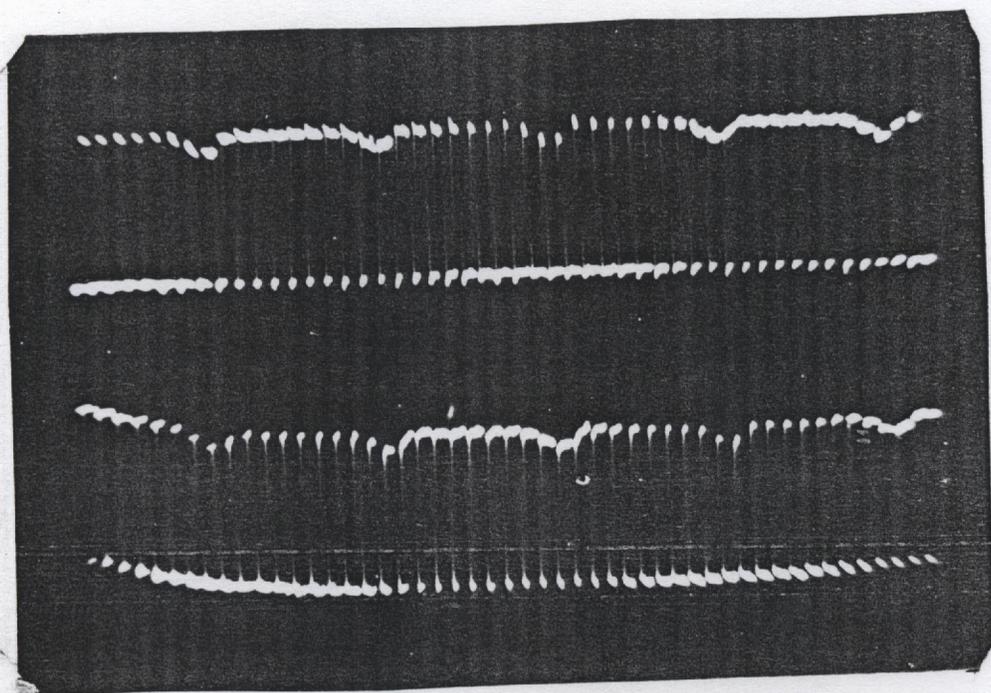


Photo F2 Signaux des phases A et B
 $f = 40 \text{ Hz}$

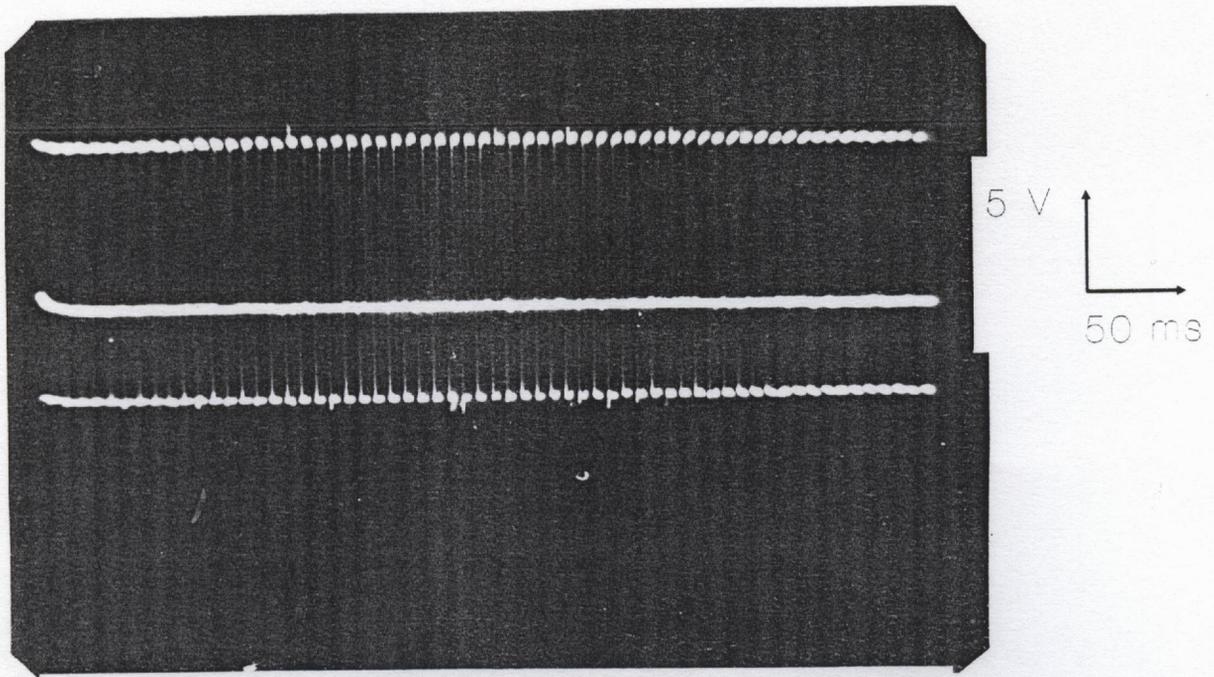


Photo F3 Signal fourni par la CCB

$f = 5 \text{ Hz}$, CCB:carte de commande de base

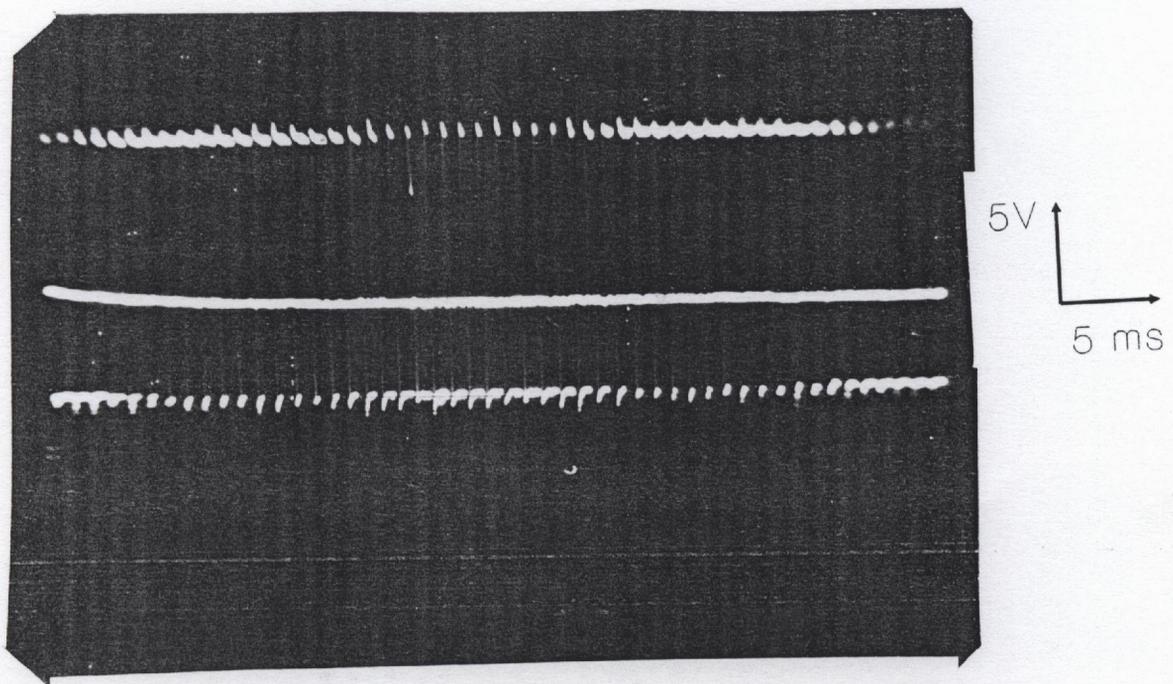
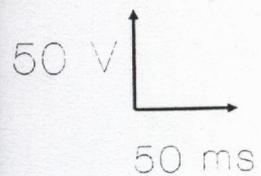
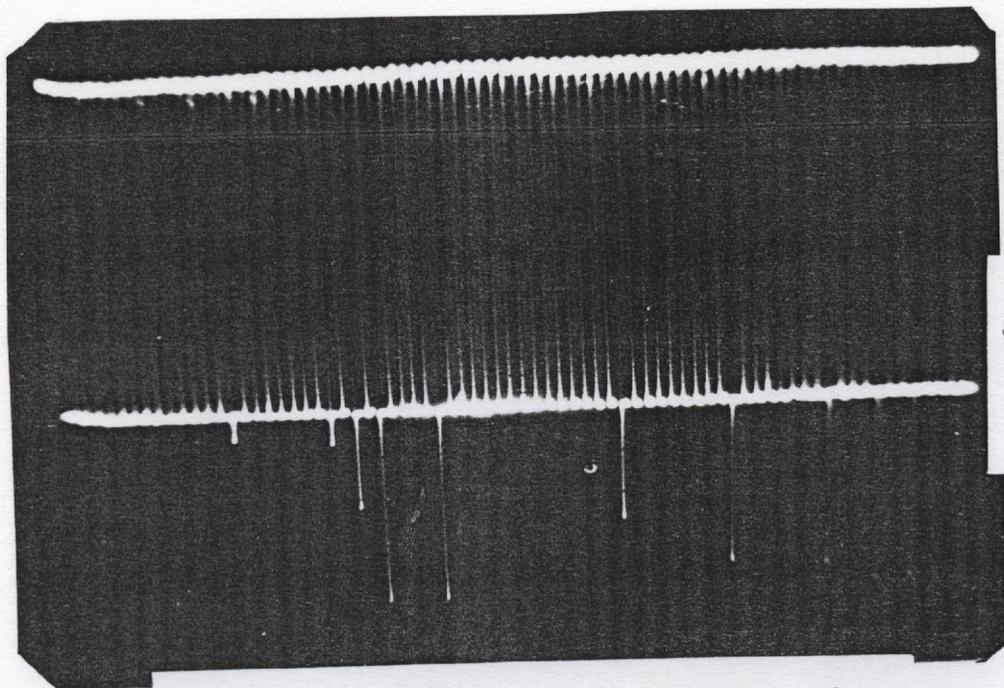
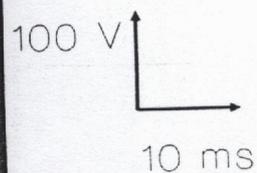
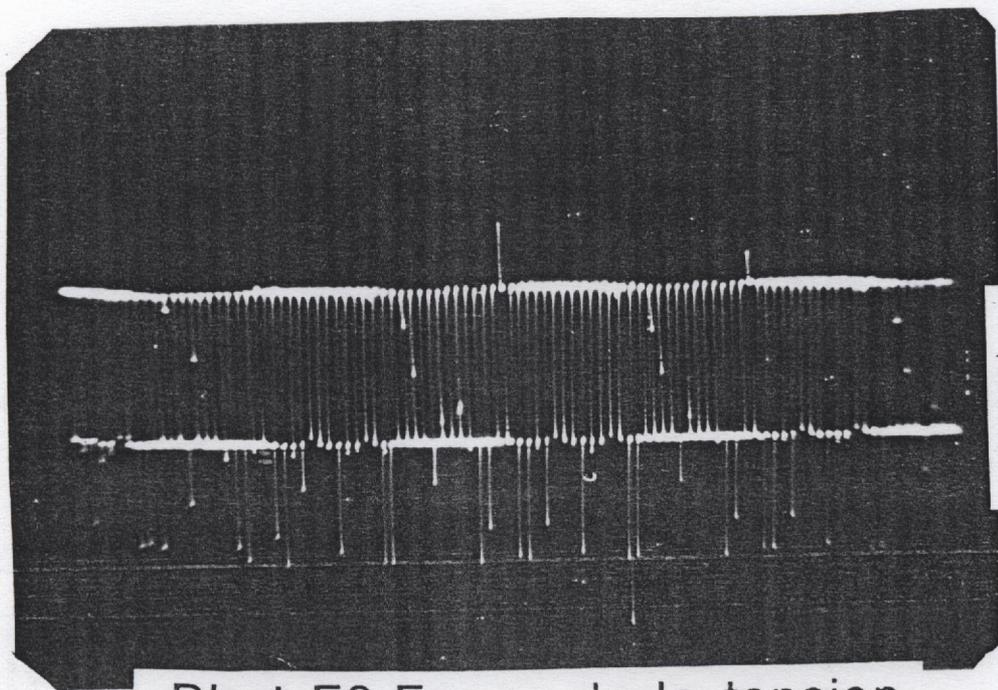


