



M E M O I R E

Présenté à



l'Université Hadj Lakhdar Batna

En vue de l'obtention du diplôme de

MAGISTER EN ELECTROTECHNIQUE

Option: Machines électriques.

Présenté par

MADDOUI Loffi

Ingénieur d'état en électrotechnique



Etude et réalisation d'un dispositif péristaltique pour application médicale.



Mémoire soutenu le :/...../2010 devant le jury :

Président
Rapporteur
Co-Rapporteur
Examineur
Examineur

Pr Boukheteche S.
Dr Kadid F.Z.
Pr Abdessemed R.
Dr Benakcha A.
Dr S.Taibi

Université de Batna
Université de Batna
Université de Batna
Université de Biskra
Université de Batna

Liste des symboles et des abréviations.

-Abréviations :

-MHD	Magnétohydrodynamique
-EHD	Electrohydrodynamique
-MVF	Méthode des volumes finis.
-MEF	Méthode des éléments finis.
-MDF	Méthode des différences finis.
-MIF	Méthode des intégrales de frontières.

-Symboles :

F	Force magnétique	[N]
W	Energie	[J]
\overline{W}	Coénergie	[J]
L	Inductance	[H]
P	Pression	[bar]
f	Fréquence	[Hz]
U	Tension électrique	[V]
A	Potentiel vecteur magnétique	[T.m]
D	Induction électrique	[C/m ²]
E	Champ électrique	[V/m]
B	Induction magnétique	[T]
H	Champ magnétique	[A/m]
J_{ex}	Densité de courant	[A/m ²]
I	Courant	[A]
R₀	Résistance électrique	[Ω]
ϵ	Permittivité électrique	[F/m]
μ	Perméabilité magnétique	[H/m]
μ_0	Perméabilité magnétique du vide	[H/m]

- Introduction générale.	1
- Problématique	1
- Objectif.	2
- Présentation du mémoire	2

CHAPITRE I

Etat de l'art des pompes

I.1 Pompe à piston.	5
I.2 Pompe à membrane.	5
I.3 Pompe à vis.	6
I.4 Pompe centrifuge.	7
I.5 Pompe MHD.	8
I.5.1 Définition de la MHD.	8
I.5.2 Domaine d'application de la MHD.	9
I.5.3 Principe de la pompe MHD.	10
I.5.4 Avantages et inconvénients des pompes MHD.	11
I.6 Pompe EHD.	12
I.7 Pompe péristaltique.	12
I.8. La miniaturisation des éléments fluidiques.	13
I.8.1. Les micro-TAS.	13
I.8.2. Les micro-pompes.	14
I.9. Assistance ventriculaires.	14
I.9.1 Pompes cardiaques.	15
I.10. Conclusion.	16

CHAPITRE II

Pompes péristaltiques

II.1. Pompe péristaltique cylindrique.	18
II.2. Pompe péristaltique linéaire.	19

II.3.Types d'actionneurs dans les pompes péristaltiques linéaires.	20
II.4. Actionneur à base de fluide magnétique.	20
II.5.Nature du fluide magnétique.	21
II.6. Actionneurs à base de polymères électroactifs (Dielectric Elastomers).	22
II.7. Actionneurs à base d'électroaimants étrangleurs.	23
II.8. Actionneurs à base d'éléments piézoélectriques.	23
II.9. Tubulure des pompes péristaltique.	24
II.10.Avantages et inconvénients des pompes péristaltiques.	24
II.11.Normes et application des électroaimants.	25
II.11.1.Électroaimants de commande simple.	25
II.11.2.Électroaimant de commande multiple.	27
II.11.3.Électroaimant de sécurité.	27
II.11.4.Electroaimants porteurs.	28
II.12.Caractéristiques mécaniques.	28
II.12.1.La force.	29
II.12.2.La course .	29
II.13.Caractéristiques force magnétique-course.	29
II.14.Caractéristiques dynamiques.	30
II.14.1.Temps de repense d'un électroaimant.	31
II.14.2.Constante de temps à l'appel.	32
II.14.3.Fréquence de manœuvre.	33
II.15.Suralimentation des électroaimants .	33
II.16.Conclusion.	33

CHAPITRE III

Formulation mathématique et modélisation numérique

III.1.Equations électromagnétiques de Maxwell.	36
III.2. Hypothèses simplificatrices.	38
III.2.1.Les courants de déplacements.	38
III.2.2.Les courants induits.	38
III.3.Formulation utilisant le potentiel vecteur magnétique.	38
III.4. Techniques de discrétisations.	39

III.5. Méthodes de discrétisations.	39
III.5.1.Méthodes des éléments finis.	40
III.5.2.Méthodes des différences finis.	41
III.5.3.Méthodes des intégrales de frontières.	41
III.5.4.Méthode des volumes finis.	41
III.5.5.Etapes dans l’application de la méthode des volumes finis.	41
III.5.6. Exemple illustratif unidimensionnel de la méthode des volumes finis.	42
III.6. Conditions aux limites.	44
III.7. Application de la méthode des volumes finis à la pompe péristaltique.	44
III.8. Représentations et commentaires des résultats de simulation.	46
III.9. Calcul des forces magnétiques.	51
III.10. Méthode de la variation de la coénergie et de l’énergie magnétiques.	52
III.11. Energie dans l’électroaimant.	53
III.12. Conclusion.	56

CHAPITRE IV

Réalisation et expérimentation de la pompe péristaltique linéaire

IV.1.Discription de la pompe péristaltique linéaire.	58
IV.2.Circuit électrique de commande.	59
IV.3.Principe de fonctionnement.	59
IV.4.Estimation théorique du débit et de la pression.	63
IV.4.1.Estimation théorique du débit.	63
IV.4.2.Estimation théorique de la pression.	64
IV.5.Mesures expérimentales du débit.	65
IV.6. Interprétations et discussion des résultats.	66
IV.7.Propositions suggérées.	66
IV.7.1. Changement dans les séquences de pompage.	66
IV.7.2. Changement dans la structure de la pompe.	67
IV.7.3. Autres propositions.	69
IV.8.Conclusion.	69

-Conclusion générale.	70
-Annexe.	73
-Références bibliographique.	82

Remerciements

Je tiens a remercier mon encadreur Dr F.Z.KADID, Maître de conférence à l'université de Batna ; d'avoir accepter de diriger ce travail et de me faire bénéficier de son savoir et expérience ;

Mes remerciements vont également à monsieur R.ABDESSAMED ; Professeur à l'université de Batna ; Co-Direteur de thèse pour ses conseils pratiques et ses encouragements.

Je remercie monsieur S.BOUKHETECHE ; Professeur à l'université de Batna, qui ma fait l'honneur de présider mon jury de thèse et d'évaluer mon travail ;

Je remercie monsieur A.BENAKCHA ; Docteur et Maître de conférence à l'université de Biskra, pour avoir participer à ce jury ;

Je remercie monsieur S.TAIBI ; Docteur et Maître de conférence à l'université de Batna, pour avoir participer à ce jury ainsi que pour sa contribution à ma formation.

Je remercie mon ami le Dr H.MOKRANE ; Chirurgien à la clinique Med Sadek de Batna ; pour ses conseils et orientations d'ordre médical ;

Je remercie mon ami Mr M.RAHMANI ; Ingénieur à l'entreprise SONELGAZ ; pour ses conseils pratique et sont support technique.

Je remercie mon ami Mr A.OUBIDALLAH ; Technicien en fabrication mécanique ; pour sa contribution à la réalisation du prototype de la pompe et pour ses conseils pratique de valeur.

Mes remerciements vont spécialement à tous les membres de ma petite famille pour leurs patience et encouragements.

Introduction générale

Le transport des fluides par pompage est devenu une opération banale et courante, tout le monde reconnaît le sifflement d'une motopompe centrifuge durant le remplissage d'un réservoir domestique. Ce type de motopompe est généralement composé d'un moteur électrique couplé à une pompe à ailettes. Sous l'effet de rotation, celles-ci provoquent le refoulement de l'eau. Les motopompes sont caractérisées par leurs puissances qui se traduisent en un débit et une pression. Dans l'industrie, on est souvent appelé à pomper des fluides agressifs (*acides, bases, carburants, vapeurs...*) ou des fluides propres et stériles (*lait, jus, médicaments,...*) ; dans ces cas, la pompe conventionnelle n'est plus valable. Dans cette optique, les techniciens ont développé plusieurs types de pompes telles que les pompes à vis et les pompes à pistons dédiées spécialement à la haute pression, les pompes centrifuges en inox et les pompes à membranes pour les secteurs agroalimentaires et pharmaceutiques. Dans le secteur médical la rigueur est de taille dans le cas des transferts de fluides biologiques tel que le *sang* dans les générateurs de dialyses (*reins artificiels*) ou dans les dispositifs de transfusions où plusieurs contraintes sont à considérer.

-Problématique.

Si on prend l'exemple du sang humain, on imagine clairement la gravité de la situation si l'intégrité et la stérilité du sang sont mises en doute ainsi que l'impacte sur la santé publique...

Biologiquement parlant ; le sang est un tissu vivant (*globules, hémoglobine, plaquettes...*), donc toute interaction entre le sang et les organes de pompage est à éviter, par conséquent tout doit être chimiquement inerte. Les organes de pompage doivent être à usages unique (*jetables*) et changeables sans grande difficulté afin d'éliminer toute voie de contaminations croisées entre sangs. Comme le sang contient de l'hémoglobine qui est composé, notamment, de molécules à base de fer, il contient aussi des sels, et par conséquent la présence d'un champ électromagnétique va avoir une influence sur ces molécules et peut même induire des courants électriques dans le sang. A long terme, les ondes électromagnétiques altèrent les propriétés chimiques et biologiques du sang ...

-Objectif.

Dans ce contexte, l'*objectif* fixé dans le cadre du mémoire de Magister est d'étudier et de concevoir une pompe destinée à des applications médicales devant répondre à trois contraintes majeures, à savoir :

- *les conduits de pompages doivent, impérativement, être chimiquement inertes ;*
- *l'Organe de pompage doit être facilement changeable (faible maintenance) ;*
- *le fluide pompé doit être loin de toute influence thermique ou électromagnétique.*

L'étude bibliographique montre que la pompe péristaltique semble être la solution la mieux adaptée aux exigences précitées, le souci d'une contamination directe ou croisée est éliminé grâce à des tubes en silicones, élastiques, chimiquement inertes, et facilement changeables. Reste à trouver un moyen moteur pour actionner la pompe sans exposer le fluide aux influences du champ électromagnétique.

-Présentation du mémoire.

Pour ce faire, le travail est reparti sur quatre chapitres.

Le premier chapitre couvre l'état de l'art des pompes et donne une présentation des types de pompes les plus utilisées ainsi que leurs principes de fonctionnement.

Le second chapitre est dédié aux pompes péristaltiques où une attention particulière a été focalisée sur la structure linéaire.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation et la simulation de la pompe péristaltique linéaire conçue par les champs électromagnétiques, plus précisément par la méthode des volumes finis.

Le dernier chapitre présente une description détaillée de la pompe et de sa commande et où les performances pratiques sont mises en évidence et comparées aux résultats théoriques.

CHAPITRE I
ETAT DE L'ART DES
POMPES

CHAPITRE I

Etat de l'art des pompes

Toutes les motopompes répondent au même besoin qui se traduit par le déplacement d'un fluide d'un point à un autre. Pour accomplir cette tâche il faut communiquer au fluide de l'énergie par le biais d'un dispositif adéquat appelé pompe. Le moteur qui entraîne cette pompe transforme l'énergie thermique ou électrique en énergie mécanique afin d'actionner les organes de la pompe. Cette énergie mécanique est transmise au fluide sous les formes d'énergies cinétique (mouvement) et /ou énergie potentielle (pression). On distingue deux types de pompes :

- Centrifuge : énergie fournie sous forme cinétique ex hélice ;
- Volumétrique : énergie fournie par application de pression ex piston.

La classification des pompes est possible suivant plusieurs critères tels que :

- 1- Le débit ;
- 2- La pression ;
- 3- Le type mouvements (Rotatif /Rectiligne) ;
- 4- Le type de fluides (Gazes/Liquides) ;
- 5- Le type de liquides (Stériles, agressifs, chauds...).

Généralement, toutes ces pompes sont caractérisées par les paramètres suivants :

- La cylindrée : C'est le volume de fluide aspiré et expulsé pour un mouvement.
En cas de pompes rotatives, la cylindrée s'exprime en (litre/tour) ;
- Le débit : C'est le volume de fluide transvasé par unité de temps (litre/min) ;
- La pression : C'est la capacité de la pompe à augmenter la pression du fluide qui la traverse. Elle est exprimée en Pa ou en HMT (hauteur manométrique totale dans le cas de l'eau) ;
- Le rendement volumétrique : C'est le rapport entre le débit théorique et le débit effectif.

Il est toujours inférieur à l'unité en raison des fuites ;

- Le rendement mécanique : C'est le rapport entre le couple (ou force) théoriquement nécessaire pour produire la différence de pression et le couple (ou force) effectivement nécessaire ;

- Le rendement global : C'est le rapport entre la puissance hydraulique fournie par la pompe et la puissance mécanique absorbée par la pompe ;
- La puissance hydraulique : C'est le produit du débit par la différence de pression.

Dans le domaine pratique, on peut citer quelques types de pompes, dont l'usage est très courant telles que : Pompe à piston, pompe à membrane, pompe à vis, pompe centrifuge, pompe MHD, pompe EHD et pompe péristaltique.

I.1. Pompe à piston.

Ce type de pompes fait partie des pompes volumétriques alternatives, Fig. I.1. Elle utilise un piston couissant de manière étanche dans un cylindre pour repousser le fluide, admis précédemment, par l'intermédiaire d'un clapet (soupape), grâce à l'aspiration provoquée par le recule du piston. Chaque course du piston constitue une action d'aspiration ou de refoulement régulée à travers les clapets d'entrées et de sorties convenablement orientés. Les pompes à piston possèdent des performances élevées, ce type de pompe est notamment sollicité dans les applications de haute pression telles que les pompes hydrauliques des engins de travaux publics.

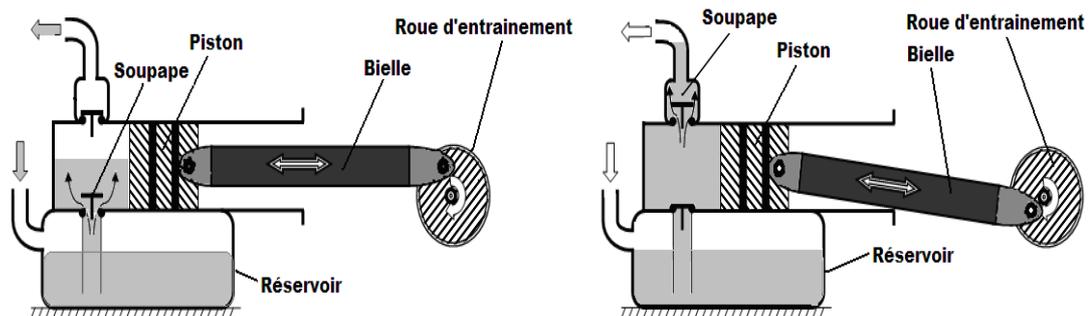


Fig.I.1. Schéma fonctionnel d'une pompe à piston en cycle d'aspiration et de refoulement.

I.2. Pompe à membrane.

Le principe de fonctionnement de ce type de pompe, considéré volumétrique, repose sur un excentrique entraîné par un moteur, et qui anime une membrane à travers une bielle d'un mouvement alternatif créant ainsi l'aspiration et le refoulement du fluide par l'intermédiaire de clapets convenablement orientés. La membrane est en

matière élastique souple, la face en contact avec le fluide est chimiquement inerte. Sur la Fig. I.2, la membrane attirée par le mouvement de la bielle crée un vide partiel permettant à la pompe de s'auto amorcer. Le liquide est aspiré dans la chambre de la pompe à travers la soupape d'entrée et le vide ainsi créé ferme la soupape de refoulement. L'avancée de la membrane pressurise le liquide, Fig. I.3, ce qui ferme la soupape d'entrée et ouvre celle de sortie par la quel le liquide est expulsé. Ce type de pompe est notamment sollicité dans les secteurs des industries agroalimentaires et pharmaceutiques.

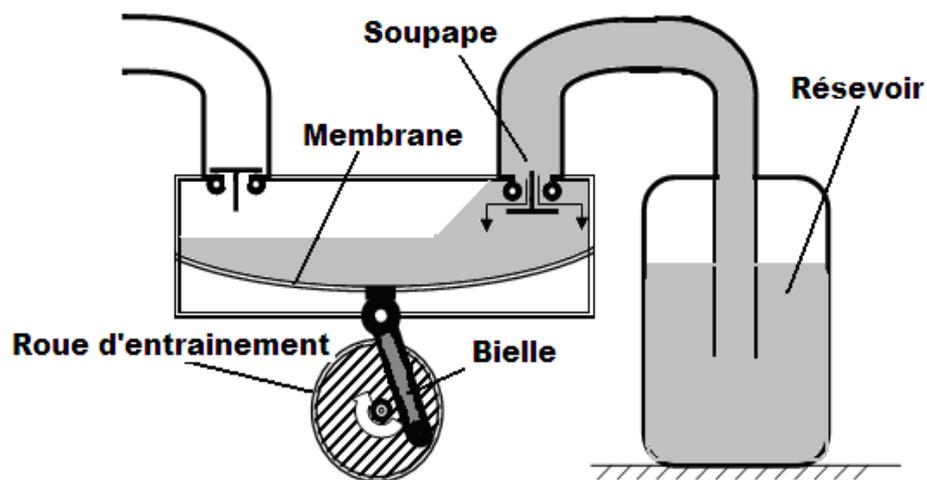


Fig. I.2. Schéma fonctionnel d'une pompe à membrane en cycle d'aspiration.

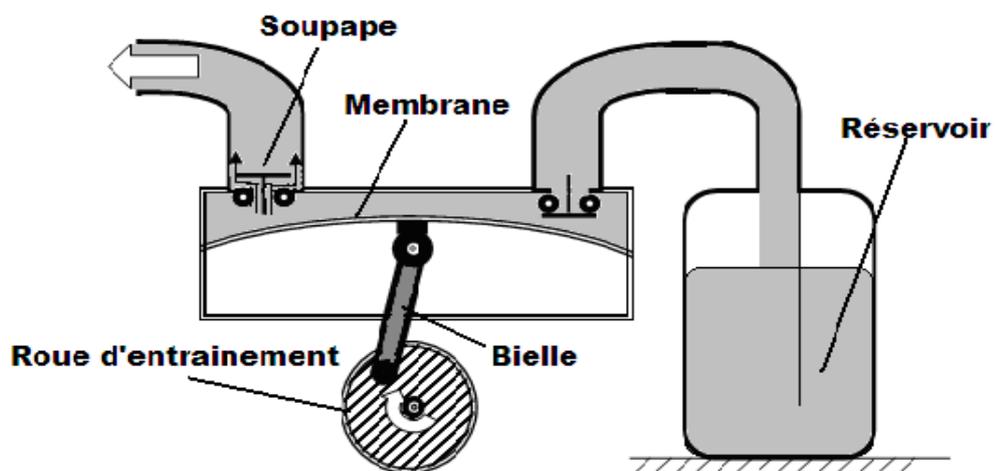


Fig. I.3. Schéma fonctionnel d'une pompe à membrane en cycle de refoulement.

I.3. Pompe à vis.

Ce type de pompes, considéré volumétrique, est constitué d'un rotor hélicoïdal tournant à l'intérieur d'un stator Fig. I.4. Cette rotation provoque la progression des alvéoles (filetages) le long de l'axe de la pompe en décrivant une spirale sans changer de forme ni de volume transférant ainsi la matière depuis l'entrée d'aspiration jusqu'à la sortie de refoulement. Ce type de pompes est notamment sollicité dans le secteur des industries agroalimentaires pour le transfert des céréales.

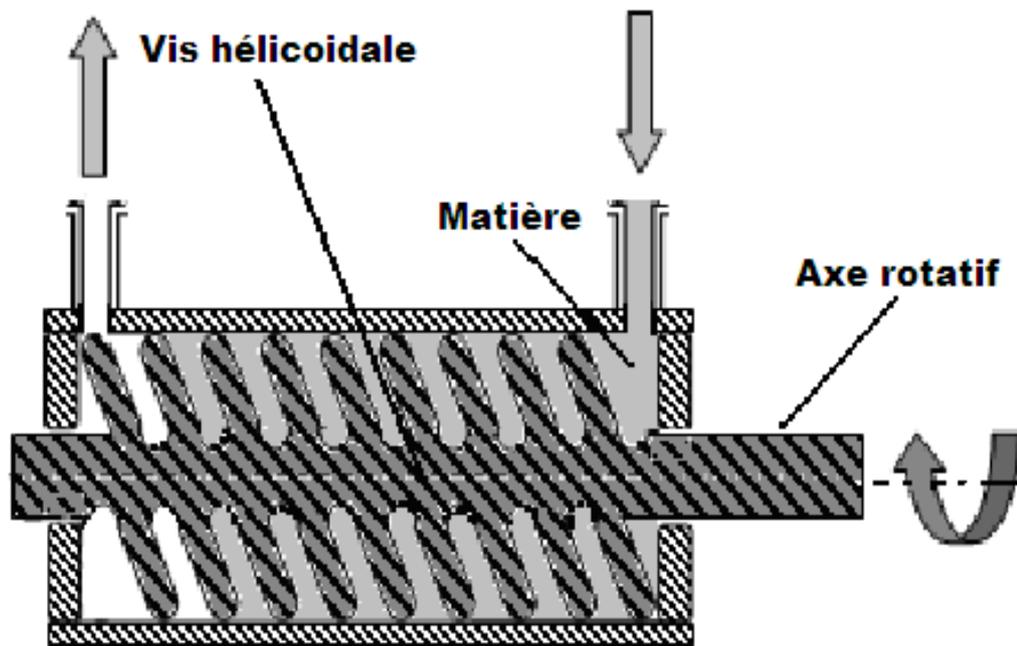


Fig. I.4. Schéma fonctionnel d'une pompe à vis.

I.4. Pompe centrifuge.

C'est le type de pompe le plus sollicité dans le transfert des liquides notamment l'eau. La pompe centrifuge utilise l'effet centrifuge pour déplacer le liquide et augmenter sa pression, lorsque le liquide entre dans le corps de la pompe, une roue à palette entraînée par un moteur projette le liquide au périphérique du corps de la pompe grâce à la force centrifuge produite par la rotation de la roue. Cette énergie emmagasinée dans l'eau est transformée en débit et en hauteur d'élévation. Ce mouvement centrifuge déclenche au même moment une dépression capable d'aspirer le liquide à pomper. Le liquide est donc aspiré par l'entrée de la pompe par l'effet de dépression et évacué dans le tuyau de refoulement par l'effet centrifuge comme indiqué sur les Fig. I.5 et Fig. I.6.

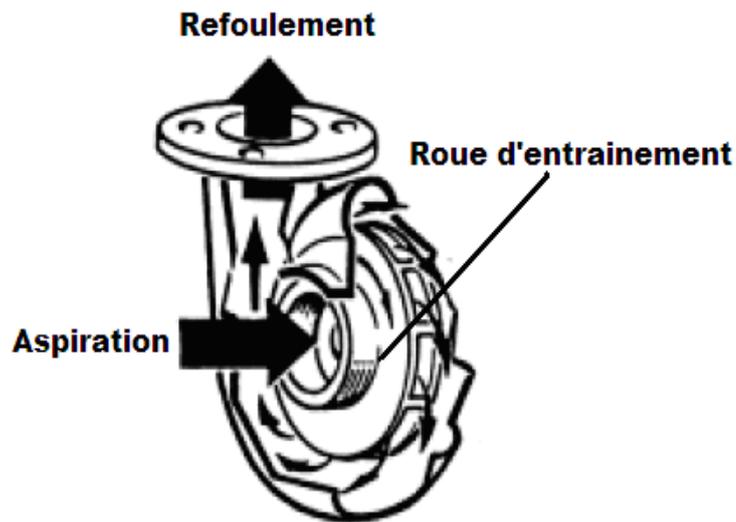


Fig. I.5 Schéma fonctionnel d'une pompe centrifuge à base de fenêtres d'éjections.

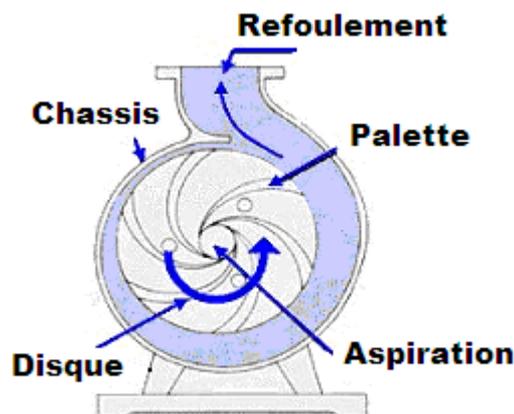


Fig. I.6. Schéma fonctionnel d'une pompe centrifuge à base de disque à palettes.

I.5. La Pompe MHD.

I.5.1. Définition de la MHD.

La magnétohydrodynamique (MHD) est un domaine vaste de la physique lié à l'interaction entre un champ magnétique et un fluide conducteur d'électricité. La notion de la conversion MHD remonte à l'époque de FARADAY qui en plaçant des électrodes dans une rivière d'eau saumâtre, convenablement orientées par rapport au champ magnétique terrestre, recueillit un faible courant électrique induit.

I.5.2. Domaine d'application de la MHD.

Le principe de la MHD trouve un large secteur d'applications en commençant par les propulseurs des véhicules marins, le freinage électromagnétique, le refroidissement des réacteurs atomiques et jusqu'au domaine des micropompes liées aux applications médicales. Ce même principe peut être exploité dans le cas des fluides gazeux ionisés, Fig. I.7. Les gaz dégagés par les moteurs à réaction peuvent être exploités pour augmenter la force de propulsion de ces derniers et ainsi améliorer leur rendement [28 ,30].

La MHD peut être aussi exploitée pour accélérer des fluides (pompe MHD), ou même pour produire de l'électricité à partir d'un fluide en mouvement (générateur MHD). Dans ces cas on parle d'un convertisseur MHD c à d une machine électromagnétique sans pièces mécaniques mobiles ; possédant un inducteur classique pour produire un champ magnétique mais avec un induit fluide conducteur (eau salée, métal liquide, gaz ionisé...); remplaçant l'induit conventionnel composé de pièces solides (acier, aluminium, cuivre...).

Un convertisseur MHD est réversible comme toute machine électromagnétique, il permet de :

- Convertir l'énergie mécanique présente dans le mouvement d'un fluide en énergie électrique, c'est le cas d'un générateur MHD ;
- Convertir l'énergie électrique en énergie mécanique par la mise en mouvement d'un fluide conducteur dans un champ magnétique, c'est le cas d'un accélérateur MHD.

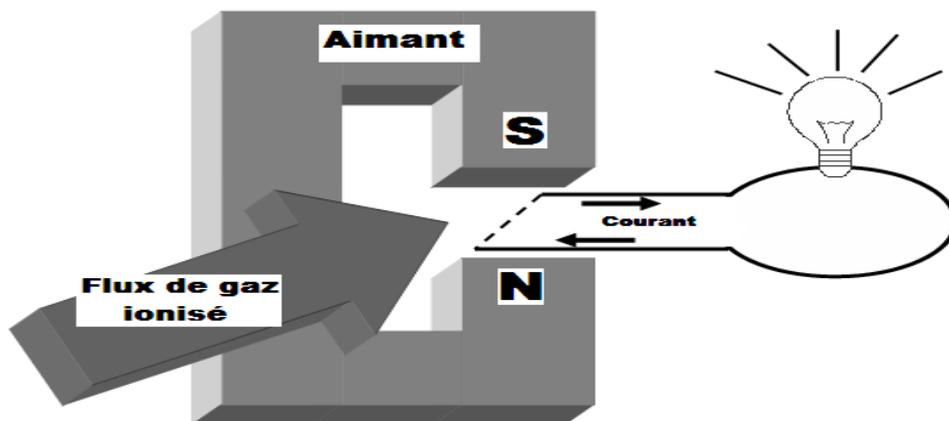


Fig. I.7. Générateur MHD à gaz ionisé.

Deux applications technologiques prometteuses de la MHD sont actuellement en cours de développement et peuvent devenir d'une importance cruciale dans le futur. En premier lieu vient l'utilisation de puissants champs magnétiques pour confiner des anneaux ou colonnes de plasma de haute température pendant des durées suffisantes afin de permettre une fusion thermonucléaire, (Tokamak) Fig. I.8. En second lieu et toujours dans le même cadre, des métaux liquides sont accélérés à travers un champ magnétique pour produire de l'électricité.

