

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des sciences et de la Technologie
Département d'Electronique et Télécommunications



Support de Cours

Actionneurs Industriels

Filière: Electronique
Spécialité: Instrumentation
Unité d'enseignement : UEF 2.1.1
Master 2

Préparé par :

Khalil Tamersit

2020-2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Cette page a été laissée intentionnellement blanche

Sommaire

Chapitre 1: Les actionneurs électriques

1.1 Les pré-actionneurs électriques.....	3
1.1.1 Introduction.....	3
1.1.2 Le relais et ses différents types.....	3
1.1.2.1 Relais électromagnétique.....	3
1.1.2.1.1 Présentation.....	3
1.1.2.1.2 Principe de fonctionnement.....	4
1.1.2.1.3 Caractéristiques principales d'un relais électromagnétique.....	4
1.1.2.2 Relais statique.....	4
1.1.2.2.1 Présentation.....	4
1.1.2.2.2 Principe de fonctionnement.....	5
1.1.2.2.3 Caractéristiques d'un relais statique.....	5
1.1.2.2.4 Exemple.....	6
1.1.3 Le contacteur.....	6
1.1.3.1 Constituants du contacteur.....	6
1.1.3.2 Principe de fonctionnement.....	6
1.1.3.3 Avantage d'usage.....	7
1.1.4 Le sectionneur.....	8
1.1.4.1 La fonction du sectionneur.....	8
1.1.4.2 Le rôle du sectionneur.....	8
1.1.4.3 Symbole et constitution.....	8
1.1.5 Les fusibles.....	9
1.1.5.1 Composition.....	9
1.1.5.1.1 L'élément fusible.....	9
1.1.5.1.2 Le corps.....	9
1.1.5.1.3 La matière de remplissage.....	9
1.1.5.2 Fonctionnement.....	9
1.1.5.3 Types.....	10
1.1.5.4 Choix et mise en œuvre des fusibles.....	10
1.1.6 Le relais thermique.....	10
1.1.6.1 Rôle.....	10
1.1.6.2 Principe de fonctionnement.....	10
<i>Références.....</i>	11
1.2 Convertisseur électromécanique.....	12
1.2.1 Introduction.....	12
1.2.2 Organisation de la machine.....	12
1.2.3 Principe de fonctionnement.....	13
1.2.3.1 La loi de la place.....	13
1.2.3.2 Principe de fonctionnement d'un MCC.....	14
1.2.3.3 Modes de fonctionnement d'un MCC: Schémas équivalents et relations.....	14
1.2.3.3.a Fonctionnement en moteur.....	15
1.2.3.3.b Fonctionnement en génératrice.....	15
1.2.4 Démarrage du MCC.....	16
1.2.5 Bilans de puissance.....	16
1.2.5.a Fonctionnement en moteur.....	17
1.2.5.b Fonctionnement en génératrice.....	17
1.2.6 Réversibilité de la machine à courant continu.....	17
1.2.7 Alimentation du moteur.....	17
1.2.8 Fonctionnement à vitesse variable.....	18
1.2.9 Exercice d'application.....	18
<i>Références.....</i>	18
1.3 Les moteur pas à pas (Stepper motors).....	19
1.3.1 Introduction.....	19
1.3.2 Définition.....	19

1.3.3 Symbole.....	19
1.3.4 Principe de commande.....	19
1.3.5 Différents types.....	20
1. 3.5.1 Moteur à aimant permanent.....	20
1.3.5.1.a Composition.....	20
1.3.5.1.b Caractéristiques.....	20
1.3.5.1.c Types de MPP à aimant permanent.....	20
1.3.5.1.d Principe de fonctionnement.....	21
1.3.5.1.e Alimentation.....	23
1. 3.5.2 Moteur pas à pas à réluctance variable.....	27
1. 3.5.2.a Constitution.....	27
1. 3.5.2.b Principe de travail.....	27
1. 3.5.2.c Inconvénients.....	28
1. 3.5.2.d Avantages.....	28
1. 3.5.3 Moteur pas à pas hybride.....	28
1. 3.5.3.a Principe de fonctionnement.....	28
1. 3.5.3.b Réalisation et industrie	29
1. 3.5.3.c Performances des MPPs hybride.....	29
<i>Références.....</i>	<i>29</i>
Chapitre 2: Les actionneurs pneumatiques et hydrauliques	
2.1. Introduction.....	30
2.2. L'énergie pneumatique.....	30
2.2.1 Constitution d'une installation pneumatique.....	30
2.2.2 Production de l'énergie pneumatique	31
2.2.2.1 Compression de l'air	31
2.2.2.2 Stockage de l'énergie pneumatique	32
2.2.2.3 Conditionnement de l'air.....	32
2.2.3 Principes physiques.....	32
2.3. Les pré-actionneurs pneumatiques.....	33
2.3.1 Fonction.....	33
2.3.2 Constituants d'un distributeur	33
2.3.3 Les principaux distributeurs pneumatiques.....	33
2.3.3.1 Distributeur 3/2.....	34
2.3.3.2 Distributeur 5/2.....	34
2.3.4 Les dispositifs de commande.....	34
2.3.5 Application: Presse pneumatique	35
2.4. Les actionneurs pneumatiques.....	35
2.4.1 Les vérins.....	35
2.4.1.1 Constitution et principe de fonctionnement.....	36
2.4.1.2 Types usuels des vérins.....	36
2.4.1.2.a Vérin simple effet.....	36
2.4.1.2.b Vérin double effet.....	37
2.4.1.2.c Vérins spéciaux.....	37
2.4.1.3 Caractéristiques et performances d'un vérin.....	37
2.4.1.4 Exemple d'utilisation des vérins pneumatiques.....	38
2.4.2 Le générateur de vide ou venturi.....	38
2.4.2.1 Avantages des générateurs de vide à effet venturi.....	39
2.5. Les actionneurs hydrauliques.....	39
2.5.1 Définition.....	39
2.5.2 Les vérins hydrauliques.....	39
2.5.2.1 Principaux types de vérin hydraulique.....	39
2.5.2.1.a Vérin hydraulique simple effet (VSE)	40
2.5.2.1.b Vérin hydraulique double effet (VDE)	40
2.5.2.1.c Vérins hydrauliques spéciaux.....	40
2.5.2.2 Dimensionnement des vérins.....	40
<i>Références.....</i>	<i>41</i>

Chapitre 3: Actionneurs électrostatiques	
3.1. Introduction.....	42
3.2. Actionneurs à plaques parallèles.....	42
3.3. Actionneur d'entraînement en peigne.....	44
3.4. Actionneur linéaire à induction électrostatique.....	46
<i>Références</i>	46
Chapitre 4: Actionneurs ultrasonores ('ultrasonic motors')	
4.1. Introduction.....	47
4.2. Construction fondamentale du moteur à ultrasons.....	48
4.3. Caractéristiques des moteurs à ultrasons.....	49
4.3.1 Les avantages.....	49
4.3.2 Les inconvénients.....	49
4.4. Classification des moteurs ultrasonique.....	49
4.4.1 Moteurs à ultrasons à ondes stationnaires.....	50
4.4.2 Moteurs à ultrasons à ondes de propagation.....	51
4.5. Type de moteurs à ultrasons à ondes stationnaires.....	52
4.5.1 Moteur rotatif.....	52
4.5.1.1 Composition.....	52
4.5.1.2 Principe de fonctionnement.....	53
4.5.2 Moteur linéaire.....	54
4.5.2.1 Composition et principe de fonctionnement.....	54
<i>Références</i>	56
Chapitre 5: Actionneurs Stick and slip': l'effet collé-glissé	
5.1. Introduction.....	57
5.2. Principe et mode de fonctionnement.....	57
5.3. Composition des actionneurs 'stick and slip' et leurs différentes configurations.....	58
5.3.1 Les pieds déformables	58
5.3.2 L'interface mécanique entre le curseur et les pieds.....	59
5.3.3 Masse inertielle du mobile (partie mobile)	59
5.3.4 Le système de charge.....	59
5.3.5 Le système de guidage	59
5.4. Actionneur 'stick and slip' à un degré de liberté.....	60
5.5. Modélisation	61
5.6. Avantages.....	61
5.7. Mise en échelle.....	62
<i>Références</i>	62
Chapitre 6: Actionneurs Intelligents	
6.1. Introduction.....	63
6.2. Actionneurs intelligents : composition et principe de fonctionnement.....	63
6.3. Applications en robotique.....	66
6.4. Bras de robot avec articulations et poignet.....	66
6.4.1 Moteur intelligent piézoélectrique linéaire.....	67
6.4.2 Moteur intelligent piézoélectrique rotatif.....	67
6.5. Avantages des actionneurs intelligents.....	68
<i>Références</i>	68
-Conclusion-	
<i>Références Générales</i>	70

Présentation du cours

Les actionneurs sont des dispositifs qui permettent à un système automatisé d'effectuer la tâche ou l'action pour laquelle il a été programmé. Ils constituent, avec les capteurs, la partie opérative d'un système automatisé. Ces dispositifs importants ne sont pas seulement très utilisés dans l'instrumentation industrielle mais aussi dans les robots modernes, instrumentation médicale, ...etc. C'est pour cette raison, la maîtrise de ces dispositifs par l'instrumentiste (ou le master en instrumentation) se considère comme une compétence prépondérante.

Ce cours intitulé « Actionneurs Industriels » permet de familiariser l'étudiant avec les actionneurs les plus répandus dans le champs industriel. Le cours est scindé en un ensemble d'unités d'apprentissage qui permettent aux étudiants d'acquérir des compétences en matière des concepts et principes pertinents, de câblage des systèmes électroniques contenant des actionneurs, et de modélisation des caractéristiques des actionneurs. Il est à noter que cette matière contient des initiations à quelques axes de recherches sur les actionneurs de pointe en servant les mastérants qui visent le troisième cycle.

La figure ci-dessous montre les types des actionneurs les plus répandus et leurs domaines d'utilisation.

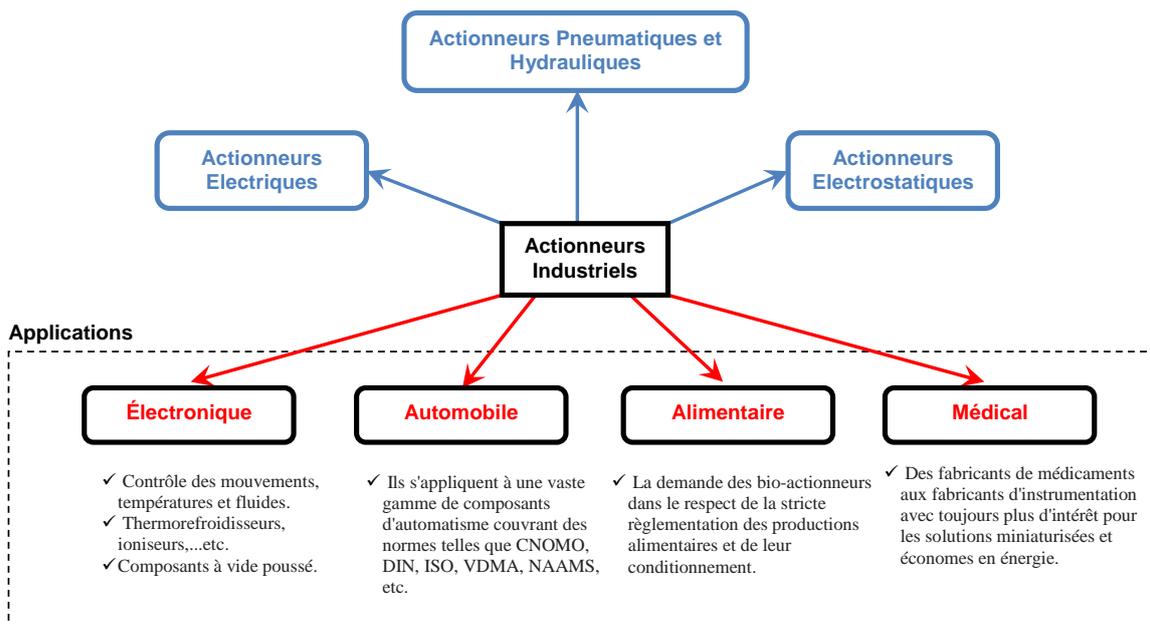


Figure 0. Les principaux types des actionneurs et leurs domaines d'application.

Chapitre 1

Les actionneurs électriques

Introduction

Dans l'industrie actuel, l'interfaçage entre les différents champs technologiques (e.g. électronique, mécanique, électrotechnique, chimie, etc...) et les mécanismes physiques est devenu de plus en plus nécessaire visant des systèmes industriels à haute-performance. Ce chapitre est consacré au actionneurs électriques y compris les dispositifs et les systèmes associés à savoir les pré-actionneurs. En effet, les actionneurs électriques sont les plus répandus dans le l'industrie moderne en raison de ses caractéristiques rentables à tous les niveaux. Ce chapitre est constitué de trois sections principale: les pré-actionneurs électriques, les convertisseur électromécanique, et les moteur pas à pas [1-6].

1.1 Les pré-actionneurs électriques

1.1.1 Introduction

Dans un système industriel automatisé, les pré-actionneurs font partie de la chaîne d'action. Pratiquement, les pré-actionneurs électriques assurent la distribution de l'énergie de puissance aux actionneurs sur l'ordre de la partie de commande. En d'autres termes, ils sont des constituants de gestion de l'énergie électrique fournie à l'actionneur. Généralement, les pré-actionneurs sont soit un contacteur, soit un relais dans les circuits électriques [1,2].

1.1.2 Le relais et ses différents types

Un relais est un appareil électrique dans lequel un courant ou une tension contrôle une commutation d'un élément mécanique. Ce dispositif a comme fonction l'interfaçage entre un circuit de puissance alternatif ou continu et un circuit de commande. Il est à noter qu'il y a deux catégories de relais: le relais statique et le relais électromagnétique [2].

1.1.2.1 Relais électromagnétique

1.1.2.1.1 Présentation

Un relais électromagnétique peut être défini comme un interrupteur mécanique dont la manœuvre ou l'interruption se fait d'une manière électromagnétique via un signal électrique provenant de la partie commande. Pratiquement, le signal commandant est un courant "I" qui circule dans le circuit de stimulation du relais. Ce circuit est composé par une bobine d'excitation et ses contacts associés comme le montre la figure ci-dessous (i.e. Figure 1.1) [2].

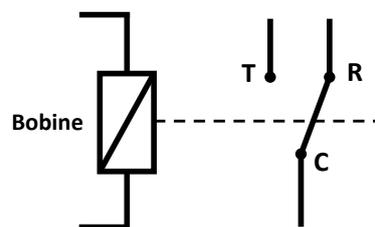


FIGURE 1.1 Constitution d'un relais électromagnétique.

Le point T, R et C signifient la position en travail, la position en repos et la position commune, respectivement. Les contacts associés sont les éléments métalliques qui laissent passer ou coupent le courant "I" tout dépend de la commande de la bobine (indiquée dans la même figure par la ligne discontinue) [2].

1.1.2.1.2 Principe de fonctionnement

Lorsqu'un courant "I" circule dans le partie d'excitation (i.e. la bobine), le contact initialement en position R (i.e. en repos) passe en position (T) travail. Cette situation continue comme telle est tant qu'un courant "I" active la bobine. Dans le cas ou le courant "I" disparaît le contact retourne en position "R" à cause du champ électromagnétique inactif [1,2].

1.1.2.1.3 Caractéristiques principales d'un relais électromagnétique

Le relais électromagnétique est fondamentalement caractérisé par [2]:

- Une tension permettant l'excitation de la bobine de commande (i.e. La tension d'alimentation).
- La résistance de la partie d'excitation (i.e. bobine de commande) qui permet de régler le courant "I" qui circule dans le circuit d'excitation.
- Le nombre de contacts souhaités.
- Le pouvoir de coupure, en d'autres termes, le courant maximal commutable par les contacts de relais sans aucun endommagement.

1.1.2.2 Relais statique

1.1.2.2.1 Présentation

Un relais statique peut commuter (i.e. off ↔ on) sans aucune pièce dynamique (d'une façon absolument statique), ce qui prolonge la durée de vie de l'appareil. La structure descriptive d'un relais statique peut être illustrée de la façon suivante [2]:

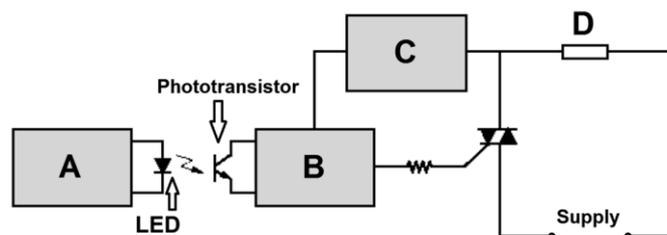


FIGURE 1.2 Structure de base d'un relais statique [2].

La section (A) est le système électrique d'entrée (Input) qui correspond au bloc de traitement. La section (B) est le circuit de mise à niveau. La partie (C) est le système de détection de passage de zéro, il permet de ne commuter le relais statique que si la tension secteur est égale à zéro. Le bloc (D) est la charge qui peut comporter un actionneur [2].

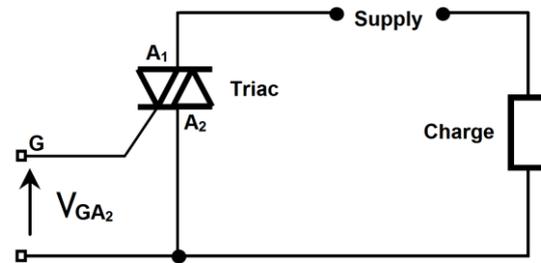


FIGURE 1.3 Fonctionnement simplifié d'un TRIAC en mode interrupteur [2].

Il est à noter que le triac dans la Figure 1.2 et la Figure 1.3 peut s'agir comme un interrupteur bien commandé comme suit [2]:

- Si $V_{GA2} = 0$ V, Triac est équivalent à un circuit ouvert, la charge n'est pas alimentée.
- Si $V_{GA2} = (1$ V par exemple), Triac est équivalent à un circuit fermé, → la charge est bien alimentée.

1.1.2.2.2 Principe de fonctionnement

Le model le plus simple et pratique d'un relais statique est constitué d'une diode électroluminescente (LED) dans la partie input et un phototransistor coté sortie. Notant que l'entrée et la sortie sont bien séparés par un chemin optique (Voir Figure 1.2 et Figure 1.4). Sur ce, la LED va convertir l'énergie électrique en une lumière de commande, qui stimule le phototransistor passant au mode de conduction tout en commandant la commutation On/Off. Tout dépend de la grandeur électrique (i.e. tension et courant), un thyristor ou un Triac photosensible peuvent remplacer le phototransistor dans la figure ci-dessous [1,2].

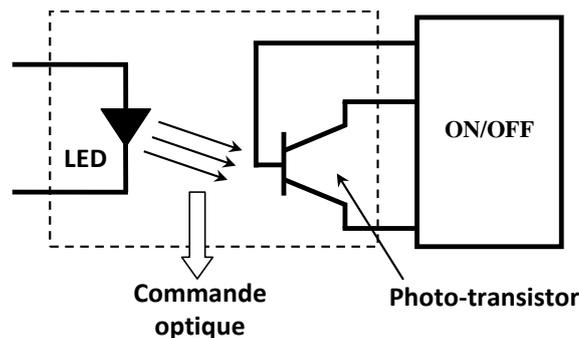


FIGURE 1.4 Schéma d'une simple commande On-Off via un couple LED-Phototransistor.