Photo F4 Signal fourni par la CCB

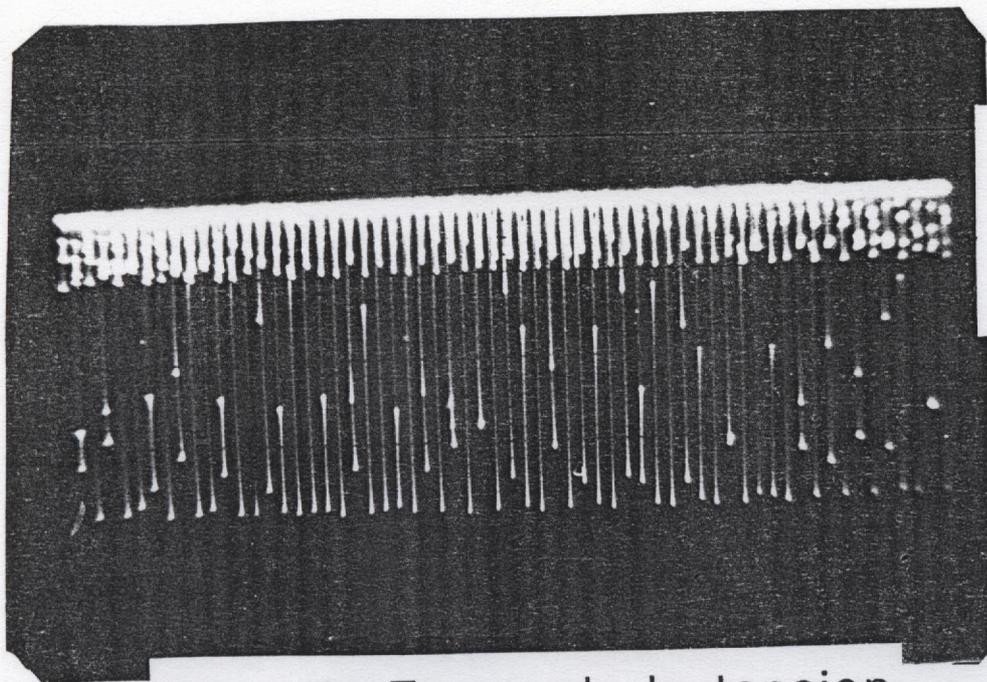
$f = 40 \text{ Hz}$



Phot F5 Forme de la tension
Charge R , $f = 5$ Hz

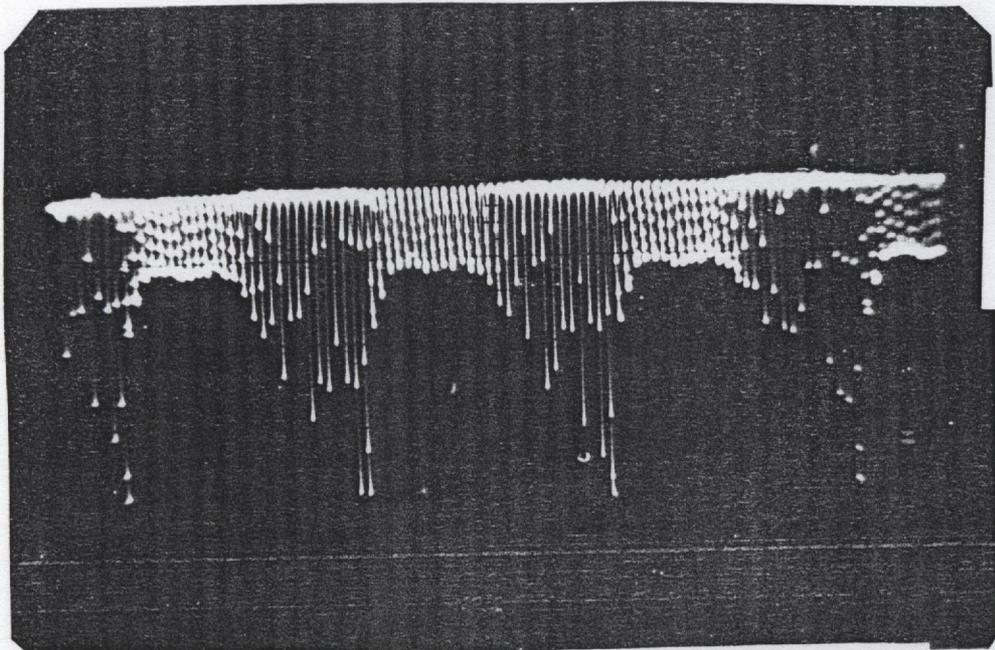


Phot F6 Forme de la tension
Charge R , $f = 40$ Hz



100 V
50 ms

Phot F7 Forme de la tension
Charge R-L , $f = 5\text{ Hz}$



100 V
10 ms

Photo F8 Forme de la tension
Charge R-L , $f = 40\text{ Hz}$

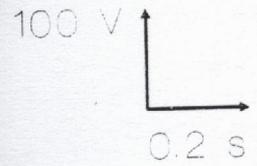
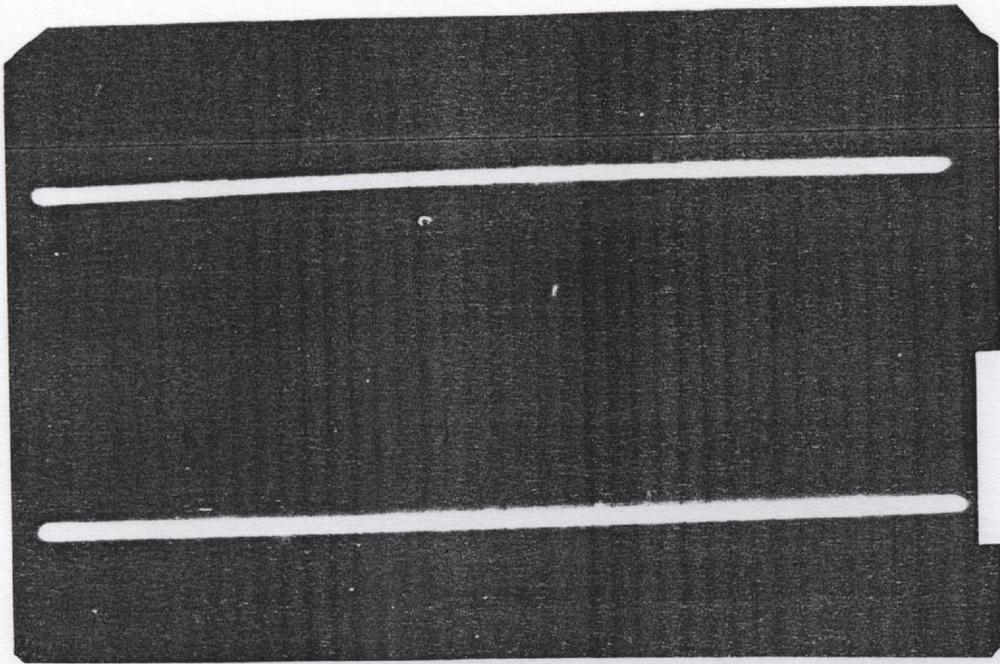


Photo F9 Tension continue d'alimentation

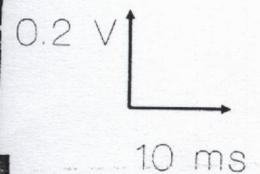
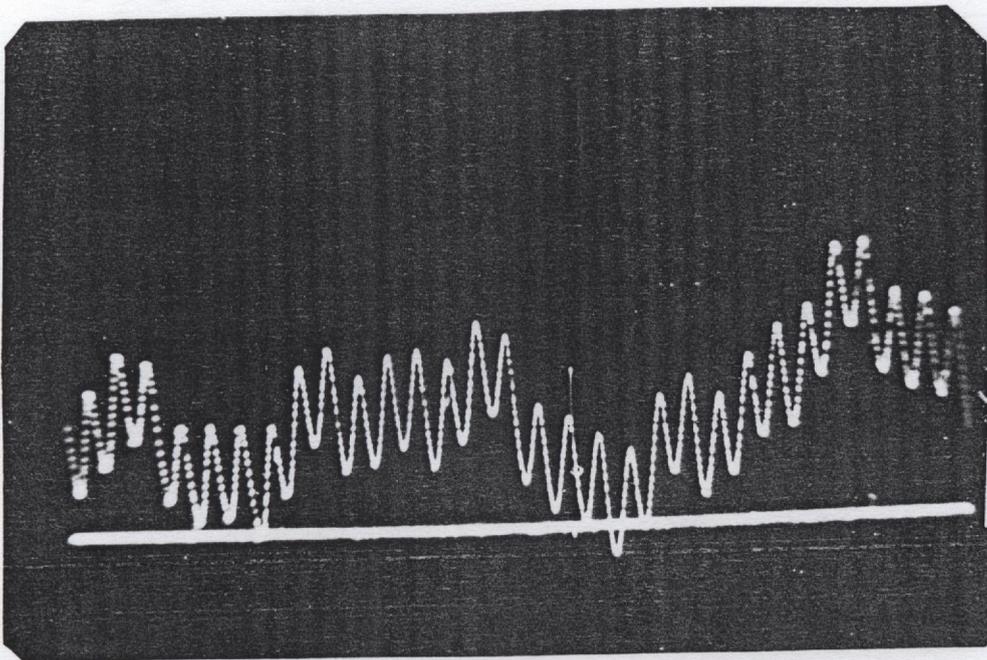


Photo F10 ondulation de la source continue

5/ Test de l'onduleur chargé par un moteur asynchrone

La maquette expérimentale complète (carte à microprocesseur et onduleur chargé par un moteur asynchrone) est testée. Les essais ont été effectués pour toute la plage de la fréquence. Les relevés du courant à l'entrée de l'onduleur et du courant et de la tension de ligne ont été réalisés. Les relevés des courants se font par l'intermédiaire de shunts placés en série. Aux bornes du shunt une tension est relevée qui est l'image du courant à visualiser. La photo F11 donne la tension de ligne aux bornes du moteur. La photo F12 montre le courant de ligne et la photo F13 visualise le courant à l'entrée de l'onduleur. Ces photos illustrent le fonctionnement de la maquette pour une fréquence affichée de 40 Hz.