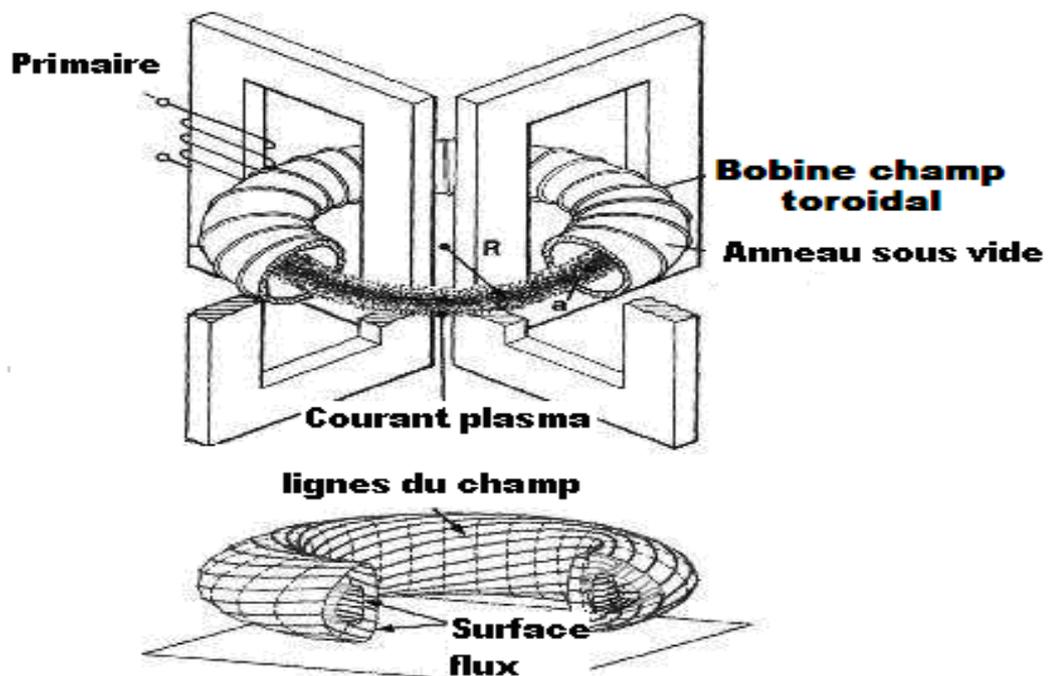


Fig. I.8. Structure d'un TOKAMAK.

I.5.3. Principe de la pompe MHD.

Ce type de pompe repose sur le principe de la loi de LENZ (Un conducteur parcouru par un courant électrique et plongé dans un champ magnétique est le siège d'une force électromagnétique motrice dite force de Laplace suivant la règle des trois doigts). Si ce conducteur est un fluide (liquide ou gaze) placé dans les mêmes conditions, c à d parcouru par un courant électrique et plongé dans un champ magnétique, alors une force motrice agit sur ce fluide et provoque son déplacement sans qu'il y ait un contact physique, Fig. I.9. Le déplacement d'un fluide sous l'effet d'une force électromagnétique s'appelle la MHD (MagnétoHydroDynamique) [20, 21,22].

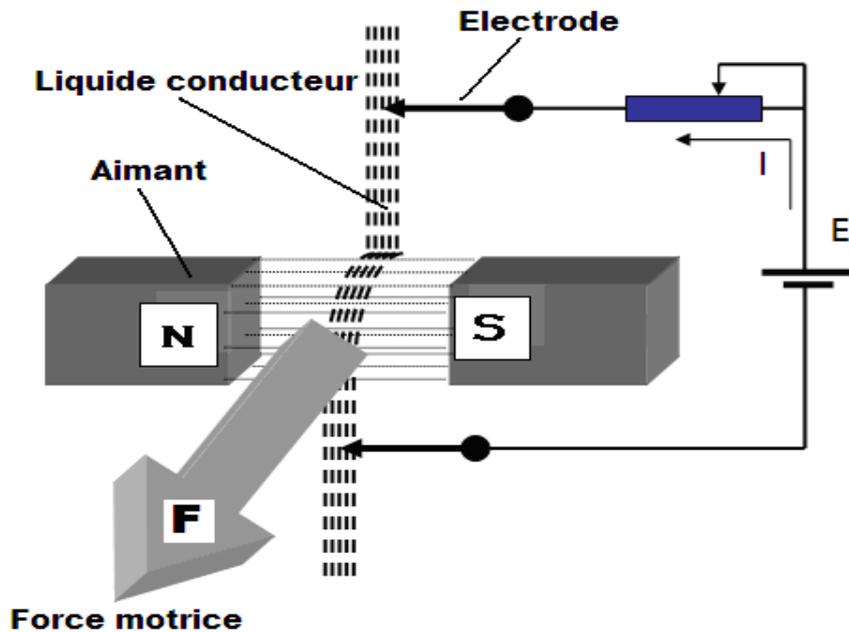


Fig. I.9. Principe du pompage MHD dans les liquides.

I.5.4. Avantages et inconvénients des pompes MHD.

Les pompes MHD gagnent de l'intérêt car elles rassemblent des critères attractifs tels que :

- Absence totale de pièces mobiles ;
- Processus de fabrication simple ;
- Problèmes mécaniques nulles ;
- Débit continue de fluide ;
- Durée de vie prolongée.

Malgré ces avantages, les pompes MHD trouvent quelques difficultés à s'intégrer dans des secteurs spécifiques tels que le médical, le pharmaceutique, l'agroalimentaire..., ceci est lié notamment à:

- La formation du phénomène d'électrolyse ;
- L'échauffement du à la circulation des courants électriques ;
- La présence des courants électriques n'est pas toujours commode ;
- Le pompage MHD n'est possible qu'en présence d'un liquide et qui doit être conducteur.

I.6- Pompe EHD.

L'électrohydrodynamique (EHD) est l'interaction entre un champ électrique et un fluide électriquement chargé, Fig. I.10. Le principe de la EHD remonte au début des années 60 où Stuetzer et Pickard [12,26] ont été les premiers à proposer une étude d'une pompe à refoulement EHD (ion-drag EHD pump). L'injection d'un élément à haute concentration d'ions dans un liquide permet de le charger électriquement, puis un champ électrique intense externe est appliqué au liquide via deux électrodes (Emetteur et Collecteur), ceci provoquera une accélération des électrons originaires des molécules ionisées et qui vont par leurs tours provoquer l'ionisation d'avantage d'atomes du liquide (les électrons accélérés jouent le rôle de producteurs d'ions). La force de Coulomb qui résulte de l'application du champ électrique induira le mouvement du liquide. Comme la masse des électrons est négligeable devant la masse des ions, l'impact majeur sur le mouvement du liquide est dû au mouvement des ions. Les frottements entre les ions mobiles et le reste du liquide entraîneront le refoulement du liquide (parties chargées et neutres).

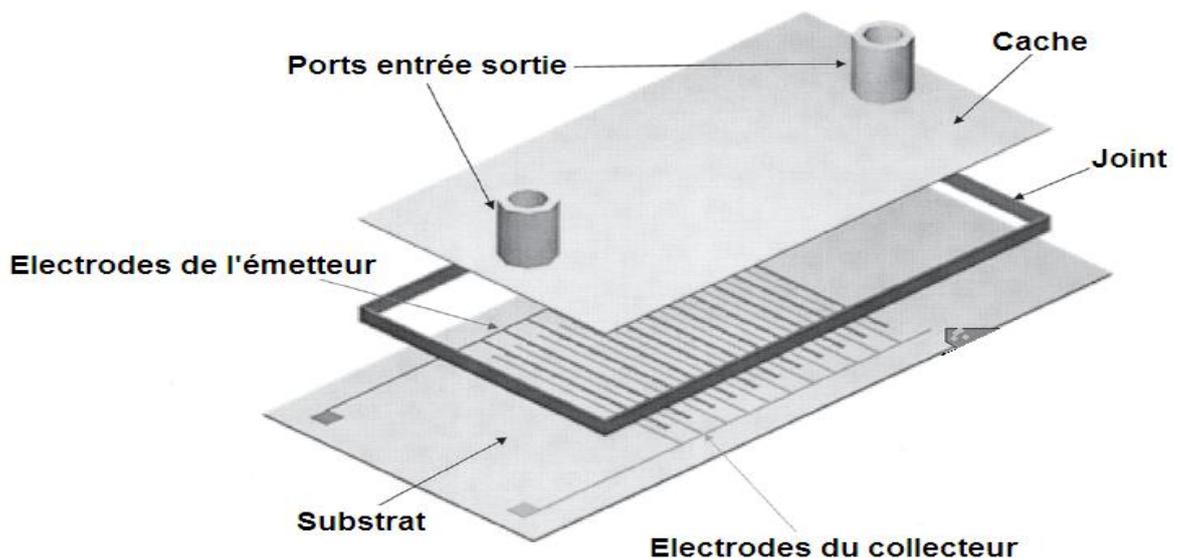


Fig. I.10. Structure d'une pompe EHD [26].

I.7- Pompe péristaltique.

Le principe de la pompe péristaltique s'inspire du fonctionnement de l'intestin. Ce dernier est pourvu de muscles périphériques qui permettent de déplacer la matière par une succession de contractions et décontractions, ce mouvement typique des intestins est appelé le péristaltisme, [16,17]. L'action du péristaltisme ressemble à une vague

traversant l'intestin, ayant pour effet de réduire son diamètre ; ces rétrécissements se déplacent lentement d'un bout à l'autre de l'organe et toujours dans le même sens, avec pour effet d'en pousser le contenu à travers le canal de l'intestin, Fig.I.11.

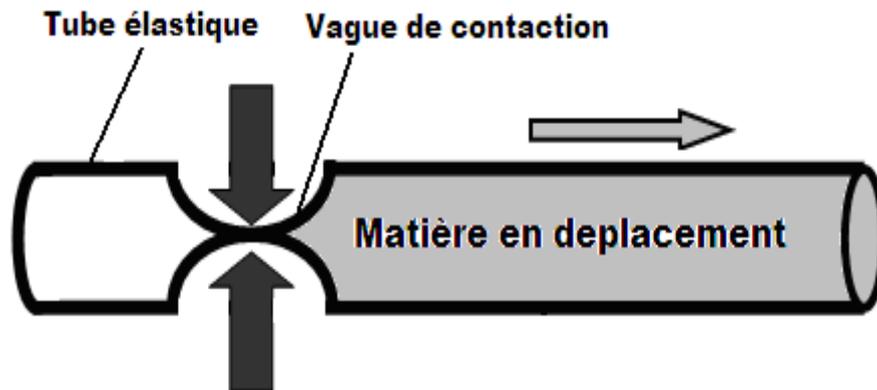


Fig. I.11. Principe du mouvement péristaltique.

I.8. La miniaturisation des éléments fluidiques.

Durant la dernière décennie et pour des raisons de coût, de rapidité et de sensibilité des efforts considérables ont été déployés dans la miniaturisation des équipements de laboratoires d'analyses médicales, où le contrôle des petits volumes avec une grande précision est devenu d'une importance cruciale, car les analyses chimiques sont affectées par les volumes des réactifs utilisés dans le sens où les petits volumes nécessitent peu de temps pour compléter une réaction. La miniaturisation va mener, en premier lieu, à une réduction dans la consommation des réactifs, à la diminution du temps d'analyse, à l'amélioration des performances analytiques, à l'augmentation du débit d'analyse et à une automatisation directe d'un système portatif. [7,27].

I.8.1. Les micro-TAS.

Le concept des microTAS (micro Total Analysis System) ou systèmes d'analyse intégrés a été introduit au début des années 90, l'idée derrière ce concept est de placer toutes les fonctions pratiquées dans un laboratoire d'analyse sur une puce (Lab-on-a-chip), c à d tous les éléments nécessaires à l'analyse sont assemblés sur un petit dispositif qui exécute l'analyse d'une manière autonome. Cependant, ce dispositif est intégré sur une plateforme miniature au lieu d'être assemblé à partir d'éléments discrets. Les dites plateformes sont fabriquées sur des substrats de verre, de quartz, de

silicium ou de polymères. La précision des volumes et des débits passe impérativement par la microfluidique, qui englobe les éléments et les méthodes de contrôle et de manipulation des flux fluidiques dans un ordre de grandeur inférieur au millimètre. Les éléments microfluidiques couvrent les vannes passives et actives, les micropompes, les cellules de réactions et les capteurs de débits et de pressions, [7].

I.8.2. Les micropompes.

Une large variété de dispositifs fluidiques s'est développée ces dernières années pour des applications couvrant les systèmes d'analyses chimiques et les systèmes de transferts des fluides dans la médecine et la biologie. La technologie de la microélectromécanique a permis le développement d'une nouvelle génération de pompes ; dont l'ordre de grandeur se mesure en millimètres ; appelées micropompes [16,17]. Elles offrent quelques avantages à savoir :

- Un encombrement réduit ;
- Un volume mort faible;
- Une réduction dans la consommation d'échantillon et du réactif ;
- Une basse consommation d'énergie ;
- Une importante cadence ;
- Une réponse rapide.

I.9.Assistances ventriculaires.

La recherche en matière d'assistance ventriculaire mécanique de longue durée a débuté dans les années 1970 aux Etats-Unis. Le but initial de cette technologie était d'assister totalement le cœur défaillant et de remplacer le ventricule gauche en capturant tout le débit cardiaque du patient via la machine implantée. Les pompes construites alors pouvaient assurer un débit de 10 l/min contre les résistances physiologiques. Les assistances pulsatiles pneumatiques ou électromécaniques furent introduites cliniquement en attente de greffe dans les années 1980, et leur usage commercial fut progressivement autorisé dans les années 1990. Avec l'expérience clinique grandissante et les progrès technologiques associés, la prise en charge prolongée de tout le débit cardiaque par l'assistance ventriculaire gauche chez ces patients insuffisants cardiaques a été remise en cause. La conservation d'une certaine part d'éjection est considérée comme intéressante et bénéfique [24,25].

Les pompes électromécaniques ou pneumatiques étaient volumineuses et nécessitent une dissection chirurgicale extensive. Ces systèmes à base de valves étaient bruyants et exposés aux complications des prothèses. Plus récemment sont apparus les cœurs artificiels de troisième génération, en attente d'une greffe, ils sont implantés en intracorporel et autorisent une mobilité accrue et une qualité de vie acceptable. Parmi ceux-ci les pompes électromagnétiques axiales de très petites dimensions, implantables, silencieuses, sans valves, et à flux continu sont à l'étude actuellement.

Les nouvelles pompes axiales sont d'implantations chirurgicales plus simples, moins traumatiques et strictement intra-thoraciques. Miniaturisées, silencieuses pour le patient et son entourage, elles peuvent être implantées sur des malades de petit gabarit. Quelques questions subsistent vis-à-vis du flux continu des pompes axiales, néanmoins le flux artériel pulsatile devient physiologiquement non pulsatile au niveau des capillaires où se font les échanges gazeux et nutritifs.

Du fait de l'absence de valves, d'une surface réduite en contact avec le sang (miniaturisation) et du flux continu, les pompes électromagnétiques nécessitent moins d'anticoagulant.

I.9.1 Pompe cardiaque.

La majorité des pompes cardiaques (assistances ventriculaires) existantes ; implantées ou en cours d'essais ; sont à base de moteur électrique axial rotatif [23], où le sang est dirigé par des ailettes, toutes les surfaces en contact avec le sang sont en titane. Une batterie en Lithium portée à la ceinture du patient constitue la source d'alimentation de la pompe via un câble, percutané, en silicone recouvert de Dacon.

Tableau 1.

Quelques problèmes de taille restent à considérer à savoir le rejet, l'infection et la coagulation.

Tableau 1 : Caractéristiques électriques des principales pompes cardiaques axiales [23].

Pompe	Jarvik2000	MicroMed DeBakey	Heart-Mate	Berlin Heart Incor
Dimensions [cm]	5.5x2.5	7.6x3.05	6.0x4.0	12.0x3.0
Poids [g]	85	93	375	200
Débit [L/min]	7	10	10	7
Flux	Continu	Continu/Pulsatile	Continu	Continu

I.10.Conclusion.

Dans ce chapitre on a passé en revue les types de pompes les plus utilisées ainsi qu'une explication sommaire du principe de fonctionnement soutenu par des schémas fonctionnels de chaque type. Nous avons aussi noté l'importance de la miniaturisation des éléments fluidiques dans le secteur de la biologie et de la médecine. Les pompes péristaltiques feront l'objet du chapitre suivant où plus de détails seront donnés.

CHAPITRE II

POMPES

PERISTALTIQUES

CHAPITRE II

Pompes péristaltiques

Dans plusieurs applications ; et pendant leurs transferts ; les fluides doivent être tenus loin de tout contact avec les organes mobiles de pompage et bien isolés de l'air. Ces exigences trouvent satisfaction dans les pompes péristaltiques où les fluides sont canalisés dans un conduit souple, chimiquement inerte, totalement isolé du reste de la pompe et où le transfert se fait par des actions de péristaltisme.

II.1.Pompe péristaltique cylindrique.

Dans la configuration cylindrique conventionnelle, les galets représentent les éléments actifs du pompage, ils sont fixés à un rotor entraîné par un moteur, Fig.II.1.Ce type de pompage repose sur la capacité que possède un tube en matériau souple à se déformer puis à reprendre sa forme initiale après avoir été écrasé par un galet. Le débit obtenu varie en fonction du diamètre du tube et de la vitesse de rotation des galets. Sous l'action du galet, le tube est comprimé et se referme d'une façon occlusive, le retour du tube à sa forme initiale, à l'arrière du galet, génère une dépression qui *aspire* le produit. Le volume du produit compris entre deux galets est *transféré* à l'intérieur du tube, et finalement sous la pression du second galet, le produit est *refoulé* vers la sortie, Fig. II.2.

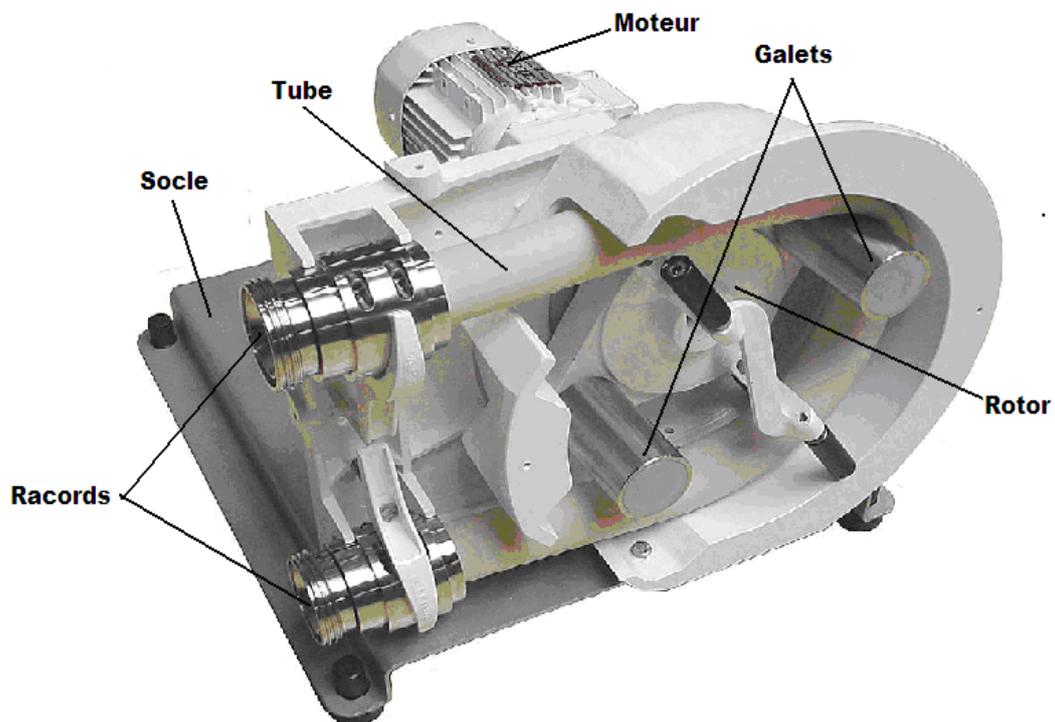


Fig. II.1.Pompe péristaltique cylindrique à deux galets.

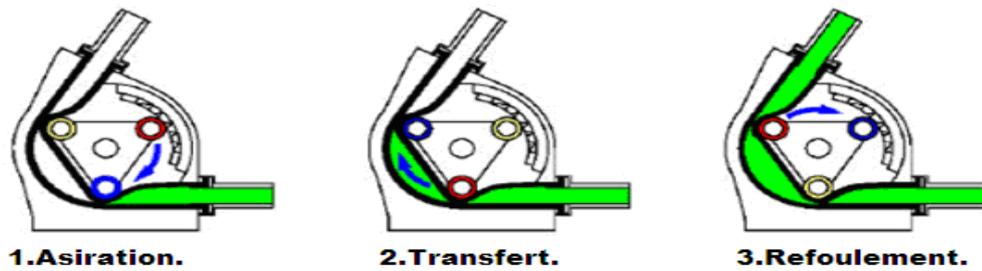


Fig. II.2. Cycles de fonctionnement d'une pompe péristaltique cylindrique.

II.2. Pompe péristaltique linéaire.

Dans la configuration cylindrique, le contrôle du débit passe par le contrôle de la vitesse du moteur ; ainsi tous les problèmes liés au moteur et à sa commande (*changement de roulements et étalonnage de vitesse*) s'ajoutent à ceux propres à la pompe péristaltique, Cet handicap peut être surmonté par le choix d'une configuration linéaire, Fig.II.3, au lieu d'une configuration cylindrique, ceci élimine totalement les problèmes liés à la rotation et nécessite une commande moins complexe. Dans cette structure linéaire, les éléments actifs (actionneurs) ne sont plus des galets en rotation, mais des dispositifs d'écrasements indépendants, actionnés séparément et suivant une séquence précise, ils provoquent ainsi la compression du tube élastique et entraînent le transfert du contenu, [8].

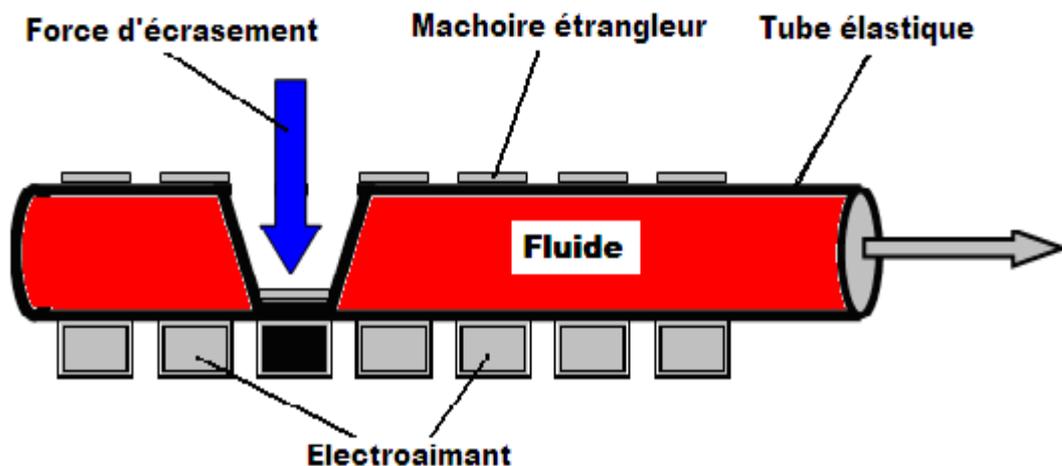


Fig. II.3. Principe de la pompe péristaltique linéaire.

II.3. Types d'actionneurs dans les pompes péristaltiques linéaires.

Dans une pompe péristaltique linéaire, la force qui engendre la contraction du conduit, et provoque ainsi le mouvement du fluide, est générée à l'aide d'un

actionneur. Le choix du type d'actionneur approprié repose sur des critères tels que la capacité de la pompe, l'encombrement disponible, le type de fluide à pomper et la puissance demandée. Ces actionneurs peuvent être, entre autres, des dispositifs à base de liquide magnétique [1], [2], [3], d'éléments piézoélectriques, [6], de polymères électroactifs, [9], ou simplement à base d'électroaimants étrangleurs, [17].

II.4. Actionneur à base de fluide magnétique.

Le fluide magnétique ou ferro-fluide est un liquide, pouvant bouger sous l'influence d'une force externe, mais assez rigide sous l'influence d'un champ magnétique. Il est souvent qualifié de fluide intelligent. Cette caractéristique très spéciale rend le fluide magnétique attractif dans la fabrication des actionneurs et des capteurs. Des applications typiques matérialisées couvrent les systèmes des joints d'étanchéité, les amortisseurs de vibrations, les embrayages et freins magnétiques et les capteurs angulaires [4], [5], [10], [11], [15]. Cet avantage a été exploité pour concevoir un nouveau moyen de refoulement de liquide dans une pompe, Fig. II.3.

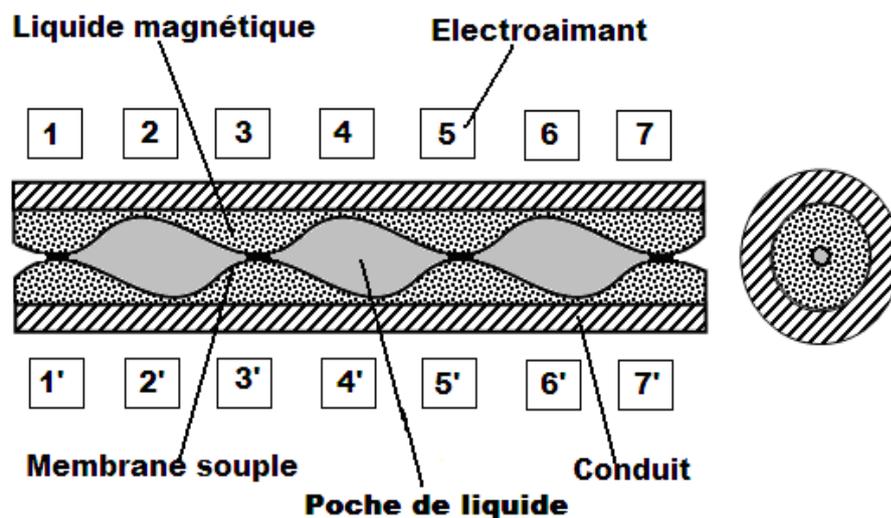


Fig. II.3. Structure d'une pompe péristaltique linéaire à base de liquide magnétique [1].

Le fluide magnétique, activé par une série d'impulsions sur les électroaimants, propulse le liquide dans le canal sous forme de poches, Fig. II.4. Cette structure offre plusieurs avantages tels que l'absence totale de pièces mobiles, la possibilité d'écoulement inverse, l'utilisation en tant qu'électrovanne, le contrôle direct du débit et de la pression et enfin une miniaturisation simple et directe.

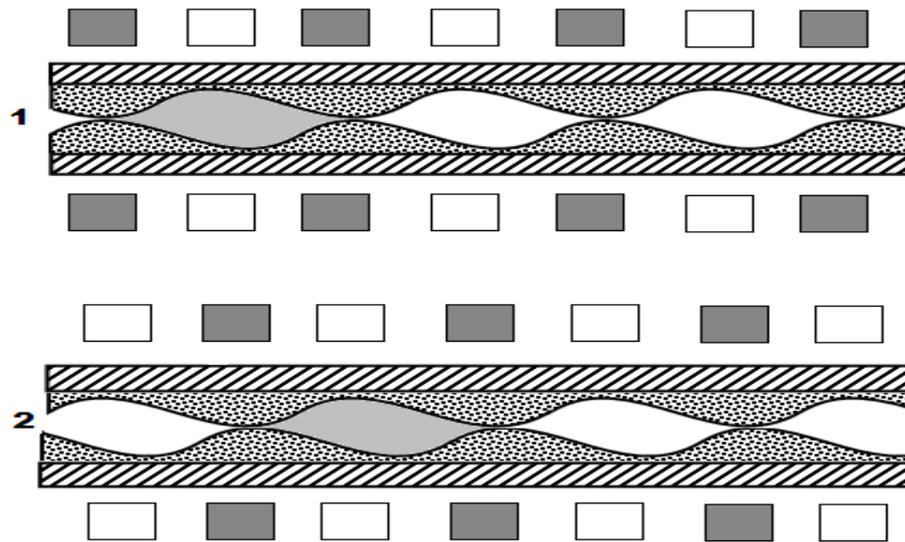


Fig. II.5. Pompe péristaltique linéaire à base de fluide magnétique [1].

II.5.Nature du fluide magnétique.

Le fluide magnétique ou ferro-fluide est une dispersion colloïdale stable de particules magnétiques de l'ordre de nanomètre dans un solvant. Le solvant peut être de nature organique ou même de l'eau. Les particules de 0,1nm sont enrobées d'un dispersant stabilisateur qui empêche toute sédimentation ou agglomération (agrégation, agglutination) même sous l'effet d'un intense champ magnétique. Cet état de suspension est stable et conserve ses propriétés à des températures extrêmes et pendant longtemps. Les propriétés physiques et magnétiques de quelques types de ferro-fluides sont indiquées sur le tableau II.1, [14].

Tableau II.1. Propriétés physiques et magnétiques de quelque ferro-fluides [14].

Propriétés	SMF110	N304	EMG900	EMG901	EMG909
Densité, ρ , à 25°C [g/cm ³]	1,04	1,14	1,74	1,53	1,02
Saturation, M_s [G]	100	330	900	600	200
Viscosité, μ , à 27°C [cP]	1000	10	60	10	6
% concentration particule	15,4	12,3	16,3	10,7	3,6
Dimension de particule [nm]	10	10	10	10	10

II.6. Actionneurs à base de polymères électroactifs (Dielectric Elastomers).

Certains polymères (gommes) sont sensibles aux charges électriques statiques, ils se dilatent sous l'influence de ces dernières et retrouvent leurs formes initiales lorsqu'ils deviennent électriquement neutre (Effet de Contrainte de Maxwell) [17], Fig. II.5.

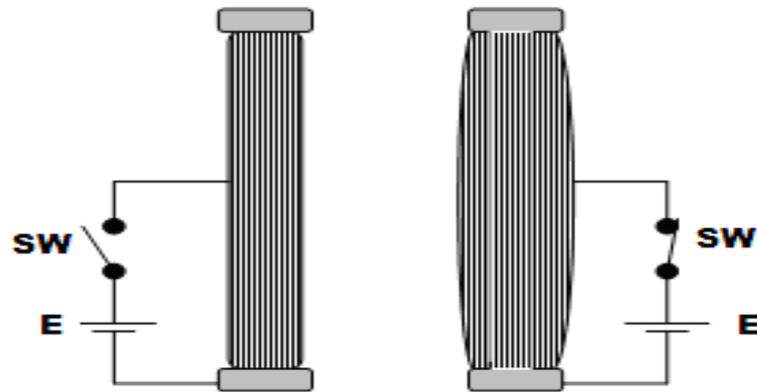


Fig. II.5. Actionneur à base de polymères électroactif à expansion radiale [14].