1.1.2.2.3 Caractéristiques d'un relais statique

Les caractéristiques principales d'un relais statique sont [2]:

- Le courant maximal commutable par le contact de sortie (i.e. courant d'emploi).
- La tension continue ou alternative de l'alimentation, autrement dit, la tension d'entrée.
- La tension d'alimentation de la charge qui est de type alternatif généralement.

1.1.2.2.4 Exemple

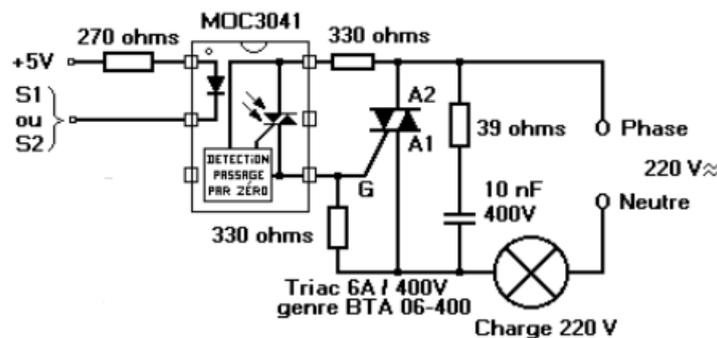


FIGURE 1.5 Pilotage d'un appareil ~220 V [3].

Pratiquement, lorsque la LED de l'opto-triac est allumée intentionnellement (S_1 vers la masse), le triac du *MOC3041* devient conducteur tout en commandant le triac extérieur qui se comporte à son tour comme un circuit fermé. Donc, la charge/l'actionneur est bien alimentée.

1.1.3 Le contacteur

Le contacteur fait partie également de la famille des pré-actionneurs parce qu'il s'utilise avant l'actionneur dans la chaîne de l'action. Le contacteur peut être considéré comme un relais électromagnétique ayant le pouvoir de commuter de fortes puissances. Donc, le contacteur est un pré-actionneur qui sert à fermer ou ouvrir un circuit électrique (généralement de puissance), par l'intermédiaire d'un circuit de commande [2].

1.1.3.1 Constituants du contacteur

Comme montré dans la figure 1.6, un contacteur est composé de [2], [4]:

- Un électro-aimant.
- Ressort de rappel.
- Une armature fixe.
- Une armature mobile.
- Les pôles (les contacts principaux), qui sont chargés d'établir ou de couper le courant.
- Un ou plusieurs contacts auxiliaires (bloc additif) qui assurent les auto-alimentations et les asservissements dans le circuit de commande de l'installation.

1.1.3.2 Principe de fonctionnement

La figure 1.6 (a) et (b) montrent le dedans d'un contacteur à l'état ouvert et fermé, respectivement. Lorsque la bobine est alimentée par le biais du circuit de commande, elle se

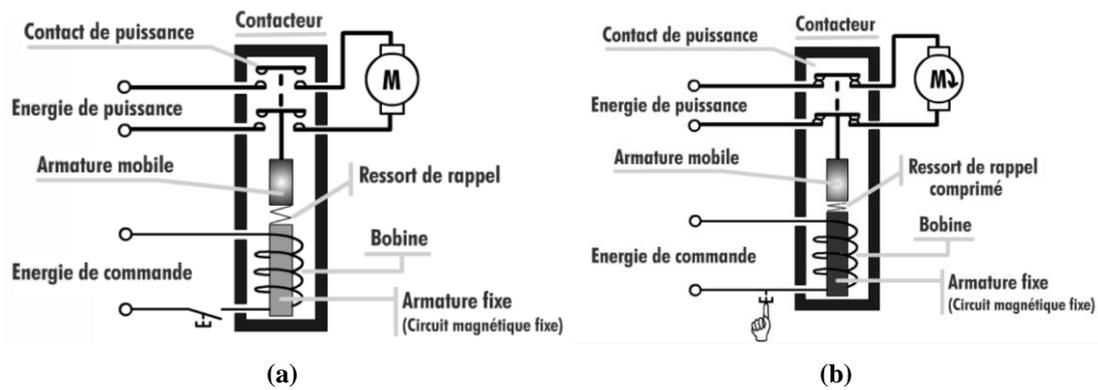


FIGURE 1.6 Contacteur à l'état (a) ouvert (b) fermé [4].

comporte comme un aimant avec un champ magnétique qui gouverne à son tour le changement de position de l'armature dynamique qui presse le ressort de rappel en fermant les contacts de puissance [2], [4]. Sur ce, l'actionneur M est donc alimenté. Le symbole du contacteur est schématisé dans la figure 1.7.

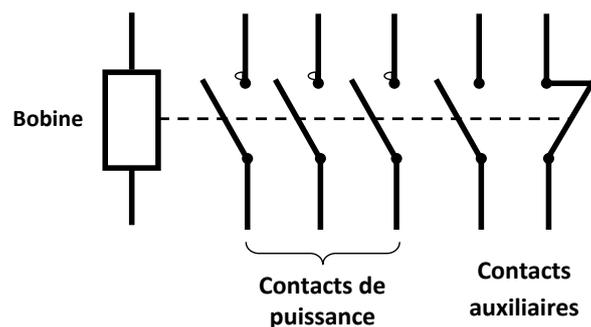


FIGURE 1.7 Symbole du contacteur [2].

1.1.3.3 Avantage d'usage

Les mérites majeures de l'usage d'un contacteur sont [2]:

- Une commande à distance est possible.
- Interruption de puissance. (i.e. des courants monophasés ou polyphasés importants).
- Garantie d'un fonctionnement intermittent ou continu et possibilité de multiplier les postes de contrôle.
- Coupure prévue (i.e. sous courant nominal ou en surcharge).
- Le fusible peut assurer la coupure, en cas de défaut en fermeture.

1.1.4 Le sectionneur

Pratiquement, un réseau peut alimenter plusieurs actionneurs (machines électriques, vérins, ...etc.), donc il est impératif que chaque actionneur puisse être mise séparément hors tension en toute sécurité. Cette sorte d'isolement peut être réalisée par un sectionneur [2].

1.1.4.1 La fonction du sectionneur

Un sectionneur sert à assurer le sectionnement (i.e. isolement ou séparation du réseau) au commencement des équipements comportant des actionneurs. Généralement, il contient des fusibles (pour la protection) et un ou deux contacts de pré-coupe [2].

1.1.4.2 Le rôle du sectionneur

Le sectionneur peut être considéré comme un dispositif mécanique de connexion, capable de séparer électriquement (i.e. isolement électrique) un circuit lorsque l'énergie électrique est nul. En d'autre terme, le sectionneur n'a aucune force de coupure, donc il ne doit pas être sectionné en charge (i.e. l'énergie électrique de l'actionnement est non nul). Notant que le bloc isolé est la partie de l'installation en aval du sectionneur. Cela permet par exemple d'effectuer une maintenance curative ou préventive au niveau de la partie qui se trouvent en *aval* du sectionneur [2].

1.1.4.3 Symbole et constitution

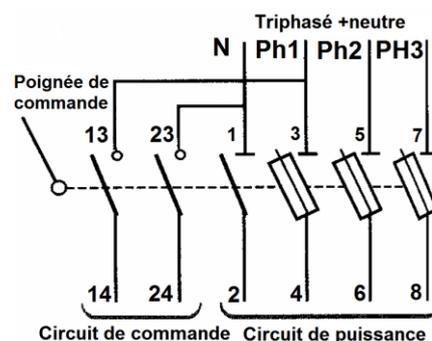


FIGURE 1.8 Symbole électrique d'un sectionneur à fusible avec contacts de pré-coupe [2].

Le rôle des contacts secondaire (à gauche) dans la figure 1.8 est la pré-coupe. Pratiquement, à l'ouverture du sectionneur via le poignée de commande, les contacts de pré-coupe 13-14 et 23-24 s'ouvrent avant les contacts de puissance, ce qui permet d'éviter la coupure en charge. Donc, il s'agit d'une bonne fonction de sécurité indispensable [1,2].

1.1.5 Les fusibles

Un fusible est un dispositif destiné à protéger un appareil ou une ligne électrique contre un courant électrique élevé. Sa fonction principale consiste à ouvrir un circuit ou une ligne électrique par fusion d'un élément sensible calibré, lorsque le courant, dans un moment donné, dépasse une valeur bien déterminée. Le symbolisation du fusible est illustrée ci-contre [1], [2].

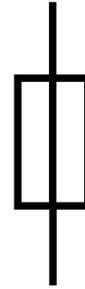


FIGURE 1.9 Symbole électrique d'un fusible.

1.1.5.1 Composition

1.1.5.1.1 L'élément fusible: L'élément fusible peut être considéré comme le cœur de l'appareil fusible. La caractéristique principale de l'élément fusible est sa sensibilité à la valeur efficace du courant. Généralement, il est réalisé en matériau de très faible résistivité, et il se présente sous la forme d'un fil [1,5].

1.1.5.1.2 Le corps: Le corps est réalisé en céramique, en verre ou en d'autres matériaux similaires [5].

1.1.5.1.3 La matière de remplissage: Son rôle principal est l'absorption de l'énergie de l'arc et de garantir l'isolement après la coupure. Elle est généralement réalisée à base de silice granuleuse [5].

1.1.5.2 Fonctionnement

Il est bien connu que lors du passage d'un courant électrique I dans un conducteur, l'effet Joule est défini par la manifestation thermique de la résistance électrique. Dans le cas d'un fusible et pour l'intensité nominale I_n , l'énergie dissipée s'évacue sans causer la fusion.

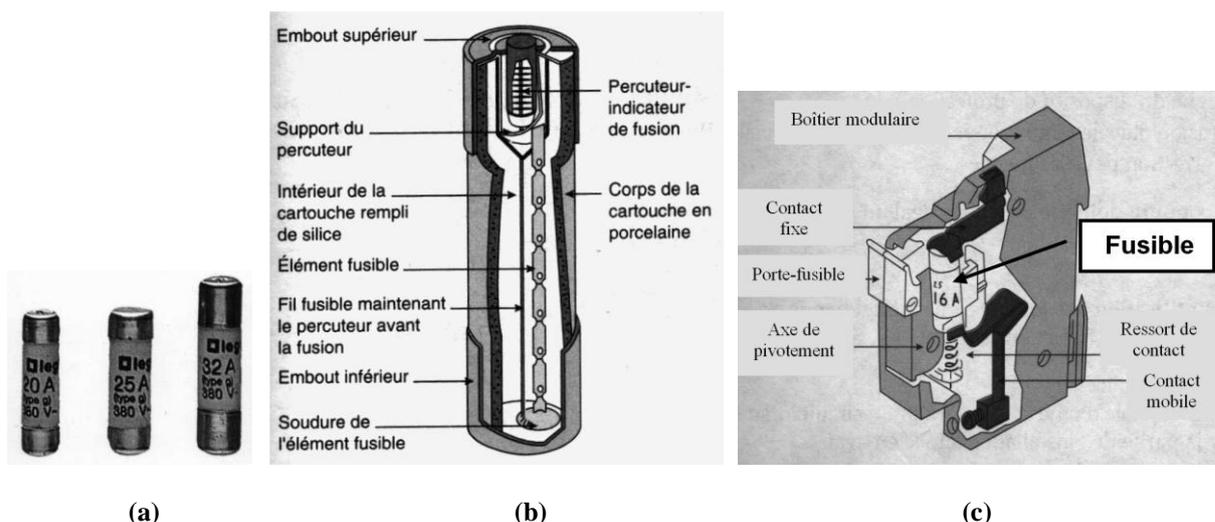


FIGURE 1.10 (a) Différents fusibles. (b) Composants du fusible. (c) Porte fusible et ses constituants [5].

L'équilibre thermique est donc réalisé, et cela ne cause pas de dommage du fusible. En cas de surintensité, le composant fusible reçoit plus d'énergie (pas d'équilibre thermique), ce qui mène à la fusion [5].

1.1.5.3 Types: Il existe 3 types principaux de fusibles [5]

- Les fusibles de type Prosistor sont destinés principalement pour protéger des semi-conducteurs. D'un point de vue temps de réponse, ils sont rapides.
- Les fusibles de type gI/gG: ce sont des fusibles généralement utilisés pour des fins de protection contre les courts-circuits et les surcharges.
- Les fusibles d'accompagnement Moteur (aM) sont destinés pour la protection contre les courts-circuits et surtout pour la protection des moteurs. Notant qu'ils sont lents

1.1.5.4 Choix et mise en œuvre des fusibles

Les principaux critères de choix d'un fusible sont:

- La classe: gG, aM, ...etc.
- La tension nominale et les niveaux de courant assigné.
- Le pouvoir et le temps de coupure.
- La forme et la taille et de la structure.

1.1.6 Le relais thermique

1.1.6.1 Rôle

La hausse excessive de l'intensité consommé par un moteur/actionneur électrique peut mener au dommage du moteur. Il y a plusieurs causes de surintensité, nous citons entres autres la baisse de la tension du réseau, surcharge mécanique, démarrage trop long ou trop fréquent, et blocage de démarrage. Sur ce, les relais thermiques peuvent offrir une bonne protection contre les surcharges imprévues et prolongées [1,2].

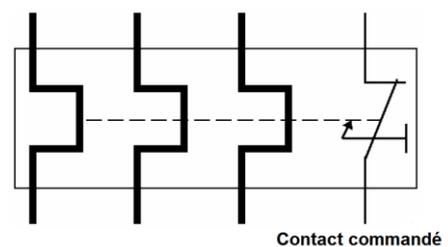


FIGURE 1.11 Symbole du relais thermique [2].

1.1.6.2 Principe de fonctionnement

Les relais thermiques comportent généralement des composants bimétalliques qui se déforment (choisis intentionnellement) par des quantités liées aux courants circulant dans les

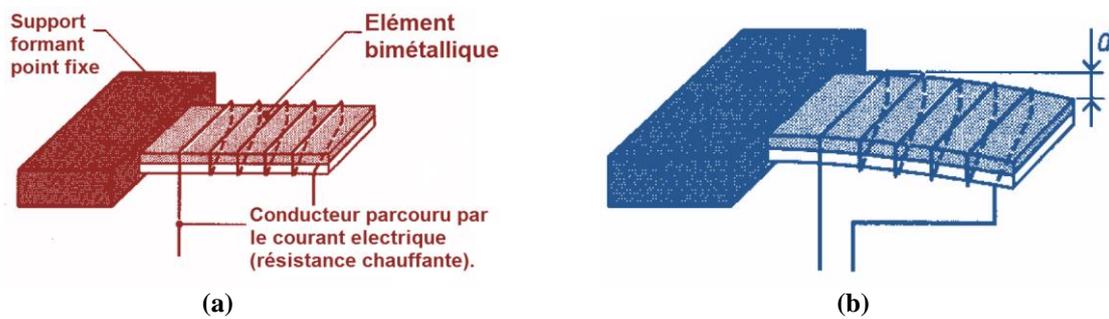


FIGURE 1.12 (a) bilame non déformé. (b) Déformation d due à l'échauffement provoquée par le passage du courant [2].

éléments chauffants. Les déflexions ont tendance à être liées à certaine valeur de courant, la fermeture/ouverture des contacts pertinents se fait. Donc, une propriété temps de fonctionnement / courant inverse est enregistré au delà d'une valeur de courant de fonctionnement minimum. Ces relais se comportent donc de manière similaire aux fusibles et ils peuvent être utilisés ensemble avec des contacteurs ou bien des disjoncteurs. Ces relais peuvent avoir leurs composants chauffants liés explicitement en série avec les enroulements des moteurs qu'ils protègent ou être alimentés par des "transfo" de courant. Ils peuvent alors être employés pour assurer la protection des machines d'une grande gamme de puissances et de tensions de travail. Comme nous voyons dans la Fig. 1.12, le relais thermique emploie la caractéristique du bilame sensible aux surcharges. En fait, l'apparition d'une surcharge mène à une augmentation de chaleur "effet joule". Par conséquent, le bilame détecte l'augmentation de chaleur, se déforme et ouvre le contact auxiliaire. Ce dernier étant convenablement placé dans le circuit de commande qui va couper l'alimentation de la bobine du contacteur tout en ouvrant les pôles de puissances. Donc, c'est l'appareillage de la partie commande qui interrompt le circuit de puissance [1,2].

Références

- [1] C. Christopoulos et A. Wright " Electrical Power System Protection 2nd Edition", Springer, 1999.
- [2] <http://www.technologuepro.com/cours-genie-electrique/cours-27-capteurs-actionneurs-instrumentation>
→<https://www.technologuepro.com/cours-capteurs-actionneurs-instrumentation-industrielle/ch31-les-preactionneurs-electriques.html>
(par B. J. Riadh et M. Lotfi).
- [3] Datasheet, MOC3041. (<https://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/161/MOC3041-pdf.php>)
- [4] http://jean.david.delord.free.fr/Dossier_ressource/maintenance/s5/schema_elec/technologie_composant_demarr_mot.pdf
(par J. D. Delord).
- [5] Stage de sécurité électrique 2001- Aix Marseille. Equipe des formateurs de Physique appliquée.
→https://www.pedagogie.ac-aix-marseille.fr/jcms/c_79543/fr/stage-de-securite-electrique-2001-aix-marseille
- [6] Canevas, Harmonisation - Offre de Formation - Master Académique, Domaine: Sciences et Technologies, Filière: Electronique, Spécialité: Instrumentation, 2016 - 2017.

1.2 Convertisseur électromécanique

1.2.1 Introduction

Un convertisseur électromécanique est un appareil dans lequel il y a des actions et des réactions entre des mécanismes électriques et mécaniques. Un convertisseur électromécanique peut comporter:

- Une entrée électrique qui relie le convertisseur à l'extérieur avec un système électrique.
- Une entrée mécanique qui relie le convertisseur à l'extérieur avec un système mécanique.

Parmi les membres de la famille des actionneurs, on trouve les machines à courant continu. Les actionneurs/moteurs sont des appareils qui réalisent un actionnement. Pratiquement, il y a 2 types de moteurs, au premier lieu on trouve les génératrices qui donne en sortie une énergie électrique (créant un courant continu) à partir d'une énergie mécanique en entrée. Notant que ces machines peuvent être réversibles, nous obtenons donc le 2^{eme} type de la machine continue (i.e. les moteurs). Les moteurs à courant continu (MCC) sont des actionneurs à courant continu qui transforment l'énergie électrique à un mouvement rotatif (i.e. une rotation) [3].

Les MCC sont utilisés beaucoup plus dans des applications et des domaines particuliers. Au titre d'exemple, on les retrouve dans les applications du levage, de la traction, et du positionnement. Il est à noter que les MCC peuvent être utilisés également lorsqu'un système emploie une pile ou une batterie comme une source d'énergie [3].

1.2.2 Organisation de la machine

Le MCC (Fig. 1.13(a)) est constitué de 2 blocs particuliers [3]:

- L'élément fixe (Fig. 1.13(b)): le stator ou l'inducteur.
- l'élément tournant (Fig. 1.13(c)): le rotor ou l'induit.

Notant que les autres composants mécaniques permettent la rotation de l'induit et le maintien des divers sous ensembles [2].