La tension de ligne (F11) est formée d'impulsions de largeurs variables et contient des pics , dus aux différentes inductances parasites du montage. Le courant de ligne a une allure sinusoïdale (F12). Le courant à l'entrée de l'onduleur est haché et présente des parties négatives (F13). Ces résultats sont conformes à ceux donnés par la simulation (chapitre 3). Les caractéristiques du moteur utilisé sont données en annexe 4.

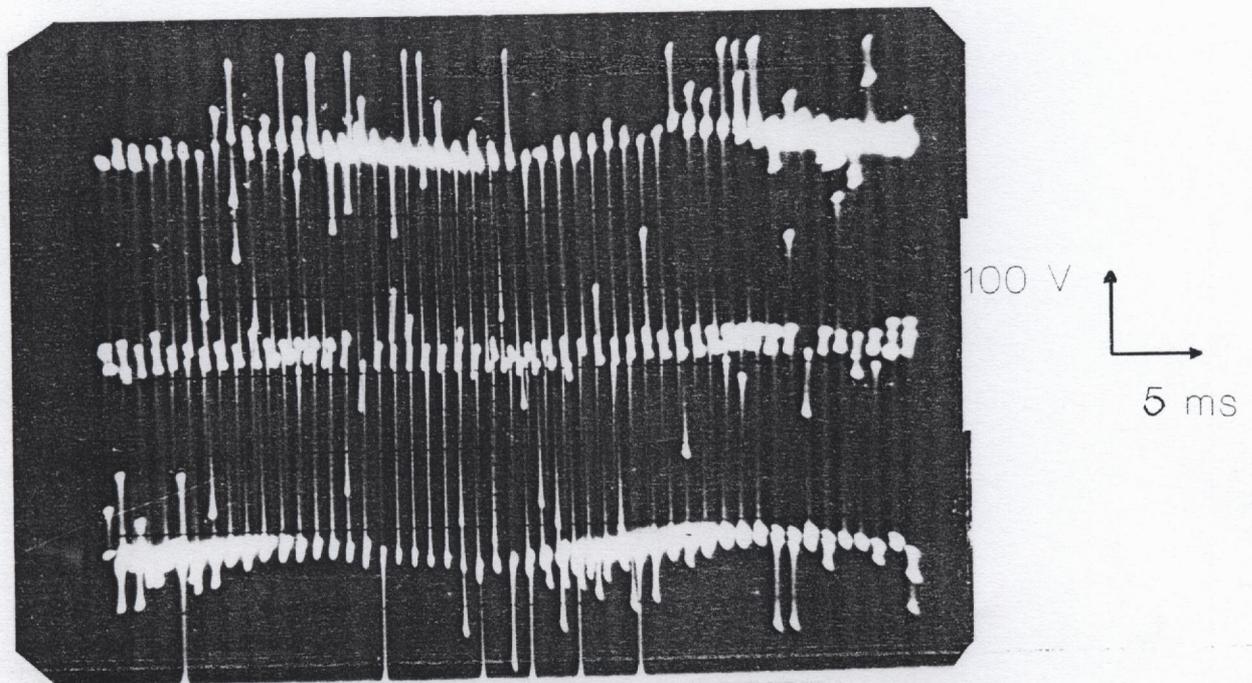
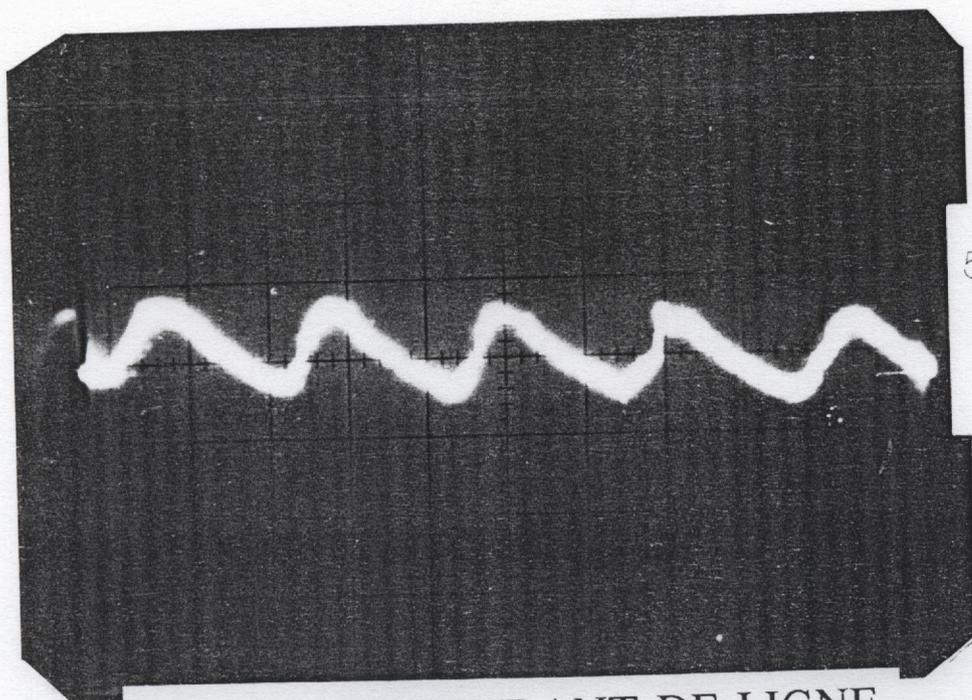
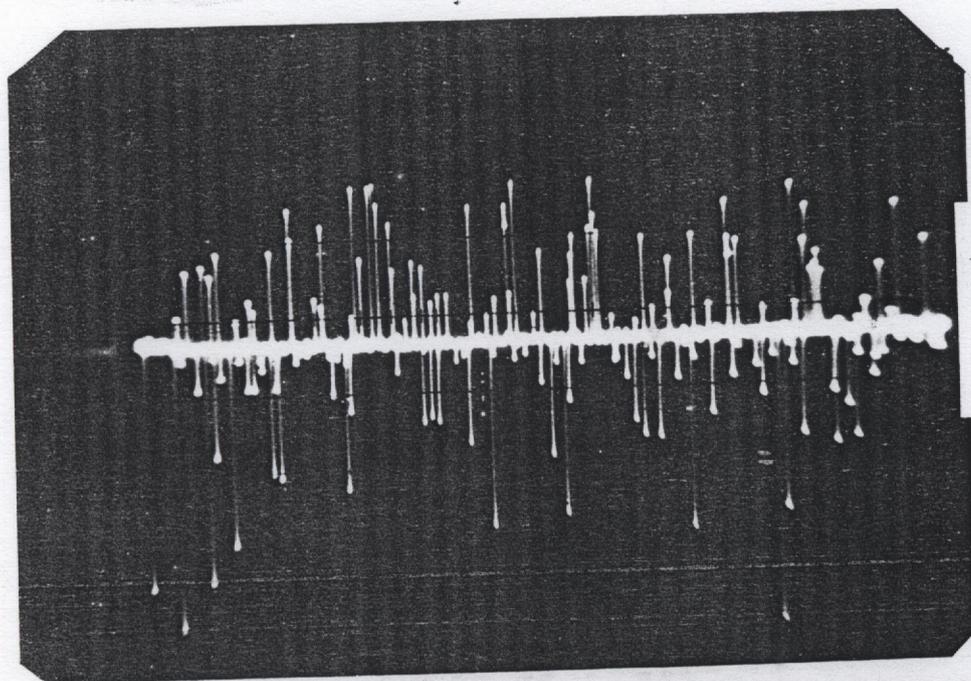


PHOTO F11 TENSION DE LIGNE
AUX BORNES DU MOTEUR, $f=40$ Hz



5 A
5 ms

PHOTO F12 COURANT DE LIGNE
 $f = 40\text{Hz}$



10 A
10 ms

PHOTO F13 COURANT à L'ENTREE DE L'ONDULEUR
 $f=40\text{ Hz}$

CONCLUSION

Dans ce chapitre, les essais expérimentaux effectués sur la maquette réalisée, ont été présentés. Ces tests concernent, en premier lieu, la carte de commande à base de microprocesseur, l'étage de préamplification constitué par la carte de commande de base et finalement l'interrupteur de puissance. Ces étages ayant correctement fonctionné, l'étape suivante, a été le test de l'onduleur chargé par un moteur asynchrone. Les résultats obtenus sont conformes à ceux donnés par la simulation. Le bon fonctionnement de l'ensemble a été illustré par des photos.

CONCLUSION GENERALE

Le moteur à induction, grâce à ses qualités (robustesse, absence de collecteur mécanique, prix de revient, ...), présente une solution intéressante dans le domaine des variateurs de vitesse. Alimenté par convertisseur statique, il peut concurrencer avantageusement les autres types de moteurs. Bien que sa commande pose des difficultés, les progrès réalisés dans le domaine des microprocesseurs et des semi-conducteurs de puissance, permettent d'implémenter des algorithmes de commande performants.

Nous avons analysé différentes stratégies de commande, et celles basées sur la modulation en largeur des impulsions à échantillonnage régulier présentent quelques avantages:

- les largeurs des impulsions sont décrites par des équations simples.
- possibilité d'une implémentation efficace par microprocesseur
- dans le signal de sortie, les harmoniques significatifs sont la porteuse et ses bandes

latérales

Ceci nous a conduit à simuler certaines de ces stratégies. La stratégie suboptimale, jugée intéressante, a été retenue. Ensuite nous avons simulé le comportement du moteur avec la stratégie en créneau et la stratégie suboptimale. Nous avons pu voir, à travers les résultats obtenus, que pour cette dernière les courants ne présentent pas de pics et s'approchent de la sinusoïde et que le couple est moins pulsatoire.

Pour les stratégies à échantillonnage régulier, le ratio de fréquence P est un paramètre important. En effet, c'est P qui détermine le nombre de commutation par cycle, donc les pertes par commutation dans les interrupteurs de puissance, ainsi que la valeur de la fréquence porteuse et donc le rang des harmoniques significatifs présents dans le signal

de sortie. P doit résulter d'un compromis entre ces contraintes.

Nous avons conçu et réalisé une carte à base du microprocesseur 8085 pour implémenter la stratégie suboptimale dans le cas où P est égal à 27. Il est évident qu'elle peut fonctionner pour toute autre valeur de P et pour toute stratégie décrite par les équations donnant les largeurs des impulsions, en particulier, les stratégies basées sur la modulation sinusoïdale à échantillonnage régulier. Nous avons également étudié et réalisé un onduleur de tension triphasé à transistors. Des tests ont été effectués, d'abord sur la carte de commande et sur un interrupteur destiné à cet onduleur dans deux cas, avec charge R et avec charge R-L, ensuite sur l'onduleur chargé par une machine asynchrone.

Les résultats obtenus lors des tests pratiques sont conformes avec ceux de la simulation. La commande en boucle ouverte et à flux constant, de la vitesse du moteur à induction a pu être efficacement implémentée par microprocesseur.