L'activation électrique de chaque tube élément provoque une auto expansion radiale, ce qui permet l'aspiration du fluide depuis le tube précédant ; ensuite ce dernier est désactivé provoquant ainsi d'avantage de fluide transvasé vers le tube (élément) suivant Fig.II.6. L'activation cyclique continue des tubes éléments créé un effet de pompage. Pour assurer un meilleur débit on insère un clapet anti-retour à l'entrée de la structure.

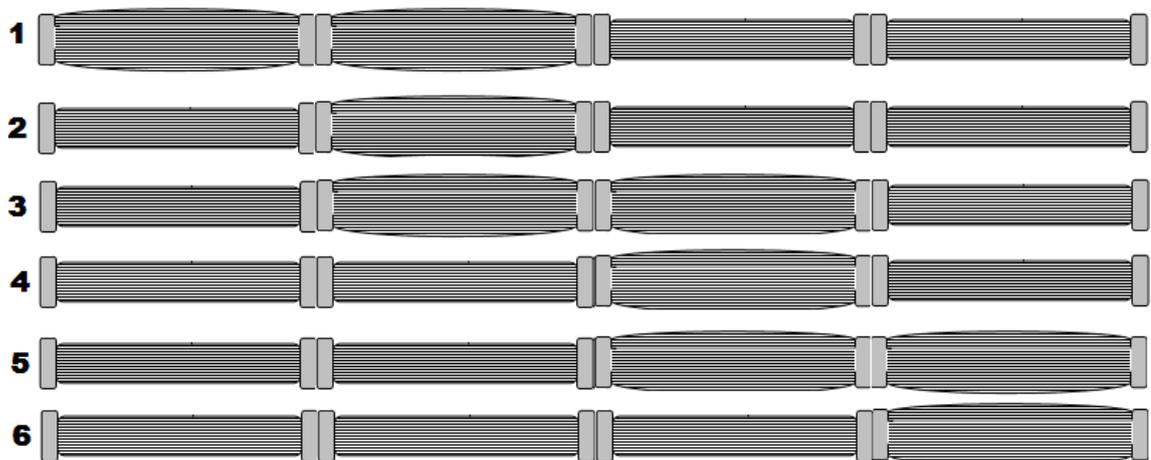


Fig. II.6.Cycles de pompage dans une P.P linéaire à base de tubes électroactifs à expansion radiale [14].

II.7. Actionneurs à base d'électroaimants étrangleurs.

Les éléments actifs du système traité dans ce mémoire sont des électroaimants appelés étrangleurs, Fig. II.7. Suite à l'excitation, la mâchoire supérieure, solidaire au noyau mobile ; est attirée par l'électroaimant et provoque la compression et l'étranglement du tube élastique, Fig. II.8. En éliminant l'excitation, la nature élastique du tube repousse la partie mobile de l'étrangleur et le tube retrouve sa forme initiale. Quand le tube est comprimé hermétiquement, la quantité de fluide, initialement entre les mâchoires de l'étrangleur est déplacée d'un pas. En actionnant l'électroaimant suivant, sans relâcher le précédent, la même quantité de fluide est déplacée d'un autre pas et toujours dans le même sens. Si cette opération est répétée d'une façon continue sur tous les étrangleurs et dans le même sens, un écoulement pulsé du fluide est collecté à la sortie. Le débit de cet écoulement est fonction de la cadence d'excitation, et du diamètre du tube, alors que la pression du fluide est fonction de la force de compression c à d fonction de la tension d'excitation des électroaimants.

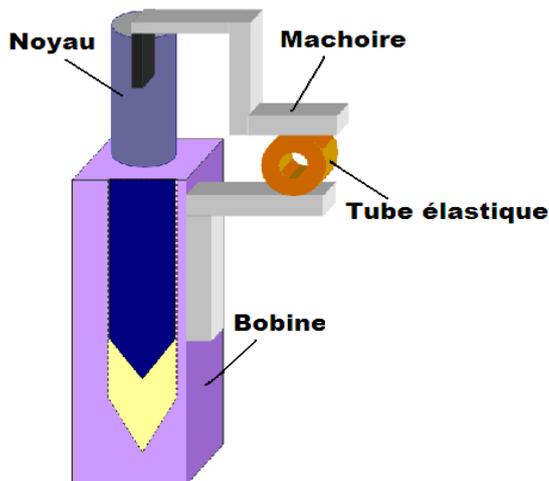


Fig.II.7. Actionneur à base d'électroaimant en position d'appel.

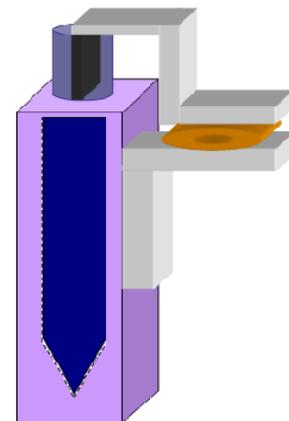


Fig.II.8. Actionneur à base d'électroaimant en position de collage.

II.8. Actionneurs à base d'éléments piézoélectriques.

Les éléments piézoélectriques dans les actionneurs sont à base de disques céramique semi-conducteurs, Ils font la conversion directe de l'énergie électrique en énergie mécanique avec une résolution remarquable [6]. Ils sont conçus pour combiner la haute performance à la grande longévité pour des applications industrielles et

scientifiques. Ils sont insensibles aux champs magnétiques, capables de générer des efforts considérable et de fonctionner à de très bases températures.

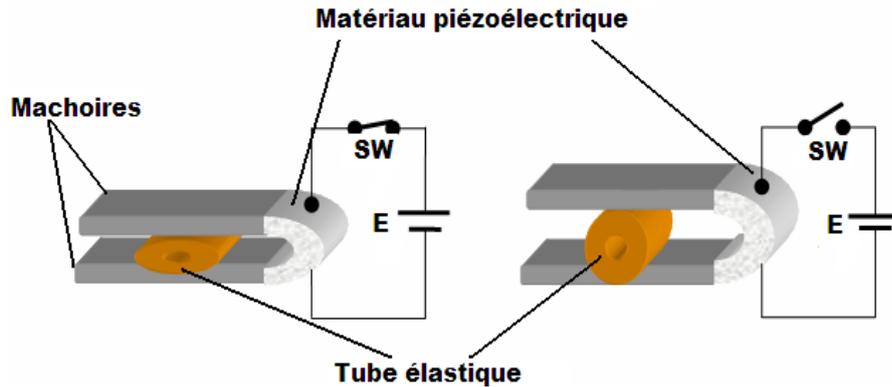


Fig. II.8. Actionneur à base d'éléments piézoélectriques

II.9. Tubulure des pompes péristaltique.

Les fabricants ont développés une tubulure à base de gomme spéciale (Gomme synthétique de haute performance) capable de travailler dans une large gamme de température (0°C _ 180°C) d'une manière continue et dans des températures plus importantes d'une manière intermittente. Cette tubulure a une excellente résistance aux produits chimiques tels que les acides minéraux, les carburants et les huiles avec d'excellentes propriétés mécaniques et élastiques.

II.10. Avantages et inconvénients des pompes péristaltiques.

L'atout majeur de ce type de pompe est l'absence totale de contacts entre le produit pompé et les organes de la pompe, ceci donne l'avantage d'un transfert des produits stériles sans risque de contaminations ou même de dégradations de la pompe en cas de produits agressifs. Parmi les avantages de ce type de pompes on cite :

- Auto amorçage à sec ;
- Transfert des liquides très visqueux ;
- Fonctionnement à vide sans risques ;
- Transfert des liquides agressifs ;
- Isolement total du produit pompé ;
- Débit précis ;
- Débit assez important ;
- Transfert réversible.

Ces pompes ont cependant, quelques défauts propres à leurs constructions et relatifs à une pompe parfaite. Elles ne peuvent fonctionner qu'à température moyenne car le tube perd son élasticité dans les températures extrêmes. L'usure du tube est fréquente et elle est due, essentiellement, à l'écrasement répété, ce qui nécessite un changement régulier de celui-ci en cas d'usage prolongé.

II.11. Classification et application des électroaimants.

La norme a essayé de faire une classification des appareils électroaimants suivant leurs fonctions en [18]:

- électroaimant de manœuvre et vibrateurs électromagnétiques ;
- embrayages et freins ;
- électroaimants porteurs ;
- trieurs électromagnétiques.

Les électroaimants de commande ou manœuvre sont définis comme des appareils dans lesquels chaque mouvement d'un bout à l'autre de la course est induit par la fermeture ou la coupure du circuit d'alimentation.

Ils sont subdivisés suivant la nature géométrique du mouvement en :

- électroaimant de commande à mouvement rectiligne,
- électroaimant de commande à mouvement rotatif.

Ils sont également classifiés suivant le nombre de sens de manœuvres possible :

- les électroaimants de commande simple,
- les électroaimants de commande multiple.

II.11.1.Électroaimants de commande simple

Ce sont des électroaimants dans lesquels le mouvement, sous l'effet de la force électromagnétique, ne peut avoir lieu que dans un sens déterminé. L'appellation électroaimant de manœuvre apparaît comme trop restrictive, car elle laisse entendre que c'est le travail développé par l'électroaimant qui est directement utilisé, comme dans le cas des électroaimants commandant des dispositifs de freinage par exemple. Mais il s'agit là d'une vision très limitée des possibilités multiples des électroaimants. En effet, dans bien des applications, c'est la position de l'armature mobile et son maintien dans cette position qui intéresse l'utilisateur, plutôt que le travail fourni. Par

exemple les électroaimants de commande des distributeurs hydrauliques, les électroaimants de commande pour verrouillage d'organes mécaniques.

Sont qualifiés également d'électroaimant de manœuvre les appareils dont on utilise l'énergie cinétique pour réaliser certaines opérations comme le postage des tickets, découpage des tôles fines. La définition de la norme laisse entendre, enfin, que l'électroaimant est, par essence, un appareil de tout ou rien, en position d'appel ou en position de collage. Or, les progrès en performances et les diminutions des coûts de l'électronique ont mis à la portée des industries l'utilisation de systèmes électroniques d'alimentation permettant de piloter des électroaimants appelés souvent électroaimants proportionnels. Ils sont conçus de manière telle qu'il n'y ait plus seulement deux positions d'équilibre, mais que, suivant l'intensité du courant continu de l'alimentation délivrée par le module électronique, n'importe quelle position de l'armature devienne une position d'équilibre. On imagine facilement l'intérêt d'un tel mariage de l'électronique et des électroaimants proportionnels.

Exemples :

-maintien d'une température constante d'un liquide ou d'un gaz. Une sonde prends la température du corps en permanence et, par l'intermédiaire du module électronique, commande l'électroaimant attelé à une vanne d'arrivée de combustible pour régler l'arrivée de ce dernier ;

-une application du même genre est rencontrée sur les moteurs thermiques dont on veut maintenir la vitesse de rotation indépendante de la charge ;

-pour une position quelconque de l'armature, l'effort exercé sur une soupape peut être plus au moins important suivant l'intensité du courant parcouru par la bobine ; la régulation de la pression peut ainsi être modulée en fonction des variations d'un paramètre quelconque dont on mesure en permanence la valeur ;

Ces types d'appareils sont souvent adoptés comme régulateurs de débit ou régulateurs de pression. La difficulté de conception de tels appareils réside dans la recherche de la linéarité de la force en fonction du courant, et la réduction de l'hystérésis mécanique (force de frottement) et magnétique par le choix des matériaux. Cette hystérésis, si elle est constante, peut être compensée par une superposition au courant continu principal d'un courant alternatif, ayant pour objet de rendre l'armature mobile flottante.

II.11.2.Électroaimant de commande multiple.

Ce sont des électroaimants dans lesquels le mouvement, sous l'effet de la force électromagnétique, peut avoir lieu au choix dans un sens ou dans l'autre, ils sont encore subdivisés en :

- électroaimants de manœuvre double, où il apparaît une position de repos intermédiaire (le retour à cette position de repos est assuré par l'effet des forces extérieures) ;
- électroaimants de manœuvre réversible dans lesquels le mouvement a lieu d'une position de fin de course à l'autre ou inversement suivant le sens de la force électromagnétique.

Les besoins des utilisateurs ont amené les concepteurs d'électroaimants à définir des appareils à manœuvre multiple qui ne sont ni double ni réversible. Si les positions de fin de course sont des positions stables même en l'absence de courant d'excitation, l'électroaimant est appelé bistable et il est utilisé, par exemple, en manutention pour la sélection d'aiguillage de système de convoyage. La consommation est nulle dans les deux positions d'équilibres. Il convient aussi de mentionner les électroaimants de commande de moteurs thermiques, qui demande trois positions stables (arrêt, ralenti, marche). Le système est constitué par un électroaimant dont la forme polaire procure une course importante :

- le moteur à l'arrêt correspond à la position d'appel de l'armature mobile (pas de tension sur la bobine) ;
 - la position marche est obtenue avec l'armature au collage ;
 - un dispositif électromécanique supplémentaire permet le blocage de l'armature de l'électroaimant principal dans une position intermédiaire qui fixe le régime du ralenti.
- Sauf exception, tous ces dispositifs sont à sécurité positive, de sorte qu'une coupure de l'alimentation électrique du bobinage entraîne l'arrêt du moteur.

II.11.3.Électroaimant de sécurité.

Si l'on prend l'exemple d'un système de sécurité incendie dans un immeuble, il est nécessaire de prévoir un circuit de désenfumage. On sait en effet que certains matériaux émettent des vapeurs plus dangereuses que le feu lui-même lorsqu'ils sont portés à températures élevées. Lorsque un foyer d'incendie se déclare, un certain nombre d'opérations se déclenchent automatiquement (fermeture des conduits de

conditionnement d'air, ouverture des circuits de désenfumage, fermeture des porte coupe-feu, etc.). Il s'agit là de toute une ligne de système de sécurité pouvant être commandé automatiquement par coupure de courant d'alimentation d'une bobine, dont la consommation est toujours très faible, ou par émission d'une impulsion de courant. La commande d'un électroaimant à émission de courant utilisé en sécurité incendie, pour le décrochage d'une trappe de désenfumage, est réalisée par simple impulsion de courant, elle-même pilotée par un détecteur de fumé.

Les aimants peuvent, en effet, être considérés comme des générateurs de forces magnétomotrices possédant leurs propres reluctances internes. La force motrice et la réluctance interne de l'aimant dépendent du circuit magnétique dans lequel ils sont insérés, ce qui rend l'étude des circuits magnétiques notablement plus compliquée que celle des circuits électriques. Tous les matériaux ayant un champ coercitif (H_c) élevé peuvent être utilisés comme aimant permanent car ils seront ainsi insensibles aux champs parasites. Cependant, pour en tirer des effets intéressants, il faut encore qu'ils aient des inductions rémanentes (B_r) importantes. Les appareils de sécurité, et principalement ceux qui touchent la sécurité des personnes, doivent faire l'objet d'une conception et de soins (tant en fabrication qu'en contrôle) tous particuliers, auxquels les décideurs ne sont pas toujours très sensibilisés.

Prenons une ventouse dite à émission de courant, en l'absence de courant dans la bobine, l'aimant permanent crée une induction dans le circuit magnétique et donne lieu à un effort au collage. Lorsque l'on désire décoller le corps de l'embase, une impulsion de courant crée une induction opposée à celle produite par l'aimant permanent annulant en théorie l'effort de collage. Toutefois, en raison des flux de fuite, on n'obtient jamais l'annulation complète de la force et il reste un effort rémanent [18].

II.11.4. Electroaimants porteurs.

Ces appareils sont des électroaimants utilisés pour le maintien des charges ayant des qualités ferromagnétiques, dans le but de les transportés, et ils peuvent atteindre des puissances de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts et un diamètre de 1 à 1,5 mètres. Le régime nominal est caractérisé par l'ensemble des grandeurs électriques et mécaniques attribuées à un appareil électromagnétique pour définir son fonctionnement dans des conditions spécifiques indiquées sur la plaque signalétique. Rappelant que le courant nominal est défini comme celui traversant l'enroulement à une température de 20°C sous la tension nominale. La puissance nominale correspond

à la tension nominale et au courant nominale, elle est souvent appelée puissance à 20°C et notées P_{20} par opposition, la puissance consommée lorsque l'enroulement atteint une température d'équilibre s'appelle puissance à chaud [18].

II.12.Caractéristiques mécaniques.

II.12.1.La force.

La *force électromagnétique brute* est la force mécanique produite par l'électroaimant dans le sens de la course, après réduction de la valeur du frottement interne. Il est également défini comme *force de maintien* la valeur de l'effort produit par un électroaimant dont l'armature mobile est au collage. *La force rémanente* et la force de maintien qui subsiste après une coupure de courant ; elle est donc due au flux de l'induction rémanente, elle est liée à la qualité du matériau utilisé, au champ maximal établi dans le circuit magnétique et surtout à l'entrefer résiduel. En général on la réduit considérablement, dans les électroaimants à courant continu par l'adjonction d'une rondelle amagnétique de quelque dixième de millimètre d'épaisseur dont l'effet est d'augmenter considérablement (de l'ordre de 3 à 4 fois) la reluctance du circuit magnétique au collage et, par conséquent, de diminuer le flux rémanent.

II.12.2.La course.

La norme définit la position de *départ de la course* comme étant la position occupée par l'armature mobile lorsqu'elle commence sa course et dans laquelle elle revient après le rappel. La position de *fin de la course* est déterminée par la butée de l'armature mobile contre la culasse, éventuellement par l'intermédiaire de la rondelle anti-rémanence. En pratique on parle plus souvent de position de l'armature à *l'appel* et au *collage*, la distance séparant ces deux positions étant appelée *course* δ .

II.13.Caractéristiques force magnétique-course.

L'allure générale des caractéristiques, sur la Fig.I.12, est définie par le profil des formes polaires, la hauteur de la caractéristique est fonction des ampèretours magnétisants, et donc, en pratique, de la puissance active dissipable par l'appareil. Ces courbes caractéristiques peuvent avoir des allures différentes. La courbe I sur la Fig. I.12 constitue une caractéristique usuellement appelée descendante, elle est recherchée pour les électroaimants proportionnels afin d'assurer la plus grande stabilité. En effet si la caractéristique du ressort est représentée par la droite IV sur la Fig.I.13, le meilleur

compromis entre la stabilité et la plage de fonctionnement est obtenu pour une caractéristique I présentant un angle important avec la droite IV, une petite variation Δi du courant entraînera un déplacement de la caractéristique en I' et un déplacement de l'armature mobile de $\Delta\delta$.

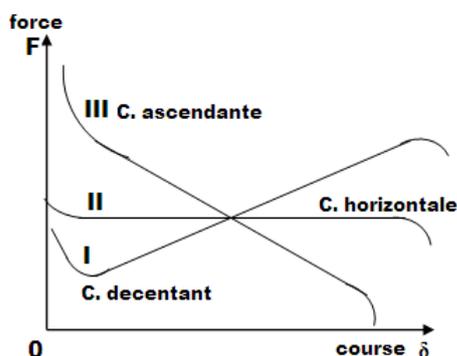


Fig. II.12. Caractéristique de la force magnétique $F(\delta)$ [18].

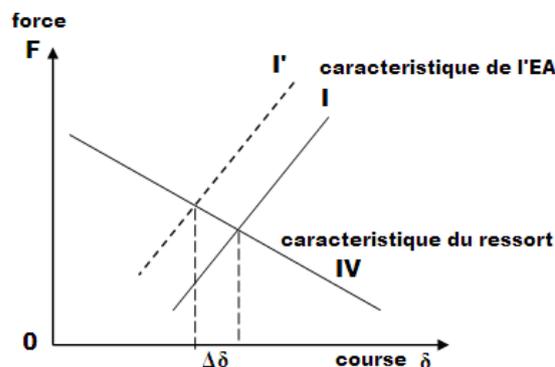


Fig. II.13. Caractéristique descendante électroaimant proportionnel [18].

La stabilité la plus grande serait obtenue avec une caractéristique I proche de la verticale, mais alors la plage de fonctionnement serait très réduite. Les caractéristiques horizontales, (allure de la courbe II de la Fig.I.12.), sont recherchées quand la fonction de l'appareil est de vaincre un effort constant sur une certaine course ; le cas le plus courant étant représenté par la levée d'un poids. Les caractéristiques ascendantes, (courbe III de la Fig.I.12.), ont pour application la commande de systèmes munis de ressorts de rappel, l'appareil et le ressort sont choisis de manière à ce que les deux caractéristiques soient sensiblement parallèles, de sorte que l'accélération du mouvement soit sensiblement constante. Il est important de ne pas perdre de vue que l'énergie se transformera en énergie potentielle si l'armature bonde un ressort et, le solde, en énergie cinétique [18].

II.14. Caractéristiques dynamiques.

On appelle *durée de mise sous tension*, l'intervalle de temps entre la fermeture et l'ouverture du circuit d'excitation et *durée de repos* le délai entre l'ouverture et la fermeture du circuit d'excitation. La *durée d'un cycle* (T) est la somme de la durée de mise sous tension et de la durée de repos, le *facteur de marche* (FM) est le rapport de la durée totale des mises sous tension à la durée totale des cycles ; il s'exprime généralement en pourcentage.

II.14.1. Temps de réponse d'un électroaimant.

Fermons un circuit électrique d'alimentation à tension constante sur un électroaimant à courant continu et relevons sur un oscilloscope la valeur du courant dans le bobinage en fonction du temps. Sur la Fig.I.14, sont indiquées les valeurs du courant dans le bobinage pendant le déplacement de l'armature mobile en fonction du temps.

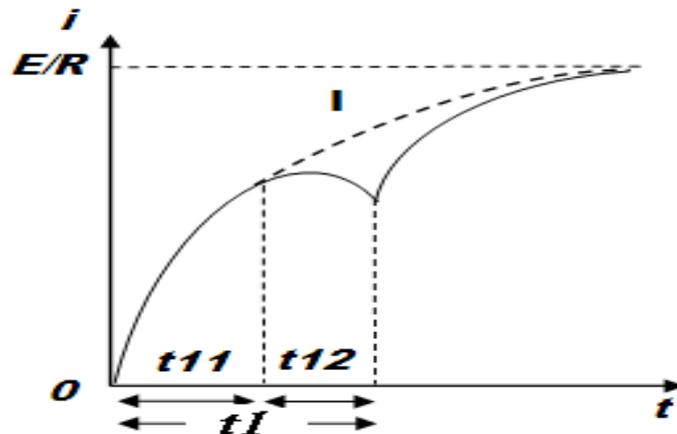


Fig. II.14. Temps de repense d'un électroaimant lors de la mise sous tension [18].

Pendant un premier délai (t_{11}), on observe la montée en courant due à une tension constante E appliquée à un circuit (R, L_{app}). Dès que le courant crée un flux suffisant pour imprimer à l'armature mobile un effort capable de vaincre les forces résistantes, il apparaît une accélération de l'armature mobile. Cette variation de position entraîne une augmentation de l'inductance du circuit magnétique qui provoque le plus souvent une chute de courant. Lorsque l'armature parvient au collage, l'inductance prend une valeur $L_{col} > L_{app}$ de sorte que le courant augmente mais plus lentement que si le circuit magnétique était resté ouvert. On remarque que la durée t_{12} du mouvement de l'armature mobile ainsi que sa loi de déplacement en fonction du temps dépend essentiellement de la nature des efforts existants qui lui sont appliqués [18].

On appelle *retard de réaction* (t_{11}) l'intervalle de temps entre l'instant de la fermeture du circuit d'excitation et le début du mouvement de l'armature mobile, la *durée du mouvement* (t_{12}) est l'intervalle de temps compris entre le début du mouvement de l'armature quittant sa position de départ et la fin de course. La *durée d'attraction* (t_I) est la somme du retard de réaction et de la durée du mouvement.

Si la bobine est alimentée par une source de courant continu et que la coupure du courant se réalise entre la source et la bobine, on pourra constater sur l'oscilloscope

que la tension va devenir très brusquement et fortement négative ; en effet, en raison de la loi de Lenz, il va se créer aux bornes du dispositif de coupure une tension qui s'opposera aux variations de flux. Cette surtension se reporte aux bornes de l'appareil de coupure et est suffisante pour ioniser l'air entre les deux faces de l'interrupteur, de sorte que la résistance de l'air diminue et, en raison de la forte tension, il y circule un arc électrique. Dès que cette décharge est terminée, il n'y a plus de courant qui circule dans la bobine de sorte que l'armature revient à sa position d'appel suivant une loi dépendant uniquement des forces mécaniques appliquées sur elle, (Fig. I.15).

On appelle *retard à la retombée* (t_{21}) l'intervalle de temps compris entre l'instant de coupure du circuit d'excitation et le début du mouvement de l'armature, (Fig. I.16.) ; la *durée de retour* (t_{22}) est l'intervalle de temps compris entre le début du mouvement de retour de l'armature et le moment où celle-ci est revenue à son point de départ ; les efforts d'ordre électromagnétiques ne sont pas alors très importants. *La durée de rappel* (t_2) est la somme du retard à la retombée et de la durée de retour.

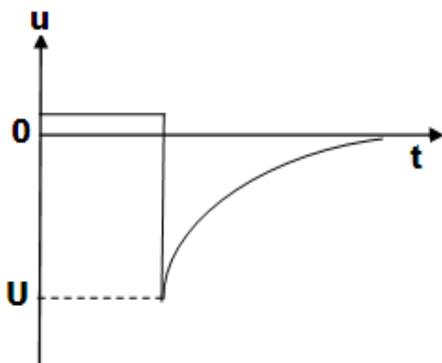


Fig. II.15. Oscillogramme de coupure sur tension continue.

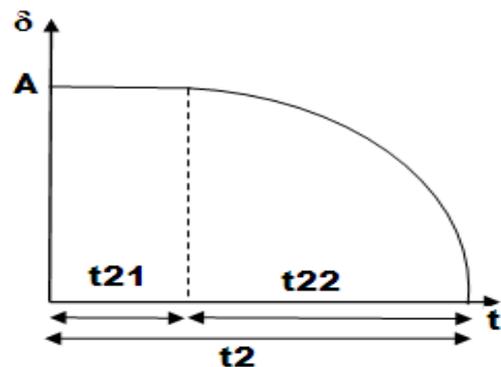


Fig. II.16. Temps de réponse lors de la mise hors tension.

II.14.2. Constante de temps à l'appel.

Il est intéressant de connaître qualitativement le sens de la variation de la constante de temps ($\tau=L/R$) suivant les conditions de fonctionnement. A froid le retard de réaction (t_{11}) augmente en raison de la valeur plus faible de la résistance ; l'augmentation de la constante de temps est d'environ 40% entre un bobinage à 20°C et un bobinage à 125°C. On remarque que si l'armature est au collage, l'énergie magnétique potentielle est fonction de (L_{col}), donc de (τ_{col}), c à d la constante de temps du circuit électromagnétique est liée à sa capacité à emmagasiner de l'énergie.

II.14.3.Fréquence de manœuvre.

La *fréquence de manœuvre* est le nombre de cycle autorisé par heure. La fréquence de manœuvre maximale que l'on puisse mécaniquement atteindre se définit en connaissant la somme des durées d'attraction t_1 et de rappel t_2 . Ce cycle correspond un facteur de marche limite ($FM_{limite} = \frac{t_1}{(t_1 + t_2)}$)

Cependant, au voisinage de la fréquence maximale, le fonctionnement est de nature transitoire, notamment le courant, de sorte que la puissance injectée est inférieure à la puissance instantanée dissipable avec le facteur de marche limite. Cet écart permet d'adopter un facteur de marche pratique (*évalué expérimentalement*) supérieur au facteur de marche limite ($FM_{pratique} = (1/\chi) \cdot FM_{limite}$) ; ($0 < \chi < 1$).

II.15.Suralimentation des électroaimants.

Lorsque un électroaimant est utilisé en position de collage pendant un temps relativement long et que la fréquence de manœuvre est faible, il est alors possible de réaliser des économies en réduisant la taille de l'appareil et sa consommation. En effet, il faudrait normalement utiliser un électroaimant de FM 100%, et dont les dimensions seraient imposées par l'effort à l'appel dont on a besoin. Au lieu de cette solution, il est souvent possible de reporter son choix sur un électroaimant de plus petite taille, équipé d'une bobine a facteur de marche suffisamment faible pour obtenir l'effort à l'appel nécessaire.

Lorsque l'armature mobile parvient au collage, on met en série une résistance dite résistance d'économie dont le but est de limiter la puissance dans l'électroaimant à celle qu'il est capable de dissiper. En courant alternatif, et toujours à la condition que le temps de maintien au collage soit assez long et que la fréquence de manœuvre soit faible, il est possible grâce à la technologie électronique, de faire varier l'angle de retard d'amorçage avec un pont de thyristor, afin de ne pas dépasser la puissance admissible au collage.

II.16.Concluion.

Dans ce chapitre on a passé en revue quelques types existants de pompes péristaltiques linéaires suivant la nature des actionneurs qui leurs sont associés. Le choix d'un type d'actionneur dépend de l'application. La puissance développée, l'encombrement disponible et l'énergie nécessaire sont les éléments décisifs dans ce

choix. Le prototype de la pompe péristaltique développé, dans le cadre de ce mémoire, a été conçu pour vérifier la faisabilité de l'idée. On a réalisé une structure lisible alimentée par une basse tension continue. Quelques paramètres des électroaimants sont cités avec des courbes illustratives.