L'induit peut être vu comme un rouleau de fer feuilleté où ont été fabriquées des encoches en périphérie. Pratiquement, ce circuit correspond bien au circuit de puissance parce que le couple du MCC est bien proportionnel au courant. Pour cette raison, la puissance

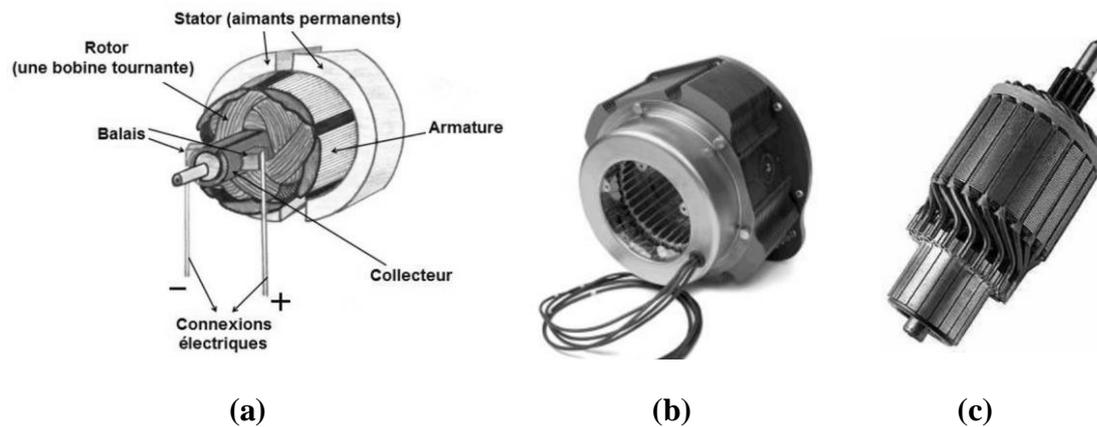


FIGURE 1.13 (a) Le moteur à courant continu [3]. (b) Stator [2]. (c) Rotor [2].

maximale est bien bornée par le courant maximal que l'on peut acheminer de l'induit à l'environnement l'extérieur (i.e. mode génératrice) [3].

Le stator peut comporter 2 ou plusieurs pièces polaires opposées enveloppant chacune le rotor d'un angle de $\pi/2$. Les pièces polaires deviennent des pôles N et S fixes grâce à des aimants permanents ou des inducteurs. Alors, les lignes d'inductions générées se referment via l'induit provoquant sa rotation [3].

1.2.3 Principe de fonctionnement

1.2.3.1 La loi de la place

Un conducteur placé dans un champ magnétique et traversé par un courant est soumis à une force dont le sens est déterminé par la règle la main droite avec [2]:

Index \rightarrow Force.

Majeur \rightarrow Intensité.

Pouce \rightarrow Induction.

La force peut être exprimé par: $F = B \times I \times L$.
(1)

Avec

F : Force en Newtons.

B : Induction magnétique en teslas.

I : Intensité dans le conducteur en ampères.

L : Longueur du conducteur en mètres.

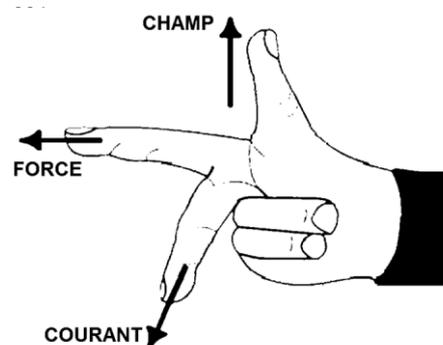


FIGURE 1.14 La règle des trois doigts de la main droite [2].

1.2.3.2 Principe de fonctionnement d'un MCC

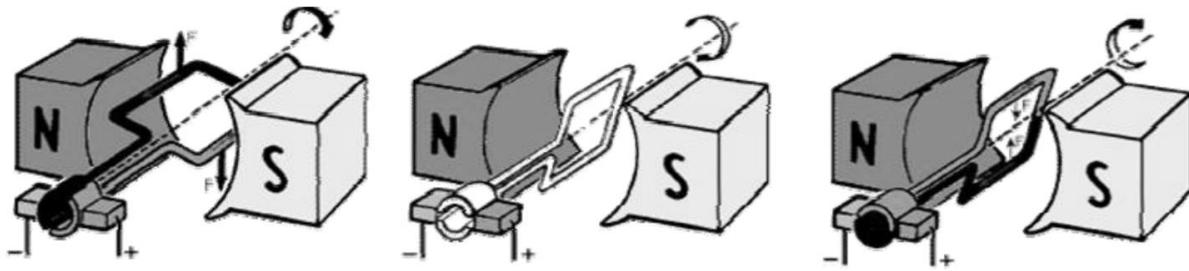


FIGURE 1.15 Principe de fonctionnement du MCC [2].

Comme nous voyons dans la Fig. 1.15, quand une spire traversée par un courant, grâce au collecteur et aux balais, est bien placée dans un champ magnétique, il se manifeste un couple de forces (nous referons à la loi de la place). Ces forces produisent un couple rotatif qui fait tourner la spire de $\pm \pi/2$ vis-à-vis au plan vertical, le sens du courant restant inchangé dans la spire, au cours de ce mouvement, le couple de rotation s'abaisse régulièrement jusqu'à l'annulation après rotation de la bobine de $\pm \pi/2$ (i.e. zone/région neutre, la spire se positionne à l'horizontale et perpendiculaire aux aimants naturels) [2].

Pour assurer la continuité de la rotation, l'enroulement du rotor doit être composé de plusieurs spires pareilles. Ces dernières seront divisées de manière régulière sur l'induit, de telle sorte d'avoir un couple indépendant de l'angle de rotation. Notant qu'après le passage de la zone neutre, la direction du courant faut être inversé en même temps dans chacune de ces spires. Sur ce, l'inversion du courant est effectuée via le commutateur qui, lié au balais, est le composant qui garantit le transfert du courant de la partie immobile à la partie rotative du MCC [2].

1.2.3.3 Modes de fonctionnement d'un MCC: Schémas équivalents et relations

La machine est constitué, vue du rotor d'un bobinage incluant son inductance et sa résistance propre. En outre, durant de le tournoiement de l'induit, le stator étant traversé par un courant bien déterminé, il se crée aux limites de la MCC une force électromotrice (FEM) dite "interne". Notant que cette FEM ne dépend que de la quantité du flux inducteur et de la rapidité rotative. Ces propriétés sont partagées aux opérations en mode moteur et en mode générateur [1]. Ci-après, nous allons voir les schémas équivalents et les relations pertinentes de la MCC [1].

1.2.3.3.a Fonctionnement en moteur

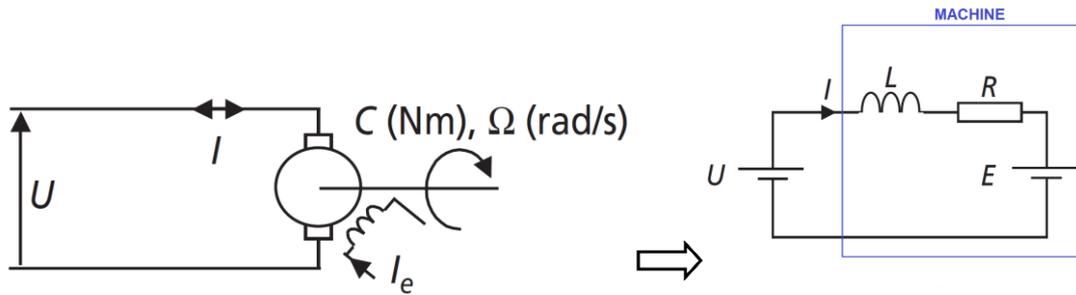


FIGURE 1.16 Schémas équivalent de fonctionnement en moteur [1].

➤ Equation électriques [1]

$$U = R I + L \frac{di}{dt} + E \tag{2}$$

➤ Equation mécanique [1]

$$\sum \text{couples} = C - C_{résistant} = j \frac{d\Omega}{dt} \tag{3}$$

1.2.3.3.b Fonctionnement en génératrice

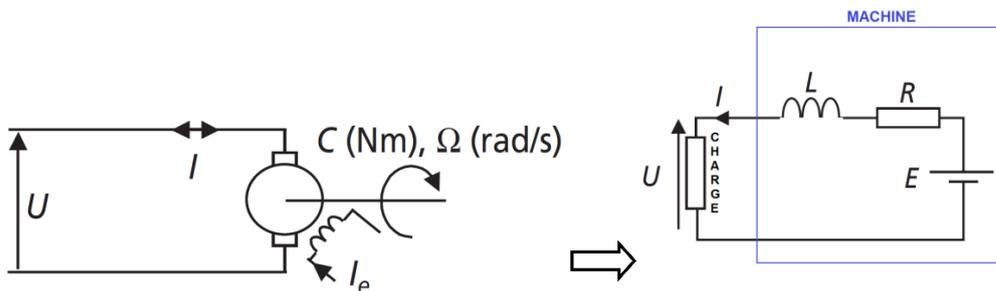


FIGURE 1.17 (a) Schémas équivalent de fonctionnement en génératrice [1].

➤ Equation électrique [1]

$$U + R I + L \frac{di}{dt} = E \tag{4}$$

➤ Equation mécanique [1]

$$\sum \text{couples} = C_{moteur} - C = j \frac{d\Omega}{dt} \tag{5}$$

Dans tous les cas, on retiendra les relations suivantes [1]

$$C = K\Phi \cdot I \tag{6}$$

$$E = K\Phi \cdot \Omega \tag{7}$$

ou en fonction du courant inducteur

$$C = K' \cdot I_e \cdot I \tag{8}$$

$$E = K' \cdot I_e \cdot \Omega \tag{9}$$

Notes: Il est important de souligner les points ci-dessous [1]

- ✓ Le bobinage inducteur, parcouru par un courant, décrit une résistance R_e non figurée sur les circuits schématisés. Il se présente ainsi les fuites de Joules ($R_e \cdot I_e^2$) au niveau du bobinage.
- ✓ L'inductance schématisée sur les circuits équivalents n'a aucun effet dès lors qu'on concentre sur le régime permanent. Notant que dans ce fait le courant qui la parcourt est stable et le potentiel à ses bornes nulle.
- ✓ Les 2 équations pré-mentionnées sont basées sur la définition de la puissance électrique (i.e. $E \cdot I$) avec celle mécanique (i.e. $C \cdot \Omega$). C'est le fait si on assume que le couple de fuites mécaniques appartient au couple de charge de la MCC.

➤ Pour plus de détails nous referons ces documents [1]-[3].

1.2.4 Démarrage du MCC

Pratiquement la vitesse est nulle au démarrage, donc $\Omega = 0$ et $E = 0$, ce qui permet d'écrire [2]:

$$U = R \cdot I_D \quad (10)$$

avec I_D le courant de démarrage.

Pour réduire le courant de démarrage, nous pouvons commencer le démarrage avec une faible tension ou bien insérer une résistance en série avec le rotor durant le démarrage [2].

1.2.5 Bilans de puissance

Il est essentiel de définir les différents composants du diagramme équivalent sur le plan de puissance. C'est nécessaire aussi de concentrer sur le terme du rendement de la MCC tout dépend du mode de travail (i.e. générateur ou moteur). Nous illustrons sur la figure 1.18 l'écoulement des puissances au niveau de la MCC dans les 2 régimes de fonctionnement (i.e. générateur ou moteur) [1]. Notant que les équations suivantes correspondent la Fig. 1.18 [1,2].

1.2.5.a Fonctionnement en moteur: Pour ce régime de fonctionnement on a [1,2]

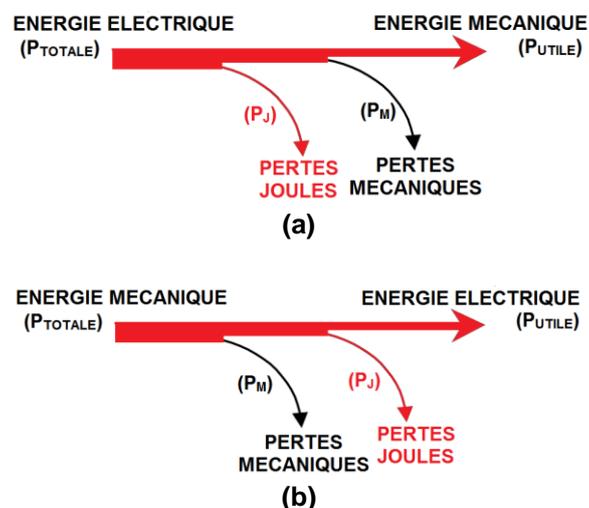


FIGURE 1.18 Écoulement des puissances (a) Fonctionnement en moteur. (b) Fonctionnement en génératrice [1].

$$P_{TOTALLE}=U.I \quad (11)$$

$$P_{UTILE}=C.\Omega \quad (12)$$

$$P_J=R.I^2+Re.Ie^2 \quad (13)$$

1.2.5.b Fonctionnement en génératrice: Pour ce régime de fonctionnement on a [1,2]

$$P_{TOTALLE}=C.\Omega \quad (14)$$

$$P_{UTILE}= U.I \quad (15)$$

$$P_J=R.I^2+Re.Ie^2 \quad (16)$$

Il est à noter que dans tous les cas, le rendement s'écrit [1,2]:

$$\eta = \frac{P_{UTILE}}{P_{TOTALLE}} \quad (17)$$

avec

$$P_{TOTALLE} = P_{UTILE} + P_J + P_M \quad (18)$$

1.2.6 Réversibilité de la MCC

Par définition, la loi de Faraday accentue que si un conducteur bouge dans un environnement (i.e. champ) magnétique il est le siège d'une FEM induite qui exprime la modulation du flux dans le temps au cours de cette spire. De ce concept vient le régime en génératrice de la MCC. Si l'arbre de la génératrice est stimulée en rotation, nous pouvons mesurer un potentiel U entre les bornes du rotor qui sera proportionnel à la vitesse rotative. L'application la plus populaire de ce régime fonctionnement est la dynamo [2].

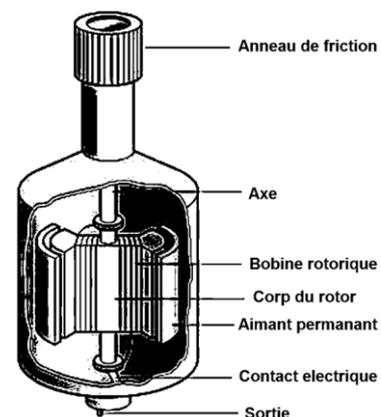


FIGURE 1.19 Dynamo [2].

1.2.7 Alimentation du moteur

La figure ci-contre montre des montages simples pour faire tourner le moteur dans le sens souhaité. Pour effectuer l'inversement de rotation, la tension d'alimentation du MCC doit être inversée. Donc, le MCC tourne soit dans le sens a soit dans le sens b selon la position des commutateurs a et b [2].

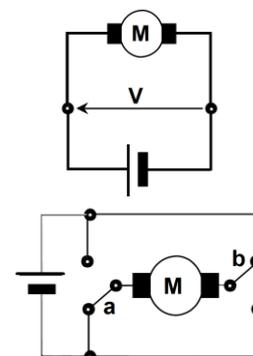


FIGURE 1.20 Montage pour un seul sens (haut) et deux sens (bas) de marche [2].

1.2.8 Fonctionnement à vitesse variable

Nous pouvons considérer différents mode dans lesquels nous avons besoin d'une MCC à vitesse variable. Pour atteindre à cela, une solution naïve (mais pratique dans quelques applications dans lesquelles les pertes ne forment pas une préoccupation) consiste à insérer en série une résistance variable avec la MCC. Notant que pour $R_v = 0 \Omega$, la vitesse est à sa valeur maximale [2].

La seconde méthode consiste à employer un hacheur. Sur ce, l'action sur le rapport cyclique autorise de moduler la valeur moyenne de le potentiel de commande et ensuite la modulation de la vitesse de la MCC [2].

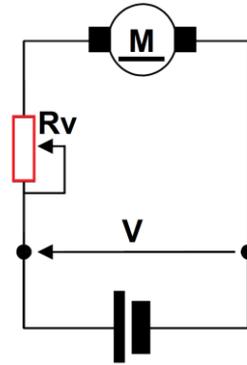


FIGURE 1.21 Montage simple pour un fonctionnement à vitesse variable [2].

1.2.9 Exercice d'application: Il s'agit d'un exercice exhaustif qui touche différents cotés [1]

Nous considérons une MCC employée en régime moteur. Une source de tension de 0.11 kV alimente le bobinage inducteur et aussi l'induit. La différence est que la résistance R_{e1} limite le courant inducteur. La figure 1.22 montre l'installation concernée. Nous donnons: Résistance du stator : $R_{e1} = 0.4 \text{ k}\Omega$ et Résistance du rotor: $R = 1/2 \Omega$.

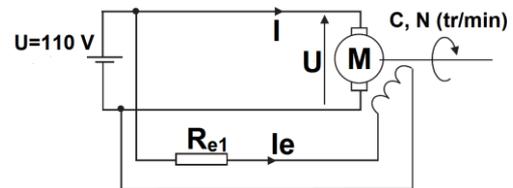


FIGURE 1.22 MCC en moteur [1].

- Le courant consommé en fonctionnant à vide est $I = 1,2 \text{ A}$. Déterminer la quantité des pertes mécaniques. Déterminer aussi la valeur de la FEM interne "E".
- Restant en scenario sans charge (i.e. à vide), et pour $R_{e1} = 0$, le MCC fonctionne à une vitesse de $1.62 \times 10^3 \text{ tr/min}$. Déterminer le couple de pertes mécaniques.
- Trouvez le facteur k pour $C = k \cdot I_e \cdot I$. Dédurre que ce facteur vérifie aussi l'équation $E = k \cdot I_e \cdot \Omega$.
- Considérant une charge à entrainer (poids ou roue, ...etc.) qui reflète un couple résistant de 10 Nm ajouté au couple de pertes (assumé invariable). Déterminer alors la valeur du courant absorbé, I_{AB} .
- Déterminer la valeur de la FEM "E" et de la vitesse rotationnelle du moteur N en tour par minute.
- Nous souhaitons que cette charge soit tournée à $1.8 \times 10^3 \text{ tr/min}$. Déterminer donc la valeur de la résistance R_{e1} qui permet d'avoir la vitesse pré-mentionnée.

Références

- [1] L. Lasne , "exercices et problèmes d'électrotechnique, Notions de base et machines électriques", Dunod, 2005.
 [2] <http://www.technologuepro.com/cours-genie-electrique/cours-27-capteurs-actionneurs-instrumentation>
 →<https://www.technologuepro.com/cours-capteurs-actionneurs-instrumentation-industrielle/ch32-convertisseur-electromecanique.html>
 (par B. J. Riadh et M. Lotfi).
 [3] C. Antonin, K. Pierre, D. Rodrigue, C. Louis, rapport du projet, PDF, Le moteur à courant continu, INSA, 2017.

1.3 Les moteur pas à pas (Stepper motors)

1.3.1 Introduction

La mesure de déplacement et le contrôle d'actionnement sont des exigences majeures pour de nombreuses applications dans les industries de fabrication des pièces spéciales. Les moteurs pas-à-pas (MPP), qui sont intrinsèquement numériques par nature, sont en phase avec la technologie de traitement de l'information numérique qui caractérise l'approche moderne des systèmes d'automatisation que l'on trouve dans les industries de pointes.

1.3.2 Définition

Un moteur pas-à-pas (MPP) est un dispositif électromécanique tournant dont le rotor tourne d'un angle élémentaire "pas" à chaque commutation de courant effectuée par son circuit de commande au niveau de ses enroulements. Donc, il peut être considéré comme un actionneur de positionnement. Dans un MPP, une rotation continue est assurée par une succession rapprochée de commutations ou de pas. D'autre part, une bonne résolution de positionnement nécessite un MPP pouvant effectuer des pas assez faibles. Notant que la résolution est une caractéristique essentielle de la machine de type MPP [1]. Pratiquement, le nombre de pas par tour (360°) caractérise la résolution. Cela peut être exprimé par [1]

$$N_p = \frac{360}{\alpha_p} \quad (19)$$

où N_p , 360° , α_p sont le nombre de pas, l'angle pleine, et l'angle élémentaire, respectivement.

1.3.3 Symbole

Il y a beaucoup de types des MPP réalisés selon différentes approches. Néanmoins, nous utilisons un symbole uniforme dans les schémas et circuits électriques, comme le montre la figure ci-contre [2].