Certaines améliorations peuvent être apportées au travail présenté, tel que :

- l'utilisation d'un P variable. P sera grand pour les basses fréquences et petit pour les fréquences élevées.

- l'utilisation d'un microprocesseur plus puissant et plus rapide.

- une boucle de retour peut être envisagée pour réaliser l'autopilotage.

Le moteur à induction alimenté par convertisseur statique est décrit par un modèle couplé et non-linéaire et ses paramètres varient, dans de larges proportions, au cours du fonctionnement, et pour des applications où de hautes performances sont exigées, d'autres concepts de commande, telles que la commande vectorielle, la commande par mode de glissement, ...etc, qui sont plus performantes mais aussi plus exigeantes en matériel peuvent être mises en oeuvre. Ceci ouvre des perspectives très intéressantes pour le moteur à induction dans le domaine des actionneurs électriques.

BIBLIOGRAPHIE

- 1/ **B.K. BOSE**
" Adjustable-speed AC drives: A technology status review ".
Proceedings of the IEEE, Vol 70, N°2, February 1982.
- 2/ **W. LEONHARD**
" Adjustable-speed AC drives ".
Proceedings of the IEEE, Vol 76, N°4, April 1988.
- 3/ **P.C. SEN**
" Electric motor drives and control: Past, Present an Futur ".
IEEE Trans.Ind.Electronics Vol 37, N°6, Dec 1990.
- 4/ **B.K. BOSE**
" Power electronics : an emerging technology ".
IEEE Trans.Ind.Electronics Vol 36, N°3, August 1989.
- 5/ **R. CHAUPRADE et F. MILSANT**
" Commande des moteurs à courant alternatif "
pp 97-98; Dunod 1988
- 6/ **S.R. BOWES and B.M. BIRD**
" Novel approach to the analysis and synthesis of modulation processes in power convertor ".
IEE Proc., Vol 122, N°5, May 1975.
- 7/ **S.R. BOWES**
" New sinusoidal pulse width-modulated inverter ".
IEE Proc., Vol 122, N°11, Nov 1975.
- 8/ **S.R. BOWES and M.J. MOUNT**
" Microprocessor control of PWM inverter ".
IEE Proc., Vol 128, Pt B, N°6, Nov 1981.
- 9/ **S.R. BOWES and R.R. CLEMENTS**
" Computer-aided design of PWM inverter system ".
IEE Proc., Vol 128, Pt B, N°6, Nov 1981 .
- 10/ **F.G. TURNBULL**
" Selected harmonic reduction in static DC-AC inverter ".
IEEE Transaction - Com 85 , 1964.
- 11/ **S.P. JAKSON**
" Multiple pulse modulation in static inverter reduces selected output harmonics and provides smooth ajustement of fundamental ".
IEEE Trans.Ind. & General Application; Vol 14 1-A 6,N°4, 1970

- 12/ **H.S. PATEL and R.G. HOFT**
 " Generalized techniques of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters: Part 1 : Harmonic elimination ".
 IEEE Trans.Ind.App. Vol 1-A 9, N°3, 1973.
- 13/ **H.S. PATEL and R.G. HOFT**
 " Generalized techniques of harmonic elimination and voltage control in thyristor inverters. Part 2 : Voltage control techniques ".
 IEEE Trans.Ind.App. Vol 1-A 10, N°5, 1974
- 14/ **D. AKHRIB**
 " Microprocessor implementation of PWM switching strategies ".
 PhD thesis, Loughborough University of Technology, 1986.
- 15/ **D.A. GRANT, J.A. HOULDSWORTH and K.N. LOWER**
 " A new high quality PWM AC drives ".
 IEEE Trans.Ind.App. Vol 1-A 19, N°2, March/April 1983
- 16/ **J.A. TAUFIQ, B. MELLIT and C.G. GOODMAN**
 " Novel algorithm for generating near optimal PWM waveforms for AC traction drives".
 IEE Proc.Vol 133, Pt B, N°2, March 1986.
- 17/ **S.R. BOWES and A. MIDOUN**
 " Suboptimal switching strategie for microprocessor controlled PWM inverters drives".
 IEE Proc.Vol 132, Pt B, N°3, May 1986
- 18/ **M.G. EGAN and J.M.D. MURPHY**
 " A comparison of PWM strategies for inverter fed induction motors ".
 IEEE Conference record of IAS, 1982.
- 19/ **M. PIETERZAK**
 " Algorithmme de commande d'un variateur électrique asynchrone ".
 Thèse de Docteur es-Science, INP Toulouse 1988.
- 20/ **M. BELMECHRI et A. JABER encadré par D. AKHRIB et A. FERDJOUNI**
 " Etude et simulation de quatre techniques de génération d'onde PWM ".
 Projet de fin d'étude d'ingénieur, Institut d'Electronique, Université de Blida, 1991.
- 21/ **R. LE DOEUFF et al**
 " La simulation numériques des ensembles convertisseur-machine-commande ".
 Rapport GRECO 1990
- 22/ **D.Y. CHEN**
 " Power semiconductors: fast, tough and compact ".
 IEEE Spectrum september 1987.

- 23/ **P.L. HOWER**
 " Power semiconductor devices : an overview ".
 Proceedings of the IEEE, Vol 76, N°4, April 1988.
- 24/ **I. SLAMA-BELKHODJA et M. BENREJEB**
 " Sur le dimensionnement du filtre d'un ensemble convertisseur statique-moteur asynchrone ".
 10^{ème} J.T.E.A Tunis, 1984.
- 25/**K.RAJASHEKARA,V.RAJAGOPALAN,A.SEVIGNY and J. VITHAYATHIL**
 " DC link filter design considerations in three phase voltage source inverter fed induction motor drives system ".
 IEEE Trans.Ind. App. Vol 1A-23, N°4, July/August 87
- 26/ **J. LESSENNE, F. NOTELET et G. SEGUIER**
 " Introduction à l'électrotechnique approfondie ".
 pp 163-170; Techniques et documentation 1981
- 27 / **J. CHATELAIN**
 " Electrotechnique ".
 pp 225-233 ; Dunod 1987.
- 28/ **R. CHAUPRADE**
 " Commande des moteurs à courant continu ".
 pp 21-32 ; Dunod 1988.
- 29/ **A. SANDER**
 " Les variateurs de vitesse pour moteurs à courant continu ".
 RGE Tome 85, N°10, Oct 1976.
- 30/ **COLLECTIF**
 " Hacheurs et onduleurs autonomes ".
 Cours de l'ENSEEIH de Toulouse, pp B-20.6-B-20.11 ; 1980
- 31/ **R. CHAUPRADE et F. MILSANT**
 " Commande des moteurs à courant alternatif ".
 pp 127-134 ; Dunod 1988.
- 32/ **F. BRICHANT**
 " Les onduleurs autonomes ".
 pp 23-33 ; Dunod 1982.
- 33/ **F. FOREST et J. FERRIEUX**
 " Les alimentations à découpage ".
 pp 125-191 ; Masson 1987.

- 34/ **G. SEGUIER et F. LABRIQUE**
" Les convertisseurs de l'électronique de puissance ".
Vol 4 : La conversion continu-alternatif
pp 139-150 ; Technique et documentation 1987.
- 35/ **TEXAS INSTRUMENTS**
" The power Semiconductor data book for design engineers ".
Second european edition 1983.
- 36/ **M. SIBONY et J.CL. MARDON**
" Approximations et équations différentielles ".
pp V43-V47 ; Hermann 1984.
- 37/ **A. RALSTON and S.H. WILF**
" Mathematical methods for digital computers ".
pp 110-120 ; John Willey and Sons, 1965
- 38/ **R. ZURMUHL**
" Numerical analysis for engineers and physicists ".
pp 437-445 ; Springer Verlag, 1976
- 39/ **A. RALSTON and P.H. RABINOWITZ**
" A first course in numerical analysis ".
pp 208-224 ; Mc Graw Hill, 1985

ANNEXES

ANNEXE1 : DEVELOPPEMENT EN SERIE DE FOURIER

1/ CALCUL DES COEFFICIENTS DE FOURIER POUR LE SIGNAL DE PHASE

Un signal PWM ayant P impulsion se décompose en série de Fourier comme suit:

$$f(\omega t) = \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)] \quad (1)$$

avec

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t) \quad (2)$$

et

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin(n\omega t) d(\omega t) \quad (3)$$

Posons $\alpha = \omega.t$, f s'écrit alors

$$f(\alpha) = \begin{cases} +1 & \alpha_{2i} \leq \alpha \leq \alpha_{2i+1} \\ -1 & \alpha_{2i+1} \leq \alpha \leq \alpha_{2i+2} \end{cases} \quad (4)$$

L'amplitude du n^{ieme} harmonique est donnée par

$$H_n = (A_n^2 + B_n^2)^{0.5} \quad (5)$$

où

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos(n\omega t) d(\omega t)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \sum_{i=0}^{2P-1} (-1)^i \int_{\alpha_i}^{\alpha_{i+1}} \cos(n\alpha) d\alpha \quad (6)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \sum_{i=0}^{2P-1} (-1)^i \frac{1}{n} \sin(n\alpha) \Big|_{\alpha_i}^{\alpha_{i+1}} \quad (7)$$

Finalement avec $\alpha_0 = 0$ et $\alpha_{2P} = 2\pi$, on peut écrire A_n comme :

$$A_n = \frac{2}{n\pi} \sum_{i=1}^{2P} (-1)^{i+1} \text{Sin}(n\alpha_i) \quad (8)$$

Pour B_n nous avons:

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \text{Sin}(n\omega t) d(\omega t)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \sum_{i=0}^{2P-1} (-1)^i \int_{\alpha_i}^{\alpha_{i+1}} \text{Sin}(n\alpha) d\alpha \quad (9)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \sum_{i=0}^{2P-1} (-1)^i \left(\frac{-1}{n} \text{Cos}(n\alpha) \Big|_{\alpha_i}^{\alpha_{i+1}} \right) \quad (10)$$

Finalement avec $\alpha_0 = 0$ et $\alpha_{2P} = 2\pi$, B_n peut s'écrire comme :

$$B_n = \frac{2}{n\pi} \sum_{i=1}^{2P} (-1)^i \text{Cos}(n\alpha_i) \quad (11)$$

REMARQUE

Dans le cas de l'onde PWM disposant d'une double symétrie, c'est à dire une symétrie paire par rapport à l'axe $\pi/2$ et impaire par rapport à l'axe π , on obtient :

$$B_n = 0$$

$$A_n = \frac{4}{n\pi} \left[1 + 2 \sum_{i=1}^N (-1)^i \text{Cos}(n\alpha_i) \right] \quad (12)$$

2/ CALCUL DES COEFFICIENTS DE FOURIER POUR LE SIGNAL DE LIGNE

Pour ce calcul la même approche est utilisée

$$A_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \text{Cos}(n\omega t) d(\omega t)$$

$$A_n = \frac{1}{\pi} \sum_{i=0}^{4P-2} [Y_{ab}(i+1) \int_{\alpha_i}^{\alpha_{i+1}} \text{Cos}(n\alpha) d\alpha] \quad (13)$$