Dans ce travail on a opté pour des actionneurs à base d'électroaimant étrangleurs pour des raisons de puissances. La pompe est composée de six actionneurs montés en série et associée à une commande électronique. De plus amples détails seront donnés et traités dans le chapitre IV.

CHAPITRE III
FORMULATION
MATHEMATIQUE ET
MODELISATION
NUMERIQUE

CHAPITRE III

Formulation Mathématique et Modélisation Numérique

Dans l'étude de tout phénomène physique, l'établissement des équations qui régissent le phénomène concerné constitue la première approche au problème. De ce fait, il est plus judicieux de commencer par poser les équations mathématiques caractérisant les phénomènes physiques que nous désirons traiter, pour procéder ensuite au développement et à l'étude des paramètres de couplage à savoir les forces magnétiques.

Ce chapitre fera l'objet d'une description du modèle mathématique utilisé dans le calcul du champ magnétique, ainsi que les équations utilisées pour la modélisation des phénomènes électromagnétiques. Pour cela, on présente les équations locales qui décrivent les champs et la formulation en potentiel vecteur magnétique. Ces équations seront aussi développées dans le cas particulier des problèmes caractérisant notre dispositif.

Nous adoptons les conventions suivantes :

- Les grandeurs vectorielles sont écrites en caractères gras.
- Les grandeurs scalaires en caractères standards.

III.1. Equations électromagnétiques de Maxwell

Grâce à James Clerk Maxwell nous possédons, depuis plus d'un siècle, les expressions des équations qui régissent les phénomènes électromagnétiques. Ces équations doivent être prises en compte en combinaison avec les expressions des lois constitutives des matériaux utilisés. Quatre grandeurs vectorielles caractérisent le champ électromagnétique [28,32]. Ces grandeurs, qui dépendent de l'espace et du temps sont le champ électrique **E**, le champ magnétique **H**, l'induction magnétique **B** et l'induction électrique **D**. Ces quatre grandeurs sont régies par les équations de Maxwell qui traduisent leur interdépendance. Elles sont données par :

$$\text{rot}(\mathbf{E}) = -\partial\mathbf{B}/\partial t \quad (3.1)$$

$$\text{rot}(\mathbf{H}) = \mathbf{J} + \partial\mathbf{D}/\partial t \quad (3.2)$$

$$\text{div}(\mathbf{B}) = 0 \quad (3.3)$$

$$\text{div}(\mathbf{D}) = \rho \quad (3.4)$$

Des relations supplémentaires caractérisant les différents milieux doivent être ajoutées aux équations précédentes. Ainsi, pour les milieux isotropes, nous avons :

Les lois de comportement du milieu :

$$\mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E} \quad (3.5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (3.6)$$

Les densités des courants sont données par :

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_{ind} \quad (3.7)$$

$$\mathbf{J}_{ind} = \sigma \mathbf{E} + \sigma (\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}) \quad (3.8)$$

Le terme $\sigma \mathbf{E}$ exprime le courant résultant du champ électrique \mathbf{E} et le terme $\sigma (\mathbf{v} \wedge \mathbf{B})$ exprime le courant résultant du mouvement.

A la limite de séparation de deux milieux correspondant respectivement aux indices 1 et 2, il existe les conditions suivantes :

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{B}_1 = \mathbf{n} \cdot \mathbf{B}_2 \quad (3.9)$$

$$\mathbf{E}_1 \wedge \mathbf{n} = \mathbf{E}_2 \wedge \mathbf{n} \quad (3.10)$$

$$\mathbf{H}_1 \wedge \mathbf{n} - \mathbf{H}_2 \wedge \mathbf{n} = \mathbf{K} \quad (3.11)$$

\mathbf{n} : vecteur normal à la surface de séparation entre les deux milieux 1 et 2 ;

\mathbf{K} : densité surfacique d'une nappe de courant entre les deux milieux.

Les relations (3.9) et (3.10), montrent respectivement la continuité de la composante normale de l'induction magnétique \mathbf{B} et celle de la composante tangentielle du vecteur champ électrique, tandis que la relation (3.11) représente la discontinuité des composantes tangentielles du champ magnétique \mathbf{H} .

L'ensemble des équations que nous avons présentées jusque là, décrivent globalement tous les phénomènes électromagnétiques, mais actuellement et dans la plus part des cas, nous ne pouvons les résoudre directement.

D'autre part, et suivant les dispositifs

étudiés, certains phénomènes deviennent négligeables ; par conséquence, les équations se découpent pour donner lieu à des modèles plus simples.

III.2. Hypothèses simplificatrices.

III.2.1. Les courants de déplacements

Les structures électromagnétiques que nous étudions peuvent être caractérisées par les mêmes propriétés diélectriques que celles du vide. D'autre part, les fréquences de travail sont relativement faibles. Dans ces conditions, les courants de déplacement sont faibles, et nous pouvons alors les négliger.

III.2.2. Les courants induits

Le terme \mathbf{J} regroupe l'ensemble des densités de courants. Ces courants peuvent être des courants induits (dans l'inducteur ou la charge) ou imposés (dans l'inducteur). On peut, de manière formelle, transformer l'équation (3.2) en :

$$\text{rot}(\mathbf{H}) = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_{\text{ind}} \quad (3.12)$$

Avec les hypothèses ainsi formulées, les équations de Maxwell à résoudre sont :

$$\text{rot}(\mathbf{E}) = -\partial\mathbf{B}/\partial t \quad (3.13)$$

$$\text{rot}(\mathbf{H}) = \mathbf{J}_s \quad (3.14)$$

$$\text{div}(\mathbf{B}) = 0 \quad (3.15)$$

$$\text{div}(\mathbf{D}) = 0 \quad (3.16)$$

Sachant que:

$$\mathbf{B} = \mu\mathbf{H} \quad (3.17)$$

$$\mathbf{J} = \mathbf{J}_s + \mathbf{J}_{\text{ind}} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{J}_{\text{ind}} = \sigma \mathbf{E} + \sigma (\mathbf{v} \wedge \mathbf{B}) \quad (3.29)$$

\mathbf{J}_s est imposé dans l'inducteur et nul ailleurs.

III.3. Formulation utilisant le potentiel vecteur magnétique

Comme formulé précédemment, le système d'équations (3.13), (3.14), (3.15) et (3.16) contient beaucoup d'inconnues et présente des difficultés pour une résolution numérique. L'utilisation du potentiel magnétique vecteur \mathbf{A} et du potentiel scalaire électrique φ permet de condenser et de réduire le nombre d'inconnues.

Ces méthodes sont maintenant bien connues et largement utilisées dans le domaine de calcul du champ électromagnétique.

III.4. Techniques de discrétisations.

De plus en plus la précision est demandée dans les procédés de conception et d'analyse des machines électriques, c'est pourquoi des modèles numériques appropriés sont souvent adoptés pour le couplage des champs électriques et magnétiques. Des méthodes numériques basées, essentiellement, sur la détermination de la distribution des champs électriques et magnétiques dans la structure à étudier sont utilisées pour résoudre les équations. Une solution analytique de ces équations est souvent impossible ceci est dû à la complexité géométrique de la machine et aux caractéristiques non linéaires de ses matériaux. Dans la majorité des cas la solution numérique est l'unique recours. La solution numérique transforme le système d'équations différentielles en un système d'équations algébriques où le domaine d'étude et les conditions aux limites sont bien définis. La solution du système d'équations algébrique par une méthode numérique souvent itérative, donne la valeur du champ à chaque point 'nœud' du domaine [29], [31].

III.5. Méthodes de discrétisations.

L'ensemble des étapes de résolution des équations différentielles par la voie numérique s'appelle méthode de discrétisation. La mise en œuvre d'une méthode numérique de calcul des champs débouche inévitablement sur un logiciel qui lui est associé, on peut écrire pour chaque problème un programme qui tient compte de sa géométrie, ses propriétés physiques et ses conditions aux limites. Il existe aujourd'hui des logiciels généraux appropriés nommés techniques de la CAO dont les structures informatiques sont adaptées aux traitements d'un grand nombre de problèmes d'un même type tels que PDETOOL sous MATLAB, ANSYS, MEGA...

La mise en équations du problème physique constitue la phase préliminaire à toute prédiction des phénomènes mis en jeu. En électromagnétisme, les équations décrivant la physique du problème sont connues sous le nom d'équations de Maxwell. Associées aux lois expérimentales du comportement des milieux, elles apportent la connaissance complète des grandeurs physiques mises en œuvre. Le traitement numérique d'un problème d'équations aux dérivées partielles (électromagnétique – thermique ou couplé) comprend trois étapes essentielles, Fig.III.1.

- 1-Description du problème (Géométrie, caractéristiques physiques, maillage, limites du domaine d'étude...).
- 2-Mise en œuvre de la méthode numérique de simulation (Différences finies, éléments finis, volumes finis, intégrales de frontière...) plus une méthode itérative.
- 3-Vérification, visualisation et interprétation des résultats de la simulation (Courbes et graphes 2D et 3D).

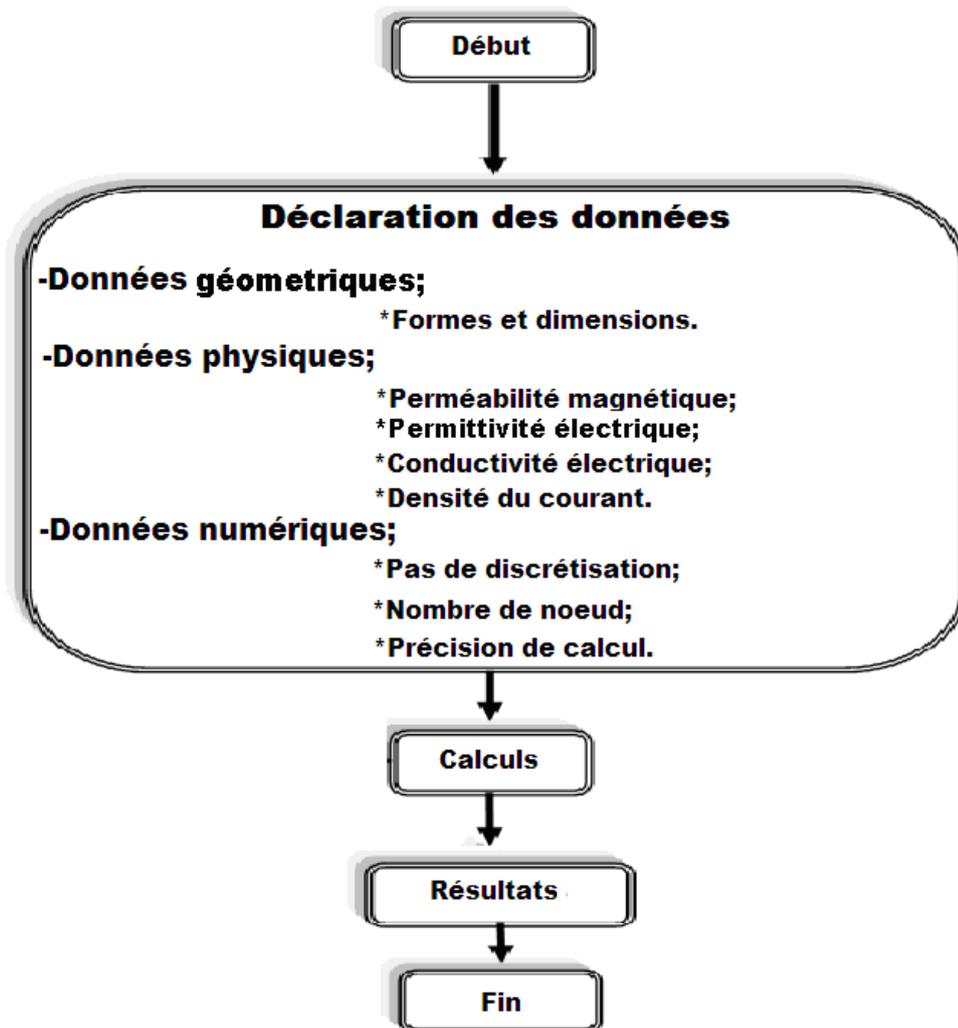


Fig.III.1. Organigramme d'une méthode numérique de simulation.

III.5.1.Méthode des éléments finis.

La méthode des éléments finis consiste à repartir le domaine d'étude en zones élémentaires (éléments finis) et à représenter l'inconnue par une approximation polynomiale d'ordre un ou deux dans chacune de ces zones, puis, l'erreur due à l'approximation doit être minimisée. Cette méthode est très performante dans les géométries complexes mais elle nécessite un espace mémoire important.

III.5.2.Méthode des différences finis.

Cette méthode est structurée sur la discrétisation du domaine d'étude suivant le développement limité de la série de Taylor en chaque nœud du maillage, ainsi l'équation différentielle est transformée en équation algébrique en chacun des nœuds. La distribution de la grandeur en question est obtenue par la résolution du système d'équation algébrique.

III.5.3.Méthode des intégrales de frontière.

Cette méthode fait transférer le maillage aux limites du domaine d'étude, et ainsi la détermination des valeurs de l'inconnu à tout point du domaine est déduite des valeurs calculées aux frontières. La méthode des intégrales de frontière nécessite de l'espace mémoire et un temps relativement long comparé à d'autres méthodes.

III.5.4.Méthode des volumes finis.

La méthode des volumes finis est une technique numérique de discrétisation, elle permet d'avoir des solutions même avec des champs variables dans le temps et des matériaux hétérogènes, ou non linéaires. Par cette méthode, tout le domaine d'analyse est divisé en sous domaines élémentaires nommés volume de contrôle Fig.III.2, et les équations du champ sont appliquées à chacun d'eux [29], [31].

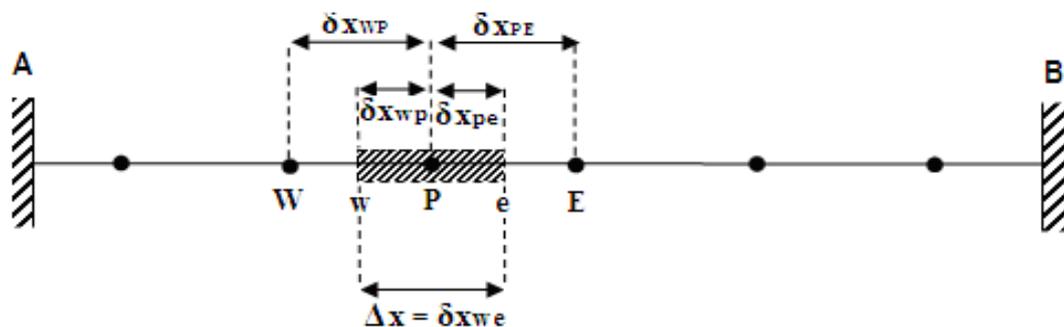


Fig.III.2. Discrétisation d'un domaine unidimensionnel par la MVF.

III.5.5.Etapes dans l'application de la méthode des volumes finis.

Le premier pas dans l'application de la méthode des volumes finis est la répartition (maillage), par une grille, du domaine d'étude en un nombre fini de cellules. Dans un domaine bidimensionnel chaque cellule ou volume élémentaire de contrôle contient un

nœud principal **P** et des nœuds adjacents Est (**E**), West (**W**), Nord (**N**) et Sud (**S**) , les faces de séparation sont respectivement **e**, **w**, **n** et **s**.

Le second pas est l'intégration des équations différentielles à travers les volumes élémentaires de contrôle pour arriver finalement à une discrétisation des équations qui gouvernent les variations dans chaque point nodal.

Le dernier pas est la résolution du système d'équations algébriques pour obtenir la distribution de la grandeur physique mise en œuvre dans chaque nœud par une méthode numérique convenable.

III.5.6. Exemple illustratif unidimensionnel de la méthode des volumes finis.

Considérant la diffusion, dans l'état permanent, d'une grandeur ϕ dans un domaine unidimensionnel Fig.III.2, ce procédé est gouverné par l'équation :

$$\frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) + S = 0 \quad (3.18)$$

Où

Γ est le coefficient de diffusion de la grandeur ϕ et S représente le terme source. Les valeurs de ϕ aux limites du domaine ϕ_A et ϕ_B sont connues. Ce type de procédé peut décrire par exemple le transfert de chaleur dans une tige métallique.

Pour un volume de contrôle tel que défini sur la Fig.III.2, on a :

$$\int_{\Delta V} \frac{d}{dx} \left(\Gamma \frac{d\phi}{dx} \right) + \int_{\Delta V} S dV = \left(\Gamma.A \frac{d\phi}{dx} \right)_e + \left(\Gamma.A \frac{d\phi}{dx} \right)_w + \bar{S}.\Delta V = 0 \quad (3.19)$$

Où

A est la section de la face du volume de contrôle, ΔV le volume et \bar{S} la valeur moyenne de la source S . Pour pouvoir dériver des de l'équation de discrétisation on a besoin du coefficient de diffusion Γ et du gradient $(d\phi/dx)$ aux interfaces Est (e) et West (w). Une approximation linéaire de Γ aux interfaces semble être la plus simple ; pour une grille uniforme et linéaire on a :

$$\Gamma_w = (\Gamma_w + \Gamma_p)/2 \quad (3.20)$$

$$\Gamma_e = (\Gamma_p + \Gamma_e)/2 \quad (3.21)$$

$$\left(\Gamma_e \cdot A \frac{d\varphi}{dx} \right)_e = \Gamma_e \cdot A_e (\varphi_E - \varphi_P) / \delta x_{PE} \quad (3.22)$$

$$\left(\Gamma_w \cdot A \frac{d\varphi}{dx} \right)_w = \Gamma_w \cdot A_w (\varphi_P - \varphi_W) / \delta x_{WP} \quad (3.23)$$

Dans des situations pratiques, le terme source S peut être fonction de la variable φ ; dans ce cas le terme source S est approximé par une forme linéaire.

$$\bar{S} \cdot \Delta V = S_u + S_p \cdot \varphi_P \quad (3.24)$$

Après remplacement et arrangement de l'équation (3.19) on aura.

$$\left(\frac{A_e \cdot \Gamma_e}{\delta \cdot X_{PE}} + \frac{A_w \cdot \Gamma_w}{\delta \cdot X_{PE}} - S_p \right) \varphi_P = \left(\frac{A_w \cdot \Gamma_w}{\delta \cdot X_{WP}} \right) \varphi_W + \left(\frac{A_e \cdot \Gamma_e}{\delta \cdot X_{PE}} \right) \varphi_E + S_u \quad (3.25)$$

L'équation (3.25) peut être écrite sous une forme plus compacte.

$$a_p \cdot \varphi_P = a_w \cdot \varphi_W + a_e \cdot \varphi_E + S_u \quad (3.26)$$

Où

$$a_e = \left(\frac{A_e \cdot \Gamma_e}{\delta \cdot X_{PE}} \right) \quad (3.27)$$

$$a_w = \left(\frac{A_w \cdot \Gamma_w}{\delta \cdot X_{WP}} \right) \quad (3.28)$$

$$a_p = a_w + a_e - S_p \quad (3.29)$$

Les équations (3.24) et (3.26) représentent la forme de discrétisation de l'équation (3.18). La discrétisation par la méthode des volumes finis offre une signification physique réaliste, il est stipulé que le flux entrant le volume de contrôle par la face \mathbf{e} (Fig.III.2) moins le flux sortant par la face \mathbf{w} est égal au flux généré, c'est une balance de conservation du flux dans le volume de contrôle [29].

III.6. Conditions aux limites.

Après avoir établi les équations aux nœuds internes, il va falloir définir l'état de la grandeur mise en œuvre (\mathbf{A} : vecteur potentiel magnétique) aux limites du domaine d'étude. Il existe deux façons d'introduire les conditions aux limites :

-Condition de DIRICHLET : Cette condition impose des valeurs de \mathbf{A} aux extrémités du domaine d'étude. Ces valeurs sont prises nulles par la considération de l'infini physique.

-Conditions de NEMANN : Elles sont utilisées dans le cas où le système à étudier présente des plans de symétrie. Le problème de NEMANN impose donc $(\partial\mathbf{A}/\partial n = 0)$ où n représente la normale au plans de coupe.

III.7. Application de la méthode des volumes finis à la pompe péristaltique.

Comme le système étudié présente une symétrie et pour des raisons de calcul (temps et capacité de stockage), le traitement en 2D d'un seul actionneur suffit et la méthodologie utilisée pour dériver les équations de discrétisation pour un domaine bidimensionnel peut être adoptée. L'équation différentielle qui décrit le potentiel vecteur \mathbf{A} de l'étrangleur est donnée par :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\left(\frac{\mathbf{1}}{\mu} \right) \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\left(\frac{\mathbf{1}}{\mu} \right) \cdot \left(\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) \right) = -j_{ex} \quad (3.30)$$

La discrétisation de cette équation par la méthode des volumes finis se fait dans un domaine comme indiqué sur la Fig.III.3. Le domaine d'étude est subdivisé par une grille en un nombre fini de sous domaine appelé volume fini ou volume de contrôle où chacun contient un nœud.

Dans le cas bidimensionnel le nœud principal P est entouré de quatre nœuds à savoir les nœuds W, E, S et N respectivement sur les faces ouest, est, sud et nord.

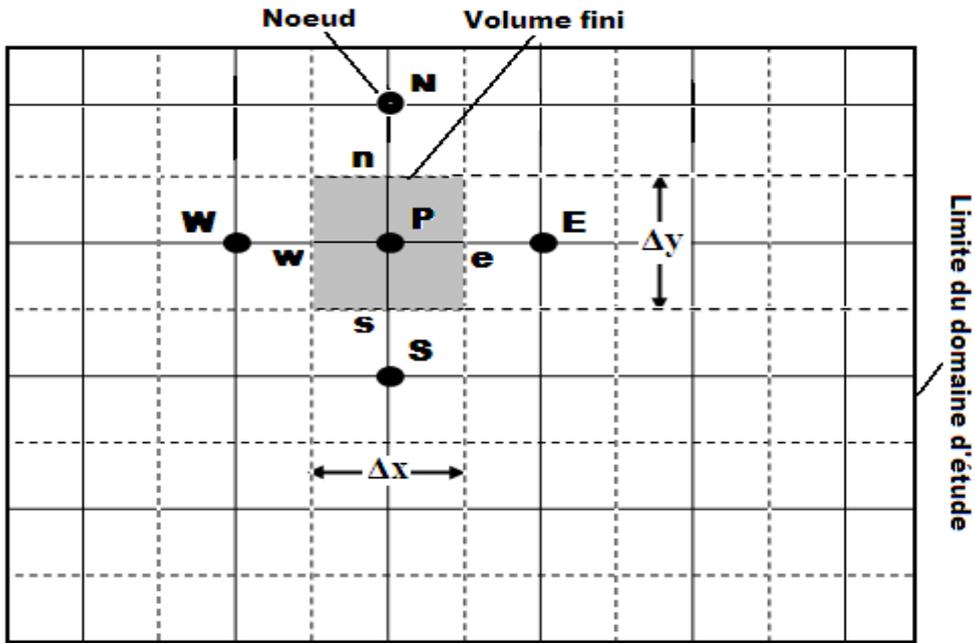


Fig.III.3. Discretisation d'un domaine en volumes de contrôles 2D.

Lorsque l'équation (3.30) est intégrée sur le volume de contrôle on obtient :

$$\iint_{x,y} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial y} \right) \right] dx dy = \iint_{x,y} (-J_{ex}) dx dy \quad (3.31)$$

$$\int_s^e \int_w^e \left(\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} \right) \right) dx dy + \int_s^e \int_w^e \left(\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial y} \right) \right) dx dy = \int_s^e \int_w^e (-J_{ex}) dx dy \quad (3.32)$$

$$\left(\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial x} \right)_w^e dx + \left(\frac{1}{\mu} \cdot \frac{\partial A}{\partial y} \right)_s^n dy = \left((-J_{ex})_w^e \right)_s^n dx dy \quad (3.33)$$

On a $(\partial A / \partial t) = 0$ car les actionneurs travaillent en tension continue à faible cadence de commutation et la variation du potentiel vecteur magnétique \mathbf{A} par rapport au temps peut être considérée comme nulle.

$$\left(\left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right)_e - \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial x} \right)_w \right) \Delta y + \left(\left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right)_s - \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A}{\partial y} \right)_n \right) \Delta x = -J_{ex} \Delta x \Delta y \quad (3.34)$$

$$\left(\frac{1}{\mu_e \cdot \delta x_e} (A_e - A_p) - \frac{1}{\mu_w \cdot \delta x_w} (A_p - A_w) \right) \Delta y + \dots$$

$$\left(\frac{1}{\mu_s \cdot \delta y_s} (A_s - A_p) - \frac{1}{\mu_n \cdot \delta y_n} (A_p - A_n) \right) \Delta x = -J_{ex} \Delta x \Delta y \quad (3.35)$$

$$- A_p \left(\Delta x \left(\frac{1}{\mu_s \cdot \delta y_s} + \frac{1}{\mu_n \cdot \delta y_n} \right) + \Delta y \left(\frac{1}{\mu_e \cdot \delta x_e} + \frac{1}{\mu_w \cdot \delta x_w} \right) \right) + A_n \cdot \frac{\Delta x}{\mu_n \cdot \delta y_n} + A_s \cdot \frac{\Delta x}{\mu_s \cdot \delta y_s} + \dots$$

$$A_e \cdot \frac{\Delta y}{\mu_e \cdot \delta x_e} + A_w \cdot \frac{\Delta y}{\mu_w \cdot \delta x_w} = -J_{ex} \cdot \Delta x \Delta y \quad (3.36)$$

L'équation algébrique finale peut s'écrire sous une forme simple et compacte :

$$a_p A_p = a_E \cdot A_e + a_W \cdot A_w + a_N \cdot A_n + a_S \cdot A_s + d \quad (3.37)$$

Où

$$a_E = \frac{\Delta y}{\mu_e \cdot \delta y_e} ; \quad (3.38)$$

$$a_W = \frac{\Delta y}{\mu_w \cdot \delta y_w} \quad (3.39)$$

$$a_N = \frac{\Delta y}{\mu_n \cdot \delta y_n} \quad (3.40)$$

$$a_S = \frac{\Delta y}{\mu_s \cdot \delta y_s} \quad (3.41)$$

$$d_p = J_{ex} \cdot \Delta x \cdot \Delta y \quad (3.42)$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S \quad (3.43)$$

III.8. Présentation et discussions des résultats de simulation.

Le potentiel vecteur magnétique obtenu par deux méthodes distinctes à savoir la méthode des volumes finis et la méthode de PDETOOL sous MATLAB montre une similitude dans la distribution en 2D avec un même ordre de grandeur comme indiqué sur Fig.III.4, et Fig.III.5, et ce pour une densité de courant de l'ordre de 3 A/mm^2 et un nombre de nœuds ($N_x=N_y= 10^3$). Il est bien clair, sur les figures Fig.III.4 et Fig.III.5, que le conduit est loin de l'influence des lignes équipotentielles du vecteur magnétique. La même similitude dans la distribution par les deux méthodes est indiquée dans les représentations en 3D sur les figures Fig.III.6, et Fig.III.7. Les figures Fig.III.8 et Fig.III.9 indiquent, respectivement, les répartitions du module potentiel vecteur magnétique suivant les axes vertical et horizontal, le potentiel vecteur magnétique suivant l'axe horizontal est pratiquement nul sauf aux extrémités. La figure Fig.III.12 indique les lignes équipotentielles du vecteur magnétique, obtenus par la méthode des volumes finis, à l'appel ; c à d juste au moment de l'excitation avant le début du mouvement de l'armature mobile. La figure Fig.III.13 montre l'allure des variations de l'induction magnétique moyenne à l'appel et au collage pour une excitation de 15V et un courant de 3A. La disparité dans les valeurs de l'induction magnétique pour une position donnée est due, essentiellement, à la variation dans la perméance du circuit magnétique de l'électroaimant étrangleur entre l'état initial à l'appel et l'état final au collage. Cette variation dans l'induction magnétique moyenne entre l'état d'appel et l'état de collage de l'électroaimant indique un changement dans le type ou la forme d'énergie, c'est à dire une part de l'énergie absorbée par l'électroaimant étrangleur et emmagasinée sous forme d'énergie magnétique est convertie en effort mécanique et exprimée par le mouvement de l'armature et de sa force d'écrasement.