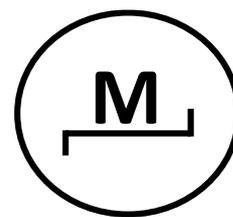


FIGURE 1.23 Symbole du MPP [1]

1.3.4 Principe de commande

En effet, contrairement aux machines à courant continu (MCC), la commande de la vitesse ou de la position d'un MPP peut être effectuée sans feedback ou asservissement. Donc, le contrôle du résultat qui correspond précisément aux entrées données n'est pas indispensable mais en respectant quelques limites de fonctionnement. La figure 1.24 montre la différence entre le principe de commande en position d'un MCC et celui de MPP.

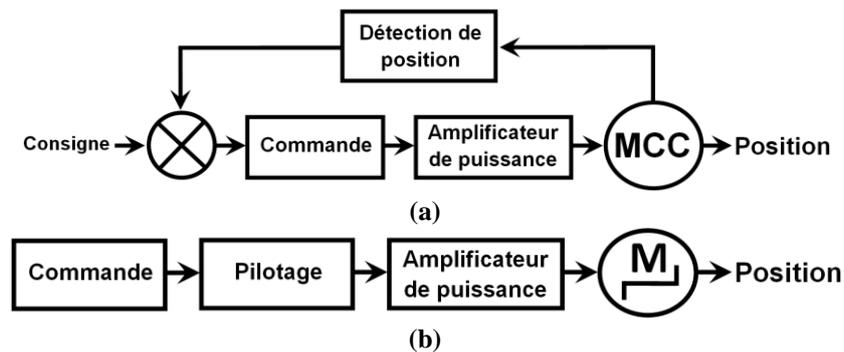


FIGURE 1.24 Principe de commande en position d'un (a) MCC. (b) d'un MPP [2]

On peut observer que le système de commande du MPP est si simple. Pratiquement, un déplacement angulaire "pas" est le résultat mécanique de chaque impulsion de signal de commande [1,2].

1.3.5 Différents types

Le point commun entre les différents MPP est la présence d'un stator portant des bobines dans lesquelles le courant de commande est commuté. Généralement, la différence apparaît au niveau du rotor [1]. Sur ce, on distingue trois groupes de moteur pas à pas [1,2]:

- Moteur pas à pas à aimant permanent.
- Moteur pas à pas à reluctance variable.
- Moteur pas à pas hybride.

1. 3.5.1 Moteur à aimant permanent

1.3.5.1.a Composition

Ce type de MPP comprend [2]

- Un stator comportant des bobines.
- Un rotor constitué des aimants permanents.

Il est à noter que le stator est la partie fixe et le rotor est la partie mobile (Voir Fig. 1.25).

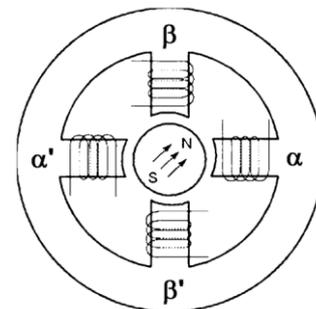


FIGURE 1.25 MPP à aimant permanent [1]

1.3.5.1.b Caractéristiques

- Les caractéristiques majeures des MPP à aimant permanent sont [1,2]:

- Faible résolution.
- Construction élaborée.
- Couple élevé.
- Sens de tournoiement dépend de la technique d'alimentation des bobines de stator.

1.3.5.1.c Types de MPP à aimant permanent

On distingue 2 classes de MPP à aimant permanent suivant la conception des enroulements [2]:

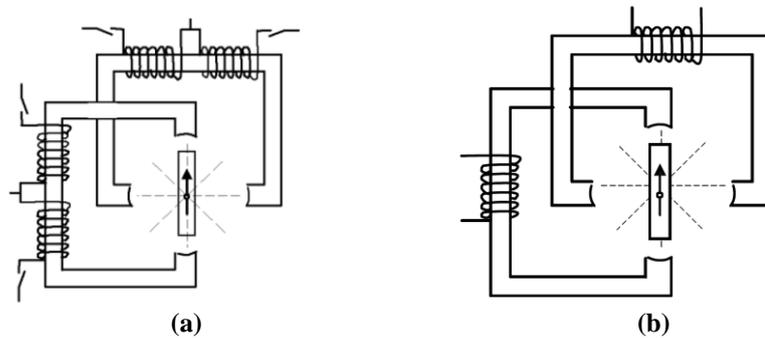


FIGURE 1.26 (a) Le moteur unipolaire. (b) Le moteur bipolaire [2].

*** Le moteur pas-à-pas unipolaire**

Comme son nom l'indique (i.e. unipolaire). Les bornes sont toujours alimentées par une polarité de même signe et les enroulements sont à point milieu [2].

*** Le moteur pas-à-pas bipolaire**

Dans ce cas, il n'y a pas de point milieu pour les enroulements du stator. Sur ce, chaque borne est alimentée par une polarité négative puis positive (i.e. bipolaire) [2].

1.3.5.1.d Principe de fonctionnement

*** Moteur à aimant permanent à 4 phases à alimentation unidirectionnelle**

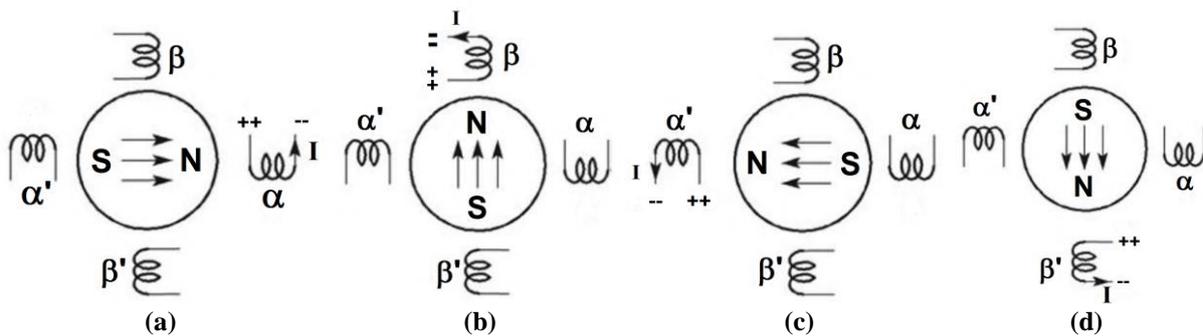


FIGURE 1.27 Rotation d'un tour (le sens inverse des aiguilles d'une montre) pour un MPP à aimant permanent à 4 phases à alimentation unidirectionnelle [1].

Au premier lieu, on prend par exemple un MPP avec un stator comportant quatre bobines et un rotor à aimant bipolaire, comme l'indique la figure 1.27. Il est à noter qu'il s'agit d'un exemple explicatif parce qu'en pratique il mène à une résolution insuffisante [1].

Dans un moteur à 4 phases à alimentation unidirectionnelle, le courant imposé est toujours de même sens, dans une seule bobine à la fois. Pratiquement, le sens de bobinage et la façon d'alimentation de la bobine sont liés au type de pôle (nord ou sud) à créer. Supposant qu'un pôle sud se crée par une phase alimentée. Donc, elle attire le pôle nord du rotor en réalisant une position d'équilibre stable. Pour réaliser une rotation de 2π , il faut effectuer 4 commutations comme le montre la figure ci-dessus. On arrive ainsi à un pas de $\pi/2$, soit 4 pas

par tour. Le tableau ci-dessous décrit clairement le fonctionnement du MPP à aimant permanent à 4 phases à alimentation unidirectionnelle [1,2].

Position du rotor	Courant dans les phases			
	α	β	α'	β'
(a)	I	0	0	0
(b)	0	I	0	0
(c)	0	0	I	0
(d)	0	0	0	I

TABLEAU 1.1 Séquence des commutations pour un MPP à aimant permanent à 4 phases à alimentation unidirectionnelle. La rotation prend le sens inverse des aiguilles d'une montre [1,2].

*** Moteur à aimant permanent à 2 phases à alimentation bidirectionnelle**

Dans le cas de l'utilisation de deux bobines par phase (Figure ci-contre), pour l'obtention d'un tour complet, il faut maintenant penser à inverser le courant I dans les enroulements. Autrement dit, l'alimentation doit être bidirectionnelle. Il faut toujours 4 commutations pour l'obtention d'un tour (voir la figure 1.29). Le pas est toujours de $\pi/2$. Le cuivre est mieux utilisé, mais l'alimentation est plus complexe puisqu'elle doit permettre l'inversion des polarités [1,2].

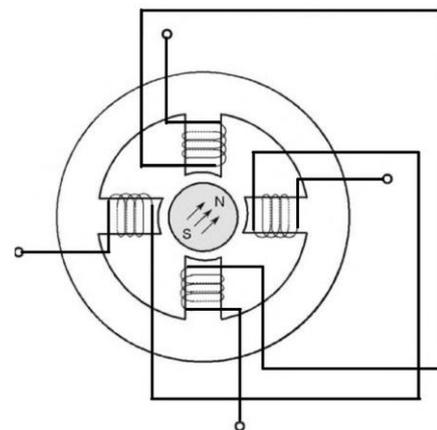


FIGURE 1.28 Couplage de 2 bobines par phase [1].

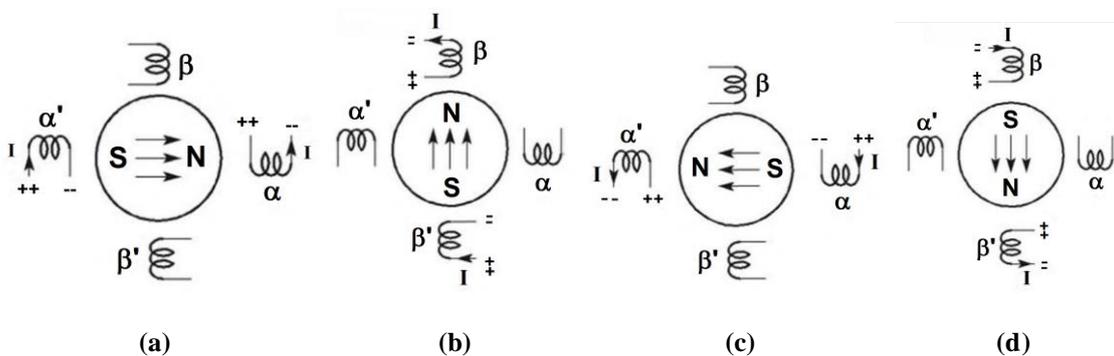


FIGURE 1.29 Rotation d'un tour (le sens inverse des aiguilles d'une montre) pour MPP à aimant permanent à deux phases à alimentation bidirectionnelle [1].

Position du rotor	Courant dans les phases	
	$\alpha \alpha'$	$\beta\beta'$
(a)	I	0
(b)	0	I
(c)	-I	0
(d)	0	-I

TABLEAU 1.2 Séquence des commutations pour un MPP à aimant permanent à 2 phases à alimentation bidirectionnelle. La rotation prend le sens inverse des aiguilles d'une montre [1].

La séquence de commutation décrit dans le tableau 1.2 montre clairement que chaque alimentation de deux bobines mène à un mouvement angulaire d'un pas de $\pi/2$. L'inversement du courant dans la position (c) et (d) par rapport aux positions (a) et (b), respectivement, cible à continuer le mouvement rotatif tout en assurant l'opposition attractive des pôles du rotor et stator [1].

1.3.5.1.e Alimentation

Comme on a vu précédemment, le fonctionnement des MPP est basé sur la commutation successive des phases. Sur ce, un séquenceur agissant sur une électronique de commutation peut être utilisé pour distribuer les polarités dans les enroulements. Une commutation mène à un seul pas quelle que soit la durée de l'impulsion [2].

- Moteurs à deux phases (ou bipolaire):

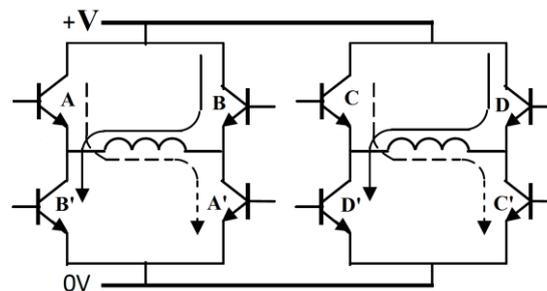


FIGURE 1.30 Pont de transistors en H utilisé pour alimenter les bobines d'un MPP bipolaire [2].

Dans ces moteurs, les enroulements sont alimentés soit dans une direction, soit dans une autre (Fig. 1.29). Chaque bobine est traversée successivement par des courants inverses demandant un contrôle bipolaire. La figure 1.30 montre une alimentation possible basé sur un pont en H de transistors actant comme des interrupteurs. Le sens de courant désiré est assuré par les transistors du chemin qui doivent être passants (AA', BB', CC', DD') [2].

- Moteurs à quatre phases (ou unipolaire):

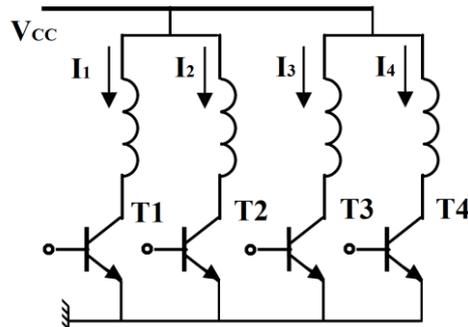


FIGURE 1.31 Alimentation d'un MPP unipolaire [2].

Dans ces moteurs, les bobines à point milieu; dans chacune d'elles le courant parcourt toujours la même direction. Donc, une commande unipolaire est suffisante. La figure ci-dessus montre un circuit de base permettant le pilotage des bobine d'un MPP unipolaire [2].

➤ **Conclusion partielle:** Le MPP bipolaire est plus simple à fabriquer que le MPP unipolaire, mais il a besoin de huit transistors alors que le MPP unipolaire n'a besoin que quatre transistors [1,2].

- Ordre d'alimentation des phases

Les signaux électriques de commande d'un MPP à deux ou quatre phases sont pratiquement identiques. La figure ci-dessous montre un schéma explicatif décrivant le principe de fonctionnement en différents modes [2].

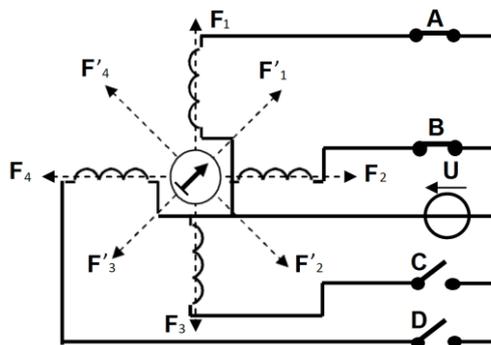


FIGURE 1.32 Alimentation des phases [2].

* Commande en mode 1 :

Dans le mode 1, l'excitation individuelle des bobines crée les champs suivants [2]:

- A → F₁
- B → F₂
- C → F₃
- D → F₄

La table de vérité ci-dessous résume le cycle de commutation. Bobine alimentée (non-alimentée)= 1(0).

A	B	C	D	Position
1	0	0	0	↑
0	1	0	0	→
0	0	1	0	↓
0	0	0	1	←

TABLEAU 1.3 Séquence des commutations en mode 1 [2].

Considérant que le "1" dans le tableau signifie une impulsion à une amplitude et une durée données. Le chronogramme correspondant est le suivant [2]:

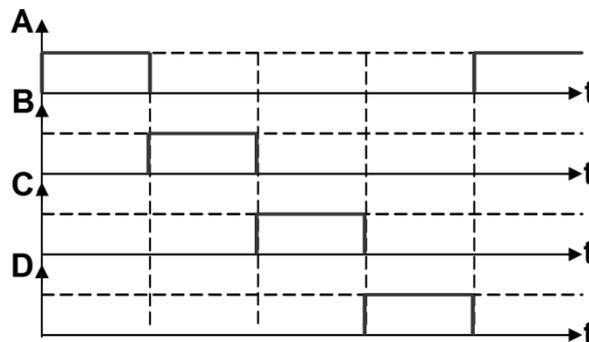


FIGURE 1.33 Chronogramme des commutations en mode 1 [2].

*** Commande en mode 2 :**

Dans le mode 2, L'excitation par paire des bobines crée les champs suivants [2]

- A-B→F₁'
- B-C→F₂'
- C-D→F₃'
- D-A→F₄'

La table de vérité ci-dessous résume le cycle des commutations en mode 2 [2]

A	B	C	D	Position
1	1	0	0	↗
0	1	1	0	↘
0	0	1	1	↙
1	0	0	1	↖

TABLEAU 1.4 Séquence des commutations en mode 2 [2].

Considérant que le "1" dans le tableau signifie une impulsion à une amplitude et une durée bien déterminées. Le chronogramme correspondant est le suivant [2]:

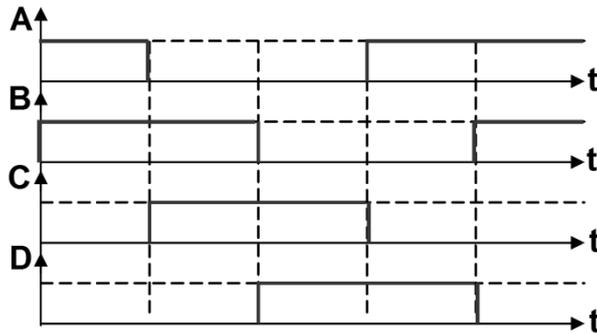


FIGURE 1.34 Chronogramme des commutations en mode 2 [2].

*** Commande en mode 1-2**

Dans ce mode, la synergie des 2 modes précédant (i.e. 1 et 2) permet d'avoir une résolution plus élevée (i.e. le double). Le rotor s'alignant successivement face à un pôle et entre 2 pôles. Sur ce, les champs suivants sont créés [2]

$A \rightarrow F_1$; $A-B \rightarrow F_1'$; $B \rightarrow F_2$; $B-C \rightarrow F_2'$; $C \rightarrow F_3$; $C-D \rightarrow F_3'$; $D \rightarrow F_4$; $D-A \rightarrow F_4'$

La table de vérité ci-dessous résume le cycle des commutations en mode 1-2 [2]

A	B	C	D	Position
1	0	0	0	↑
1	1	0	0	↗
0	1	0	0	→
0	1	1	0	↘
0	0	1	0	↓
0	0	1	1	↙
0	0	0	1	←
1	0	0	1	↖

TABLEAU 1.5 Séquence des commutations en mode 1-2 [2].

Le tableau ci-dessus correspond au chronogramme suivant [2]:

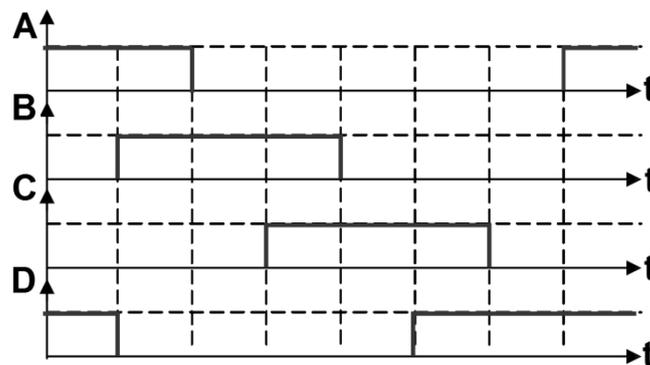


FIGURE 1.35 Chronogramme des commutations en mode1- 2 [2].