Après calcul, on trouve :

$$A_n = \frac{1}{n\pi} \sum_{i=0}^{4P-2} Y_{ab}(i+1) [\text{Sin}(n\alpha_{i+1}) - \text{Sin}(n\alpha_i)] \quad (14)$$

et pour B_n :

$$B_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \text{Sin}(n\omega t) d(\omega t)$$

$$B_n = \frac{1}{\pi} \sum_{i=0}^{4P-2} [Y_{ab}(i+1) \int_{\alpha_i}^{\alpha_{i+1}} \text{Sin}(n\alpha) d\alpha] \quad (15)$$

Finalement B_n peut s'écrire comme

$$B_n = \frac{1}{n\pi} \sum_{i=0}^{4P-2} Y_{ab}(i+1) [\text{Cos}(n\alpha_i) - \text{Cos}(n\alpha_{i+1})] \quad (16)$$

avec $N = P+1/4$

ANNEXE 2: PROGRAMME SIMULATION MACHINE;
PROGRAM SIMACH;

```
Uses Crt,graph;
Const
  Rs=1.12; Ls=0.17 ; Rr=0.11 ; Lr=0.015 ; M=0.048 ;
  JI=0.135 ; Tr=0.15 ; Tf=0.00182 ; E=500 ;
  (* Paramètres MACHINE *)
```

```
Type Tab = Array[1..100] of real;
```

```
Var
  Y1,Y2,Y3,Y4,Y5,K1,K2,K3,K4,K5,Z1,Z2,Z3,Z4,Z5,
  Ia,Ib,Ic,I0,Tem,w,t,DT,Tsup,V1,V2,a : real;
  Tpa,Toa,tpb,tob,tpc,toc : tab;
  P, J,Ja,jb,jc,Ca,Cb,Cc :integer;
  Machine :Text;
  I :LongInt ;
```

Procedure LOISDECOMMANDE ;
 (* Détermination de Ca, Cb et Cc *)

```
Var
  tempsa,tempsb,tempsc :real ;
  Label Fin1 ,Fin2,Fin3;
  Begin (* début de la procedure loisdecommande *)
    If t=0 Then
      Begin
        Tempsa:=0; Ja:=1;
        Tempsb:=0; Jb:=1;
        Tempsc:=0; jc:=1;
      End;
    If (t-Tpa[ja]-Tempsa)<=0
    Then Begin
      Ca:=1;
      Goto Fin1;
    End
    Else Begin
      If (t-Toa[ja]-Tpa[ja]-Tempsa)<=0
      Then Begin
        Ca:=0;
        Goto Fin1 ;
      End
      Else Begin
        Ca:=1;
        Tempsa:=Tempsa + Tpa[ja]+Toa[ja] ;
```

```

                ja:=ja+1; If ja=P+1 Then ja:=1;
                Goto Fin1 ;
            End ;
        End ;    (*fin de determination de Ca *)
Fin1: If (t-Tpb[jb]-Tempsb)<=0
    Then      Begin
                Cb:=1;
                Goto Fin2;
            End
    Else      Begin
                If (t-Tob[jb]-Tpb[j]-Tempsb)<=0
                Then      Begin
                            Cb:=0;
                            Goto Fin2 ;
                        End
                Else      Begin
                            Cb:=1;
                            Tempsb:=Tempsb + Tpb[jb]+Tob[jb] ;
                            jb:=jb+1;If jb=P+1 Then jb:=1;
                            Goto Fin2 ;
                        End ;
            End ;    (*fin de détermination de Cb *)
Fin2: If (t-Tpc[jc]-Tempsc)<=0
    Then      Begin
                Cc:=1;
                Goto Fin3;
            End
    Else      Begin
                If (t-Toc[jc]-Tpc[jc]-Tempsc)<=0
                Then      Begin
                            Cc:=0;
                            Goto Fin3 ;
                        End
                Else      Begin
                            Cc:=1;
                            Tempsc:=Tempsc + Tpc[jc]+Toc[jc] ;
                            jc:=jc+1;If jc=P+1 Then jc:=1;
                            Goto Fin3 ;
                        End ;
            End ;    (*fin de détermination de Cc *)
Fin3: V1:=E*(Ca-(Cb+Cc)/2)*Sqrt(2/3) ;
        V2:=E*((Cb-Cc)/2)*Sqrt(2) ;
    End;
        (* fin de la procédure loisdecommande *)

```

PROCEDURE FONCTION;

(* Détermination des Largeurs des impulsions *)

Const kk=0.02; fi1=2*pi/3; fi2=4*pi/3;

var

f, PP,AA,ff :Real ;

Begin (*Calcul des Tp et To *)

Write('Introduire p = ');readln(p);

Write('introduire f = ');readln(f);

AA:=1/(2*p*f); PP:=pi/p; ff:=1/f; ff:=1/f;

For j:=1 to p

Do Begin

Tpa[j]:=(AA+(kk/(4*p))*(sin(2*(j-1)*pp)+sin((2*j-1)*pp)+
0.25*(sin(6*(j-1)*pp)+sin(3*(2*j-1)*pp))));

Toa[j]:=(AA-(kk/(4*p))*(sin(2*j*pp)+sin((2*j-1)*pp)+
0.25*(sin(6*j*pp)+sin(3*(2*j-1)*pp))));

Tpb[j]:=(AA+(kk/(4*p))*(sin(2*(j-1)*pp+fi1)+sin((2*j-1)*pp+fi1)+
0.25*(sin(6*(j-1)*pp+3*fi1)+sin(3*((2*j-1)*pp+fi1))));

Tob[j]:=(AA-(kk/(4*p))*(sin(2*j*pp+fi1)+sin((2*j-1)*pp+fi1)+
0.25*(sin(6*j*pp+3*fi1)+sin(3*((2*j-1)*pp+fi1))));

Tpc[j]:=(AA+(kk/(4*p))*(sin(2*(j-1)*pp+fi1)+sin((2*j-1)*pp+fi2)+
0.25*(sin(6*(j-1)*pp+3*fi2)+sin(3*((2*j-1)*pp+fi2))));

Toc[j]:=(AA-(kk/(4*p))*(sin(2*j*pp+fi2)+sin((2*j-1)*pp+fi2)+
0.25*(sin(6*j*pp+3*fi2)+sin(3*((2*j-1)*pp+fi2))));

End;

End; (* Fin de la procédure FONCTION*)

PROCEDURE CALCUL(var Y1,Y2,Y3,Y4,Y5:real);

(* Implémentation de l'algorithme RK4 *)

Var

B,C,D,E,F :real ;

FUNCTION F1(Y1,Y2,Y3,Y4,Y5:real):real;

Begin

F1:= a*(Lr*(V1-Rs*Y1) + M*(Y5*(M*Y2+Lr*Y4)+Rr*Y3)) ;

End ;

FUNCTION F2(Y1,Y2,Y3,Y4,Y5:real):real ;

Begin

F2:= a*(Lr*(V2-Rs*Y2) - M*(Y5*(M*Y1+Lr*Y3)-Rr*Y4)) ;

End ;

FUNCTION F3(Y1,Y2,Y3,Y4,Y5:real):real;

Begin

F3:= a*(-M*(V1-Rs*Y1) - Ls*(Y5*(M*Y2+Lr*Y4)+Rr*Y3)) ;

```

End ;
FUNCTION F4(Y1,Y2,Y3,Y4,Y5:real):real ;
  Begin
    F4:= a*(-M*(V2-Rs*Y2) + Ls*(Y5*(M*Y1+Lr*Y3)-Rr*Y4)) ;
  End ;
FUNCTION F5(Y1,Y2,Y3,Y4,Y5:real):real ;
  Begin
    F5:= M*(Y2*Y3 - Y1*Y4)/JI - Y5*(Tr+Tf)/JI ;
  End ;
PROCEDURE Kcalcul(Y1,Y2,Y3,Y4,Y5 :real) ;
  Begin
    K1:=DT*F1(Y1,Y2,Y3,Y4,Y5) ;
    K2:=DT*F2(Y1,Y2,Y3,Y4,Y5) ;
    K3:=DT*F3(Y1,Y2,Y3,Y4,Y5) ;
    K4:=DT*F4(Y1,Y2,Y3,Y4,Y5) ;
    K5:=DT*F5(Y1,Y2,Y3,Y4,Y5) ;
  End ;

Begin (* DEBUT PROCEDURE CALCUL(y1,y2,y3,y4,y5) *)

B:=0; C:=0; D:=0; E:=0; F:=0 ; Z1:=0;Z2:=0;Z3:=0;Z4:=0;Z5:=0 ;
B:=Y1; C:=Y2;D:=Y3;E:=Y4;F:=Y5; K1:=0;K2:=0;K3:=0;K4:=0;K5:=0;

LoisdeCommande;
Kcalcul(y1,y2,y3,y4,y5); (* calcul des K1j *)
Y1:=B+0.5*K1; Z1:=k1;Y2:=C+0.5*K2; Z2:=k2;Y3:=D+0.5*K3; Z3:=k3;
Y4:=E+0.5*K4; Z4:=k4; Y5:=F+0.5*K5; Z5:=k5;
t:=t+0.5*DT;

LoisdeCommande;
Kcalcul(y1,y2,y3,y4,y5); (* calcul des K2j *)
Y1:=B+(K1/2); Z1:=Z1+2*K1; Y2:=C+0.5*K2; Z2:=Z2+2*K2;
Y3:=D+0.5*K3; Z3:=Z3+2*K3; Y4:=E+0.5*K4; Z4:=Z4+2*K4;
Y5:=F+0.5*K5; Z5:=Z5+2*K5;

Kcalcul(y1,y2,y3,y4,y5) ; (* calcul des K3j *)
Y1:=B+K1; Y2:=C+K2; Y3:=D+K3; Y4:=E+K4; Y5:=F+K5;
Z1:=Z1+2*K1; Z2:=Z2+2*K2; Z3:=Z3+2*K3; Z4:=Z4+2*K4; Z5:=Z5+2*K5;
t:=t+0.5*DT;

LoisdeCommande;
Kcalcul(y1,y2,y3,y4,y5) ; (* calcul des K4j *)
Z1:=Z1+K1; Z2:=Z2+K2; Z3:=Z3+K3; Z4:=Z4+K4; Z5:=Z5+K5;

```

```

      (* détermination des valeurs relatives au pas i+1 *)
Y1:=B+(Z1/6); Y2:=C+(Z2/6); Y3:=D+(Z3/6); Y4:=E+(Z4/6); Y5:=F+(Z5/6);
Ia:=Sqrt(2/3)*Y1;
Ib:=Sqrt(2/3)*(-0.5*Y1+0.5*Y2*Sqrt(3)) ;
Ic:=-Sqrt(2/3)*(0.5*Y1+0.5*Y2*Sqrt(3)) ;
I0:=Sqrt(2/3)*((Ca-0.5*(Cb+Cc))*Y1+0.5*(Cb-Cc)*Y2*Sqrt(3));
Tem:=M*(Y2*Y3-Y1*Y4);
Reset(machine); (* Ecriture dans le fichier MACHINE *)
Append(machine);
Writeln(machine,t,' ',Ia,' ',Ib,' ',I0,' ',Tem,' ',w,' ');
End;          (* fin de la procédure CALCUL *)

BEGIN          (* Programme principal *)

  ClrScr;
  Assign(Machine,'machine.dat'); Rewrite(machine);
  Fonction;
  Duree;
  Write('Introduire la duree de simulation en (S)');Readln(Tsup);
  a:=1/(Ls*Lr-Sqr(M)) ;
  Y1:=0 ; Y2:=0 ; Y3:=0 ; Y4:=0 ; Y5:=0 ;
  Write('quel est le PAS D"INTEGRATION en (S) , DT = ');Readln(DT);
  t:=0 ;
  While t <= Tsup
  Do Begin
    Calcul(Y1,Y2,Y3,Y4,Y5);
  End;
End.          (* Fin du programme principal *)