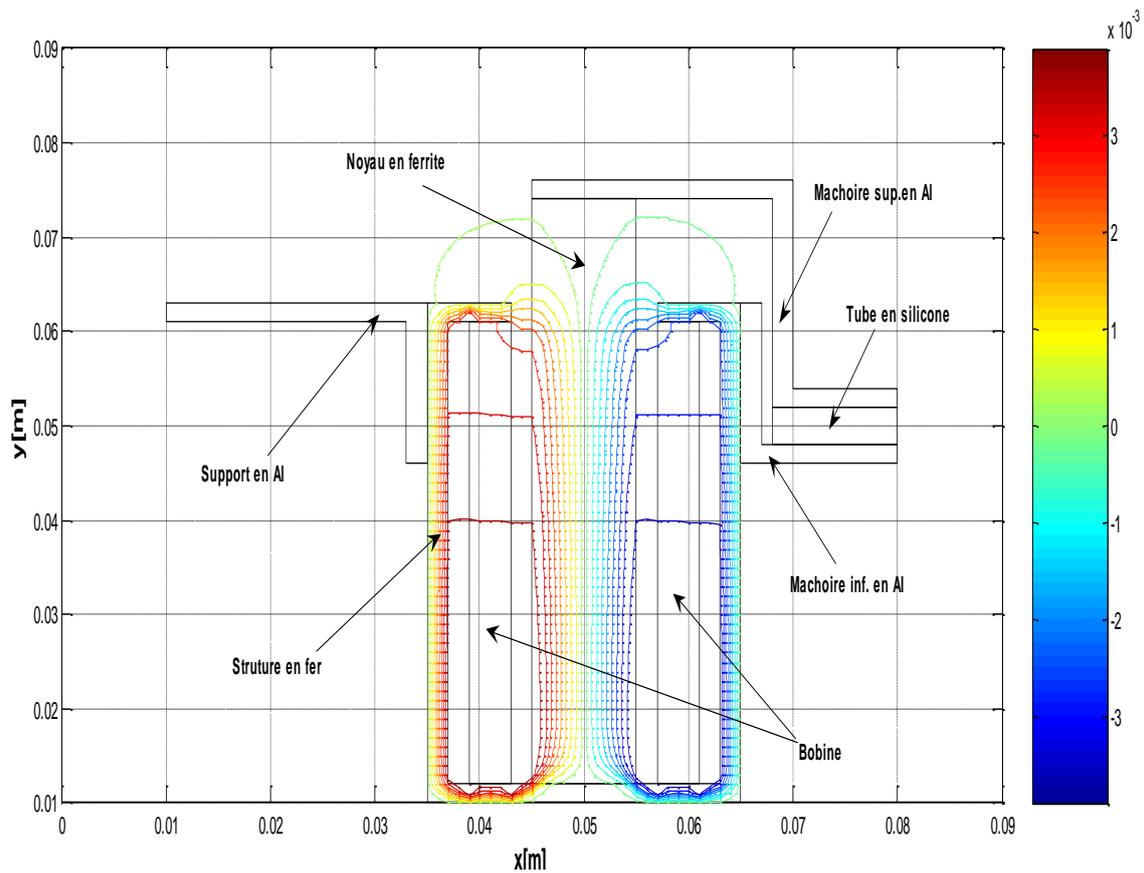


Fig.III.4. Distribution des lignes équipotentielle dans l'étrangleur au collage par la MVF.

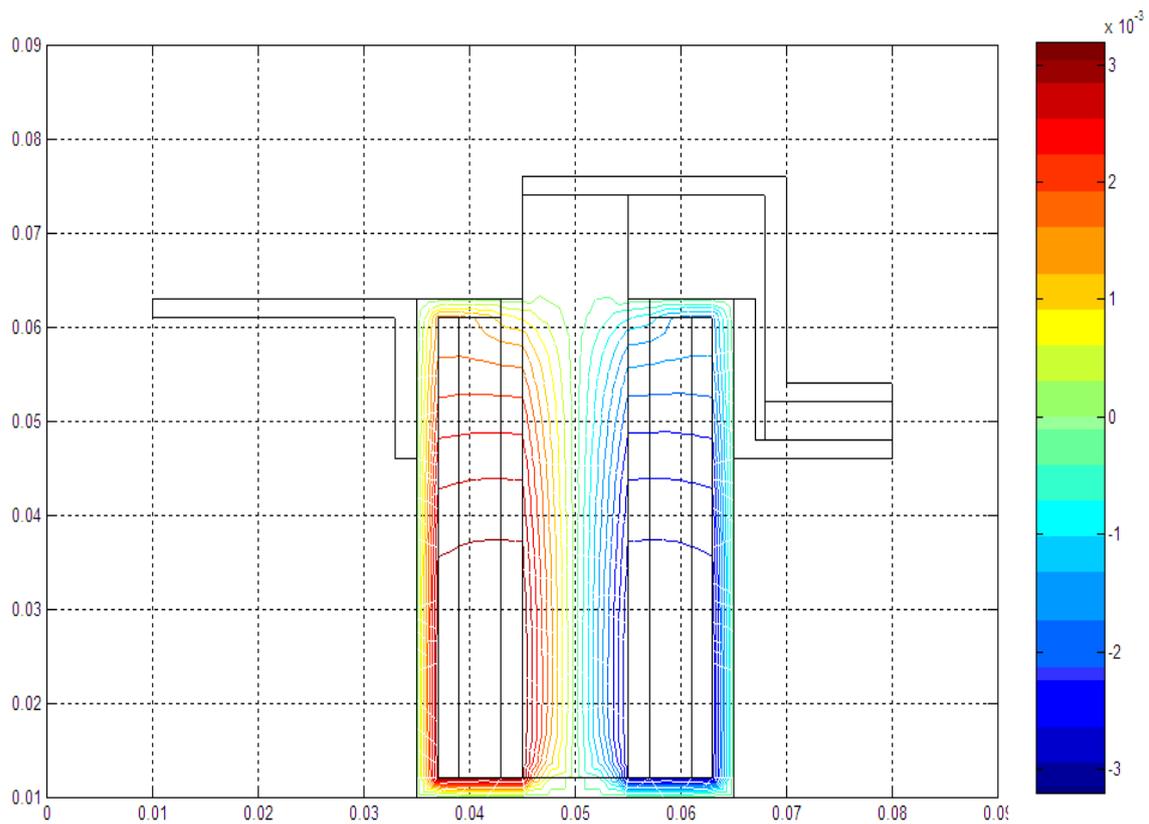


Fig.III.5. Distribution des lignes équipotentielle dans l'étrangleur au collage par PDETOOL.

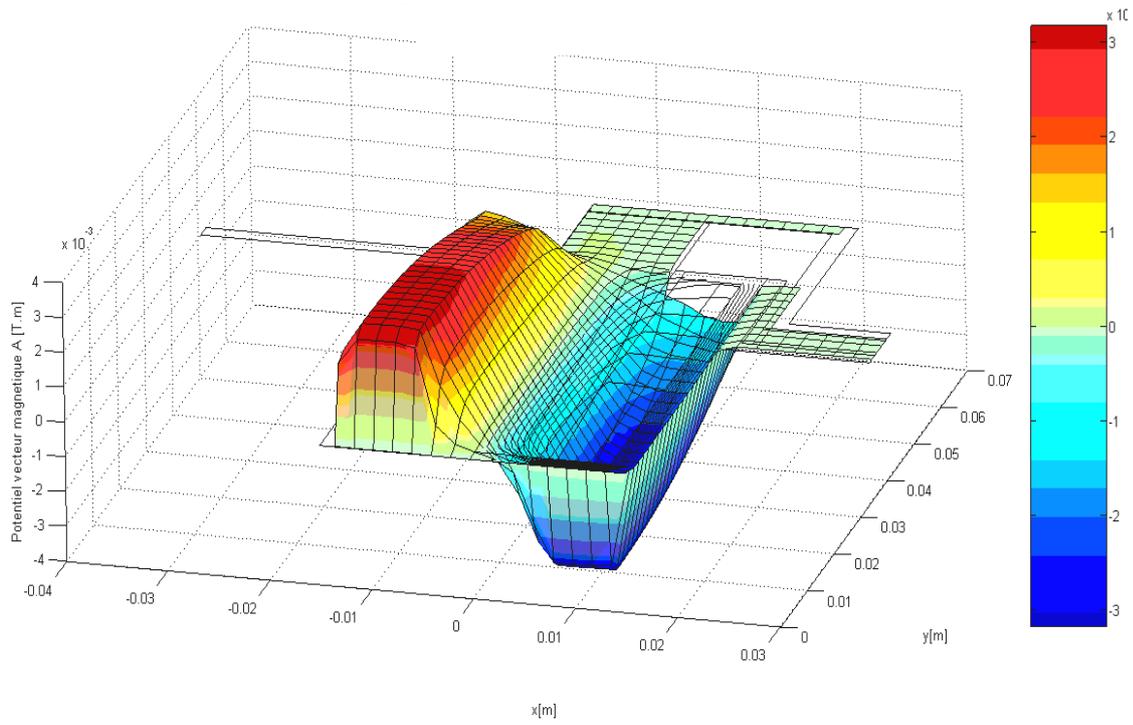


Fig.III.6. Potentiel vecteur magnétique en 3D par PDETOOL.

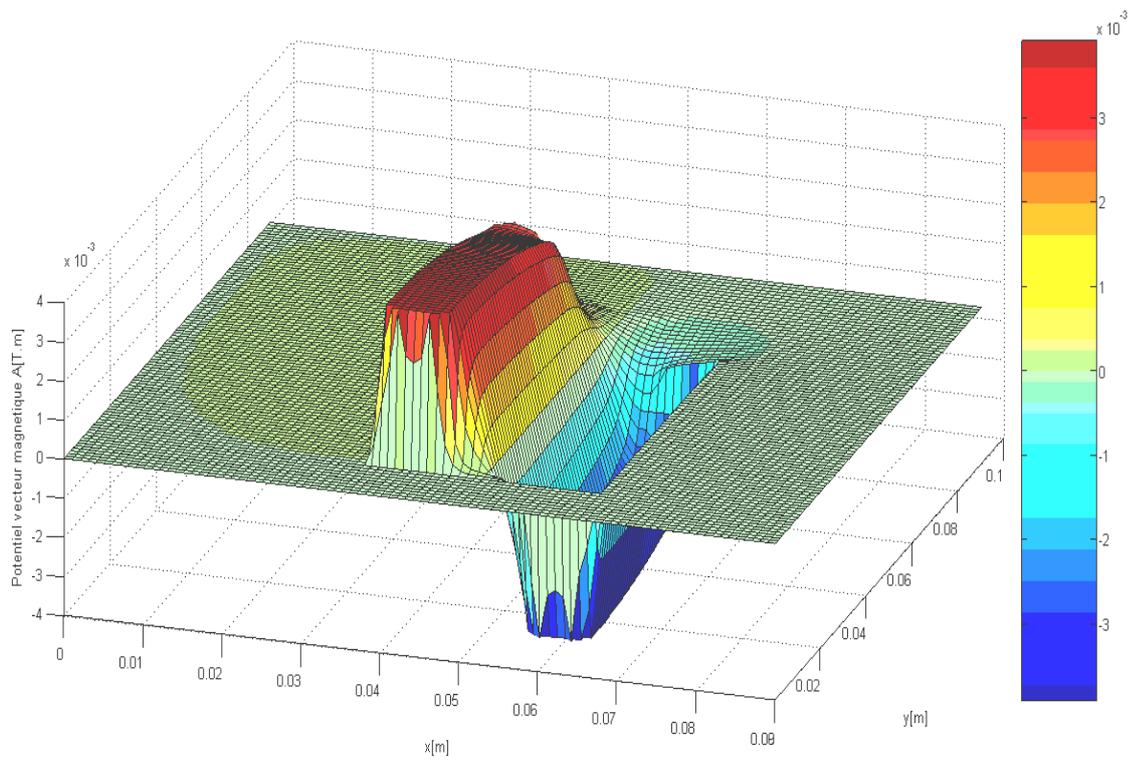


Fig.III.7. Potentiel vecteur magnétique en 3D par la MVF.

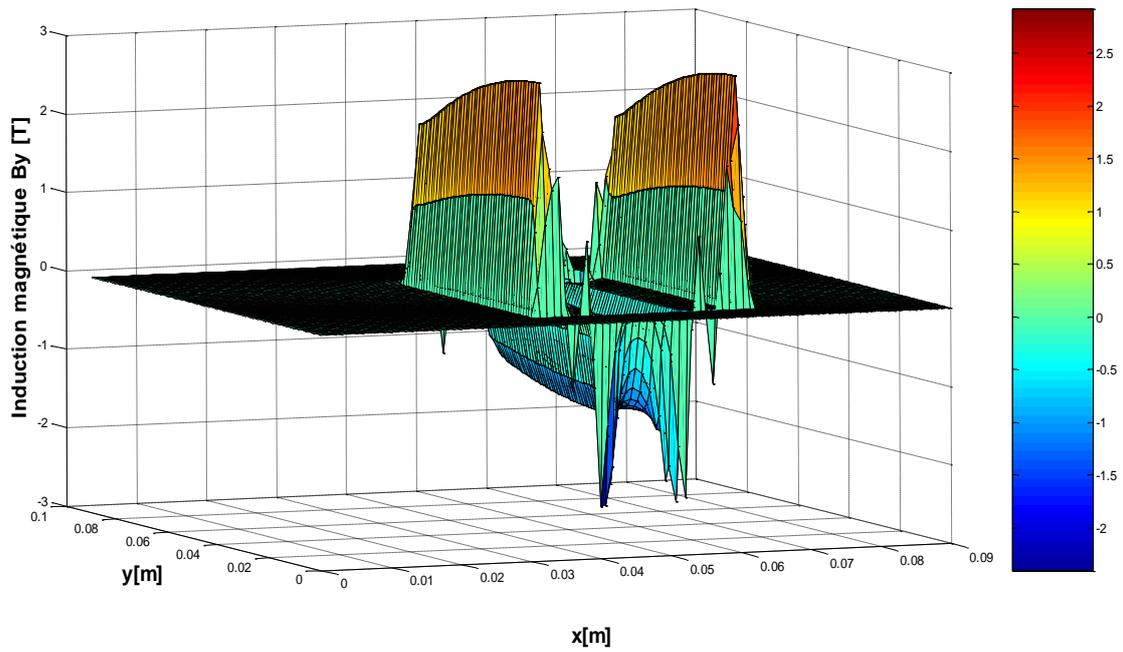


Fig.III.8. Induction magnétique verticale B_y .

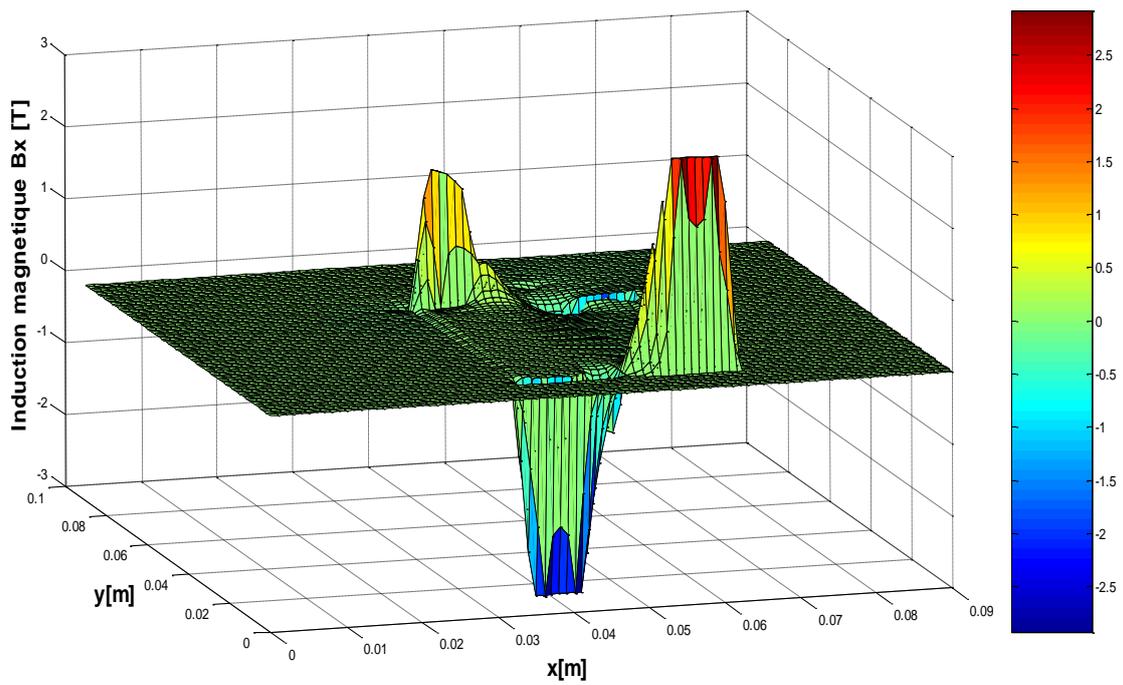


Fig.III.9. Induction magnétique horizontale B_x .

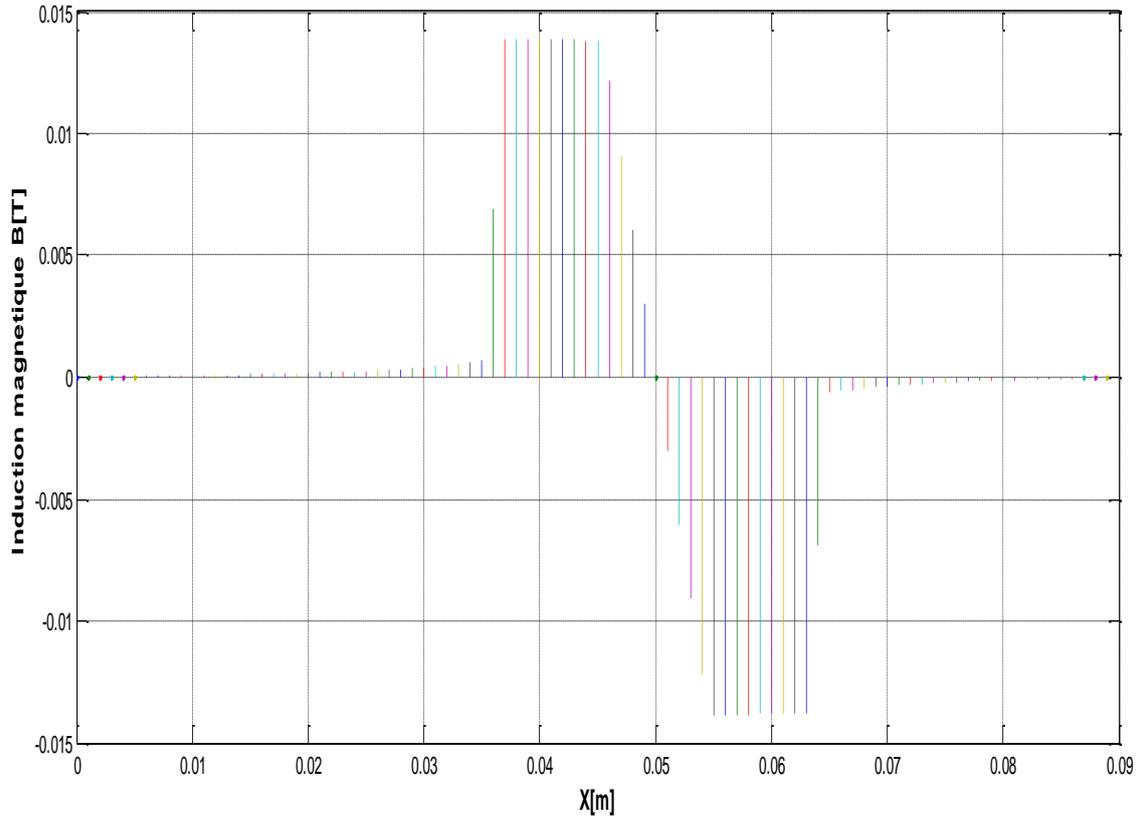


Fig.III.10. Magnitude de l'induction magnétique au collage.

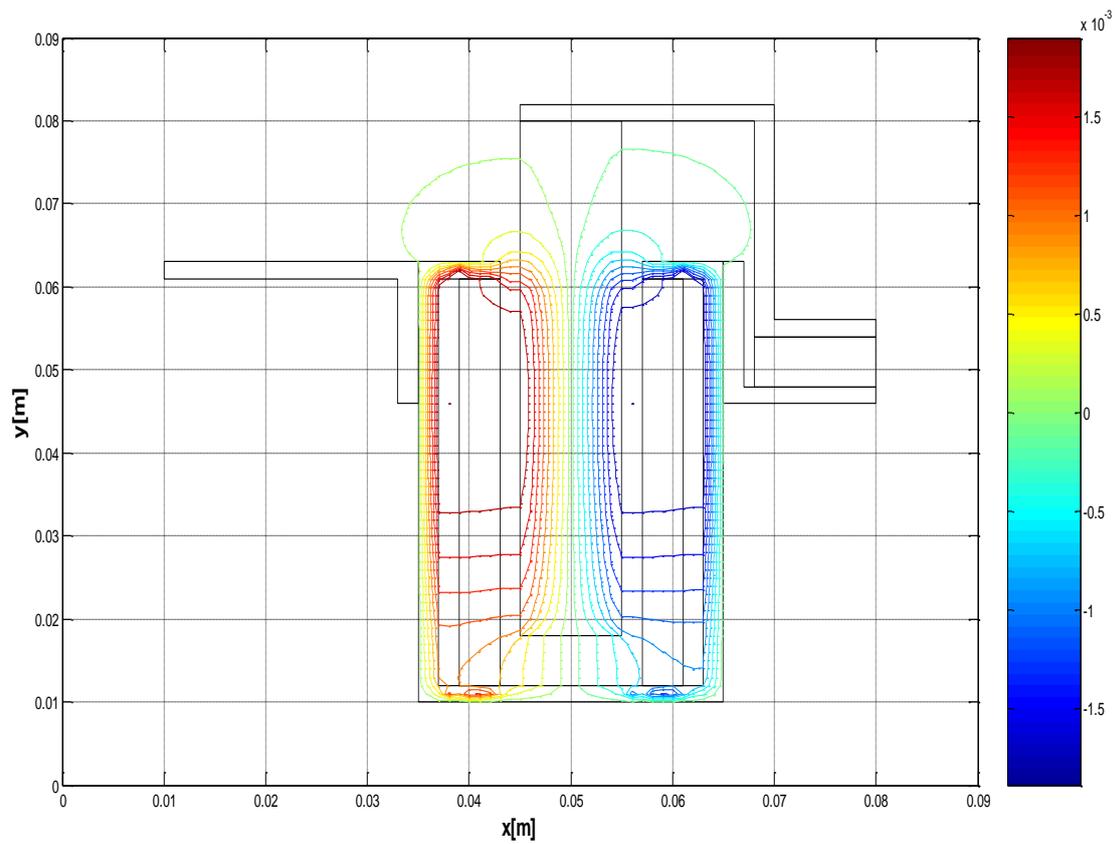


Fig.III.11. Lignes équipotentielle dans l'étrangleur à l'appel par la MVF.

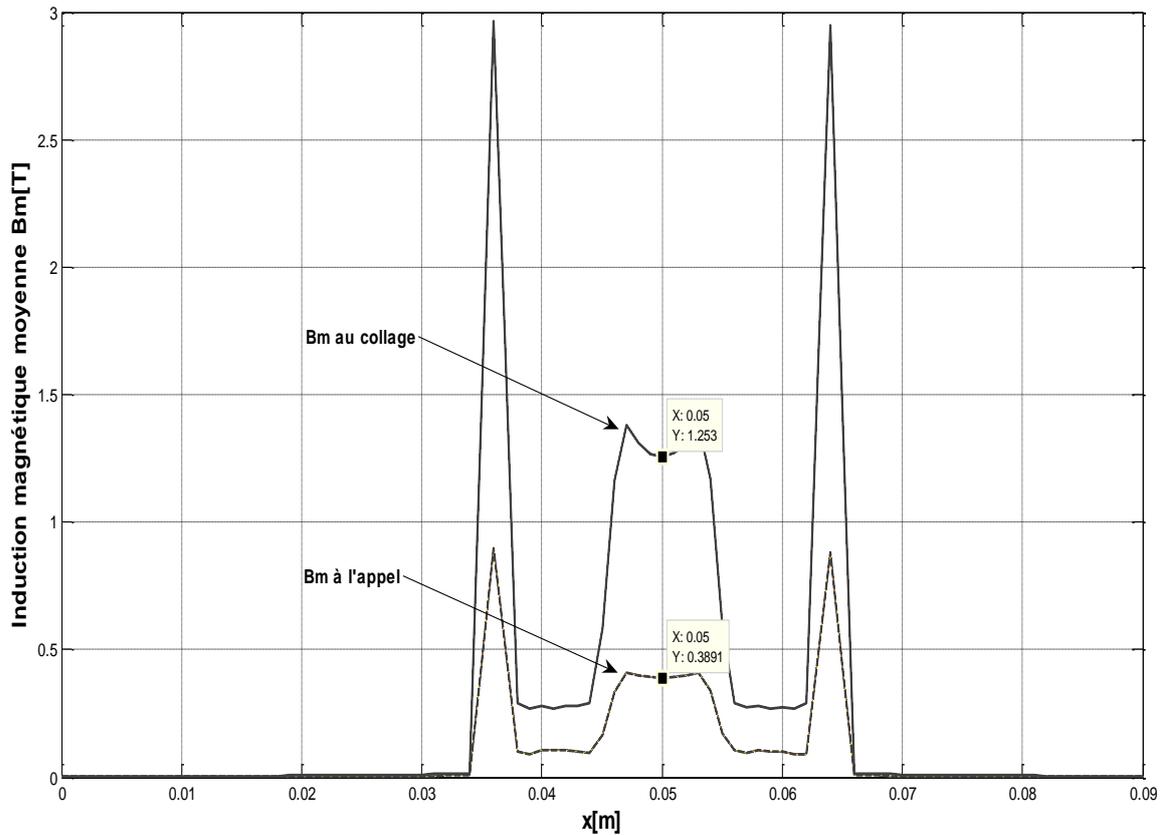


Fig.III.12. Induction magnétique moyenne à l'appel puis au collage (15v/ 3A).

III.9. Calcul des forces magnétiques.

Les forces jouent un rôle dominant dans le fonctionnement de tout système mécanique-électromagnétique en termes de déplacement ou de déformation. Une méthode d'évaluation des forces à partir des grandeurs magnétiques est présentée. Les lois physiques de l'électromagnétisme sont claires à ce sujet tant que l'on ne considère pas les matériaux ferromagnétiques. Dans le cas des conducteurs électriques la force suit la loi de Laplace : $\mathbf{F} = \mathbf{J} \wedge \mathbf{B}$.

Or, grâce à leurs propriétés, les matériaux ferromagnétiques sont extrêmement présents en électromagnétisme puisque les performances des systèmes électromagnétiques (transformateurs, machines électriques, actionneurs, ...) leur sont directement liées. Il est donc indispensable de savoir exprimer les forces qui s'exercent au sein de ces matériaux.

III.10. Méthode de la variation de la coénergie et de l'énergie magnétiques.

La force magnétique peut être calculée par la dérivation par rapport au déplacement à courant constant de la coénergie magnétique \bar{W} , ou par la dérivation par rapport au déplacement à flux constant de l'énergie magnétique (W) Fig. III.12, [28].

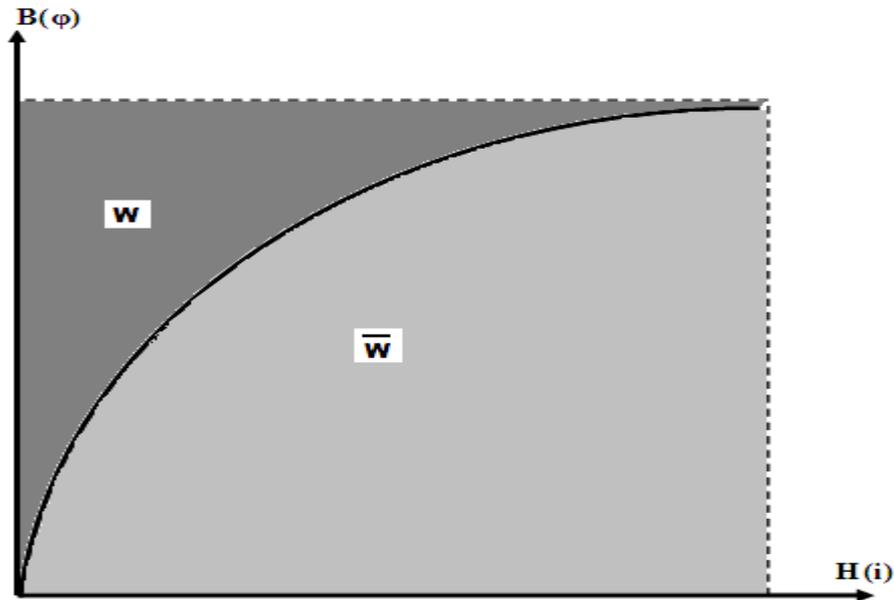


Fig.III.12. Courbe d'aimantation montrant l'énergie et la coénergie magnétiques.

Si F_s représente la composante de la force magnétique totale suivant une direction donnée, on pourra écrire :

$$F_s = \left[+ \frac{\partial \bar{W}}{\partial S} \right]_{i=Cte} \quad (3.39)$$

$$F_s = \left[- \frac{\partial W}{\partial S} \right]_{\phi=Cte} \quad (3.40)$$

Sachant que :

$$\bar{W} = \int_{\Omega} \left(\int_0^H B.dH \right).d\Omega \quad (3.41)$$

$$W = \int_{\Omega} \left(\int_0^H H.dB \right).d\Omega \quad (3.42)$$

Numériquement, les dérivations peuvent être obtenues par les relations suivantes :

$$F = \left(\frac{\overline{W}_{s+\Delta s} - \overline{W}_s}{\Delta S} \right)_{i=Cte} \quad (3.42)$$

$$F = \left(\frac{W_{s+\Delta s} - W_s}{\Delta S} \right)_{\varphi=Cte} \quad (3.42)$$

III.11. Energie dans l'électroaimant.