1. 3.5.2 Moteur pas à pas à réluctance variable

1. 3.5.2.a Constitution

Le principe conceptuel de MPP à réluctance variable est totalement différent à celui de MPP à aimant permanent. Le rotor est très simplement constitué d'une structure dentée et n'a aucun aimant. Au niveau du stator, il faut au moins 3 phases notant que le stator est le plus souvent doté des plots bobines [1]. Le MPP à réluctance variable possède une denture dont le pas n'est pas le même au stator et au rotor [2]. La Fig. 36 montre un MPP à réluctance variable doté d'un pas statorique (rotorique) vaut 45° (60°) [2].

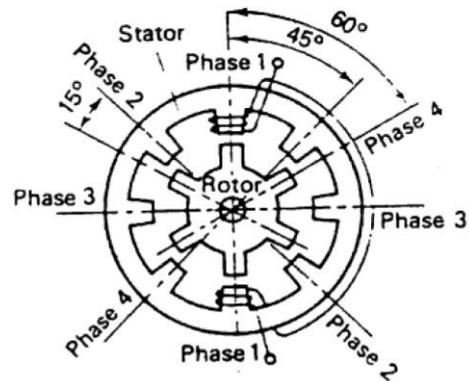


FIGURE 1.36 MPP à réluctance variable [2].

1. 3.5.2.b Principe de travail

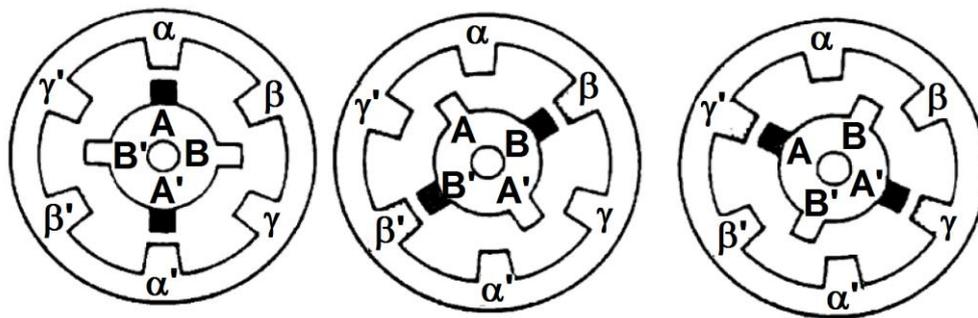


FIGURE 1.37 Fonctionnement d'un MPP à réluctance variable [2].

Conceptuellement, la réluctance est comme une résistance. C'est l'aptitude d'un circuit magnétique à s'opposer à sa pénétration par un champ magnétique. Lorsque nous alimentons les bobines $\alpha\alpha'$, puis $\beta\beta'$ et enfin $\gamma\gamma'$, le rotor se positionne d'une manière que le flux qui le pénètre soit maximal; sur ce, la réluctance est alors minimale. Pour rendre la réluctance variable, le stator et le rotor auront des encoches disposées d'une manière qu'il n'existe qu'une seule possibilité pour minimiser la réluctance compte-tenu de la bobine active [2].

Si les dents rotoriques sont divisées par un angle α_R et les plots statoriques d'un angle α_S , le pas du moteur peut être donné par [1]:

$$\alpha_P = |\alpha_S - \alpha_R| \quad (20)$$

Le nombre de pas par tour N_P peut être exprimé par [2]

$$N_P = 360 / \alpha_P \quad (21)$$

avec α_P en degré.

1. 3.5.2.c Inconvénients

- Nécessité d'au moins 3 bobinages, pour avoir un cycle complet.
- L'élaboration et la fabrication sont assez délicates.

1. 3.5.2.d Avantages

- Peu coûteux.
- Une bonne précision et bonne résolution.

1. 3.5.3 Moteur pas à pas hybride

1. 3.5.3.a Principe de fonctionnement

La combinaison des avantages des deux types de MPPs précédents mène à une haute résolution attribuée au nombre élevé de dents du rotor et également au couple important attribué à la présence d'aimants. Il est à noter que le stator possède une structure à pôles saillants, où les enroulements sont placés comme précédemment vu [1].

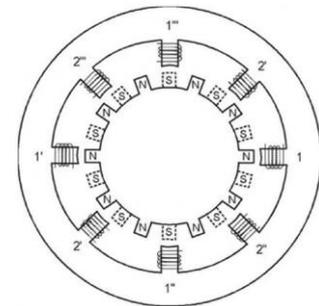


FIGURE 1.38 Une coupe explicative d'un MPP hybride [1].

Nous considérons par exemple un moteur pour lequel nous avons bobiné 2 phases sur 8 plots (Voir Fig. 1.38).

L'alimentation est considérée bidirectionnelle. Le rotor est composé de 2 roues dentées décalées entre elles de 1/2 pas dentaire, reliées par un aimant axial (Fig. 1.39.b). Sur ce, les dents de l'un des 2 demi-rotors agissent comme des pôles "N" vis-à-vis du stator alors que les dents de l'autre demi-rotor agissent comme des pôles "S". Si un plot du stator possède une dent du rotor au niveau de son axe, les plots de voisinage voient une dent décalée de 1/4 de

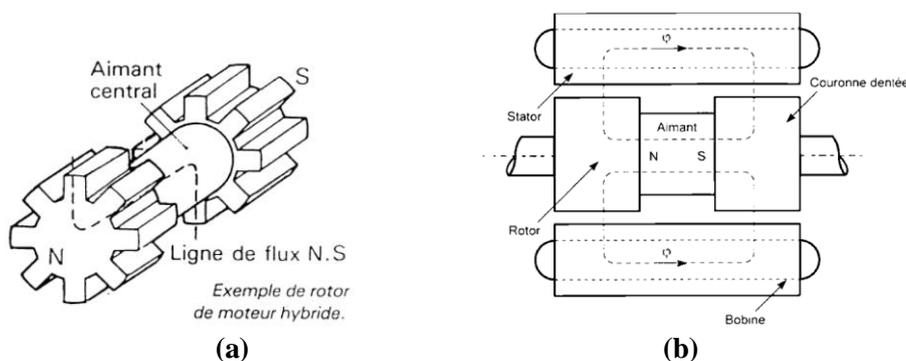


FIGURE 1.39 (a) rotor du moteur hybride [2]. (b) Vue axiale du moteur hybride [1].

pas dentaire. La séquence des commutations est la même par rapport au moteur pas-a-pas à aimant. Le rotor tourne à chaque fois de 1/4 de pas dentaire qui est alors le pas du moteur. Considérant notre exemple, le pas vaut neuf degré, ce qui s'accorde à quarante pas par tour. Globalement, si le nombre de dents d'un demi-rotor "Z_r" et le nombre de phases est "m", le nombre de pas par tour est [1]:

$$N_P = 2mZ_R \quad (22)$$

1. 3.5.3.b Réalisation et industrie

Pratiquement, la configuration souvent réalisée correspond à celle de la figure de base. Le rotor est constitué de tôles magnétiques. L'aimant est en terres rares ou en ferrites. Le matériau des demi-rotors dentés est du ferromagnétique feuillète [1]. Pour une résolution élevée, les dents des plots du stator sont avec le même pas vis-à-vis le rotor. Notant qu'il y a plusieurs dérivés dans la disposition des composants, mais toutes mènent à des propriétés relativement analogues [1].

1. 3.5.3.c Performances des MPPs hybride

Nous combinons un couple important attribué à l'action de l'aimant avec une haute résolution. Nous obtenons ainsi couramment deux cent ou quatre cent pas par tour et même nettement supérieur pour des modèles particuliers. Le moteur donne un couple de détente comme toute machine ayant des pôles saillants et des aimants. Notant que le prix est un peu plus de celui des types précédemment vus, mais les très bonnes performances en font un des MPPs les plus demandés. Autrement dit, le rapport performance/prix est très bon [1].

Références

[1] P. Mayé, Moteurs électriques pour la robotique, 3^{ème} édition, Dunod, Fev. 2016.

[2] <http://www.technologuepro.com/cours-genie-electrique/cours-27-capteurs-actionneurs-instrumentation>
→ <https://www.technologuepro.com/cours-capteurs-actionneurs-instrumentation-industrielle/ch33-les-moteurs-pas-a-pas.html>
(par B. J. Riadh et M. Lotfi).

Chapitre 2

Les actionneurs pneumatiques et hydrauliques

2.1. Introduction

Un mécanisme hydraulique ou pneumatique concerne généralement le déplacement, la saisie ou l'application d'une force sur un objet donné. Dans l'industrie, les dispositifs pertinents qui atteignent réellement cet objectif sont appelés actionneurs. Ce chapitre traite et présente délicatement les actionneurs pneumatiques et hydrauliques les plus répandus dans l'instrumentation industrielle [1-6].

2.2. L'énergie pneumatique

2.2.1 Constitution d'une installation pneumatique standard

Pratiquement, toute installation d'un système pneumatique assurant une production efficace et une bonne distribution d'air peut comprendre:

- Un compresseur avec un réservoir d'air (citerne).
- Un système ou un mécanisme pour le traitement de l'air produit.

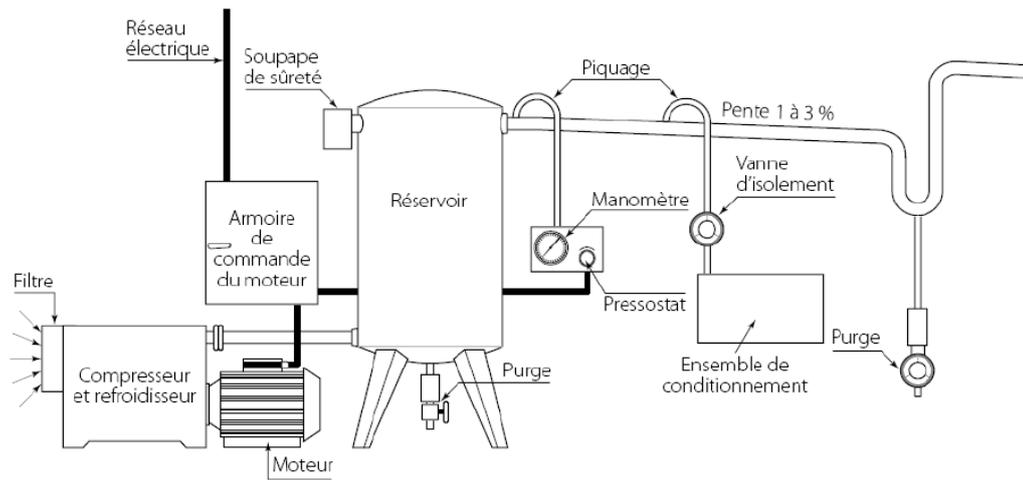


FIGURE 2.1 Production de l'énergie pneumatique [1].

- Des dispositifs de sécurité, de fiabilité, et de régulation.
- Une collection de circuits de distribution (i.e. connexions) généralement réalisés en tubes. Notant que ces derniers sont généralement en acier ou cuivre.

La figure 2.1 illustre une installation pneumatique simple, pratique, et relativement fiable pour la production de l'énergie pneumatique nécessaire [1].

2.2.2 Production de l'énergie pneumatique

2.2.2.1 Compression de l'air

La production de l'air comprimé peut être effectuée via deux modes :

- La compression dynamique (i.e. transformation ou conversion de la vitesse de l'air à une pression désirée) : compresseurs de type centrifuges ou axiaux.
- La compression volumétrique (i.e. la baisse technique du volume à l'aide d'un dispositif comprimant bien choisi) : compresseurs alternatifs (p. ex. à piston) et rotatifs (e.g. compresseurs à vis/à palettes, à engrenages, et à anneaux liquides) [2].

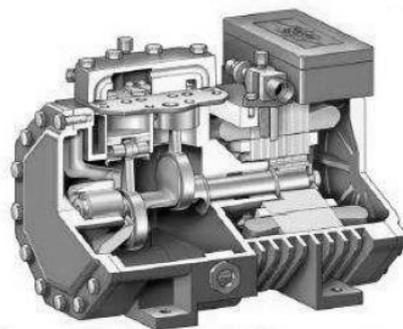


FIGURE 2.2 Compresseur [2].

2.2.2.2 Stockage de l'énergie pneumatique

En effet, afin d'éviter le fonctionnement du moteur sans cessation, l'accumulateur va pratiquement stocker l'air comprimé fourni par le compresseur de source. Il permet également de compenser les fluctuations et les variations de pression. L'accumulateur est un dispositif qui comporte un appareillage assurant la sécurité, on cite entre autres [3]:

- Un robinet de purge.
- Une vanne d'isolement.
- Un manomètre.

2.2.2.3 Conditionnement de l'air

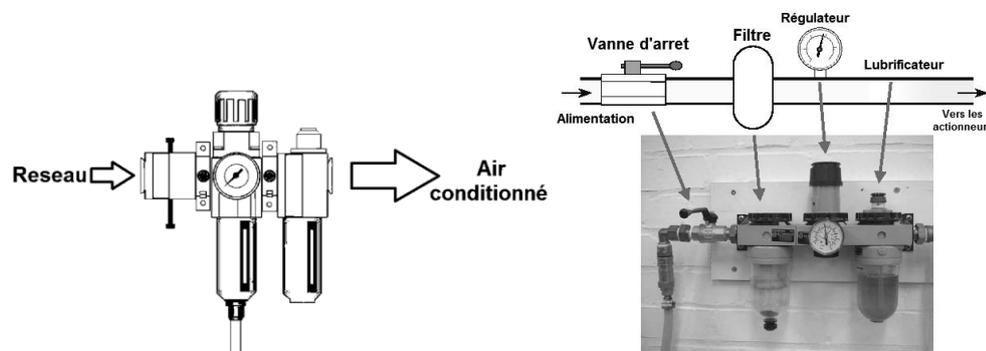


FIGURE 2.3 Conditionnement de l'air (à gauche). Ensemble de conditionnement détaillé (à droite) [3].

Le bloc de conditionnement d'air sert à fournir la pression souhaitée et prendre garde à ce que l'air concerné soit bien propre et délicatement lubrifié. Il est composé de [3]:

- Un filtre: pour assurer le filtrage visant un air propre.
- Un régulateur: pour assurer une pression d'air uniforme et bien réglé.
- Un lubrificateur: pour assurer un glissement délicat.

2.2.3 Principes physiques

La pression peut se produire dans l'air lorsqu'il est soumis à une force. Sur ce, la force mécanique produite par l'énergie pneumatique est liée à la pression par la fameuse relation:

$$F = P.S \quad (2.1)$$

Où F , P et S sont la force résultante (en Newton), la pression (en Pascals), et la surface (en m^2), respectivement [4]. (Voir Fig. 2.4).

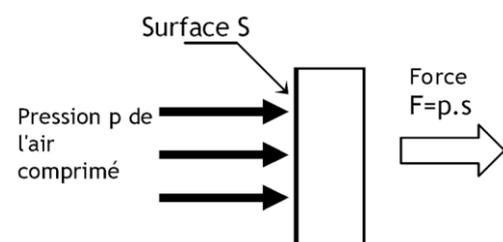


FIGURE 2.4 Principe de $F=P.S$ [4].

Il est à noter que:

1 bar = 10^5 Pa.

1 bar = 100000 N/m².

1 bar = 14.5038 Psi.

2.3. Les pré-actionneurs pneumatiques

2.3.1 Fonction

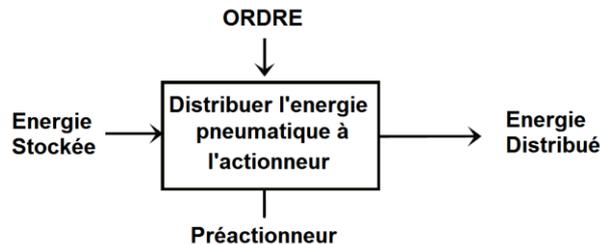


FIGURE 2.5 La fonction d'un pré-actionneur pneumatique [4].

Les pré-actionneurs pneumatique sont des dispositifs clés qui permettent de distribuer l'énergie pneumatique (air) à un actionneur qui convertit l'énergie à un actionnement [4].

2.3.2 Constituants d'un distributeur

Un distributeur standard comprend trois composants essentiels comme l'indique la figure 2.6 [3,4]

- Un tiroir.
- Des orifices
- Un corps.

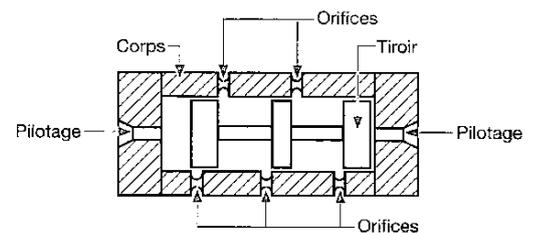


FIGURE 2.6 Constituants d'un distributeur [3,4].

2.3.3 Les principaux distributeurs pneumatiques

Pratiquement, les distributeurs sont caractérisés par (Voir Fig. 2.6 et Fig. 2.7):

➤ Leurs nombre d'orifices (i.e. le nombre de liaisons avec l'environnement externe).

Notant qu'il y a des orifices d'arrivées, de sorties et d'échappement.

➤ Le nombre de positions que peut le tiroir occuper sous l'ordre de commande.

Il est très important à noter que la représentation, la symbolisation, et le nom des distributeurs, sont basés sur le nombre d'orifices et le nombre de positions. Comme nous voyons dans la figure 2.7, chaque position est indiquée par un carré contenant les voies de passage de l'énergie pneumatique [4-6].

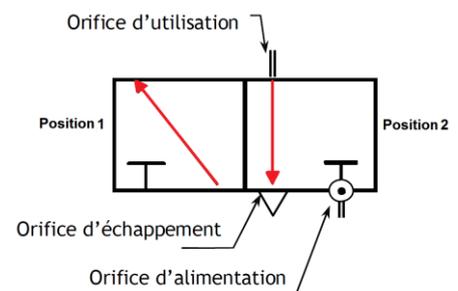


FIGURE 2.7 Symbolisation d'un distributeur [4].

2.3.3.1 Distributeur 3/2

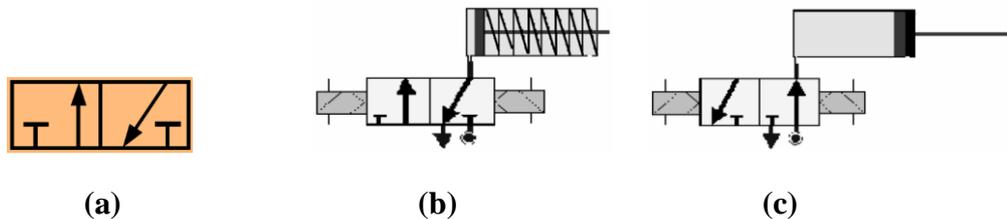


FIGURE 2.8 (a) Symbole du distributeur 3/2. Distributeur 3/2 associé à un vérin. (b) en PR (c) en PT [4-6].

La Fig. 2.8(a) montre le symbole du distributeur 3/2 tandis que la Fig. 2.8(b) et Fig. 2.8(c) illustrent un scénario de fonctionnement du distributeur associé à un vérin simple effet (VSE) à un ressort de rappel. Le principe de fonctionnement est le suivant:

- Dans la figure de milieu (en position repos 'PR'), l'orifice d'alimentation du VSE est relié à l'orifice d'échappement. Donc, le ressort du rappel maintient la tige rentrée. c'est l'état stable ou autrement dit en anglais "Steady-State".
- Dans la figure à droite (en position travail 'PT'), l'ordre de la partie commande met en liaison l'orifice d'alimentation du VSE avec la source d'air comprimé (i.e. avec l'énergie pneumatique). Donc, la tige sort et le ressort se contracte [4].