```

ANNEXE 3 : PROGRAMME ASSEMBLEUR

* Etiquette	* Instruction	* Adresse	* Code Op	* Commentaire
*	* MVI A , 8B	* 0000	* 3E	* Initialisation
*	*	* 0001	* 8b	*
*	* OUT 83	* 0002	* d3	*
*	*	* 0003	* 83	*
*	* MVI A , BC	* 0004	* 3E	*
*	*	* 0005	* bC	*
*	* OUT PORT A	* 0006	* d3	*
*	*	* 0007	* 80	*
*	* MVI A , 01	* 0008	* 3E	*
*	*	* 0009	* 01	*
*	* STA INDFREQ	* 000A	* 32	*
*	*	* 000B	* 70	*
*	*	* 000C	* 40	*
*	* XRA A	* 000D	* AF	*
*	* STA BACK	* 000E	* 32	*
*	*	* 000F	* 75	*
*	*	* 0010	* 40	*
*	* MVI A , 30	* 0011	* 3E	*
*	*	* 0012	* 30	*
*	* OUT A3	* 0013	* d3	*
*	*	* 0014	* A3	*
*	* MVI A , 70	* 0015	* 3E	*
*	*	* 0016	* 70	*
*	* OUT A3	* 0017	* d3	*
*	*	* 0018	* A3	*
*	* MVI A , b0	* 0019	* 3E	*
*	*	* 001A	* b0	*
*	* OUT A3	* 001B	* d3	*
*	*	* 001C	* A3	*
*	* LXI SP ,45FF	* 001D	* 31	*
*	*	* 001E	* FF	*
*	*	* 001F	* 45	*
*	* JMP 0040	* 0020	* C3	*
*	*	* 0021	* 40	*
*	*	* 0022	* 00	*
*	*	*	*	*
*	* JMP SP5	* 002C	* C3	* saut au s/prg
*	*	* 002D	* AA	* RST 5.5
*	*	* 002E	* 02	*
*	*	*	*	*
*	* JMP SP6	* 0034	* C3	* saut au s/prg
*	*	* 0035	* 55	* RST 6.5
*	*	* 0036	* 02	*
*	*	*	*	*
*	* JMP SP7	* 003C	* C3	* saut au s/prg
*	*	* 003D	* 00	* RST 7.5
*	*	* 003E	* 02	*
*	*	*	*	*

```

*      * XRA      A      *      0040  *      AF      *
*      * STA      RAMFREQ1 *      0041  *      32      *
*      *          *      *      0042  *      80      *
*      *          *      *      0043  *      40      *
*      * STA      RAMFREQ2 *      0044  *      32      *
*      *          *      *      0045  *      81      *
*      *          *      *      0046  *      40      *
*      * STA      IND50    *      0047  *      32      *
*      *          *      *      0048  *      70      *
*      *          *      *      0049  *      40      *
*      * MVI      A , 3C   *      004A  *      3E      *
*      *          *      *      004B  *      3C      *
*      * OUT      PORT A   *      004C  *      d3      *
*      *          *      *      004D  *      80      *
*      * LXI      B , 5000 *      004E  *      01      *
*      *          *      *      004F  *      00      *
*      *          *      *      0050  *      50      *
* ENTREE : * IN      PORT B   *      0051  *      db      * Lecture de la
*          *          *      *      0052  *      81      * frequence
*          * CMP      B      *      0053  *      b8      *
*          * JNC      OVER   *      0054  *      d2      *
*          *          *      *      0055  *      9F      *
*          *          *      *      0056  *      00      *
* INTER  : * CMP      C      *      0057  *      b9      *
*          * JZ       NUL    *      0058  *      CA      *
*          *          *      *      0059  *      7F      *
*          *          *      *      005A  *      00      *
*          * STA      RAMFREQ1 *      005B  *      32      *
*          *          *      *      005C  *      80      *
*          *          *      *      005D  *      40      *
*          * MOV      L , A   *      005E  *      6F      *
*          * MVI      H , 06  *      005F  *      26      *
*          *          *      *      0060  *      06      *
*          * MOV      M , B   *      0061  *      46      *
*          * IN      PORT C   *      0062  *      db      *
*          *          *      *      0063  *      82      *
*          * ANI      01      *      0064  *      E6      *
*          *          *      *      0065  *      01      *
*          * CPI      00      *      0066  *      FE      *
*          *          *      *      0067  *      00      *
*          * JZ       NFRAC   *      0068  *      CA      *
*          *          *      *      0069  *      74      *
*          *          *      *      006A  *      00      *
*          * STA      RAMFREQ2 *      006B  *      32      *
*          *          *      *      006C  *      81      *
*          *          *      *      006D  *      40      *
*          * MOV      A , B   *      006E  *      78      *
*          * ADD      A      *      006F  *      87      *
*          * ADD      A      *      0070  *      87      *
*          * JMP      ADRESS  *      0071  *      C3      *
*          *          *      *      0072  *      Ad      *
*          *          *      *      0073  *      00      *

```

```

* NFRAC      : * STA      RAMFREQ1 * 0074 * 32 *
*            *            * 0075 * 80 *
*            *            * 0076 * 40 *
*            * MOV      A , B   * 0077 * 78 *
*            * ADD      A       * 0078 * 87 *
*            * ADD      A       * 0079 * 87 *
*            * SUI      02      * 007A * d6 *
*            *            * 007B * 02 *
*            * JMP      ADRESS  * 007C * C3 *
*            *            * 007D * Ad *
*            *            * 007E * 00 *
* NUL         : * XRA      A       * 007F * AF *
*            * STA      RAMFREQ1 * 0080 * 32 *
*            *            * 0081 * 80 *
*            *            * 0082 * 40 *
*            * IN       PORT C   * 0083 * db *
*            *            * 0084 * 82 *
*            * ANI      01      * 0085 * E6 *
*            *            * 0086 * 01 *
*            * CPI      00      * 0087 * FE *
*            *            * 0088 * 00 *
*            * JZ       ZERO     * 0089 * CA *
*            *            * 008A * 93 *
*            *            * 008B * 00 *
*            * STA      RAMFREQ2 * 008C * 32 *
*            *            * 008D * 81 *
*            *            * 008E * 40 *
*            * XRA      A       * 008F * AF *
*            * JMP      ADRESS  * 0090 * C3 *
*            *            * 0091 * Ad *
*            *            * 0092 * 00 *
* ZERO        : * DI       * 0093 * F3 *
*            * XRA      A       * 0094 * AF *
*            * STA      RAMFREQ2 * 0095 * 32 *
*            *            * 0096 * 81 *
*            *            * 0097 * 40 *
*            * MVI      A , 3C   * 0098 * 3E *
*            *            * 0099 * 3C *
*            * OUT      PORT A   * 009A * d3 *
*            *            * 009B * 80 *
*            * JMP      ENTREE   * 009C * C3 *
*            *            * 009D * 51 *
*            *            * 009E * 00 *
* OVER        : * XRA      A       * 009F * AF *
*            * STA      RAMFREQ2 * 00A0 * 32 *
*            *            * 00A1 * 81 *
*            *            * 00A2 * 40 *
*            * MVI      A , 01   * 00A3 * 3E *
*            *            * 00A4 * 01 *
*            * STA      IND50    * 00A5 * 32 *
*            *            * 00A6 * 7A *
*            *            * 00A7 * 40 *

```

```

*      * MVI      A , C6      *      00A8      *      3E      *
*      *          *          *      00A9      *      C6      *
*      * STA      RAMFREQ1    *      00AA      *      32      *
*      *          *          *      00AB      *      80      *
*      *          *          *      00AC      *      40      *
*      *          *          *          *          *          *
*      *          *          *          *          *          *
*      *          *          *          *          *          *
* ADDRESS : * MOV      C , A      *      00AD      *      4F      *
*          * MVI      B , 05    *      00AE      *      06      *
*          *          *          *      00AF      *      05      *
*          * LXI      H,ADROM1  *      00B0      *      21      *
*          *          *          *      00B1      *      00      *
*          *          *          *      00B2      *      04      *
*          * LDA      INDFREQ    *      00B3      *      3A      *
*          *          *          *      00B4      *      70      *
*          *          *          *      00B5      *      40      *
*          * CPI      00         *      00B6      *      FE      *
*          *          *          *      00B7      *      00      *
*          * JZ      FOREGROUND *      00B8      *      CA      *
*          *          *          *      00B9      *      C1      *
*          *          *          *      00BA      *      00      *
*          * LXI      H,ADRAM1  *      00BB      *      11      *
*          *          *          *      00BC      *      00      *
*          *          *          *      00BD      *      40      *
*          * JMP      SUITE     *      00BE      *      C3      *
*          *          *          *      00BF      *      C4      *
*          *          *          *      00C0      *      00      *
* FOREGROUND: * LXI      D,ADRAM2    *      00C1      *      11      *
*          *          *          *      00C2      *      00      *
*          *          *          *      00C3      *      41      *
* SUITE      : * LDAX     B          *      00C4      *      0A      *
*          * ADD      M          *      00C5      *      86      *
*          * STAX    D          *      00C6      *      12      *
*          * INX     B          *      00C7      *      03      *
*          * INX     D          *      00C8      *      13      *
*          * INX     H          *      00C9      *      23      *
*          * LDAX    B          *      00CA      *      0A      *
*          * ADC     M          *      00CB      *      8E      *
*          * STAX    D          *      00CC      *      12      *
*          * DCX     B          *      00CD      *      0B      *
*          * INX     D          *      00CE      *      13      *
*          * INX     H          *      00CF      *      23      *
*          * LDAX    B          *      00D0      *      0A      *
*          * SUB     M          *      00D1      *      96      *
*          * STAX    D          *      00D2      *      12      *
*          * INX     B          *      00D3      *      03      *
*          * INX     D          *      00D4      *      13      *
*          * INX     H          *      00D5      *      23      *
*          * LDAX    B          *      00D6      *      0A      *
*          * SBB     M          *      00D7      *      9E      *
*          * STAX    D          *      00D8      *      12      *