Sur la Fig. III.13, L est l'inductance de l'ensemble, R la résistance de la bobine et E la tension d'alimentation. La loi d'Ohm généralisée à l'instant t s'écrit:

$$E - \left(\frac{dLi}{dt} \right) = Ri \quad (3.43)$$

Suivant l'approche de conservation d'énergie, on a:

$$Eidt = idL + Ri^2 dt \quad (3.44)$$

L'énergie fournie par la source est transformée:

- en énergie calorifique ($R i^2 dt$) ;
- en une autre forme d'énergie.

$$W_{mag} = \int_0^i idLi = \int_0^\varphi id\varphi \quad (3.45)$$

Cette expression montre que W_{mag} est une énergie d'ordre magnétique qui ne peut qu'être emmagasinée dans le circuit magnétique. Dans le cas où L est indépendante de i, on a :

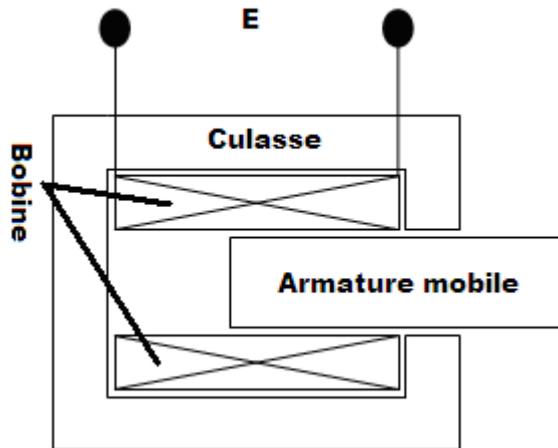


Fig.III.13. Electroaimant en position d'appel.

$$W_{mag} = \frac{1}{2} Li^2 = \frac{1}{2} i \Delta \phi \quad (3.46)$$

Pour le circuit magnétique, on a :

$$dW_{mag} = Ni d\phi$$

Et par unité de volume de métal ($V=l.S$), l'énergie est :

$$dW_{mag} = \frac{Ni}{l} \cdot \frac{d\phi}{S} \quad (3.47)$$

Ou ϕ indique le flux magnétique dans la culasse de l'électroaimant..

Cette énergie, emmagasinée par unité de volume, est représentée sur les courbes d'aimantation par la surface OA1B1, Fig.III.14.

$$W_{mag} = \int_0^{B1} HdB = \int_{OA1} HdB \quad (3.48)$$

On suppose que le déplacement de l'armature se fait suffisamment lentement pour que le courant puisse être maintenu constant, on peut alors écrire

$$Eidt = \frac{d\phi}{dt} \cdot dt + RI^2 dt = RI^2 dt + I^2 dL \quad (3.49)$$

Où $RI^2 dt$ est l'énergie dissipée par effet Joule;

$dW_{tot}=I^2 dL$ est la somme de deux énergies, l'une magnétique et l'autre mécanique.

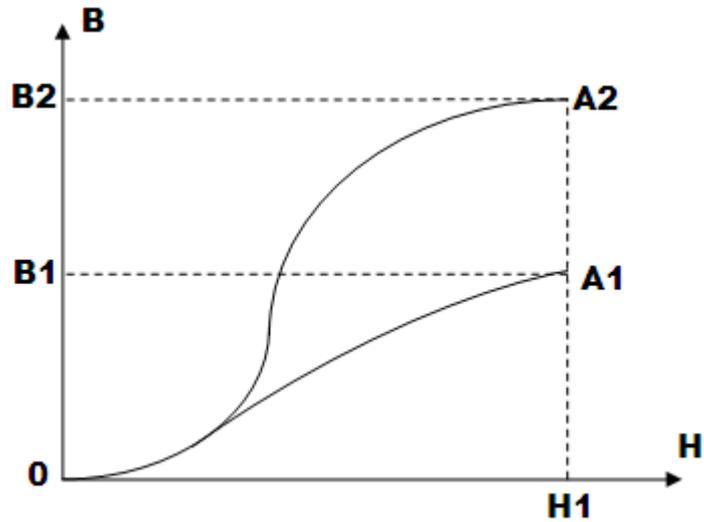


Fig.III.14. Noyau passant de l'appel au collage.

$$dW_{tot} = dW_{mag} + dW_{mec} \quad (3.50)$$

W_{mag} peut s'écrire comme

$$W_{mag} = V \int_{OA1} HdB = V \int_{OA2} HdB \quad (3.51)$$

Dont (V) est le volume du circuit magnétique.

Si L peut être considéré comme ayant une valeur finie L_1 à l'appel et une autre L_2 au collage, on peut écrire :

$$W_{mag} = \frac{1}{2} I^2 (L_2 - L_1) \quad (3.52)$$

D'où l'on déduit :

$$W_{mec} = I^2(L_2 - L_1) - \frac{1}{2} I^2(L_2 - L_1) \quad (3.53)$$

$$W_{mec} = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} I\Delta\phi \quad (3.54)$$

Pour exprimer l'effort fourni par l'armature mobile de l'électroaimant dans la direction x de déplacement du noyau, Nous avons vu que :

$$W_{mec} = \frac{1}{2} I^2 L \text{ et } L=N^2 \cdot \mathcal{P} :$$

Où \mathcal{P} représente la perméance

$$dW=F \cdot dx \text{ donc}$$

$$F=dW_{mec}/dx = (N^2 \cdot I^2/2) \cdot \partial \mathcal{P} / \partial x \quad (3.55)$$

La façon dont se répartit F en fonction de x dépend donc essentiellement des formes polaires et d'une manière générale de la loi de variation de la perméance en fonction de x. Globalement, cette loi de variation indique l'allure de la courbe F(x), tandis que son niveau est modifié par le carré des ampères-tours dont on peut disposer. Cependant, la valeur choisie pour NI a une influence sur l'allure de la courbe puisque \mathcal{P} dépend de μ et de x, et que μ dépend de NI.

En utilisant la loi de comportement qui limitera la validité de la formulation aux matériaux linéaires, c'est-à-dire ne présentant pas de saturation ni d'hystérésis, l'énergie magnétique par unité de volume devient, [33] :

$$W_{mag}=\mu H^2/2=B^2/2\mu \quad (3.56)$$

La variation en énergie magnétique ΔW_{mag}

$$\Delta W_{mag} = \int \frac{1}{2} \left(\frac{B_{col}^2}{\mu} - \frac{B_{app}^2}{\mu} \right) dl dS \quad (3.57)$$

Correspond à une énergie mécanique W_{mec}

$$W_{mec} = F.l \quad (3.58)$$

D'où la force par unité de surface

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{B_{col}^2}{\mu} - \frac{B_{app}^2}{\mu} \right) \quad (3.59)$$

III.12. Conclusion.

Dans ce chapitre nous avons présenté la formulation mathématique de l'actionneur électromagnétique utilisé dans la pompe péristaltique linéaire. Les résultats de simulation obtenus par la méthode des volumes finis et par PDETOOL sous Matlab indiquent un rapprochement très remarquable.

CHAPITRE IV
REALISATION ET
EXPERIMENTATION
DE LA POMPE
PERISTALTIQUE
LINEAIRE

CHAPITRE IV
Réalisation et Expérimentation

de la Pompe Péristaltique Linéaire

Ce chapitre sera consacré à :

- la description du prototype réalisé ;
- l'explication du principe de fonctionnement ;
- la discussion des résultats des essais expérimentaux ;
- commentaires et propositions pour l'amélioration des performances de la pompe.

IV.1.Description de la pompe péristaltique linéaire.

Le prototype de la pompe péristaltique linéaire conçue et réalisé dans le cadre de ce mémoire est formé de six actionneurs électromagnétiques (étrangleurs) montés en ligne, un tube silicone élastique et une commande électronique, Fig.IV.1. Les actionneurs sont des éléments dynamiques, chacun est composé d'une partie fixe solidaire à noyau mobile (mâchoire supérieure) et une partie inférieure immobile (mâchoire inférieure), Fig.IV.2. Les actionneurs provoquent le transfert du fluide par une succession de compressions du tube. Le tube silicone est la voie qui canalise le mouvement du fluide, il doit être souple, élastique et chimiquement inerte. La commande électronique est la source des signaux qui excitent et synchronisent les mouvements des six actionneurs.

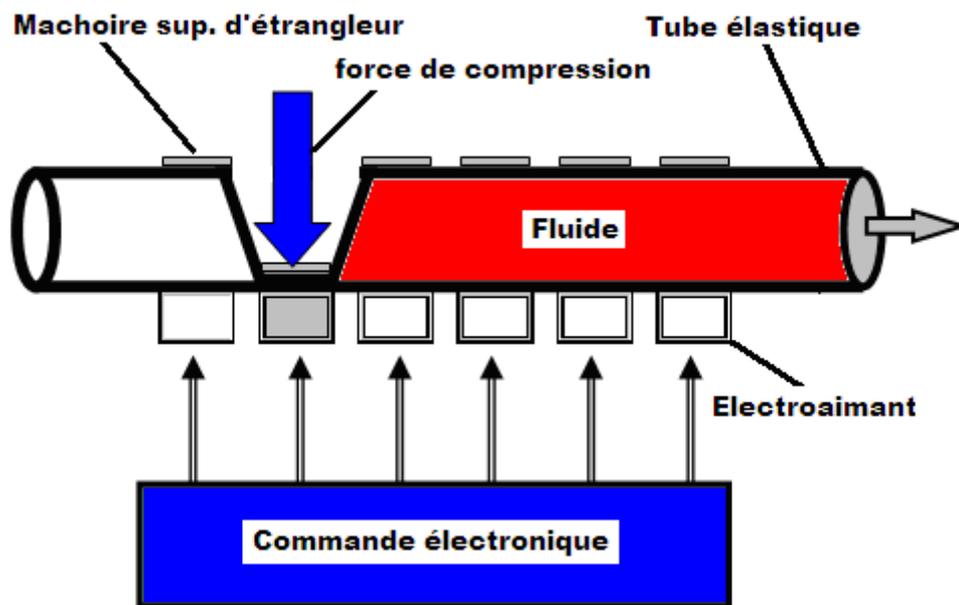


Fig.IV.1. Schéma fonctionnel de la pompe péristaltique linéaire.

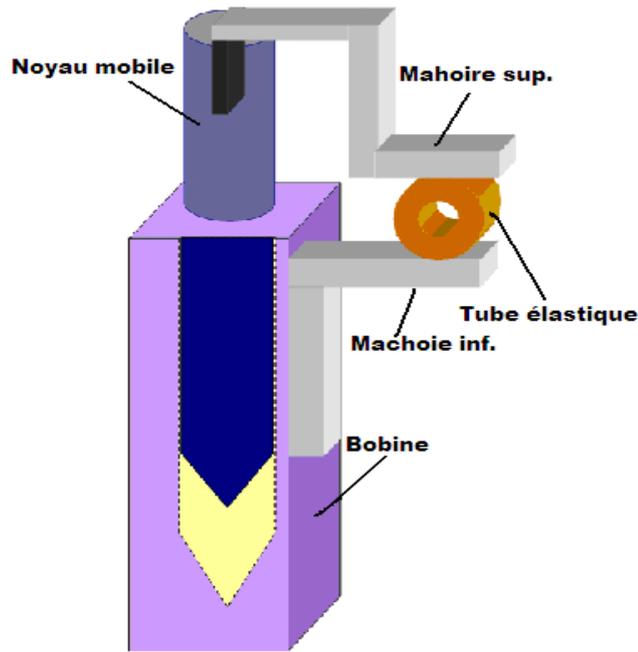


Fig. IV.2. Structure de l'actionneur électromagnétique.

IV.2.Circuit électrique de commande.

Le circuit électrique de commande de la pompe est représenté sur la Fig.IV.3. Il est composé d'une partie de commande et synchronisation et d'une partie de puissance. Cette dernière est constituée d'une source de tension continue variable U (0 à 24V), d'un interrupteur principal SW, de six interrupteurs à transistors Darlington, des éléments de protections (diodes DE et fusible F), des éléments de signalisation (LEDs) et six Bobines des actionneurs d'étrangleurs (ETR). La partie de commande et de synchronisation est constituée d'un circuit composé d'un astable à fréquence réglable à base du MC1455, d'un circuit d'aiguillage à base de compteur MC14017 et de six éléments passifs de retard et d'attaques (D, R et C).

IV.3.Principe de fonctionnement.

Le bloc d'aiguillage génère les signaux d'excitations et de synchronisations des bobines des actionneurs étrangleurs Fig.IV.4. A la base, une horloge produit un train d'impulsions à fréquence réglable sur sa sortie Q, ses impulsions sont directement injectées à l'entrée CP du bloc d'aiguillage. Ce dernier n'est qu'un compteur diviseur de fréquence chargé de produire les signaux d'activations des bobines des actionneurs suivant une séquence répétée. En jouant sur le potentiomètre, la fréquence des impulsions à la sortie Q de l'horloge varie, ceci provoque un changement dans la

cadence des signaux d'activations qui sont dirigées à travers les circuits d'attaques (D, R, C) sur les bases respectives des transistors Darlington Tr. Ces derniers jouent le rôle d'interrupteurs de puissance chargés de l'excitation directe des bobines des étrangleurs ETR. On remarque que le débit de la pompe est fonction de la cadence d'excitation des bobines des actionneurs, c à d fonction de la valeur du potentiomètre P, tandis que la pression produite par la pompe est fonction de la force développée par les actionneurs c à d fonction de la valeur de la tension d'alimentation E.

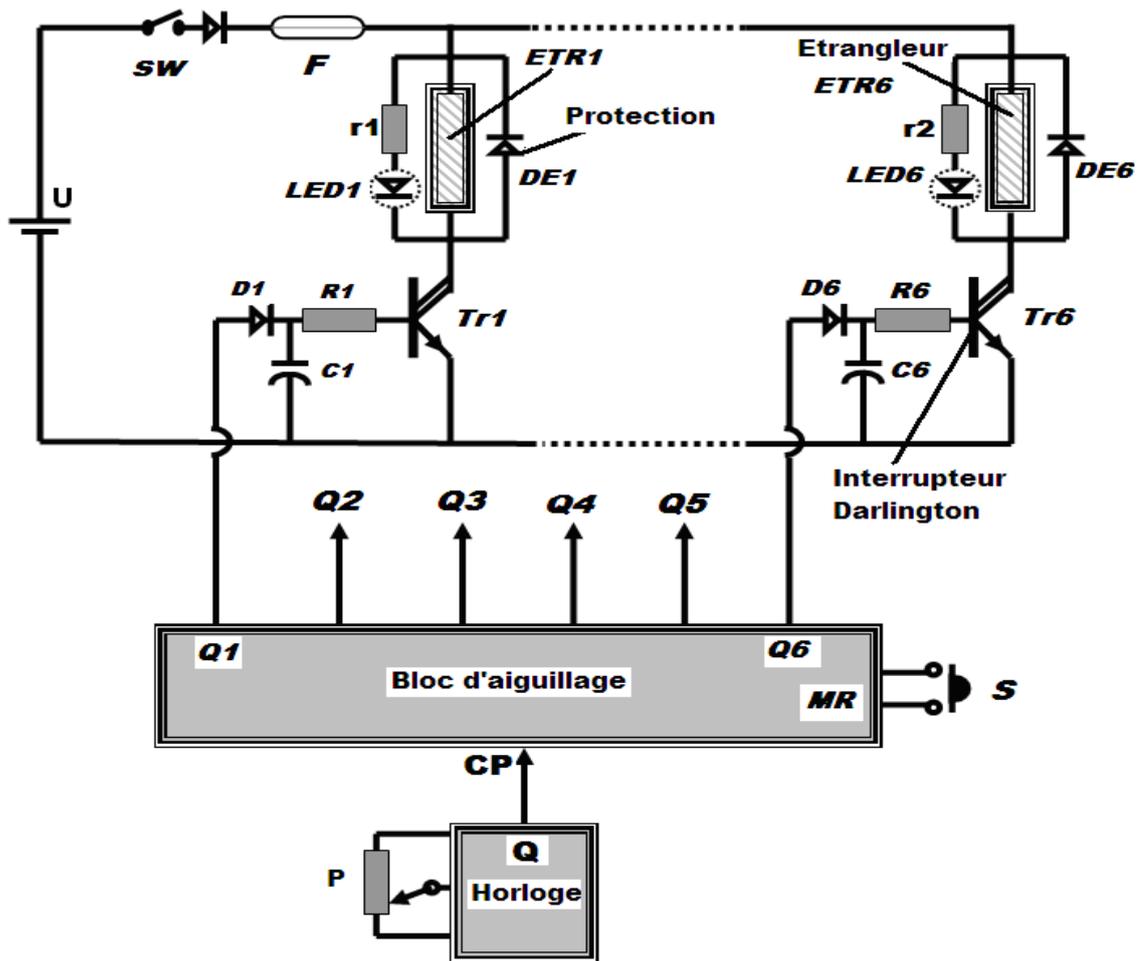


Fig.IV.3. Schéma du circuit de commande de la pompe péristaltique à base d'actionneurs électromagnétiques.

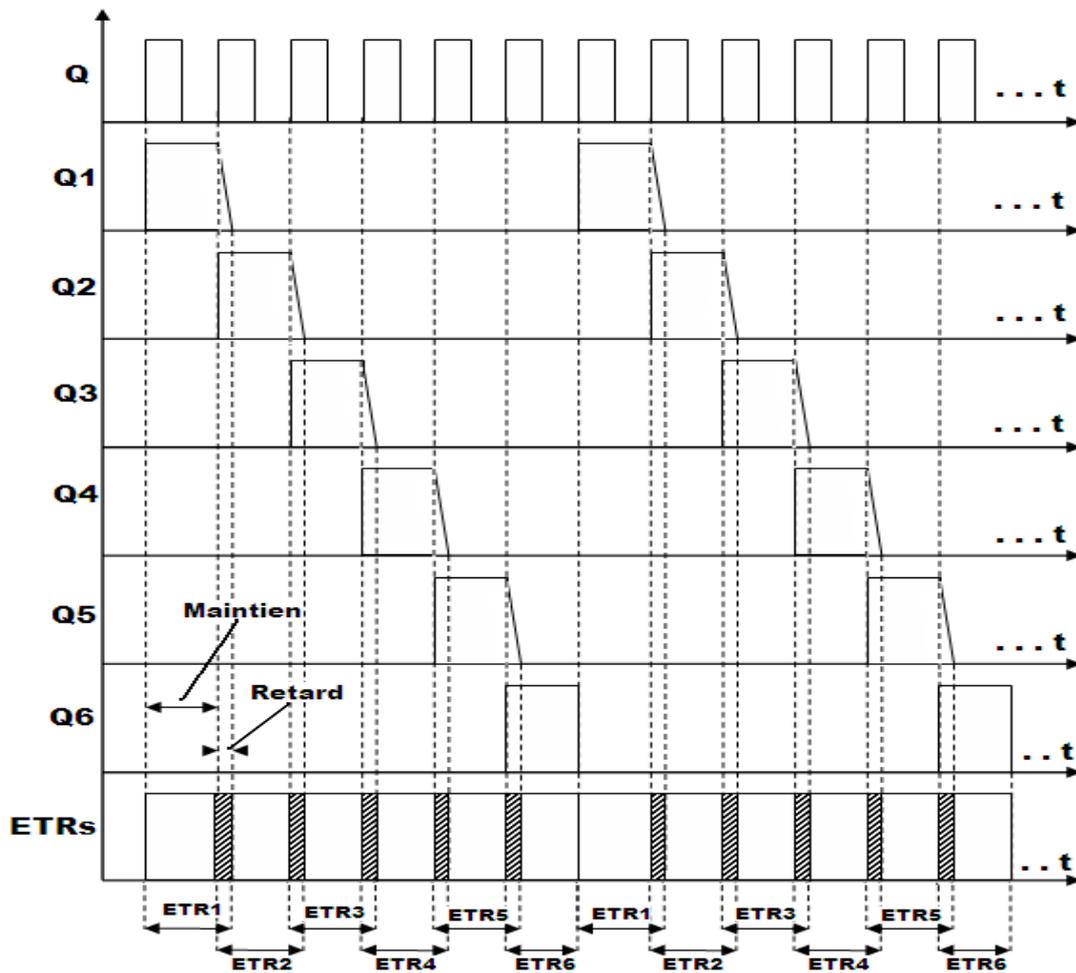


Fig.IV.4. Signaux de commande et de synchronisation des étrangleurs.

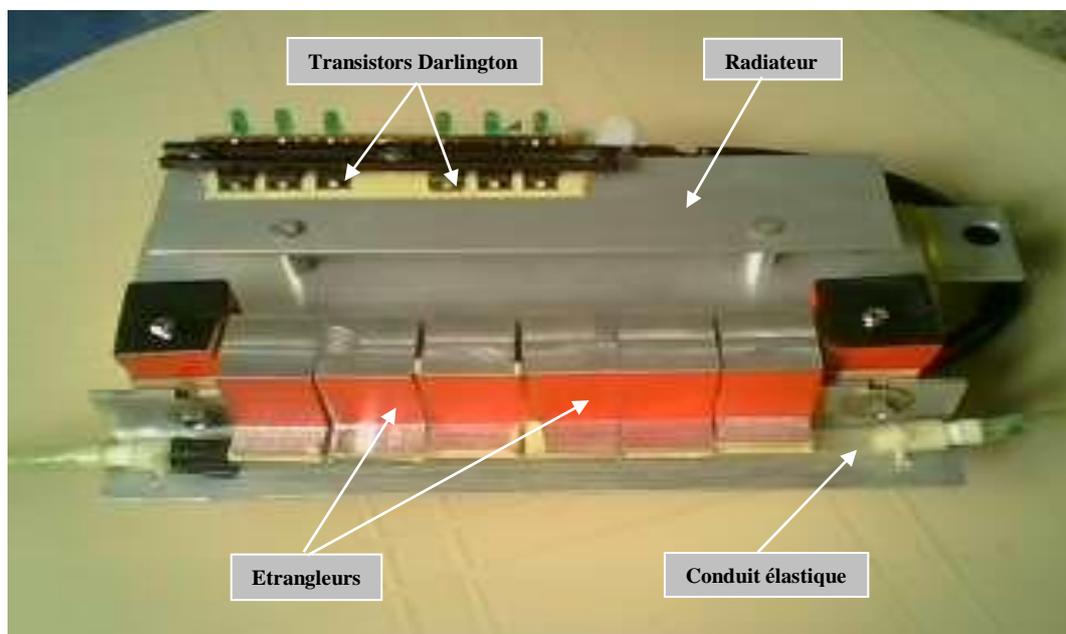


Fig.IV.5. Prototype de la pompe péristaltique (face avant).

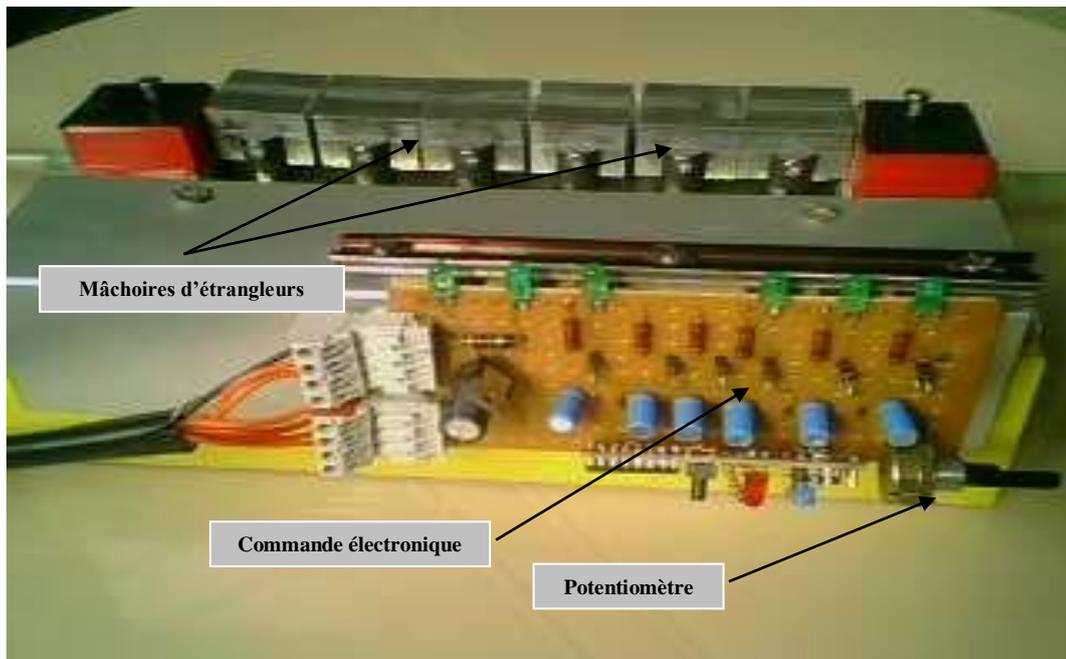


Fig.IV.6. Prototype de la pompe péristaltique (face arrière).

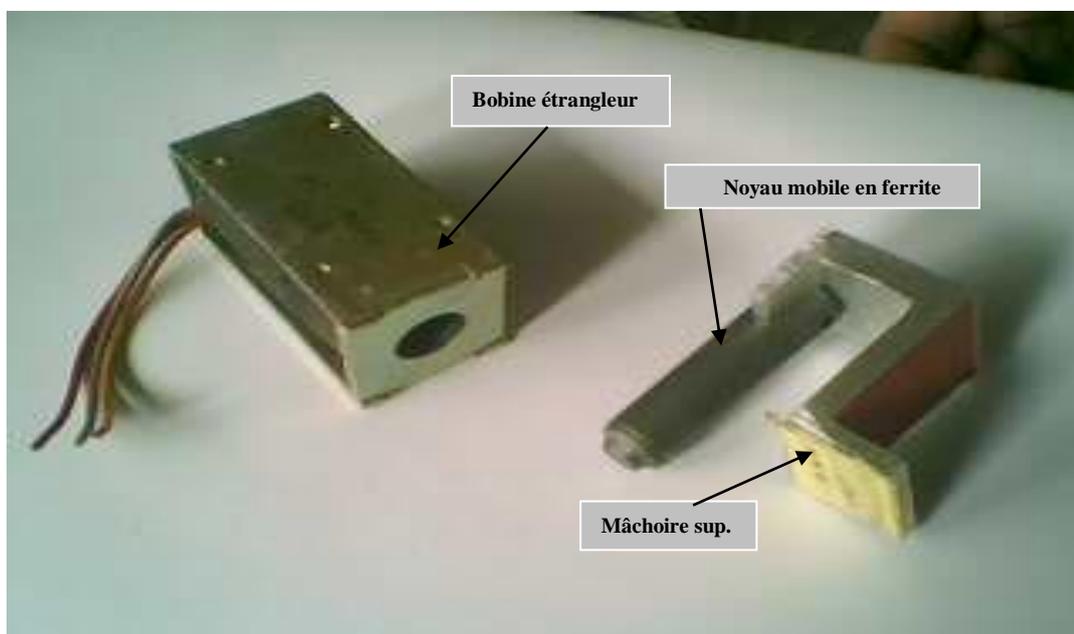


Fig.IV.7. Bobine et noyau mobile de l'actionneur.

Tableau .IV.1. Caractéristiques techniques de la bobine et du conduit.

Résistance de la bobine r0 [Ω]	Inductance de la bobine L [m H]	Section du Conducteur A [mm^2]	Rayon interne du tube r [mm]	Diamètre externe du tube d [mm]	Largeur des mâchoires l [mm]
6,0	861,0	1,6	3,0	10,0	25,0

IV.4.Estimation théorique du débit et de la pression.

Afin d'évaluer objectivement les performances de la pompe on commence tout d'abord par calculer théoriquement le débit et la pression développés par la pompe à partir de ses propriétés physiques et des résultats de simulation pour pouvoir finalement les comparer aux mesures expérimentales.

IV.4.1.Estimation théorique du débit.

A l'excitation une partie du conduit est comprimée par les mâchoires, alors la quantité de liquide q présente dans celle-ci est déplacée d'un pas l (largeur des mâchoires) vers la position suivante, Fig.IV.8, mais pour garantir un unique sens d'écoulement il faut prolonger la durée du maintien de l'actuel étrangleur jusqu'à l'excitation complète de l'étrangleur suivant (c à d introduire un retard de maintien), l'actuel étrangleur, maintenu en position de collage, assure le rôle d'un clapé anti-retour. Les étrangleurs d'extrémités (le premier et le sixième) nécessitent une attention particulière car ils exécutent le début et la fin du cycle de pompage. A l'excitation, au début d'un cycle, le premier étrangleur comprime le conduit et le liquide est renvoyé dans le tout les sens, mais le sens directe est partiellement bloquée car le sixième étrangleur est en cours d'ouverture ; une partie du liquide prend le sens inverse car cette voie est libre, donc dans chaque cycle cinq étrangleurs sont seulement effectifs au lieu de six et la quantité de liquide transvasée par cycle est réduite par un facteur de $(1/6)$, sur la Fig.IV.8 nous avons :

$$q = (5/6) \cdot \pi \cdot r^2 \cdot l \quad (4.1)$$

Où (r) est le rayon interne du conduit et (l) la longueur comprimée du conduit,

$$q = (5/6) \cdot \pi \cdot (0,003)^2 \cdot (0,025) = 0,589 \text{ ml /Contraction.}$$

Après la purge du conduit chaque contraction (compression) éjecte à la sortie une quantité de liquide q à une cadence (fréquence) de contraction f , alors un débit k de liquide est collecté à la sortie :

$$k = q \cdot f = (5/6) \cdot \pi \cdot r^2 \cdot l \cdot f \quad (4.2)$$

$$k = 0,6 \cdot f \text{ ml/s ou bien :}$$

$$k = 35,34 \cdot f \text{ ml/min.}$$

La relation (4.2) montre que le débit est directement proportionnel à la fréquence, à la section du conduit et à la largeur des mâchoires de l'étrangleur.

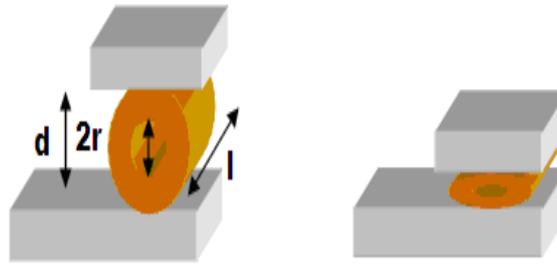


Fig. IV.8. Schéma de compression du conduit élastique

IV.4.2. Estimation théorique de la pression.