2.3.3.2 Distributeur 5/2

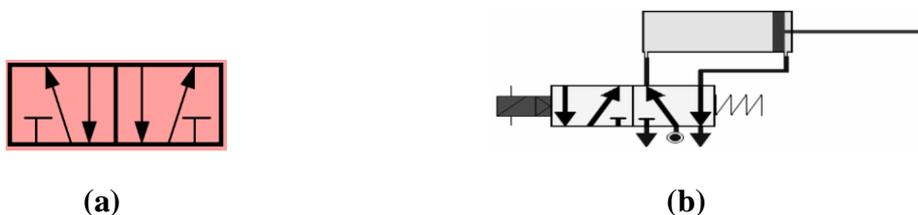


FIGURE 2.9 (a) Symbole du distributeur 5/2. (b) Distributeur 5/2 associé à un vérin double-effet (VDE) [4-6].

Nous pouvons voir d'après la figure 2.9 (b) que l'énergie pneumatique est dirigée vers l'un des deux orifices d'alimentation du VDE tandis que l'autre est à l'échappement. Cela est effectué suivant la position occupée (par la commande) [4].

2.3.4 Les dispositifs de commande

Généralement, il existe 2 types principaux de distributeurs pneumatiques [4-6]:

- **Distributeur monostable:** Dans ce type le tiroir est rappelé à sa position de référence (i.e. initiale) par un ressort dès la disparition du signal de pilotage.
- **Distributeur bistable:** Dans ce type le tiroir maintient sa position en absence du signal de pilotage et commute sous l'ordre de commande.

Il est à noter que la commande du distributeur est représentée par un rectangle interfacé à la position qu'elle commute et associé à un/plusieurs symboles schématisant la technologie utilisée, comme l'indique la figure ci-dessous [4-6].

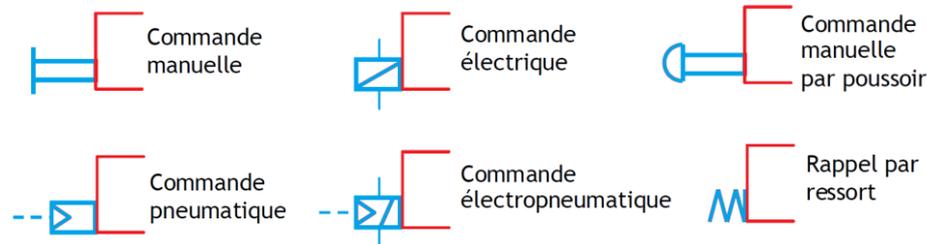


FIGURE 2.10 La schématisation de quelques types de commande [4].

2.3.5 Application: Presse pneumatique

La figure ci-dessous montre un câblage pour une presse pneumatique avec le distributeur bistable 5/2. Pratiquement, dans une presse pneumatique on a le cycle suivant [4-6]:

- ❖ La tige du vérin sort lorsque le bouton poussoir 1 (BP1) est actionné:
- ❖ La rentrée de la tige du vérin est le résultat de l'actionnement du bouton poussoir (BP2).

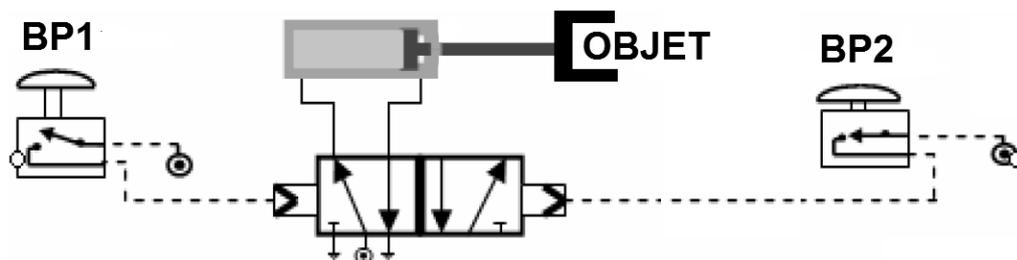


FIGURE 2.11 Une presse pneumatique [4].

2.4. Les actionneurs pneumatiques

Par définition, un actionneur pneumatique est un composant capable de transformer l'énergie pneumatique à une action mécanique. Les vérins pneumatiques et les générateurs de vide *Venturi* sont les actionneurs pneumatiques les plus répandus et utilisés dans les systèmes industriels [4].

2.4.1 Les vérins

Les vérins sont des actionneurs pneumatiques connus qui peuvent réaliser des actions habituellement linéaires avec une force bien guidée. Nous citons par exemple la perceuse, la porte d'autobus, la presse pneumatique,... etc. La figure suivante montre le schéma fonctionnel d'un vérin pneumatique [4].

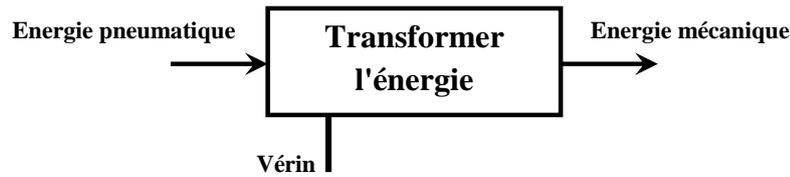


FIGURE 2.12 Schéma fonctionnel d'un vérin pneumatique [4].

2.4.1.1 Constitution et principe de fonctionnement

Comme nous voyons dans la figure ci-dessous, un vérin pneumatique est généralement composé d'un cylindre, bien fermé aux deux extrémités. Le piston doté d'une tige se déplace librement à l'intérieur du cylindre, bien sûr sous l'effet des forces dues à la pression de l'énergie pneumatique (retourner au principe $F=P.S$). L'application de la pression sur la face arrière du piston fait sortir la tige tandis que pour la faire rentrer, une pression doit être appliquée sur la face avant [4].

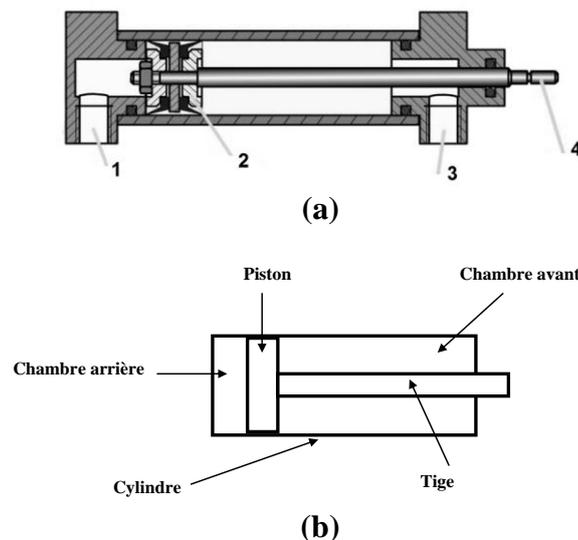


FIGURE 2.13 Composition d'un vérin pneumatique. (a) en détail - (1) Orifice d'alimentation en pression ou d'échappement. (2) piston. (3) Orifice d'alimentation en pression ou d'échappement. (4) Tige. (b) Schéma simplifié [4-6].

2.4.1.2 Types usuels des vérins

La figure 2.14 schématise le vérin simple effet et double effet.

2.4.1.2.a Vérin simple effet

Le vérin simple effet (VSE) peut produire l'effort dans un seul sens. Sur ce, l'alimentation pneumatique est d'un seul côté. Un ressort sert à retourner le piston à sa position initiale (Voir la figure 2.14(a)) [4].

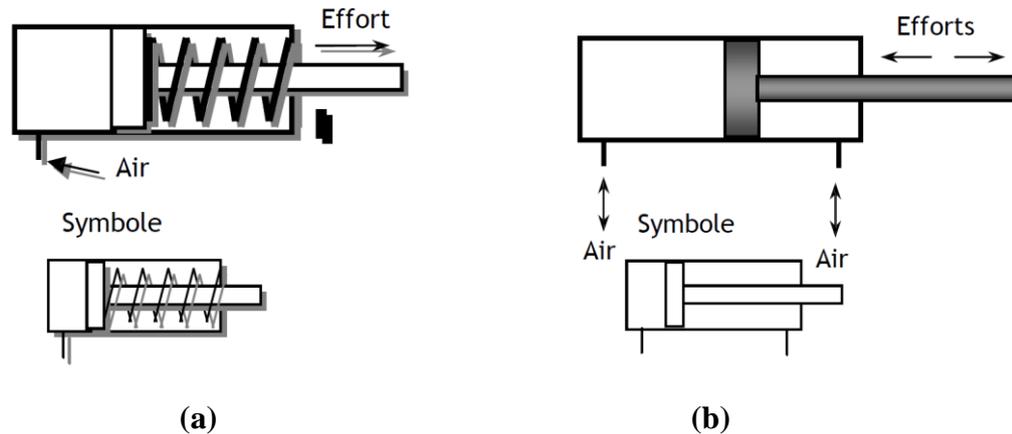


FIGURE 2.14 (a) VSE, (b) VDE [4-6].

2.4.1.2.b Vérin double effet

Dans le cas d'un vérin double effet (VDE), la rentrée et la sortie de la tige se fait en appliquant la pression, alternativement, de part et d'autre du piston. Ce type de vérin est très utilisable dans les applications nécessitant des efforts importants dans les deux sens (Fig. 2.14(b)) [4].

2.4.1.2.c Vérins spéciaux

Il existe d'autres vérins spéciaux, nous citons entre autres: les vérins sans tiges et les vérins rotatifs montrés ci-dessous [4].



FIGURE 2.15 (a) Vérins rotatifs (b) Vérins sans tige [4].

2.4.1.3 Caractéristiques et performances d'un vérin

La performance et le fonctionnement d'un vérin reposent sur les caractéristiques géométriques et physiques suivantes [4]:

- Le diamètre du piston.
- La course de la tige.
- La pression d'alimentation.

Donc, le choix et les dimensionnements d'un vérin s'effectuent en fonction de la force souhaitée. Il est à noter que les trois paramètres précités sont reliés par la relation précédemment indiquée:

$$F = P.S \quad (2.2)$$

Avec F, P, S sont la force, la pression, et la surface du piston, respectivement.

2.4.1.4 Exemple d'utilisation des vérins pneumatiques

Il existe plusieurs applications de vérins. La figure ci-dessous (2.16) résume quelques utilisations éventuelles.

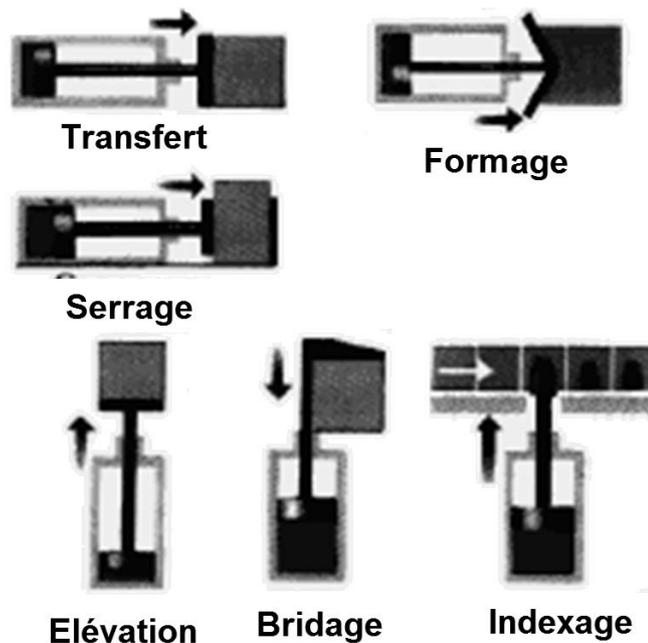


FIGURE 2.16 Exemples d'utilisation [4].

2.4.2 Le générateur de vide ou venturi

Un générateur de vide fait partie des actionneurs pneumatiques. Son rôle est de transformer l'énergie pneumatique en surpression en une énergie pneumatique en dépression, comme l'indique la figure 2.17 [4].

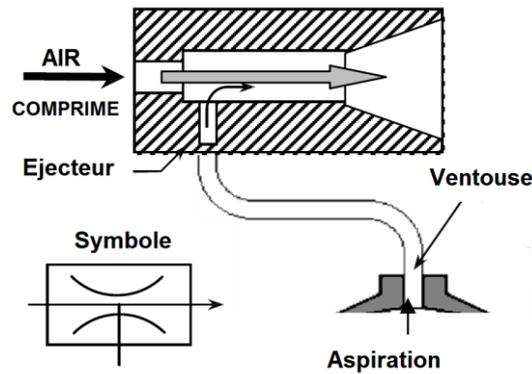


FIGURE 2.17 Principe de générateur de vide [4].

Un générateur de vide est constitué d'un éjecteur doté d'un canal d'air étroit du côté de l'entrée (i.e. étranglement) et d'un orifice, perpendiculaire au canal, servant à connecter la ventouse. Le passage de l'air comprimé dans la conduite provoque une dépression et entraîne avec lui l'air présent dans l'orifice perpendiculaire. Par conséquent, une aspiration se produit au niveau de la ventouse. Sur ce, l'aspiration (i.e. muscle pneumatique) est exploitable [4].

2.4.2.1 Avantages des générateurs de vide à effet venturi

- Très Grande réactivité.
- Il n'y a pas de pièces mobiles.
- Très économique.
- Une maintenance réduite.
- Encombrement réduit.
- Une longue durée de vie.

2.5. Les actionneurs hydrauliques

2.5.1 Définition

Par analogie aux actionneurs pneumatiques, les actionneurs hydrauliques sont des appareils qui transforment l'énergie hydraulique en mouvement mécanique. Dans ce type d'actionneurs, nous distinguons les moteurs hydrauliques et les vérins [4-6].

2.5.2 Les vérins hydrauliques

2.5.2.1 Principaux types de vérin hydraulique

Il est à noter qu'il y a une grande similarité avec les actionneurs pneumatique. Donc, on va souligner les points importants dans la présente partie.

2.5.2.1.a Vérin hydraulique simple effet (VSE)

Le couple tige-piston se bouge dans un sens seulement via l'action du fluide sous pression. Un ressort s'occupe du retour [4].

- **Mérites:** Consommation de fluide minimisé et très économique.
- **Démérites:** Course limité et encombrant.
- **Application:** Levage , serrage, bridage, et éjection,...etc.

2.5.2.1.b Vérin hydraulique double effet (VDE)

Le couple tige-piston capable de se déplacer dans deux sens (similairement aux VDE pneumatiques) [4].

- **Mérites:** Vitesse réglable facilement, souple , amortissement réglable.
- **Démérites:** Coûteux.
- **Application:** Applications vastes.

2.5.2.1.c Vérins hydrauliques spéciaux

- a) **Vérin rotatif:** La sortie du système est un mouvement rotatif (des pignons peuvent faire partie de ce vérin hydraulique, voir la figure ci-dessous) [4].
- b) **Vérin à tige télescopique:** à simple effet permet des courses importantes tout en conservant une longueur repliée raisonnable [4].

Note: Les schémas explicatifs des VSE et VDE hydrauliques sont similaires de ceux des VSE et VDE pneumatiques, apart l'énergie utilisée. Donc, nous référons à la figure 2.14. Les vérins spéciaux sont montrés dans la figure 2.18 [4].

2.5.2.2 Dimensionnement des vérins

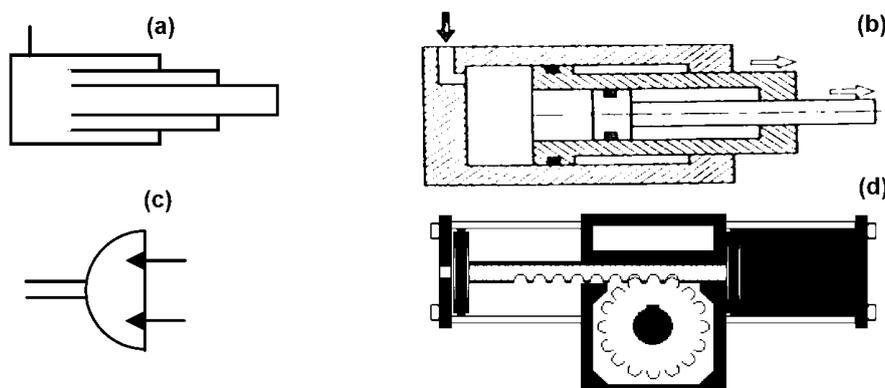


FIGURE 2.18 (a) symbole et (b) schéma, de vérin hydraulique à tige télescopique. (c) symbole et (d) schéma, du vérin hydraulique rotatif [4].

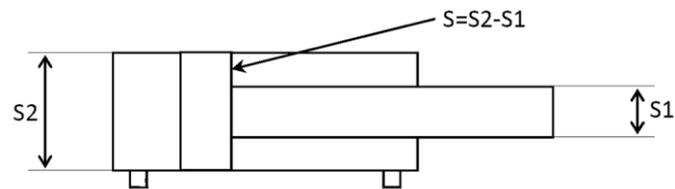


FIGURE 2.19 VDE hydraulique [4].

Par analogie aux actionneurs pneumatiques, afin de déterminer la pression P d'utilisation d'un vérin, il faut avoir des informations sur la force souhaitée et la surface S du piston. Notant que $S = \pi r^2$ (dans le cas d'un piston cylindrique), où r est le rayon concerné. Il est à noter que dans le cas d'un VDE, il y a deux surfaces différentes à calculer comme nous voyons dans la figure 2.19 [4].

Références

- [1] <http://sitelyceejdarc.org/autodoc/cours/010%201S/Sciences%20de%201%20ingenieur/Ressources/001%20Chaine%20energie%20.pdf>
- [2] <https://energieplus-lesite.be/techniques/froid-alimentaire7/compresseurs-frigorifiques-d1/>
- [3] http://lycees.ac-rouen.fr/maupassant/Melec/co/Techno/Pneumatique/res/Constituants_pneumatiques.pdf
- [4] <http://www.technologuepro.com/cours-genie-electrique/cours-27-capteurs-actionneurs-instrumentation/>
- [5] J. Faisandier, Mécanismes hydrauliques et pneumatiques, Dunod, 1999.
- [6] R. Labonville, Conception des circuits hydrauliques, une approche énergétique, Editions de l'Ecole Poly technique de Montréal, 1991.

Chapitre 3

Actionneurs électrostatiques

3.1. Introduction

Par définition, les actionneurs électrostatiques (*en anglais: Electrostatic Actuators*) sont basés sur les forces engendrées entre deux électrodes ou plaques conductrices lorsqu'un potentiel est appliqué entre les électrodes. Selon la configuration des électrodes, plusieurs et différents types d'actionneurs peuvent être élaborés. Ce type d'actionneurs sont relativement faciles et simple à utilisés en usinage de surface miniaturisé car les matériaux et nanomatériaux de structure sont très souvent conducteurs. Il est à noter que les actionneurs électrostatiques peuvent être classés en gros comme linéaires ou rotatifs [1-3].