```

```

* Fin de la
* lecture de
* la frequence

```

*	DCX	B	*	00D9	*	0B	*
*	INX	D	*	00DA	*	13	*
*	INX	H	*	00DB	*	23	*
*	MVI	A , 38	*	00DC	*	3E	*
*			*	00DD	*	38	*
*	CMP	E	*	00DE	*	Bb	*
*	JNZ	SUITE	*	00DF	*	C2	*
*			*	00E0	*	C4	*
*			*	00E1	*	00	*
*	LDA	INDFREQ	*	00E2	*	3A	*
*			*	00E3	*	70	*
*			*	00E4	*	40	*
*	CPI	00	*	00E5	*	FE	*
*			*	00E6	*	00	*
*	JZ	FORTAB4	*	00E7	*	CA	*
*			*	00E8	*	09	*
*			*	00E9	*	01	*
*	LXI	H , 4001	*	00EA	*	21	*
*			*	00EB	*	01	*
*			*	00EC	*	40	*
*	LXI	B , 4025	*	00ED	*	01	*
*			*	00EE	*	25	*
*			*	00EF	*	40	*
*	LXI	D , 4013	*	00F0	*	11	*
*			*	00F1	*	13	*
*			*	00F2	*	40	*
*	SHLD	ADR1	*	00F3	*	22	*
*			*	00F4	*	50	*
*			*	00F5	*	40	*
*	XCHG		*	00F6	*	EB	*
*	SHLD	ADR2	*	00F7	*	22	*
*			*	00F8	*	55	*
*			*	00F9	*	40	*
*	XCHG		*	00FA	*	22	*
*	PUSH	H	*	00FB	*	E5	*
*	MOV	H , B	*	00FC	*	60	*
*	MOV	L , C	*	00FD	*	69	*
*	SHLD	ADR3	*	00FE	*	22	*
*			*	00FF	*	59	*
*			*	0100	*	40	*
*	POP	H	*	0101	*	E1	*
*	DCX	B	*	0102	*	0B	*
*	DCX	D	*	0103	*	1B	*
*	DCX	H	*	0104	*	2B	*
*	DI		*	0105	*	F3	*
*	JMP	GENERATION	*	0106	*	C3	*
*			*	0107	*	25	*
*			*	0108	*	01	*
*	FORTAB4 :	LXI H , 4101	*	0109	*	21	*
*			*	010A	*	01	*
*			*	010B	*	41	*
*	LXI	B , 4125	*	010C	*	01	*

*	*	*	0140	*	40	*
*	*	* CMA	* 0141	*	2F	*
*	*	* ANI 01	* 0142	*	E6	*
*	*	*	* 0143	*	01	*
*	*	* STA BACK	* 0144	*	32	*
*	*	*	* 0145	*	75	*
*	*	*	* 0146	*	40	*
*	*	* MVI A , 7C	* 0147	*	3E	*
*	*	*	* 0148	*	7C	*
*	*	* OUT PORTA	* 0149	*	D3	*
*	*	*	* 014A	*	80	*
*	*	* MVI A , 08	* 014B	*	3E	*
*	*	*	* 014C	*	08	*
*	*	* SIM	* 014D	*	30	*
*	*	* EI	* 014E	*	FB	*
*	STOP :	* HLT	* 014F	*	76	*
*	*	* LDA RAMFREQ1	* 0150	*	3A	*
*	*	*	* 0151	*	80	*
*	*	*	* 0152	*	40	*
*	*	* MOV B , M	* 0153	*	47	*
*	*	* LDA RAMFREQ2	* 0154	*	3A	*
*	*	*	* 0155	*	81	*
*	*	*	* 0156	*	40	*
*	*	* MOV C , A	* 0157	*	4F	*
*	*	* IN PORTB	* 0158	*	DB	*
*	*	*	* 0159	*	81	*
*	*	* CMP B	* 015A	*	B8	*
*	*	* JNZ TEST	* 015B	*	C2	*
*	*	*	* 015C	*	68	*
*	*	*	* 015D	*	01	*
*	*	* IN PORTC	* 015E	*	DB	*
*	*	*	* 015F	*	82	*
*	*	* ANI 01	* 0160	*	E6	*
*	*	*	* 0161	*	01	*
*	*	* CMP C	* 0162	*	B9	*
*	*	* JZ STOP	* 0163	*	CA	*
*	*	*	* 0164	*	4F	*
*	*	*	* 0165	*	01	*
*	*	* IN PORTB	* 0166	*	DB	*
*	*	*	* 0167	*	81	*
*	TEST :	* CPI 50	* 0168	*	FE	*
*	*	*	* 0169	*	50	*
*	*	* JC NEW	* 016A	*	DA	*
*	*	*	* 016B	*	81	*
*	*	*	* 016C	*	01	*
*	*	* LDA IND50	* 016D	*	3A	*
*	*	*	* 016E	*	7A	*
*	*	*	* 016F	*	40	*
*	*	* CPI 01	* 0170	*	FE	*
*	*	*	* 0171	*	01	*
*	*	* JZ STOP	* 0172	*	CA	*
*	*	*	* 0173	*	4F	*

```

*          *          *          0174 *          01          *
*          * LDA      INDFREQ *          0175 *          3A          *
*          *          *          0176 *          70          *
*          *          *          0177 *          01          *
*          * CMA          *          0178 *          2F          *
*          * ANI      01    *          0179 *          E6          *
*          *          *          017A *          01          *
*          * STA      INDFREQ *          017B *          32          *
*          *          *          017C *          70          *
*          *          *          017D *          40          *
*          * JMP      OVER   *          017E *          C3          *
*          *          *          017F *          9F          *
*          *          *          0180 *          00          *
* NEW      : * LDA      INDFREQ *          0181 *          3A          *
*          *          *          0182 *          70          *
*          *          *          0183 *          40          *
*          * CMA          *          0184 *          2F          *
*          * ANI      01    *          0185 *          E6          *
*          *          *          0186 *          01          *
*          * STA      INDFREQ *          0187 *          32          *
*          *          *          0188 *          70          *
*          *          *          0189 *          40          *
*          * MVI      C , 00  *          018A *          0E          *
*          *          *          018B *          00          *
*          * IN       PORTB   *          018C *          DB          *
*          *          *          018D *          81          *
*          * JMP      INTER   *          018E *          C3          *
*          *          *          018F *          57          *
*          *          *          0190 *          00          *
*          *          *          *          *          *
*          *          *          *          *          *
*          *          *          *          *          *
*          *          *          *          *          *
*          *          *          *          *          *

```

SOUS-PROGRAMME D'INTERRUPTION RST 7.5

* Etiquette	* Instruction	* Adresse	* Code Op	* Commentaire
*		*	*	*
*	* PUSH PSW	* 0200	* F5	*
*	* MVI A , 6C	* 0201	* 3E	*
*	*	* 0202	* 6C	*
*	* OUT PORTA	* 0203	* D3	*
*	*	* 0204	* 80	*
*	* PUSH H	* 0205	* E5	*
*	* LDA BACK	* 0206	* 3A	*
*	*	* 0207	* 75	*
*	*	* 0208	* 40	*
*	* CPI 00	* 0209	* FE	*
*	*	* 020A	* 00	*
*	* JZ FORETABA	* 020B	* CA	*
*	*	* 020C	* 2D	*
*	*	* 020D	* 02	*
*	* LHLD ADR1	* 020E	* 2A	*
*	*	* 020F	* 50	*
*	*	* 0210	* 40	*
*	* INX H	* 0211	* 23	*
*	* MVI A , 36	* 0212	* 3E	*
*	*	* 0213	* 36	*
*	* CMP L	* 0214	* BD	*
*	* JNZ PHASEA	* 0215	* C2	*
*	*	* 0216	* 1B	*
*	*	* 0217	* 02	*
*	* LXI H,ADRAM1	* 0218	* 21	*
*	*	* 0219	* 00	*
*	*	* 021A	* 40	*
* PHASEA :	* MOV A , M	* 021B	* 7E	*
*	* OUT COMPTO	* 021C	* D3	*
*	*	* 021D	* A0	*
*	* INX H	* 021E	* 23	*
*	* MOV A , M	* 021F	* 7E	*
*	* OUT COMPTO	* 0220	* D3	*
*	*	* 0221	* A0	*
*	* SHLD ADR1	* 0222	* 22	*
*	*	* 0223	* 50	*
*	*	* 0224	* 40	*
*	* MVI A , 7C	* 0225	* 3E	*
*	*	* 0226	* 7C	*
*	* OUT PORTA	* 0227	* D3	*
*	*	* 0228	* 80	*
*	* POP H	* 0229	* E1	*
*	* POP PSW	* 022A	* F1	*
*	* EI	* 022B	* FB	*
*	* RET	* 022C	* C9	*
* FORETABA:	* LHLD ADR21	* 022D	* 2A	*
*	*	* 022E	* 60	*
*	*	* 022F	* 40	*

```

*      * INX      H      *      0230 *      23      *
*      * MVI      A , 36 *      0231 *      3E      *
*      *          *      *      0232 *      36      *
*      * CMP      L      *      0233 *      BD      *
*      * JNZ      PHASEA2 *      0234 *      C2      *
*      *          *      *      0235 *      3A      *
*      *          *      *      0236 *      02      *
*      * LXI      H,ADRAM2 *      0237 *      21      *
*      *          *      *      0238 *      00      *
*      *          *      *      0239 *      41      *
* PHASEA2 : * MOV      A , M    *      023A *      7E      *
*          * OUT      COMPT0 *      023B *      D3      *
*          *          *      *      023C *      A0      *
*          * INX      H      *      023D *      23      *
*          * MOV      A , M    *      023E *      7E      *
*          * OUT      COMPT0 *      023F *      D3      *
*          *          *      *      0240 *      A0      *
*          * SHLD     ADR21    *      0241 *      22      *
*          *          *      *      0242 *      60      *
*          *          *      *      0243 *      40      *
*          * MVI      A , 7C    *      0244 *      3E      *
*          *          *      *      0245 *      7C      *
*          * OUT      PORTA    *      0246 *      D3      *
*          *          *      *      0247 *      80      *
*          * POP      H      *      0248 *      E1      *
*          * POP      PSW     *      0249 *      F1      *
*          * EI          *      *      024A *      FB      *
*          * RET      *      *      024B *      C9      *