En revenant à l'expression (3.59) et aux courbes de la Fig. IV.10, on peut calculer la force de compression développée par l'étrangleur et la pression exercée sur le conduit par l'utilisation des valeurs moyennes de B, déduites de la simulation, dans le noyau à l'appel et au collage.

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{B_{col}^2}{\mu} - \frac{B_{app}^2}{\mu} \right) \quad (4.3)$$

$$F = \frac{1}{2} \left(\frac{(1,25)^2}{4\pi \cdot 10^{-3}} - \frac{(0,389)^2}{4\pi \cdot 10^{-3}} \right) = 56,44 N ;$$

Finalement la pression est estimée à : $P = \frac{F}{S} = \left(\frac{56,44}{25 \cdot 10^{-4}} \right) = 22576 Pa = 225,76 mbar .$

Où S est la surface du conduit comprise entre les mâchoires lors de l'excitation.

$$S = l \cdot d$$

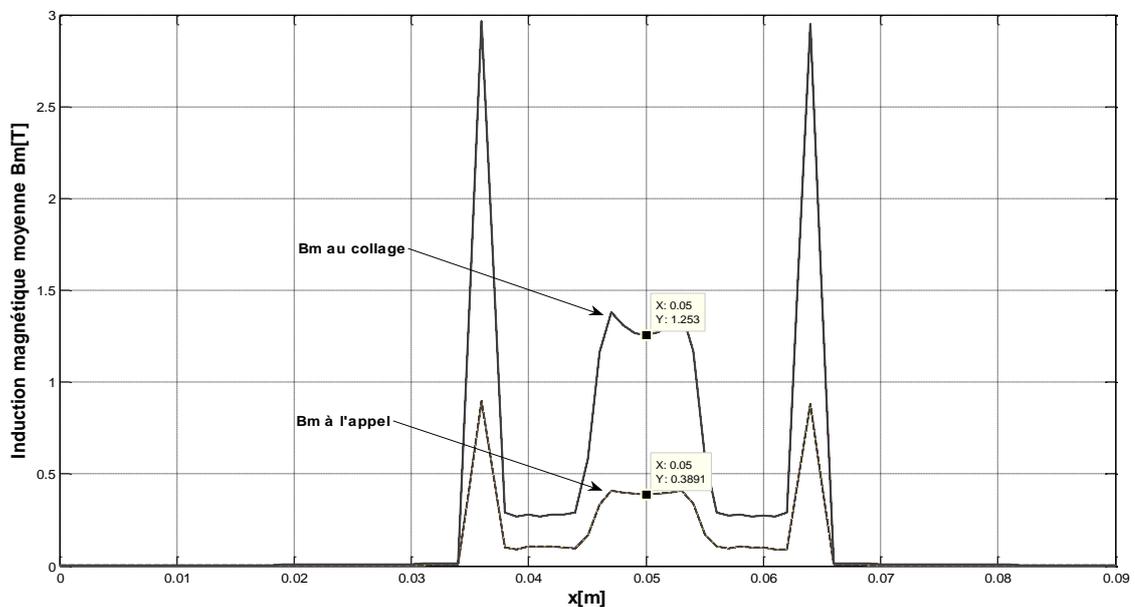


Fig. IV.10. Induction magnétique moyenne à l'appel puis au collage (15V/ 3A).

IV.5. Mesures expérimentales du débit.

Les mesures expérimentales du débit de la pompe sont effectuées en deux répliques pour neuf fréquences, afin de minimiser les erreurs de lecture, et ce pour cinq tension d'alimentation, comme indiquée sur le tableau IV.2. La quantité de liquide collectée à la sortie de la pompe pendant une durée d'une minute est mesurée puis notée.

Tableau .IV.2. Relevés expérimentaux du débit en fonction de la fréquence pour différente tension.

Fréq. [Hz]	Débit suivant tension d'alimentation. [ml/min]									
	14v		15v		16v		17v		18v	
1,4	27,3	28,4	37,0	38,5	45,0	42,0	47,2	46,8	47,6	47,0
	27,8		37,7		43,5		47,0		47,3	
2,0	46,1	49,0	46,0	52,8	53,3	54,4	59,0	59,6	57,5	57,2
	47,5		49,4		53,8		59,3		57,3	
3,0	42,7	41,0	72,4	76,4	75,8	78,0	98,2	96,9	95,2	98,9
	41,8		74,4		76,9		97,5		97,1	
4,0	43,3	41,5	74,0	71,8	95,8	90,7	108,5	107,5	141,0	124,5
	42,4		72,9		93,2		108,0		132,7	
5,0	76,6	77,4	138,8	127,7	146,2	148,2	144,2	138,7	131,7	129,1
	77,0		133,3		147,2		141,4		130,4	
6,0	111,2	102,8	134,4	126,0	162,0	157,0	164,8	153,0	156,6	145,8
	107,5		130,2		159,5		159,0		151,2	
7,0	116,0	110,8	110,6	115,2	125,2	123,2	146,0	164,0	123,6	125,8
	113,4		112,9		124,2		155,0		124,7	
8,0	125,6	135,0	128,8	138,2	165,4	179,0	114,6	125,4	101,6	103,6
	130,3		133,5		172,2		120,0		102,6	
9,0	97,6	109,2	138,3	121,2	80,2	104,0	101,5	102,8	96,8	113,2
	103,4		129,7		92,1		102,1		105,0	

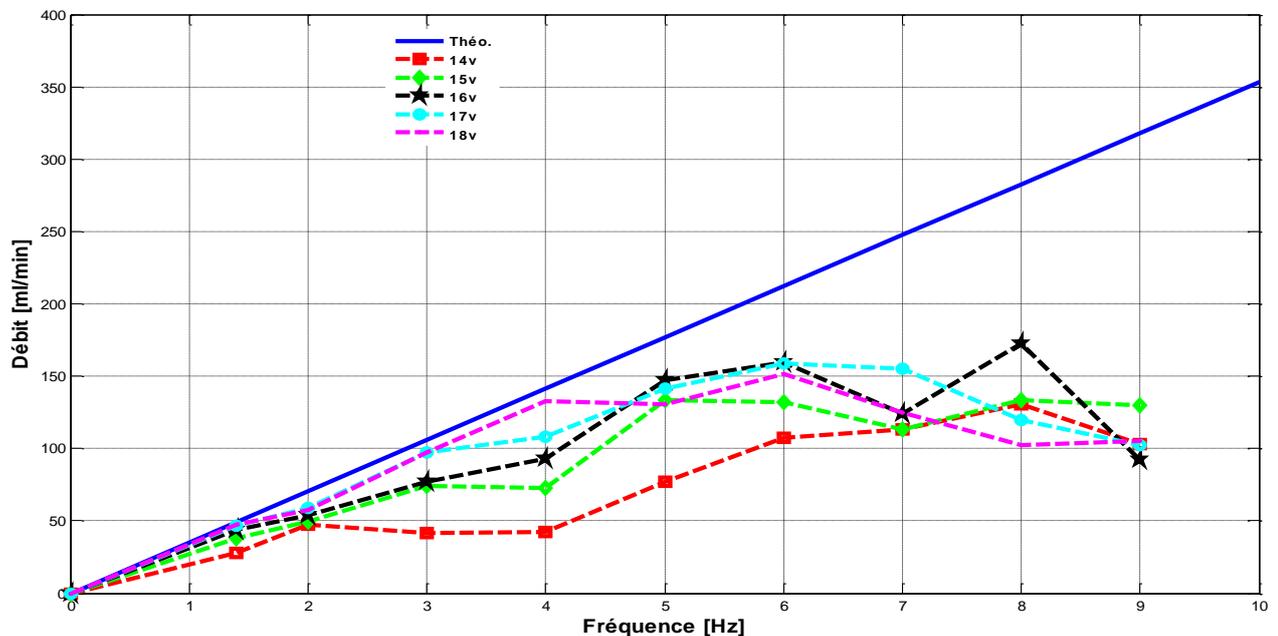


Fig.IV.11. Débit de la pompe en fonction de la fréquence pour différentes tensions.

IV.6. Interprétations et discussions des résultats.

L'analyse des résultats expérimentaux ainsi que les courbes relatives à la variation du débit en fonction de la fréquence pour différentes tensions a permis de déduire les constatations suivantes :

- 1- Les mesures expérimentales ont des allures croissantes ;
- 2- Dans une fourchette de fréquence inférieure à 5Hz, les mesures du débit peuvent être considérées comme linéaires et suivent assez bien l'allure théorique prévue ;
- 3- Pour des tensions supérieures à 14v, les mesures sont très proches de la courbe théorique ;
- 4- Pour des fréquences supérieures à 5Hz, les valeurs expérimentales du débit diminuent et s'éloignent de la courbe théorique, ceci explique, dans l'ensemble, l'incapacité des actionneurs à suivre la haute cadence, car leurs temps de réponse est relativement long ;
- 5- Pour des tensions inférieures à 14v, les actionneurs ne développent pas assez de force d'écrasement pour garantir une fermeture nette du conduit, alors une part du liquide reprend le chemin inverse vers l'entrée. Ceci explique les faibles pentes des courbes indiquant les basses tensions.
- 6- L'ordre de grandeur de la pression développée par cette pompe montre une concordance avec les résultats indiqués dans les travaux menés dans le cadre des micropompes, [17].

Afin de remédier à ces inconvénients, notamment sur le plan des effets de bord, le surchauffement des actionneurs et l'étanchéité des étrangleurs, quelques propositions sont présentées ci après.

IV.7. Propositions suggérées

Suite aux mesures et observations collectées sur les essais expérimentaux du prototype de la pompe péristaltique linéaire, quelques suggestions appropriées sont proposées dans le but d'améliorer ses performances et ses capacités.

IV.7.1. Changement dans les séquences de pompage.

Ce changement de séquence de commande peut se faire sur le système existant. Il permet l'adaptation de la topologie de pompage indiquée sur la Fig.IV.11, l'amélioration du rendement de la pompe et l'élimination de l'effet de bord. Une poche du liquide est confinée entre une paire de mâchoires d'actionneurs puis transférée vers

la sortie par une succession d'excitation de paires de mâchoires. Cette méthode préconise l'excitation de deux actionneurs à la fois.

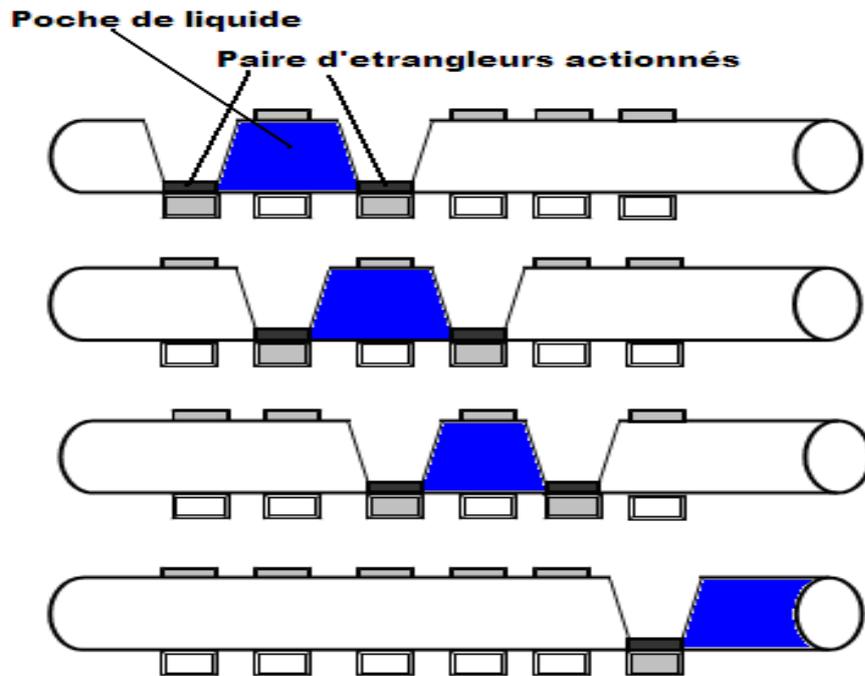


Fig.IV.11. Séquences de transfert d'une poche de liquide.

IV.7.2.Changement dans la structure de la pompe.

Dans cette structure la pompe est constituée de deux actionneurs de pincement, localisées aux extrémités, assurant le rôle d'électrovannes et d'un seul actionneur d'écrasement assurant le rôle d'écrasement d'un conduit comme indiqué à la Fig.IV.12a. La fermeture de l'électrovanne d'entrée (étape 2) ensuite de l'armature de l'actionneur (étape 3) permet de chasser l'air vers l'unique issue qui est l'électrovanne de droite, et de créer une dépression dans le conduit. Cette dépression est maintenue en fermant l'électrovanne de sortie (étape 4), l'ouverture simultanée de l'électrovanne d'entrée et de l'armature de l'actionneur provoque l'aspiration du liquide dans le conduit (étape 5), l'activation de l'électrovanne d'entrée permet de maintenir une quantité de liquide dans le conduit et de bloquer l'issue de retour (étape 6). L'ouverture de l'électrovanne de sortie et l'activation de l'armature de l'actionneur refoule la quantité de liquide vers la sortie (étape 7). Par la fermeture de l'électrovanne d'entrée on revient à l'étape 4 et le cycle est relancé une deuxième fois et ainsi le liquide est transféré. De même, le débit et la pression de la pompe sont contrôlés à travers la cadence et la tension d'excitation.

La même configuration peut être améliorée et adaptée à deux conduits par l'utilisation de deux électrovannes et d'un seul actionneur à doubles armatures ; ainsi on obtient un effet double de pompage comme indiqué sur la Fig.IV.12b.

Les deux armatures travaillent en opposition, c à d lorsque l'un aspire le liquide de l'entrée, l'autre le refoule vers la sortie, en même temps l'activation des électrovannes régule et assure les voies d'admissions et de refoulement.

Ces configurations permettent l'élimination des effets de bord et la réduction du nombre d'actionneurs.

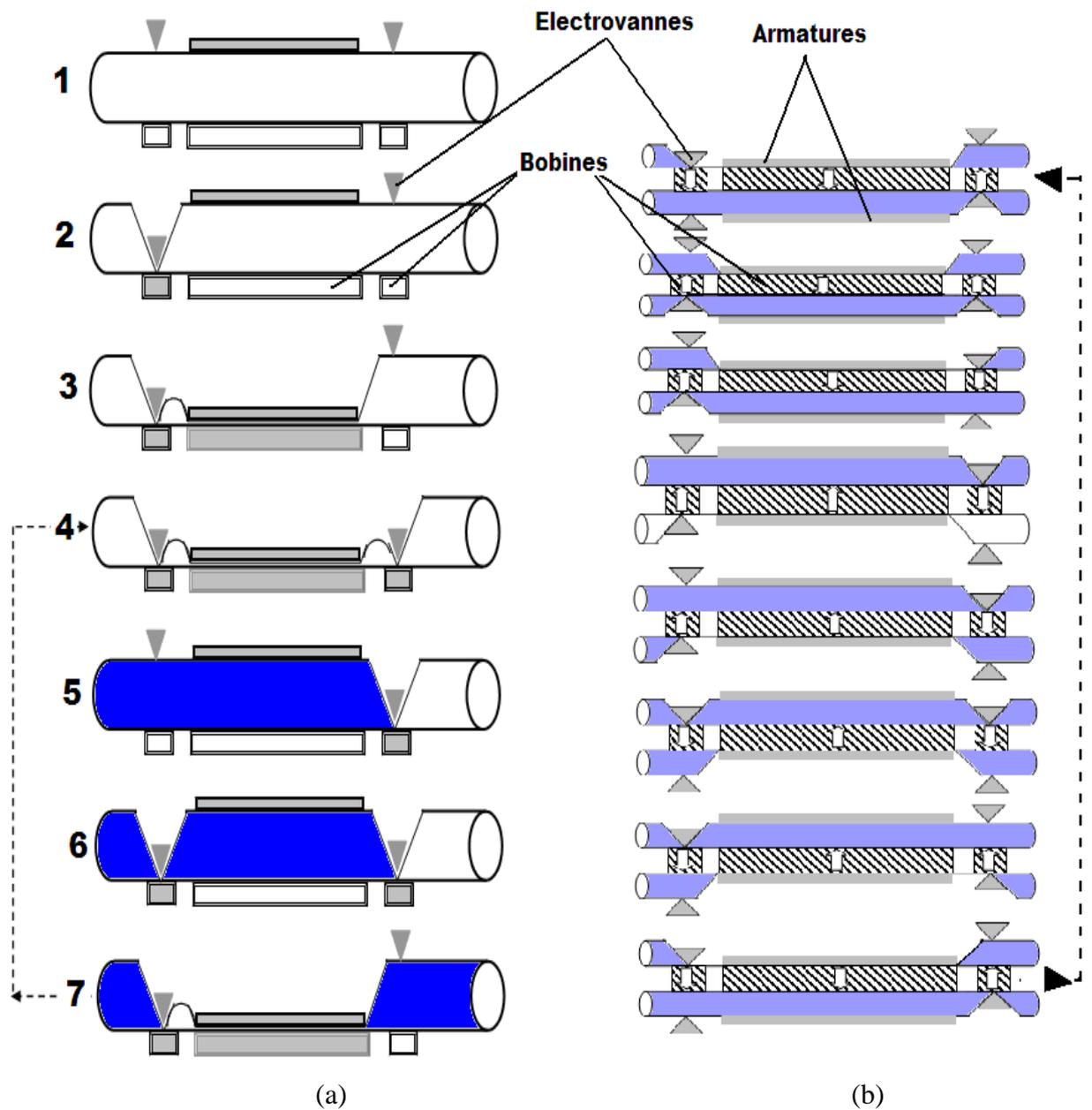


Fig. IV.12. Structures de transferts à simple et double effets.

IV.7.3. Autres propositions.

- Par similitude aux circuits électriques, au lieu d'utiliser un seul conduit de diamètre D on utilise N conduits de diamètre D/N , logiquement le débit reste inchangé mais on gagne dans la diminution de l'écartement des mâchoires d'écrasement et par conséquence sur le parcours de l'axe plongeur nécessitant ainsi moins d'énergie à l'excitation, (c à d faible reluctance du circuit magnétique du noyau mobile de l'actionneur), donc moins de courants, moins d'échauffements et de consommation d'énergie. Dans ce cas, on peut faire appel à des actionneurs de petites dimensions avec des temps de réponses plus courts, c à d des actionneurs plus rapides pour montée en fréquence de travail et amélioré les capacités de la pompe ;
- Fabriquer les mâchoires à partir de matières plastiques appropriées, afin de réduire le poids, conserver l'intégrité du conduit et prolonger sa durée de vie, ainsi, moins d'actions de maintenances préventives sont recommandées ;
- Le support du conduit doit être séparé du support des actionneurs et des transistors pour stopper la propagation de l'échauffement vers le conduit et ainsi préserver son élasticité.

IV.8.Conclusion.

Dans ce chapitre on a présenté la structure mécanique, électrique et le principe de fonctionnement de la pompe. Un rapprochement entre les résultats pratiques et les résultats théoriques est constaté, notamment, sur le débit. Des propositions d'ordre pratique ont été suggérées pour améliorer les capacités et les performances de la pompe péristaltique linéaire.

CONCLUSION
GENERALE

Conclusion générale.

Nous nous sommes intéressés, au cours de ce travail, à l'étude, la conception et la réalisation d'une pompe péristaltique linéaire inspiré de l'activité intestinale. Cette pompe est destinée à des applications dans le secteur médical. Dans une première étape, les objectifs ont été fixés et les contraintes bien définies, à savoir :

- *les conduits de pompage doivent, impérativement, être chimiquement inertes ;*
- *l'organe de pompage doit être facilement changeable (faible maintenance) ;*
- *le fluide pompé doit être loin de toute influence thermique ou électromagnétique.*

Nous avons passé en revue l'état de l'art avec des schémas synoptiques de fonctionnement des différents types de pompes ainsi que les différents types d'actionneurs des les pompes péristaltique linéaires.

A l'aide des équations de Maxwell, les caractéristiques électriques et magnétiques de la pompe sont explorées et le modèle mathématique représentant les phénomènes physiques qui régissent son comportement est déduit. L'approche d'un calcul numérique bidimensionnel (2D) par la méthode des volumes finis a permis l'étude approfondie des phénomènes électromagnétiques et la détermination du potentiel vecteur magnétique, de l'induction magnétique et de la force électromagnétique d'écrasement.

Les résultats de simulations donnés par deux méthodes distinctes, à savoir PDETOOL sous l'environnement MATLAB et la technique des volumes finis, sont, dans l'ensemble, très proches et présentent des écarts acceptables.

Finalement un prototype de pompe péristaltique linéaire à base d'actionneurs électromagnétiques a été réalisé. Des mesures de débit et de pression ont été effectuées, à deux répliques, sur la pompe ; les résultats collectés par ces mesures sont représentés sur des courbes illustratives.

Ces résultats sont cités à titres indicatifs et ne peuvent être utilisés comme validations des résultats théoriques vu les moyens rudimentaires disponibles.

On pense que les objectifs ciblés dans ce travail ont été atteints. La pompe arrive à débiter un flux de liquide réglable jusqu'à 150 ml/min sous une pression réglable jusqu'à 300 mbar et cela avec une bonne linéarité dans la fourchette de fréquence [0,0-5,0] Hz et pour des tensions supérieures à 14V. Quelques lacunes fonctionnelles ont

quand même été enregistrées concernant, notamment, l'étanchéité et l'échauffement. Des suggestions appropriées sont proposées dans le but d'améliorer la capacité et les performances de cette pompe.

ANNEXES

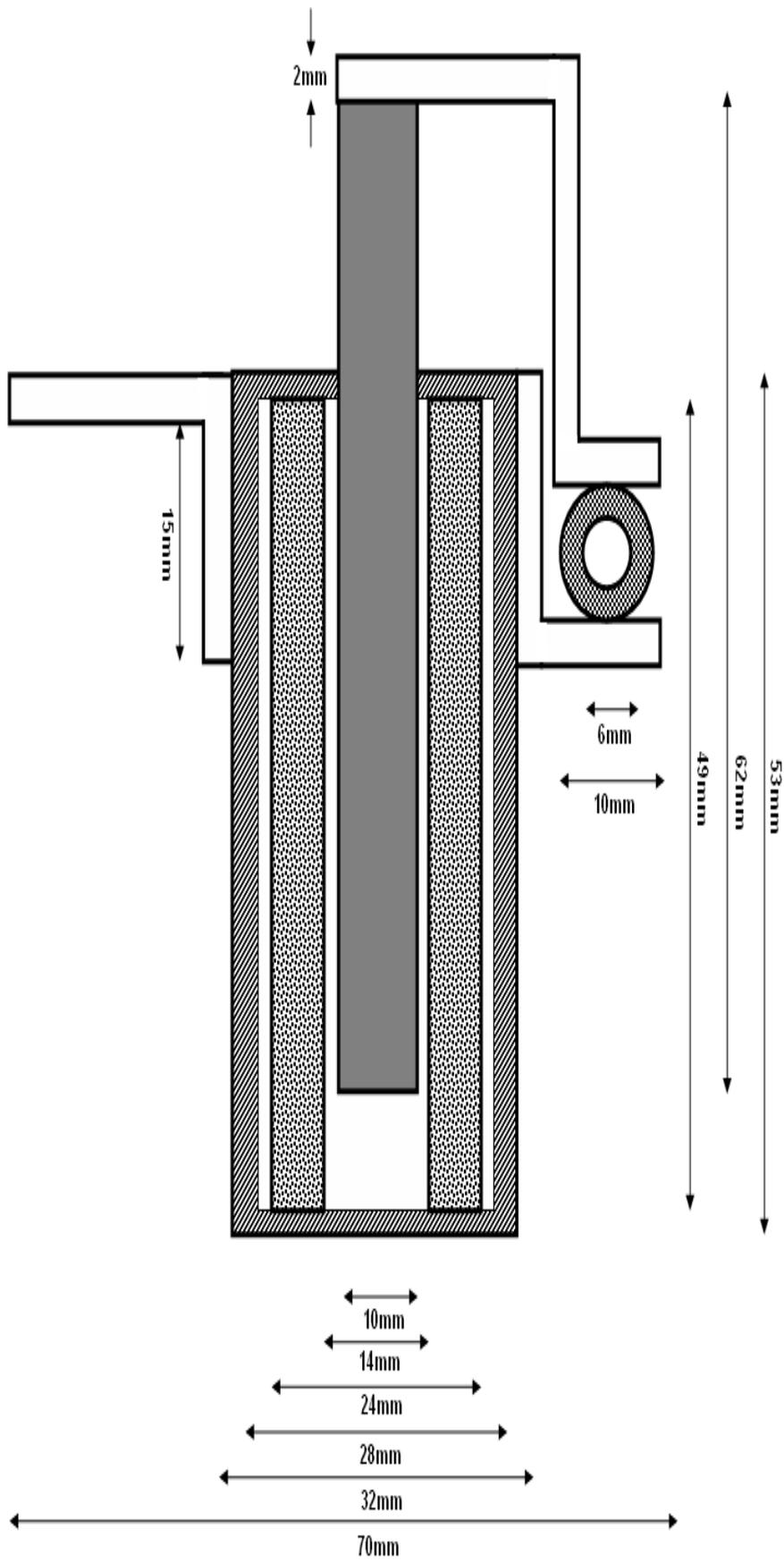


Fig. IV. Dimensionnement de l'actionneur étrangleur



Fig. V. Schéma éclaté de l'actionneur étrangleur.

CMOS Counter/Dividers

High-Voltage Types (20-Volt Rating)

CD4017B—Decade Counter with
10 Decoded Outputs

CD4022B—Octal Counter with
8 Decoded Outputs

■ CD4017B and CD4022B are 5-stage and 4-stage Johnson counters having 10 and 8 decoded outputs, respectively. Inputs include a CLOCK, a RESET, and a CLOCK INHIBIT signal. Schmitt trigger action in the CLOCK input circuit provides pulse shaping that allows unlimited clock input pulse rise and fall times.

These counters are advanced one count at the positive clock signal transition if the CLOCK INHIBIT signal is low. Counter advancement via the clock line is inhibited when the CLOCK INHIBIT signal is high. A high RESET signal clears the counter to its zero count. Use of the Johnson counter configuration permits high-speed operation. 2-input decode-gating and spike-free decoded outputs. Anti-lock gating is provided, thus assuring proper counting sequence. The decoded outputs are normally low and go high only at their respective decoded time slot. Each decoded output remains high for one full clock cycle. A CARRY-OUT signal completes one cycle every 10 clock input cycles in the CD4017B or every 8 clock input cycles in the CD4022B and is used to

Features:

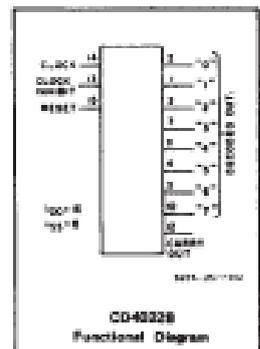
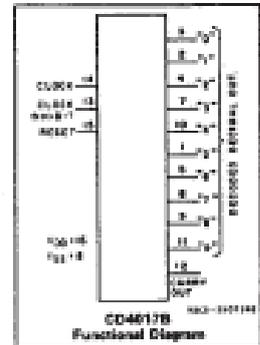
- Fully static operation
- Medium-speed operation . . . 10 MHz (typ.) at $V_{DD} = 10\text{ V}$
- Standardized, symmetrical output characteristics
- 100% tested for quiescent current at 20 V
- 5-V, 10-V, and 15-V parametric ratings
- Meets all requirements of JEDEC Tentative Standard No. 13A, "Standard Specifications for Description of 'B' Series CMOS Devices"

Applications:

- Decade counter/decimal decode display (CD4017B)
- Binary counter/divider
- Frequency divider
- Counter control/timer
- Divide-by-N counting
- For further application information, see ICAN-6166 "CMOS/MOS MSI Counter and Register Design and Applications"

ripple-clock the succeeding device in a multi-device counting chain.

The CD4017B and CD4022B-series types are supplied in 16-lead hermetic dual-in-line ceramic packages (D and F suffixes), 16-lead dual-in-line plastic package (E suffix), 16-lead ceramic flat packages (R suffix), and in chip form (H suffix).

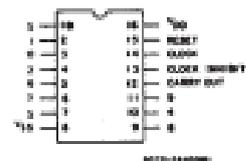


RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

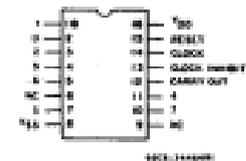
For maximum reliability, nominal operating conditions should be selected so that operation is always within the following ranges:

CHARACTERISTICS	V_{DD} (V)	LIMITS		UNITS
		Min.	Max.	
Supply-Voltage Range (For T_A = Full Package-Temperature Range)		3	18	V
Clock Input Frequency, f_{CL}	5	—	2.5	MHz
	10	—	8	
	15	—	8.5	
Clock Pulse Width, t_{PW}	5	200	—	ns
	10	90	—	
	15	60	—	
Clock Rise & Fall Time, t_{rCL}, t_{fCL}	5	UNLIMITED*		ns
	10	UNLIMITED*		
	15	UNLIMITED*		
Clock Inhibit Setup Time, t_2	5	230	—	ns
	10	100	—	
	15	70	—	
Reset Pulse Width, t_{RST}	5	260	—	ns
	10	110	—	
	15	60	—	
Reset Removal Time, t_{RRM}	5	400	—	ns
	10	200	—	
	15	150	—	

*Only if Pin 14 is used as the clock input, if Pin 13 is used as the clock input and Pin 14 is tied high (for advancing count on negative transition of the clock), rise and fall time should be $\leq 15\ \mu\text{s}$.