3.2. Actionneurs à plaques parallèles (APPs)

Plusieurs types d'actionneurs ont été créés par l'utilisation des forces électrostatiques. L'actionneur électrostatique le plus connu entre eu est nommé; actionneur à plaques parallèles. Ce simple actionneur est représenté dans la figure 3.1. Comme montré, l'actionneur à plaques parallèles se compose de 2 plaques conductrices

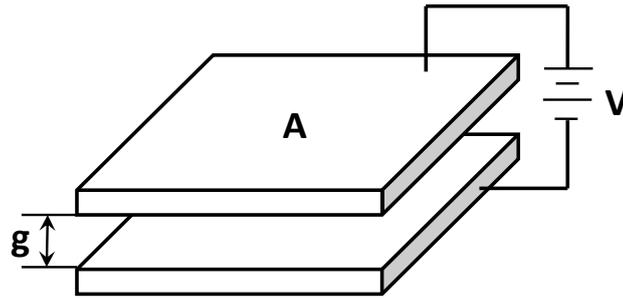


FIGURE 3.1 Actionneur à plaques parallèles [1], [2].

avec un diélectrique entre elles, et elle sont dotées des systèmes à ressort pour le support [1]. Nous notons que lorsque les plaques sont sous effets des charges opposées, elles se déplacent ensemble en raison de l'attraction engendrée [1]. Il est à noter que l'énergie électrique stockée dans le système d'actionnement décrit, est [1]

$$E = \frac{1}{2} CV^2 \quad (3.1)$$

Où V et C sont la tension et la capacité, respectivement. En négligeant les champs frangeants, la capacité peut être écrite comme [1], [2]

$$C = \frac{\varepsilon A}{g} \quad (3.2)$$

Où A , ε , et g sont la surface de la plaque, la permittivité du diélectrique, et la distance de séparation des 2 plaques, respectivement. Il est à noter que la capacité de l'équation (2) est pour une configuration de plaque parallèle. Sur ce, la force peut être donnée par [1]

$$F = -\frac{\partial e}{\partial g} = \frac{\varepsilon AV^2}{2g^2} = \frac{\varepsilon A}{2} E^2 \quad (3.3)$$

Où E est le champ électrique. Donc, la pression électrostatique est donnée par [1]

$$P = \frac{1}{2} \varepsilon E^2 \quad (3.4)$$

D'après les équations ci-dessus, il est claire que les caractéristiques des actionneurs électrostatiques à plaques parallèles sont fortement liées à l'espacement de séparation [1]. Il est à noter que l'utilisation des larges tensions peut être envisagée lorsque les systèmes d'actionnement pertinents sont dotés des grands espaces. Sur ce, la distance de l'écart est recommandée d'être minimisé [1].

Récemment, les actionneurs électrostatiques à plaques parallèles sont utilisés en tant que des dispositifs intégrés dans des systèmes optoélectroniques à base de silicium et aussi comme des relais rapides à haute performance. Les diverses techniques de micro-usinage du silicium donnent le pouvoir d'un contrôle à haute précision des courtes distances de séparation, essentielles pour un actionnement à basse tension [1].

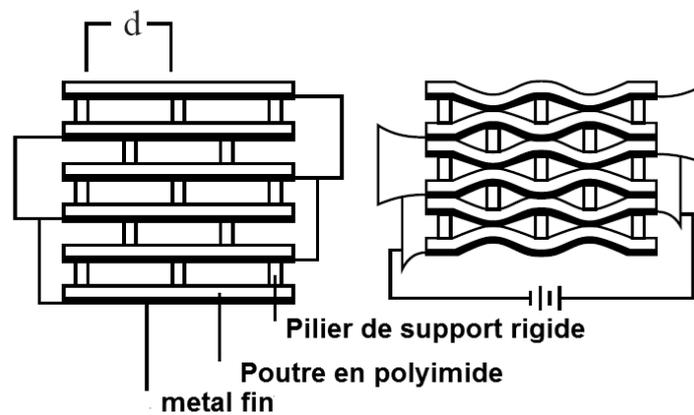


FIGURE 3.2 Réseau de force intégré sans (à gauche) et avec (à droite) l'application du potentiel [1].

Cependant, ces appareils spécifiques basé sur le silicium ne sont pas applicables dans le champs des muscles artificiels car ils sont liés à des configurations de support volumineuses. Notant que les forces et les distances dans ces systèmes d'actionnement sont de l'ordre de micro-newtons et micromètres, respectivement. Pour les adapter avec l'actionnement en robotique, c'est essentiel d'évoquer le concept des actionneurs en série pour booster l'effort et le mouvement aux niveaux utilisables [1]. Notant que ces appareils sont constitués d'électrodes flexibles alternées, reliées par des composants rigides. Lorsqu'une tension est considérée aux niveaux de structures, ils s'effondrent dans une seule direction tout en générant un mouvement de type linéaire [1]. Comme exemple, on prend le réseau d'effort intégrés illustré dans la figure 3.2. Il s'agit d'un appareil fabriqué dans le plan via des méthodes de micro-fabrication [1,3]. Il en résulte une feuille d'actionneur composée de plusieurs (d'environ 1.5×10^6 d'éléments) plaques très minces (2×10^{-6} mètre). Ce composant peut donner une pression électrostatique d'environ 8.2×10^3 Pascal associée d'une déformation globale d'environ 11% à un voltage de 10^2 Volt [1].

3.3. Actionneur à entraînement en peigne

La figure 3.3 montre les actionneurs à entraînement en peigne. Ils sont un autre type d'actionneur électrostatique beaucoup plus utilisé dans les composants à base de silicium. Particulièrement, ils sont très connus dans les systèmes micro-électromécaniques car, pour un potentiel de tension bien déterminé, leur force de sortie est inchangeable avec le déplacement, contrairement aux APPs précédemment décrits. Sur ce, le contrôle du déplacement est très simplifié [1]. En plus, ils subissent moins d'amortissement de l'air que les plaques parallèles et donnent des courses significatives.

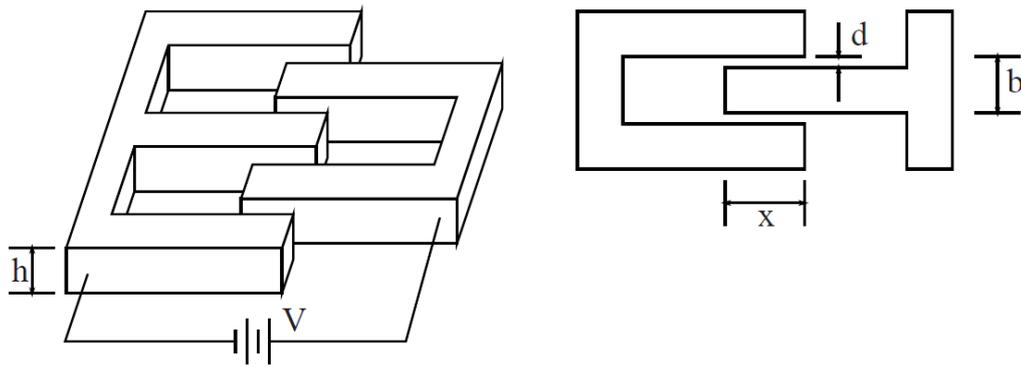


FIGURE 3.3 Actionneur d'entraînement en peigne représenté en perspective inclinée (à gauche) et détail d'un seul doigt depuis la vue de dessus (à droite) [1], [2].

L'examen d'un seul doigt d'un lecteur de peigne en ignorant les champs frangeants nous permet d'écrire la capacité entre le doigt interne et les doigts externes comme [1,2]

$$C = \frac{2\epsilon hx}{d} \quad (3.5)$$

Où h , x , et d sont la hauteur du doigt, le chevauchement des doigts, et l'espace entre les doigts, respectivement. Par analogie à les APPs, pour l'obtention de la force, nous différencions l'énergie par rapport au changement de déplacement, ce qui nous permet d'écrire [1], [2]

$$F = \frac{\partial e}{\partial x} = \frac{\epsilon h}{d} V^2 \quad (3.6)$$

La force de l'équation (6) provient des champs de franges à la fin du doigt attirant le doigt. Il est à noter que pour plusieurs doigts, la force est bien proportionnelle au nombre de doigts. D'après cette équation, on peut remarquer que la force dépend de l'écart entre les doigts, et elle est proportionnelle à la hauteur des doigts, ce qui est représentative de la zone de chevauchement. De plus, comme indiqué précédemment, la force n'est pas liée au déplacement en "x", ce qui indique qu'il n'y a pas de souci concernant les fluctuations de traction. Les entraînements en peigne ont habituellement des forces comprennent entre 10^{-3} - 10^{-6} newton et des déplacements de 1×10^{-6} à 100×10^{-6} mètre. Les efforts correspondants sont de l'ordre du 10^3 pascal, avec des fréquences d'opération d'environ 10^3 Hertz. Afin d'élaborer un actionneur plus pratique, un travail doit être fait sur la suspension afin que les actionneurs puissent être configurés en série pour atteindre des déplacements significatifs. En variante, des déplacements globaux importants sont réalisable en employant des entraînements à peigne ensemble avec des mécanismes à cliquet [1].

3.4. Actionneur linéaire à induction électrostatique

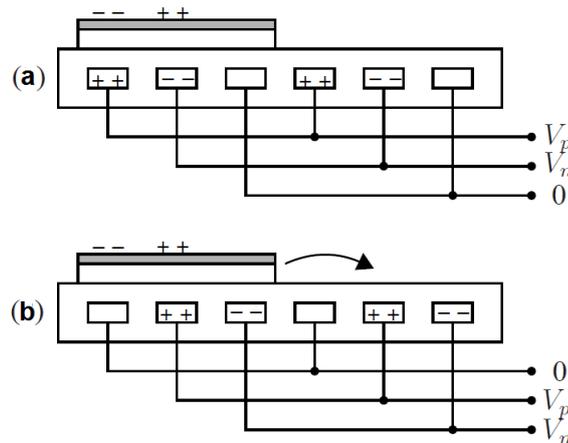


FIGURE 3.4 Moteur à induction linéaire. En (a) des charges sont induites sur le curseur par le rotor. En (b), la charge sur le rotor est commutée, le faisant repousser le curseur et le forcer d'un pas [1].

Le moteur à induction électrostatique est un autre type d'actionneurs électrostatiques les plus répandus. Il s'agit d'un actionneur linéaire constitué d'un film statorique et d'un film coulissant, comme montré dans la figure 3.4. Le film de stator possède un motif d'électrodes triphasées parallèles, répété régulièrement et noyé dans un film isolant. Le curseur possède une couche isolante supportée par un revêtement à très haute résistance. Lorsque des potentiels positives (V_p) et négatives (V_n) sont appliquées séquentiellement aux phases du stator, une charge inversée est induite au niveau du film de curseur par rapport aux charges statoriques. Tant que le curseur possède une résistivité très élevée, les charges se désintègrent lentement. Sur ce, les phases du stator sont alimentées dans une séquence spécifique qui se succède entre la répulsion et l'attraction avec l'élément mobile, tout en provoquant le déplacement du film du curseur par rapport au film statorique. Il est à noter que les feuilles peuvent être rendues arbitrairement longues afin d'achever des longueurs de course particulières. Tandis qu'un empilement peut être considéré comme configuration pour booster la force [1].

Références

- [1] B. E. Schubert, "Design, Fabrication and Testing of Angled Fiber Suspension for Electrostatic Actuators", *UC Berkeley Electronic Theses and Dissertations*, May 2012.
- [2] R. W. Johnstone *et al.*, "Electrostatic actuators", Book Chapter In: *An introduction to surface-micromachining*, pp. 135-152, Springer, Boston, MA, 2004.
- [3] S. M. Bobbio *et al.*, Integrated force arrays. *Micro Electro Mechanical Systems*, pages 149–154, 1993.

Chapitre 4

Actionneurs ultrasonores (‘ultrasonic motors’)

4.1. Introduction

Dans le monde actuel, les systèmes hybrides constitués de circuits électroniques modernes, d'actionneurs et moteurs, et de détecteurs attirent un degré d'importance sans précédent. Au titre d'exemple, nous avons constaté l'évolution rapide et remarquable de la micro-robotique et nano-robotique. D'un point de vue technologique, si on compare le développement des capacités de l'informatique numérique (e.g. en vitesse et en taille de données) et aussi la révolution des communications boostée par l'Internet et les technologies pertinentes (e.g. Internet des Objets "IoT"), avec le développement des dispositifs d'actionnement, nous pouvons dire immédiatement que les progrès des actionneurs ont été lents. Il y a eu, bien entendu, un progrès constant des performances des actionneurs électromagnétiques classiques grâce à l'exploitation de matériaux émergents et de techniques de modélisation avancées. En revanche, le potentiel de nouveaux actionneurs ont été très recherchés. L'actionneur à ultrasons est l'un de ces nouveaux actionneurs. Un actionneur à ultrasons est capable de fournir un actionnement linéaire ou rotatif via des vibrations piézoélectriques à une fréquence ultrasonique par le frottement [1]. Ce chapitre est consacré aux actionneurs ultrasoniques.

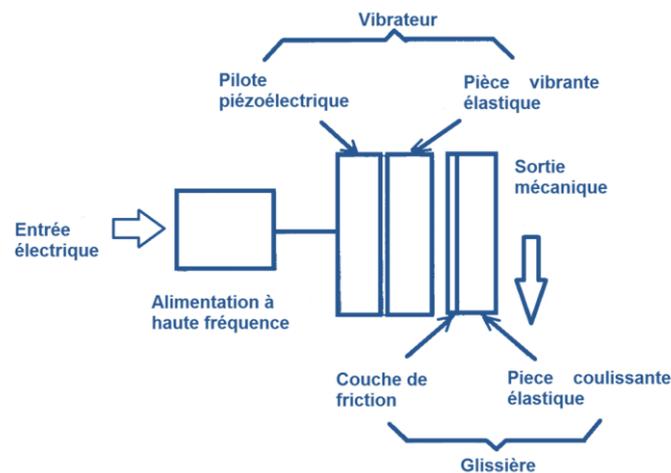


FIGURE 4.1 Les constituants fondamentaux des actionneurs à ultrasons [2].

4.2. Construction fondamentale du moteur à ultrasons

La figure 4.1 illustre la structure basique des actionneurs à ultrasons, qui se compose d'une alimentation de puissance à haute-fréquence, d'un vibrateur, et d'un curseur. De plus, le vibrateur est constitué d'un dispositif pilote piézoélectrique et d'une portion vibratoire élastique, notant que le curseur est constitué d'une partie mobile élastique et d'une couverture de frottement [2].

Dans la littérature, bien qu'il y ait eu certains efforts antérieurs, le moteur à ultrasons pratique a d'abord été introduit par H. V. Barth de "*International Business Machines*" en 1973. Comme montré dans la figure 4.2, le principe de fonctionnement est si simple, le rotor est pressé entre 2 cornes positionnées à 2 endroits différents. En stimulant l'un des cornes, le rotor est entraîné dans un sens tandis qu'en stimulant le deuxième corne, le rotor tourne dans un sens inversé par rapport au premier actionnement [2]. Notant que quelques moteurs similaires ont été proposés [3].

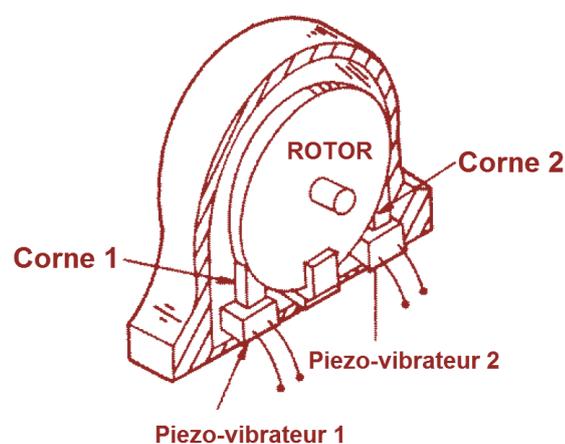


FIGURE 4.2 Moteur ultrason de Barth [2], [3].

4.3. Caractéristiques des moteurs à ultrasons

Les actionneurs à ultrasons sont caractérisés par des nombreux avantages en les comparant aux actionneurs traditionnels utilisant l'effet électromagnétique, et ils sont très prometteurs pour plusieurs applications. Les mérites et les démérites sont résumés ci-dessous [2].

4.3.1 Les avantages

- ✓ Excellente contrôlabilité et très bonne résolution de position.
- ✓ Couple élevé et faible vitesse.
- ✓ Bon rendement et rapport puissance-poids élevé (i.e. haute puissance à poids réduit).
- ✓ Bruits réduits.
- ✓ Taille compacte.
- ✓ Structure facile à produire.
- ✓ Les champs magnétiques et/ou radioactifs externes ont un effet négligeable avec aucune génération de ce type de champs, ce qui facilite l'intégration avec des divers systèmes.

4.3.2 Les inconvénients

- Durabilité réduite en raison de la conduite par frottement.
- Propriétés couple-vitesse en atténuation.
- Le besoin d'une alimentation à haute-fréquence.

4.4. Classification des moteurs ultrasonique

Pratiquement, il existe des actionneurs de type rotatif et linéaire d'un point de vue client. La classification selon la structure du vibreur, fait aboutir des types de tige, en forme de π , d'anneau (carré) et de cylindre, comme montré dans la figure 4.3. Il y a deux classes des actionneurs à ultrasons selon la caractéristique de vibration : le premier type est à ondes stationnaires et le deuxième type est à ondes de propagation [2]. Notant que l'onde stationnaire peut être s'écrit comme [2]

$$u_s(x,t) = A \cos(kx) \cos(\omega t) \quad (4.1)$$

et l'onde de propagation peut être donnée par [2]

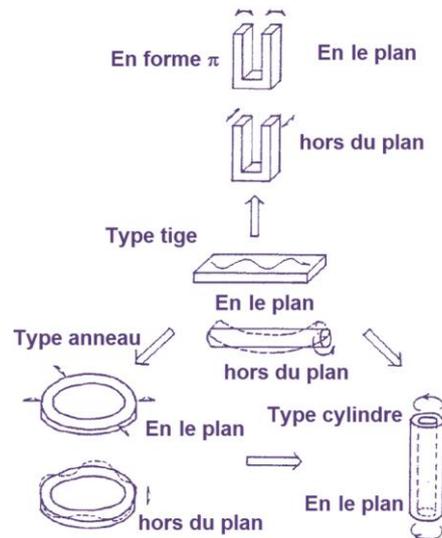


FIGURE 4.3 Formes de vibreur pour des actionneurs à ultrasons [2].

$$u_p(x,t)=A \cos (kx-\omega t) \quad (4.2)$$

La trigonométrie nous permet de transformer (2) à [2]

$$u_p(x,t)=A \cos (kx) \cos (\omega t)+A \cos (kx-\pi/2) \cos (\omega t-\pi/2) \quad (4.3)$$

Où k est le nombre de l'ordre et ω est la pulsation [1-4]. Sur ce, il s'agit d'un résultat substantiel. Autrement dit, une onde de propagation peut être engendrée en superposant 2 ondes stationnaires. Notant que les phases se diffèrent de $\pi/2$ l'une de l'autre à la fois dans l'espace et dans le temps. Ce principe est essentiel pour engendrer une onde de propagation sur une substance de volume/taille limitée, parce que seules les ondes stationnaires sont capables d'être stimulées de façon constante et stable dans une taille finie [2].