```


SOUS-PROGRAMME D'INTERRUPTION RST 5.5

* Etiquette *	* Instruction *	* Adresse *	* Code Op *	* Commentaire *
*	PUSH PSW	02AA	F5	*
*	MVI A , 78	02AB	3E	*
*		02AC	78	*
*	OUT PORTA	02AD	D3	*
*		02AE	80	*
*	PUSH H	02AF	E5	*
*	LDA BACK	02B0	3A	*
*		02B1	75	*
*		02B2	40	*
*	CPI 00	02B3	FE	*
*		02B4	00	*
*	JZ FORETABC	02B5	CA	*
*		02B6	D7	*
*		02B7	02	*
*	LHLD ADR3	02B8	2A	*
*		02B9	59	*
*		02BA	40	*
*	INX H	02BB	23	*
*	MVI A , 36	02BC	3E	*
*		02BD	36	*
*	CMP L	02BE	BD	*
*	JNZ PHASEC	02BF	C2	*
*		02C0	C5	*
*		02C1	02	*
*	LXI H,ADRAM1	02C2	21	*
*		02C3	00	*
*		02C4	40	*
PHASEC :	MOV A , M	02C5	7E	*
*	OUT COMPT2	02C6	D3	*
*		02C7	A2	*
*	INX H	02C8	23	*
*	MOV A , M	02C9	7E	*
*	OUT COMPT2	02CA	D3	*
*		02CB	A2	*
*	SHLD ADR3	02CC	22	*
*		02CD	59	*
*		02CE	40	*
*	MVI A , 7C	02CF	3E	*
*		02D0	7C	*
*	OUT PORTA	02D1	D3	*
*		02D2	80	*
*	POP H	02D3	E1	*
*	POP PSW	02D4	F1	*
*	EI	02D5	FB	*
*	RET	02D6	C9	*
FORETABC:	LHLD ADR23	02D7	2A	*
*		02D8	69	*
*		02D9	40	*

```

*      * INX      H      *      02DA  *      23      *
*      * MVI     A , 36  *      02DB  *      3E      *
*      *      *      *      02DC  *      36      *
*      * CMP     L      *      02DD  *      BD      *
*      * JNZ     PHASEC2 *      02DE  *      C2      *
*      *      *      *      02DF  *      E4      *
*      *      *      *      02E0  *      02      *
*      * LXI     H,ADRAM2 *      02E1  *      21      *
*      *      *      *      02E2  *      00      *
*      *      *      *      02E3  *      41      *
*      *      *      *      02E4  *      7E      *
* PHASEC2 : * MOV     A , M      *      02E5  *      D3      *
*      * OUT     COMPT2   *      02E6  *      A2      *
*      *      *      *      02E7  *      23      *
*      * INX     H      *      02E8  *      7E      *
*      * MOV     A , M      *      02E9  *      D3      *
*      * OUT     COMPT1   *      02EA  *      A2      *
*      *      *      *      02EB  *      22      *
*      * SHLD    ADR22    *      02EC  *      69      *
*      *      *      *      02ED  *      40      *
*      *      *      *      02EE  *      3E      *
*      * MVI     A , 7C   *      02EF  *      7C      *
*      *      *      *      02F0  *      D3      *
*      * OUT     PORTA    *      02F1  *      80      *
*      *      *      *      02F2  *      E1      *
*      * POP     H      *      02F3  *      F1      *
*      * POP     PSW     *      02F4  *      FB      *
*      * EI      *      *      02F5  *      C9      *
*      * RET     *      *

```

ANNEXE 4 : Caractéristiques des moteurs utilisés

Moteur utilisé en simulation

Résistance d'une phase statorique	: $R_s = 1.12 \Omega$
Résistance d'une phase rotorique	: $R_r = 0.11 \Omega$
Inductance cyclique statorique	: $L_s = 0.17 \text{ H}$
Inductance cyclique rotorique	: $L_r = 0.015 \text{ H}$
Inductance mutuelle cyclique	: $m = 0.048 \text{ H}$
Inertie des masses tournantes	: $J = 0.135 \text{ Nm/rds}^{-2}$
nombre de paire de pôles	: $q = 2$
Frottements	: $T_f = 0.00182 \text{ Nm/rd s}^{-1}$
Fréquence	: $f = 50 \text{ Hz}$

Moteur utilisé lors des tests pratiques

Fréquence	: 50 Hz
Vitesse	: 1400 tours / mn
nombre de paire de pôles	: $q = 2$
rendement	: 76 %
Puissance nominale	: 1.5 kW
montage étoile	: 6.2 A / 220 V
montage triangle	: 3.6 A / 380 V

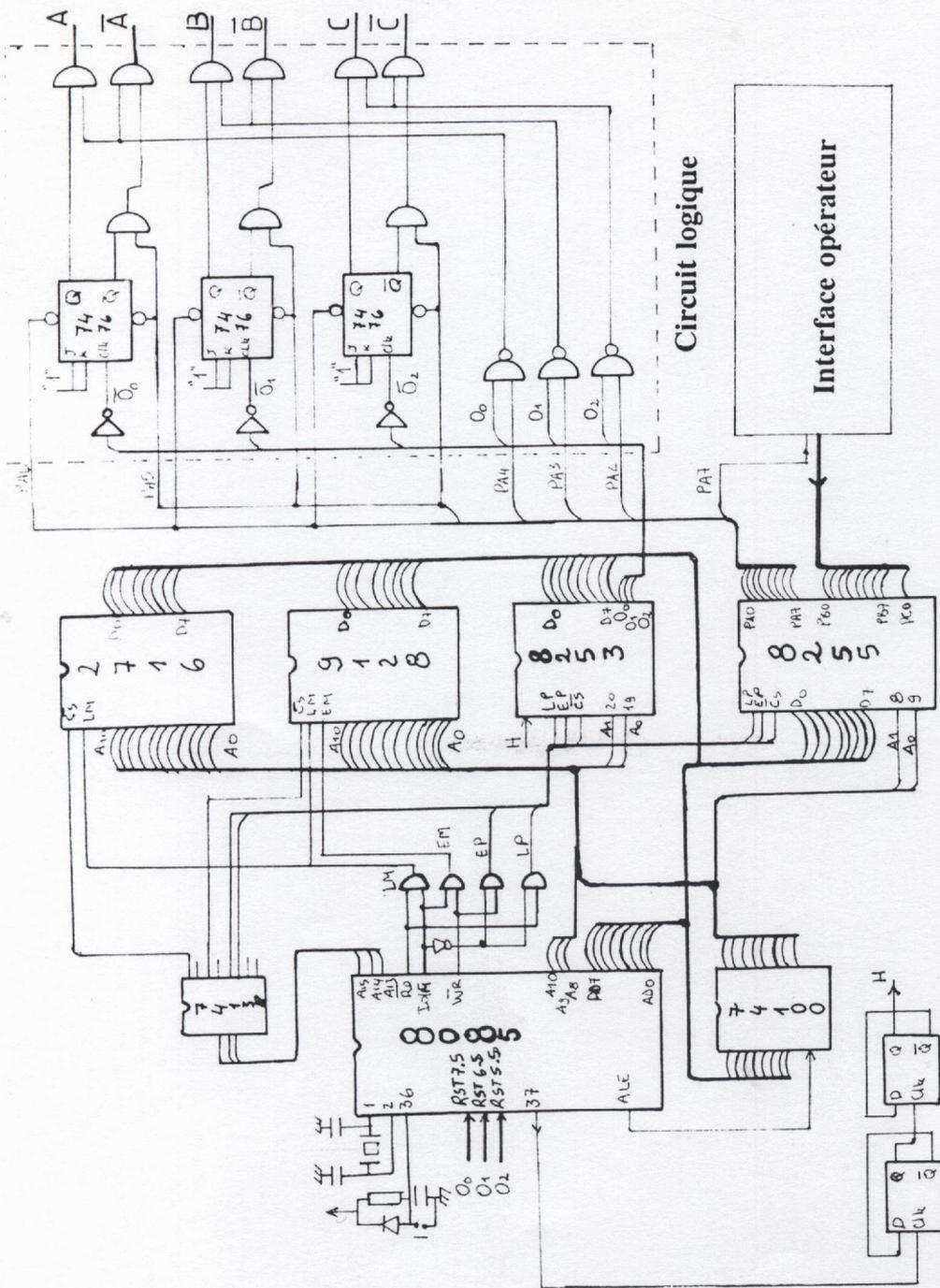


Schéma électrique de la carte à microprocesseur

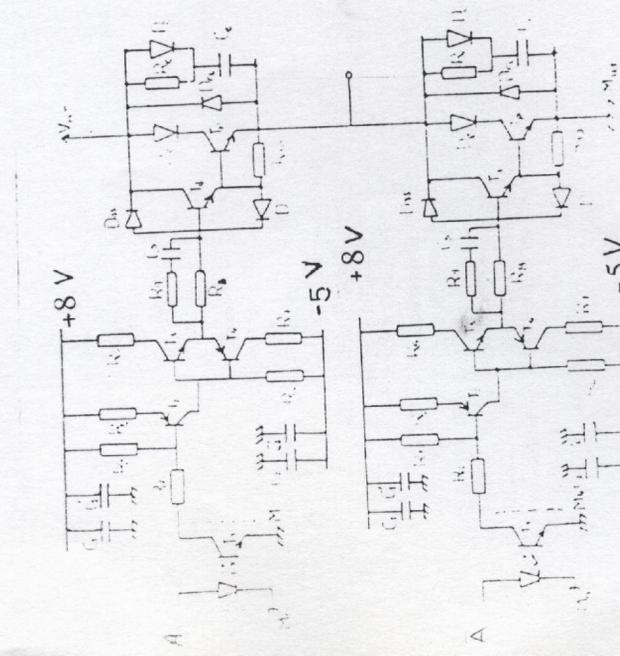
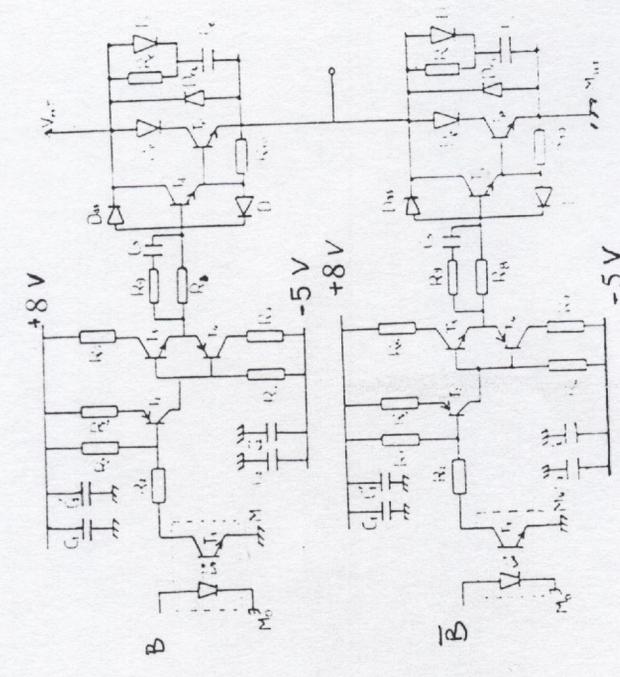
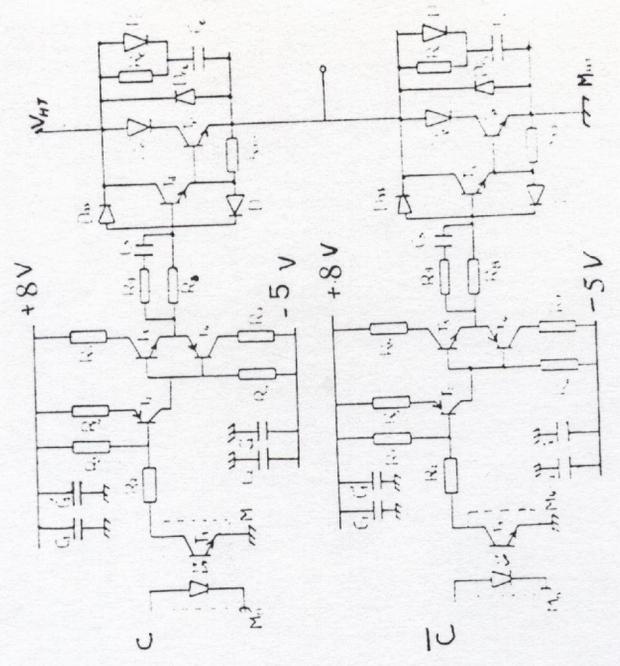


Schéma électrique de l'onduleur