TOP VIEW
CD4017B
TERMINAL DIAGRAM



TOP VIEW
NC - no connection
CD4022B
TERMINAL DIAGRAM

CD4017B, CD4022B Types

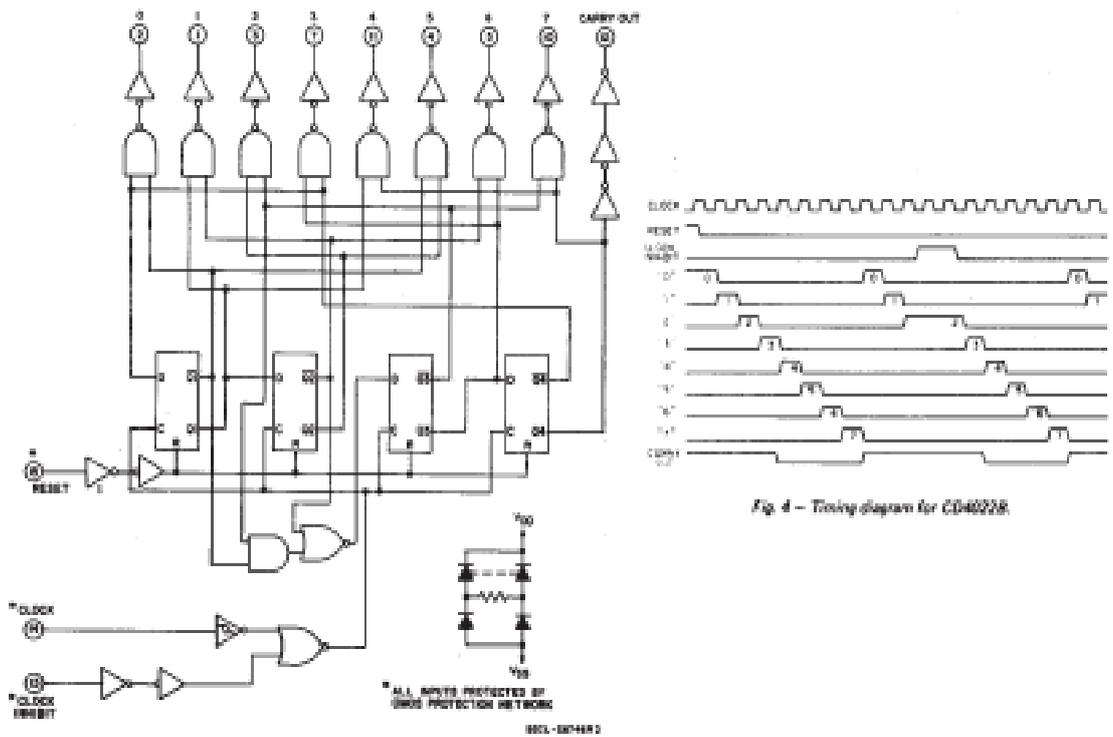
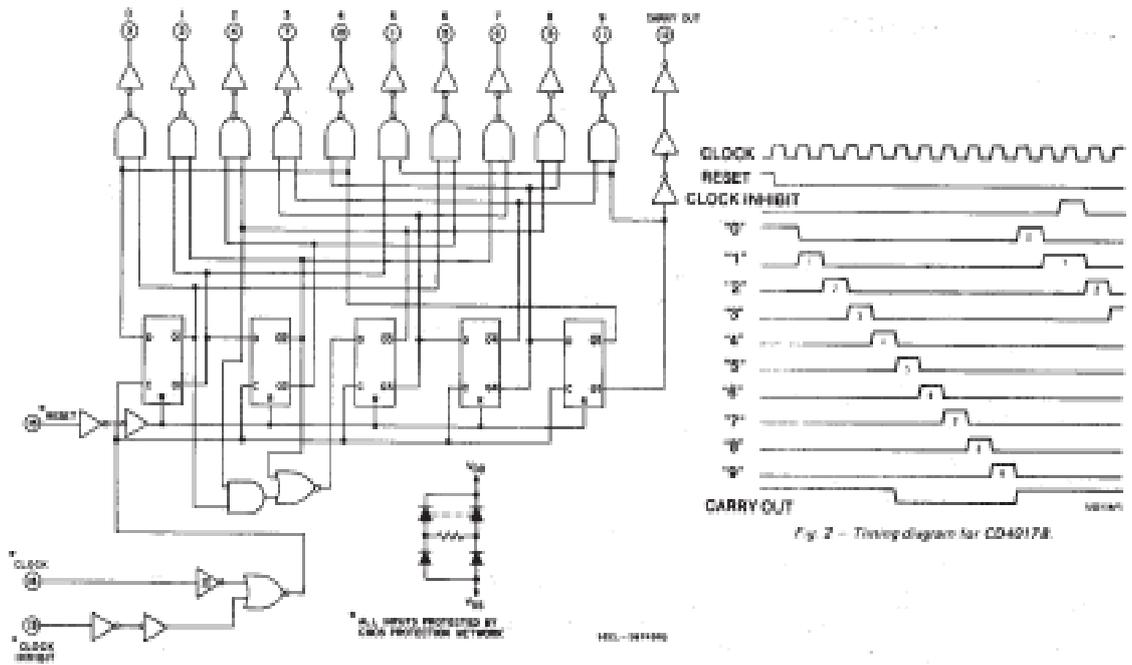


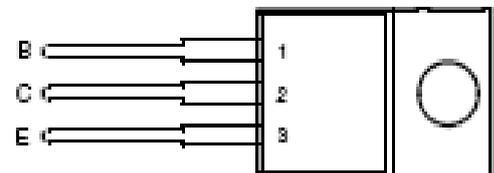
Fig. 4 - Timing diagram for CD4022B.

BDW63, BDW63A, BDW63B, BDW63C, BDW63D
NPN SILICON POWER DARLINGTONS

BOURNS®

- Designed for Complementary Use with BDW64, BDW64A, BDW64B, BDW64C and BDW64D
- 60 W at 25°C Case Temperature
- 6 A Continuous Collector Current
- Minimum h_{FE} of 750 at 3V, 2 A

TO-220 PACKAGE
(TOP VIEW)



Pin 2 is in electrical contact with the mounting base.

MDTRACA

absolute maximum ratings at 25°C case temperature (unless otherwise noted)

RATING		SYMBOL	VALUE	UNIT
Collector-base voltage ($I_B = 0$)	BDW63	V_{CB0}	45	V
	BDW63A		60	
	BDW63B		80	
	BDW63C		100	
	BDW63D		120	
Collector-emitter voltage ($I_B = 0$) (see Note 1)	BDW63	V_{CE0}	45	V
	BDW63A		60	
	BDW63B		80	
	BDW63C		100	
	BDW63D		120	
Emitter-base voltage		V_{EB}	5	V
Continuous collector current		I_C	6	A
Continuous base current		I_B	0.1	A
Continuous device dissipation at (or below) 25°C case temperature (see Note 2)		P_{tot}	20	W
Continuous device dissipation at (or below) 25°C free air temperature (see Note 3)		P_{tot}	2	W
Unlamped inductive load energy (see Note 4)		$\%LL_{L^2}$	50	mJ
Operating junction temperature range		T_J	-65 to +150	°C
Operating temperature range		T_{stg}	-65 to +150	°C
Operating free-air temperature range		T_A	-65 to +150	°C

- NOTES: 1. These values apply when the base-emitter diode is open circuited.
 2. Derate linearly to 150°C case temperature at the rate of 0.48 W/°C.
 3. Derate linearly to 150°C free air temperature at the rate of 18 mW/°C.
 4. This rating is based on the capability of the transistor to operate safely in a circuit of $L = 20$ mH, $I_{B(stn)} = 5$ mA, $R_{BC} = 100 \Omega$, $V_{BE(stn)} = 0$, $R_B = 0.1 \Omega$, $V_{CC} = 20$ V.

PRODUCT INFORMATION

AUGUST 1978 - REVISED SEPTEMBER 2002
 Specifications are subject to change without notice.

BDW63, BDW63A, BDW63B, BDW63C, BDW63D
NPN SILICON POWER DARLINGTONS

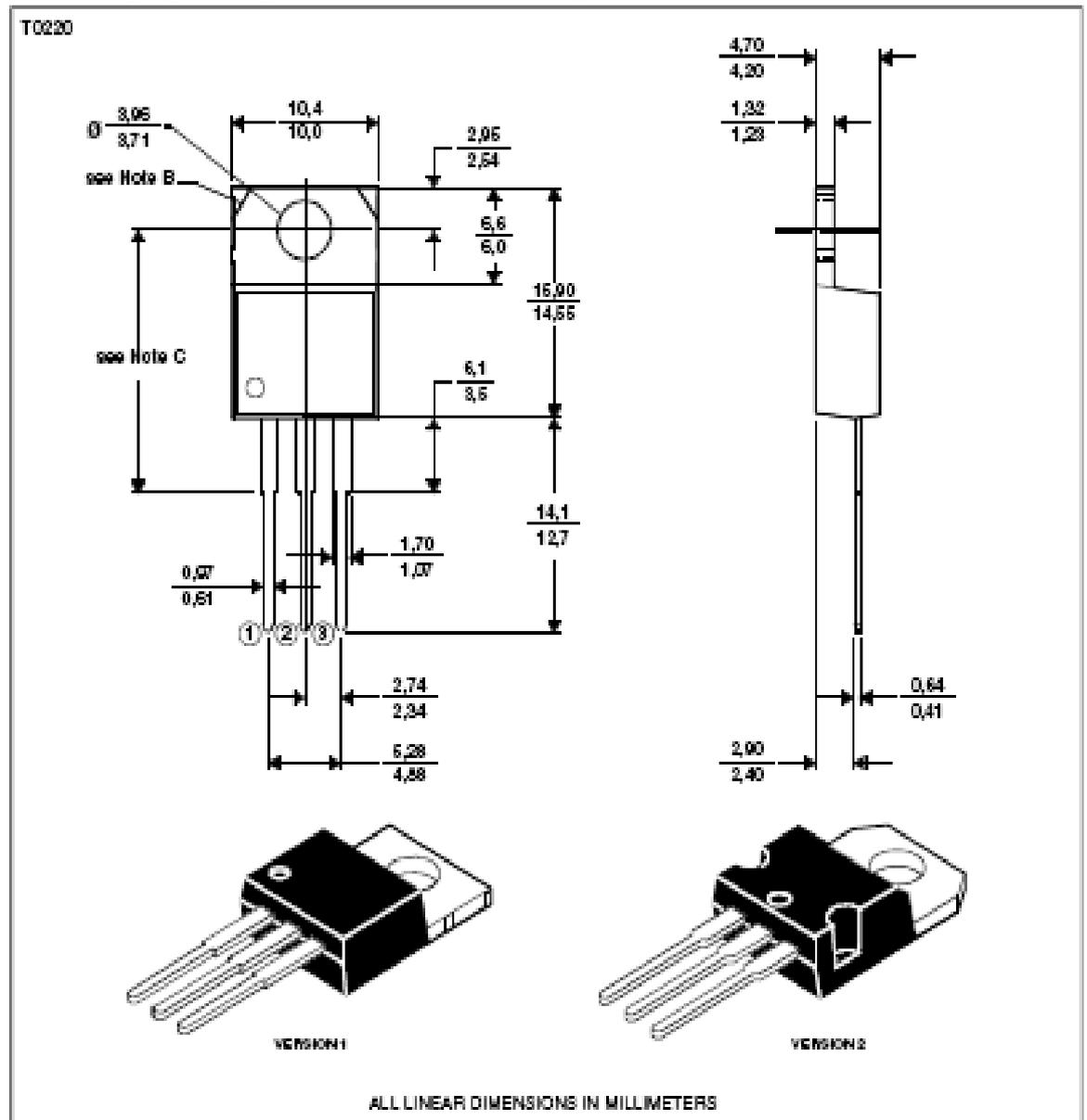


MECHANICAL DATA

TO-220

3-pin plastic flange-mount package

This single-in-line package consists of a circuit mounted on a lead frame and encapsulated within a plastic compound. The compound will withstand soldering temperature with no deformation, and circuit performance characteristics will remain stable when operated in high humidity conditions. Leads require no additional cleaning or processing when used in soldered assembly.



NOTES: A. The centre pin is in electrical contact with the mounting tab.
B. Mounting tab corner profile according to package version.
C. Typical fixing hole centre stand off height according to package version.
Version 1, 18.9 mm. Version 2, 17.6 mm.

MOJ08E

PRODUCT INFORMATION

AUGUST 1978 - REVISED SEPTEMBER 2002
Specifications are subject to change without notice.

Timer

NE/SA/SE555/SE555C

DESCRIPTION

The 555 monolithic timing circuit is a highly stable controller capable of producing accurate time delays, or oscillation. In the time delay mode of operation, the time is precisely controlled by one external resistor and capacitor. For a stable operation as an oscillator, the free running frequency and the duty cycle are both accurately controlled with two external resistors and one capacitor. The circuit may be triggered and reset on falling waveforms, and the output structure can source or sink up to 200 mA.

FEATURES

- Turn-off time less than 2 μ s
- Max. operating frequency greater than 500 kHz
- Timing from microseconds to hours
- Operates in both astable and monostable modes
- High output current
- Adjustable duty cycle
- TTL compatible
- Temperature stability of 0.005% per $^{\circ}$ C

APPLICATIONS

- Precision timing
- Pulse generation
- Sequential timing
- Time delay generation
- Pulse width modulation

PIN CONFIGURATION

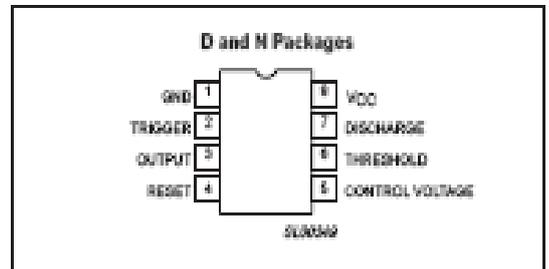


Figure 1. Pin configuration

BLOCK DIAGRAM

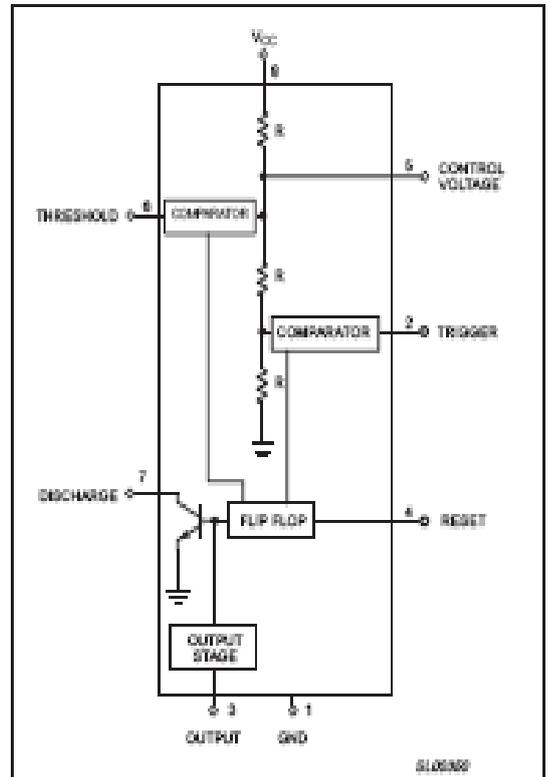


Figure 2. Block Diagram

ORDERING INFORMATION

DESCRIPTION	TEMPERATURE RANGE	ORDER CODE	DWG #
8-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	0 to +70 $^{\circ}$ C	NE555D	810T96-1
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	0 to +70 $^{\circ}$ C	NE555N	810T97-1
8-Pin Plastic Small Outline (SO) Package	-40 $^{\circ}$ C to +85 $^{\circ}$ C	SA555D	810T96-1
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-40 $^{\circ}$ C to +85 $^{\circ}$ C	SA555N	810T97-1
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-55 $^{\circ}$ C to +125 $^{\circ}$ C	SE555CN	810T97-1
8-Pin Plastic Dual In-Line Package (DIP)	-55 $^{\circ}$ C to +125 $^{\circ}$ C	SE555N	810T97-1

Timer

NE/SA/SE555/SE555C

EQUIVALENT SCHEMATIC

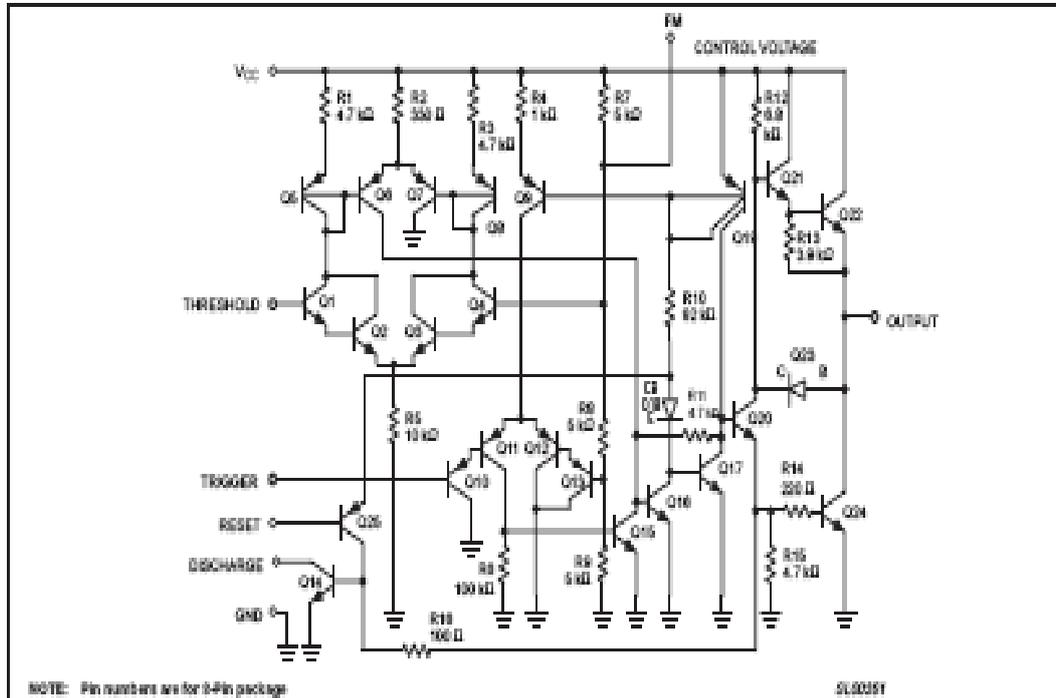


Figure 3. Equivalent schematic

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS

SYMBOL	PARAMETER	RATING	UNIT
V_{CC}	Supply voltage	+18	V
	SE555 NE555, SE555C, SA555	+18	V
P_D	Maximum allowable power dissipation ¹	600	mW
T_{amb}	Operating ambient temperature range		
	NE555	0 to +70	°C
	SA555	-40 to +85	°C
	SE555, SE555C	-55 to +125	°C
T_{stg}	Storage temperature range	-65 to +150	°C
T_{solder}	Lead soldering temperature (10 sec max)	+230	°C

NOTE:

- The junction temperature must be kept below 125 °C for the D package and below 150°C for the N package.
At ambient temperatures above 25 °C, where this limit would be derated by the following factors:
D package 160 °C/W
N package 100 °C/W

Timer

NE/SA/SE555/SE555C

TYPICAL APPLICATIONS

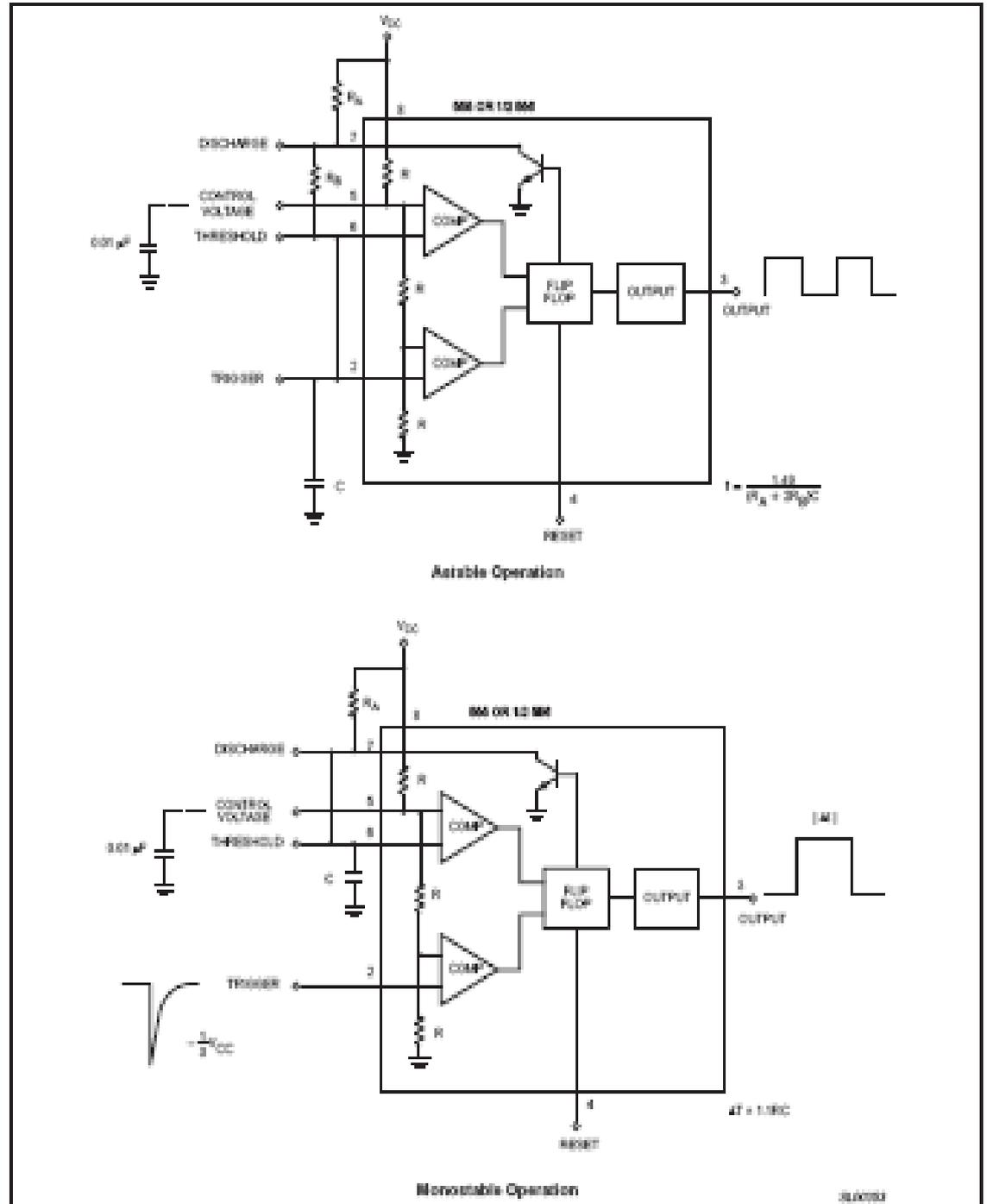


Figure 5. Typical Applications

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

Références :

- [1] S.P. Gwan and H.P.Sang "Design of magnetic fluid linear pump" IEEE Transaction on Magnetics, VOL. 35, NO.5, September 1999.
- [2] Eui-Gyu Kim, Joe-geun Oh, Bumkyoo Choi "A study on the development of a continuous peristaltic micropump using magnetic fluids". Sensors and Actuators A128 pp. 43-51, (2006),
- [3] Kuno Shimada, Hideo Oka "Magnetic characteristics of magnetic compound fluid (MCF) under DC and AC magnetic fields. Journal of magnetism and magnetic materials pp. 804-807, (2005).
- [4] Hairong Cui, Decai Li, Mingli Sun "Inductive level measurement sensor with magnetic fluid" DOI 10.11.09/ ICMTMA pp.495, 2009.
- [5] Kang Seo and Gwan Soo Park "A research on the pumping forces in the magnetic fluid linear pump" IEEE Transaction on magnetics, VOL.41, NO.5, MAY 2004
- [6] Y.B Cohen and Z. Chang, "Piezoelectrically activated miniature peristaltic pump" SPIE, 8th Annual International Symposium on Smart Structures, Newport Beach, CA, US, vol.3992, Mar. 6-8, 2000.
- [7] Hin Hu, Hejun Du and Shihfu Ling "A digital miniature pump for medical applications" IEEE Transactions on mechatronics, VOL.7, NO. 4, DEC 2002.
- [8] D.Sik Lee, J.Soo Ko and Y.Tae Kim "Bidirectional pumping properties of a peristaltic micropump with simple design and chemical resistance" Thin solid films, pp. 285-290, (2004).
- [9] F.Carpi, C.Menon and D.De Rossi "An electroactive elastomeric actuator for all-polymer linear peristaltic pumps". IEEE/ASME Transactions on mechatronics pp.1083-4435 ©2009 IEEE.
- [10] K.Nishibori, T.Tamisaku and K.Iia "Switching characteristics of torque transmission utilizing movement of magnetic field. 0-7803-6456-2/00 ©2000 IEEE.
- [11] Jibin Zou "Design and pressure control of high-pressure differential magnetic fluid seals", IEEE Transactions on magnetics, vol. 39 .NO5, Sep 2003.
- [12] Mir Majid Teymoori, Ebrahim Abbaspour-Sani "Design and simulation of a novel electrostatic peristaltic micromachined pump for drug delivery applications" Sensors and actuators A117, pp. 222-229, (2005).
- [13] M.Cong and H.Shi "A study of magnetic fluid rotary seals for wafer handling robot" 15th international conference on mechatronics and machine vision in practice (M2VIP08), 2-4 Dec 2008, Auckland, New-Zeland.

- [14] R.Hao,D.Li and G.Dong “Inductance transducer for pressure difference measurement with magnetic fluid” 2009 International conference on measuring technology and mechatronics automaton. DOI 10.1109/ICMTMA. pp.493,2009.
- [15] E.G.Kim, J.Oh,B.Choi “A study on the development of a continuous peristaltic micropump using magnetic fluids”. Sensors and Actuators, A128,pp.43-51, (2006)
- [16] D.E.Kaplan,D.Burkett and L.Warden” Linear peristaltic pump” United states patent, patent number: 4,909,710 Date of patent: Mar.20,1990.
- [17] K.Hanseup, A.A.Aaron, N.Khalil, L.P.Bernal and P.D.Washabaugh ”A fully integrated high-Efficiency peristaltic 18-stage gas micropump with active microvalves” MEMS 2007, Kobe, Japan, pp21-25 January 2007.
- [18]J.C. Sabonnadière et J.L.Coulomb “Extrait de la collection les techniques de l’ingénieur. 12-1988. ”.
- [19] A.Benoudjit “ Cours de la CAO ”, Département d’électrotechnique,faculté des sciences de l’ingénieur,Université de Batna.
- [20] S.Naceur “Contribution à la modélisation numérique d’une pompe MHD en tenant compte de la nature des matériaux des électrodes et du fluide” thèse de magister 2007, Département d’électrotechnique Université de Batna.
- [21] F.Z.Kadid “Contribution à l’étude des convertisseurs MHD à induction” Thèse de Doctorat 2004, Département d’électrotechnique, Université de Batna.
- [22] H.Bicha “Modélisation des phénomènes électromagnétiques et thermiques couplés par la méthode des volumes finis et de la paramétrisation dans les systèmes magnétiques de le chauffage par induction” thèse de magister 2001, Université de Biskra.
- [23]E.Flecher, T.Joudinaud “Expériences cliniques avec les nouvelles assistances ventriculaires mécaniques et électromagnétiques ” Science directe- Annales de cardiologie et d’angéologie-Elsevier 2006.
- [24] katarine O. Burlson, Gray E.Schwartz “Cardiac torsion and electromagnetic fields: The cardiac bioinformation hypotheses” ELSEVIER Medical hypotheses 64,pp.1109-1116,(2005).
- [25] Maaïke Peschar, Hans de Swart, Koen J.Michels, Robert S. Reneman, Friz W.Prinzen” Left ventricular septal and apex pacing for optimal pump function in canine hearts” Journal of American college of cardiology:Vol 41,No7,2003

- [26] Jeff Drabi, Mihai Rada, Michael Ohadi and John Laler "Design, Fabrication, and Testing of Electrohydrodynamic Ion-Drag Micropump." *Journal of micromechanical systems* , VOL.11 No.6 DEC.2002.
- [27] Thanh Tung Nguyen, My Pham, Nam Seo Soo "Development of a peristaltic micropump for biomedical applications based on mini LIPCA" *Journal of bionic engineering* 5 pp. 135-141. (2008).
- [28] Kamel SRAIRI "Modélisation d'actionneurs électromagnétiques alimentés en régime transitoire" Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur de NANTES.
- [29] H K Versteeg and W Malalasekera "An introduction to computational fluid dynamics the Finite Volume Method" PEARSON 2007
- [30] R.BERTON "MAGNETO-HYDRODYNAMIQUE" Edition MASSON, 1991.
- [31] Suhas.V. Patankar "Numerical Heat Transfer and Fluid Flow "Hemisphere Pulising Coporation, 1980.
- [32] J.L.Queyrel et J.Mesplède "Précis de Physique" Electricité 2, Edition Bréal, 1985.
- [33] Olivier BARRE "Contribution à l'étude des formulation de calcul de la force magnétique en magnétostatique, approche numérique et validation expérimentale" Thèse de doctorat (2003), Ecole Centrale de Lille et l'Université des sciences et technologies de Lille.