4.4.1 Moteurs à ultrasons à ondes stationnaires

Ce type d'actionneur est parfois appelé "coupleur vibratoire". Dans ce dernier une pièce vibrante est liée à un pilote piézoélectrique et la partie de pointe engendre un actionnement elliptique plat. La figure 4.4 représente un modèle simple précédemment proposé dans la littérature. En effet, une partie vibrante est attachée à un rotor ou à un curseur avec un léger pente d'inclinaison θ . Comme montré, prenant la coordonnée x - y de façon que l'axe x soit perpendiculaire au plan du rotor [2].

$$u_x=u_0 \sin(\omega t+\alpha) \quad (4.4)$$

Lorsqu'un mouvement de vibration est stimulé au niveau du vibreur piézoélectrique, le morceau vibrant engendre un fléchissement à cause de la restriction par le rotor, de sorte que la pointe se bouge le long de la face du rotor entre $A \rightarrow B$, et

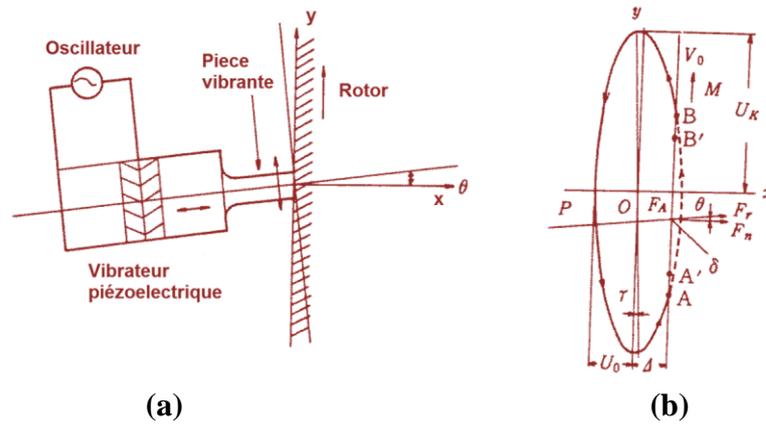


FIGURE 4.4 Actionneur de type coupleur vibratoire (a) et son locus de pointe (b) [2].

librement entre B→A. Si la pièce qui vibre et les piézo-vibrateurs sont ajustés correctement et soigneusement, ils peuvent former une constitution résonnante, et si la déformation en flexion est modeste vis à vis à la longueur de la pièce, le lieu de la pointe durant la vibration libre (B→A) peut être donnée par [2]

$$x = u_0 \sin(\omega t + \alpha) \tag{4.5}$$

$$y = u_1 \sin(\omega t + \beta) \tag{4.6}$$

Par conséquent, seule la durée A→B donne une force unidirectionnelle au rotor par friction, (c.à.d couple rotatif irrégulier ou poussée). Cependant, du fait de l'inertie du rotor, l'ondulation de la vitesse de rotation n'est pas significative à constater. Le genre d'onde stationnaire, généralement, est peu coûteux (une source de vibration) et a un rendement significatif qui tend vers 98% théoriquement [2].

4.4.2 Moteurs à ultrasons à ondes de propagation

D'un point de vue comparatif, les moteurs à ultrasons à ondes de propagation réunissent 2 ondes stationnaires avec un écart de phase de $\pi/2$ à la fois dans le temps et dans l'espace. Le concept est illustré sur la figure 4.5. Une particule de surface du corps élastique figure un lieu elliptique à cause du couplage des ondes transversales et longitudinales. Pratiquement, ce genre demande généralement 2 sources de vibrations

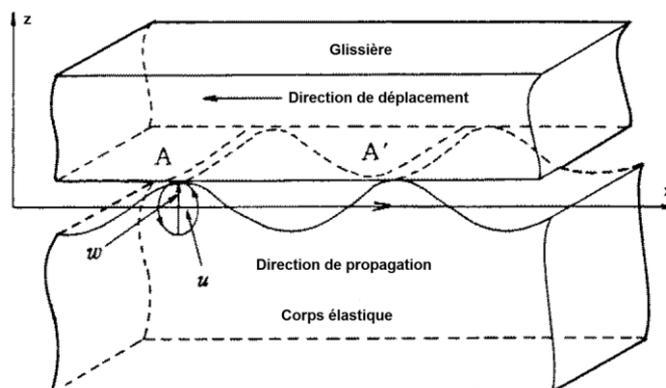


FIGURE 4.5 Principe du moteur à ultrasons à onde de propagation [2].

pour pouvoir engendrer une onde de propagation, menant à un rendement modeste (i.e. $\leq 50\%$), cependant il peut être contrôlé dans les 2 directions de tournement [2].

4.5. Type de moteurs à ultrasons à ondes stationnaires

4.5.1 Moteur rotatif

4.5.1.1 Composition

Une configuration typique pour l'actionnement rotatif, réunissant 2 vibrations stationnaires, est montré dans la figure 4.6. On peut voir des composants en titan-zirconates de plomb (connu en littérature par "PZT") longitudinaux et de torsion très bien serrés entre la tête métallique et le support inférieur via un verrou. Les vibrations de torsion et longitudinales sont capables d'être stimulées indépendamment, puisque l'unité piézoélectrique de torsion et celle longitudinale possèdent chacune une électrode bien isolée comme montré dans la même figure. En effet, le disque PZT de torsion est bien polarisé dans la sens circonférentielle pour induire une contrainte de cisaillement avec la constante piézoélectrique de d_{15} , alors que le disque longitudinal est dans la sens de l'épaisseur afin d'engendrer une contrainte axiale avec la constante d_{33} , comme le montre la figure 4.7. Il est à noter que le disque PZT de torsion est constitué de petits composants en forme de coin afin de posséder une polarisation circulaire comme montré la figure 4.8. Chaque composant en forme de coin est polarisé au moyen d'une électrode temporaire bien plaquée des 2 côtés. Ces électrodes sont enlevées après la polarisation. Les pièces sont connectées l'une à l'autre en une forme annulaire. Notant que cette méthode d'élaboration en mosaïque augmente le coup de l'élément PZT de torsion par rapport au composant longitudinal. Un rotor est bien serré sur la surface de haut du transducteur avec un roulement à billes et un ressort. Nous soulignons que la force de pression mène à une force de frottement suffisante. Des matériaux de friction convenables peuvent être utilisés à l'interface entre le transducteur et le rotor [1], [4].

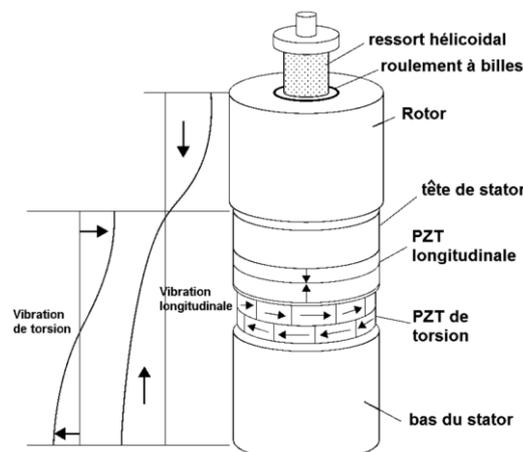


FIGURE 4.6 Moteur à ultrasons à ondes stationnaires à deux modes [1], [4].

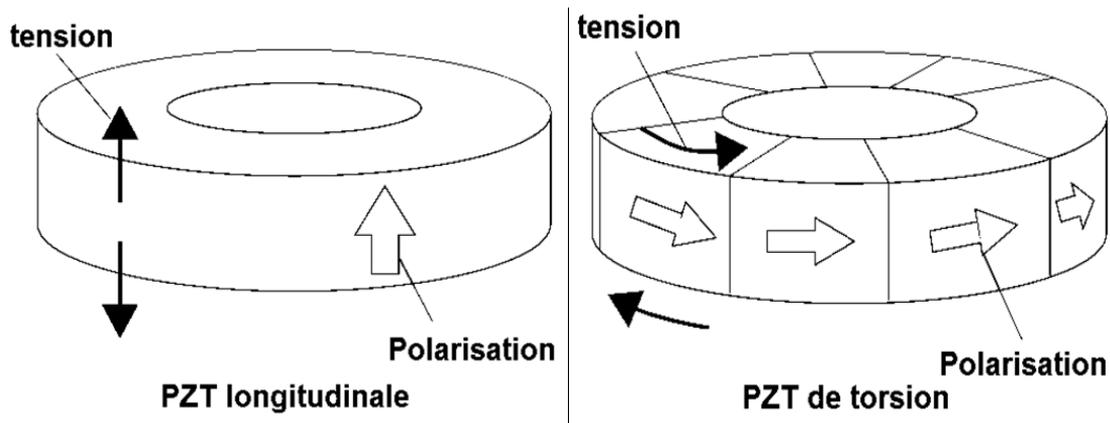


FIGURE 4.7 Composants piézoélectriques utilisés dans l'actionneur précédant [1], [4].



FIGURE 4.8 Pièce en forme de coin de l'unité PZT de torsion [1], [4].

4.5.1.2 Principe de fonctionnement

La figure 4.9 montre le fonctionnement de l'actionneur concerné, où un cycle de vibration est reparti en 4 stades. En fait, la vibration longitudinale est bien synchronisée avec la vibration de torsion de manière que le transducteur peut s'étendre dans le sens axial pour se connecter avec le rotor lorsqu'il s'agit d'une vitesse de vibration de torsion maximale. Pendant cette étape, la force rotative est transmise au rotor par frottement. Le transducteur se rétracte et n'est pas en contact avec le rotor quand la vitesse de vibration de torsion est dans le sens opposé à la rotation du rotor. Donc on peut dire que la vibration de torsion est redressée et ajustée en mouvement de rotation du rotor au moyen de la vibration longitudinale [1]. En d'autres termes, la vibration longitudinale module la force de frottement de sorte que la vibration de torsion est transportée d'une manière sélective au rotor pendant seulement la moitié du cycle. Si la relation de phase entre les 2 vibrations est changée de π , la direction de rotation du rotor s'inverse. Il est important de noter que la vitesse de rotation est quasi-proportionnelle à la vitesse de vibration de torsion [1], [4].

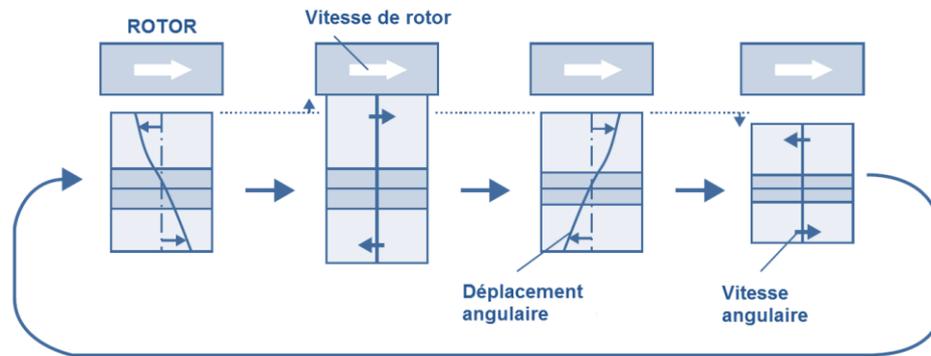


FIGURE 4.9 Fonctionnement d'un actionneur ultrasonique à transducteur hybride [1], [4].

4.5.2 Moteur linéaire

4.5.2.1 Composition et principe de fonctionnement

Il existe plusieurs combinaisons éventuelles des 2 vibrations pour réaliser un actionnement linéaire. En premier lieu, 2 exemples employant des composants piézoélectriques multicouches sont représentés dans la figure 4.10 et la figure 4.11. Dans la configuration représentée sur la figure 4.10, un transducteur *Langevin* longitudinal de demi-longueur d'onde est employé pour engendrer la force de poussée, tandis que 2 composants PZT multicouches sont assemblés aux 2 extrémités du transducteur précité pour le contrôle de la force de frottement avec le rotor. Dans le transducteur Langevin, un couple de disques céramiques piézoélectriques est compris entre des cylindres en aluminium via un boulon, afin de stimuler de fortes vibrations longitudinales. Cet actionneur travaille à la fréquence de résonance longitudinale fondamentale du transducteur *Langevin* [1]. Notant que chaque composant PZT multicouche peut fournir un contrôle de frottement relativement suffisant même lorsqu'il n'est pas entraîné à la résonance, en tirant parti de la configuration multicouche. Si la phase des vibrations des composants multicouches est sélectionnée soigneusement, la vibration longitudinale sera transformée à un actionnement linéaire unidirectionnel. Lorsque la vitesse longitudinale est à son maximum au niveau de l'extrémité du transducteur Langevin, l'un des composants multicouches s'étend pour faire une bonne connection avec le rail. En même temps, le composant multicouche à l'autre coté se rétracte pour diminuer le frottement avec le rail, parce que la vitesse de vibration longitudinale est dans le sens opposé. Le sens l'actionnement peut être inversée par la modification de la relation de phase entre les composants multicouches et la vibration longitudinale de π . Il est à noter qu'une poussée maximale de 5 Newton et une vitesse à vide de $\frac{1}{2}$ mètre/seconde ont été enregistrées au moyen d'un modèle avec un rayon de 1 centimètre [1].

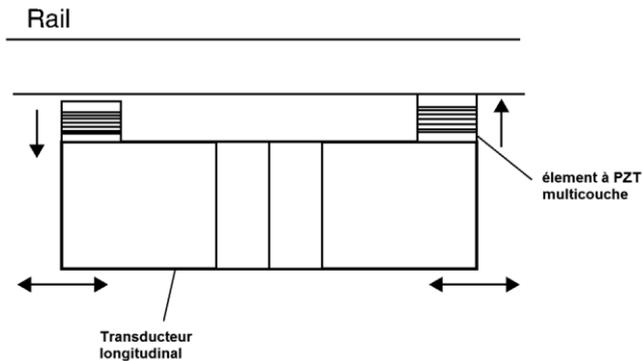


FIGURE 4.10 Actionneur linéaire utilisant une combinaison d'un transducteur longitudinal et d'éléments piézoélectriques multicouches [1], [4].

La figure 4.11 illustre une sorte modifiée dont le transducteur longitudinal est changé par un transducteur de flexion pour des raisons de miniaturisation. Une paire de plaques PZT polarisées dans la direction de l'épaisseur prend une barre métallique rectangulaire au milieu. Les sens de polarisation et la polarité des tensions électriques appliquées sont ajustés pour que la plaque PZT supérieure s'étende dans le sens latéral tandis que celle du bas se rétracte, et vice versa [1]. La vibration de flexion fondamentale est stimulée de cette manière via la structure de type "sandwich". Deux éléments piézoélectriques multicouches sont bien fixés aux points nodaux de la vibration de flexion sur la barre métallique où un actionnement de rotation est engendré. Notant que le haut des composants multicouches possède des éléments de vibration horizontales dues au actionnement de rotation en bas. La vibration horizontale est convertie en actionnement linéaire au moyen de la vibration verticale des composants piézoélectriques multicouches. Pratiquement, le transducteur doit être pressé sur le rail de manière stable avec une force perpendiculaire convenable visant un frottement suffisant au niveau des surfaces de contact, pour les 2 moteurs montrés sur les figures [1]. Pour plus de détails et d'approfondissement, nous référons aux chapitres [1], [4].

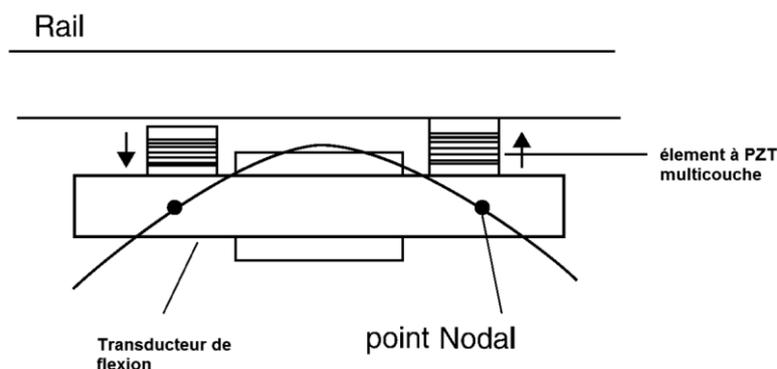


FIGURE 4.11 Moteur/actionneur linéaire utilisant un vibreur de flexion et des éléments piézoélectrique multicouches [1], [4].

Références

- [1] K. Nakamura, "Ultrasonic motors", chapter 20, book: Ultrasonic transducers, pp. 677-704, 2012.
- [2] K. Uchino, "Piezoelectric ultrasonic motors: review", *smart mater. struct.* 7 (1998), pp. 273-285.
- [3] C. Zhao, "Ultrasonic Motors, Technologies and Applications", Book, *Springer*, 2011.
- [4] K. Nakamura, "Ultrasonic motors", chapter 17, Book: Power ultrasonics, pp. 511-541, 2015.

Chapitre 5

Actionneurs 'Stick and slip': l'effet collé-glissé

5.1. Introduction

Les actionneurs de type 'stick and slip' sont des actionneurs prometteurs pour les applications miniaturisées de future. Principalement, ils sont basés sur la déformation d'un matériau particulier et bien défini. Le choix ou la sélection du matériaux déformable peut être dicté essentiellement par son aptitude à se déformer rapidement et délicatement. Ce bref chapitre est consacré pour les actionneurs 'stick and slip' [1-3].

5.2. Principe et mode de fonctionnement

Les actionneurs 'Stick and Slip' peuvent fournir plusieurs mérites qui les rendent attractifs et adaptables à nos besoins. En effet, le principe de fonctionnement peut être décrit comme suit. Comme montrée dans la figure 5.1, une masse inertielle est soutenue et dirigée par des pieds déformables (e.g. piézo-céramique). Principalement, deux modes de fonctionnement sont définis, le mode pas à pas et le mode balayage [1,2].

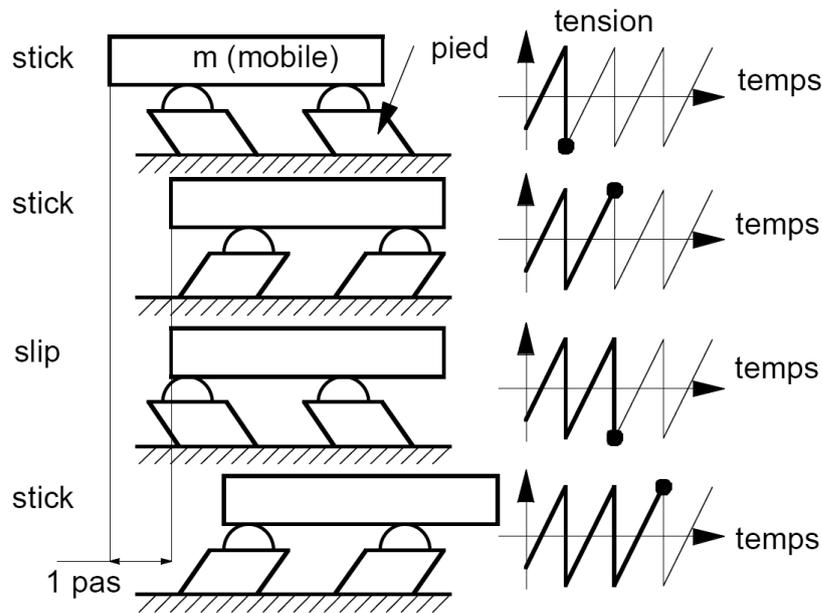


FIGURE 5.1 Principe de fonctionnement des actionneurs 'stick and slip' [1,2].

Comme nous voyons dans la figure 5.1, en mode pas à pas, chaque étape consiste en une lente déformation des jambes suivie d'un retour brusque vers l'arrière. Lors de la déformation lente, la masse suit les jambes à cause du frottement (stick), alors qu'elle ne peut pas suivre le retour brusque à cause du glissement. C'est exactement le principe de fonctionnement de ce type particulier d'actionneurs [2]. Il est à noter que le mode pas à pas permet des déplacements relativement longs à une vitesse relativement élevée (typiquement 5 mm/s). Il est important à noter également que la résolution est limitée à environ un pas (200 nm). Lorsque la position est à moins d'une distance d'un pas de la cible, les pieds se déforment lentement jusqu'à ce que le but soit atteint avec délicatesse [2]. Dans ce mode, appelé mode de balayage, la résolution est une fraction de pas. La synergie de ces 2 modes permet d'obtenir des déplacements importants à une nano-résolution [1,2].

5.3. Composition des actionneurs 'stick and slip' et leurs différentes configurations

Les actionneurs 'stick and slip' comportent 5 constituants essentiels (Voir Fig. 5.2(a)) [1,2].

5.3.1 Les pieds déformables

C'est ici où la conversion d'énergie s'effectue (i.e. de l'énergie électrique à l'énergie mécanique [1,2]).

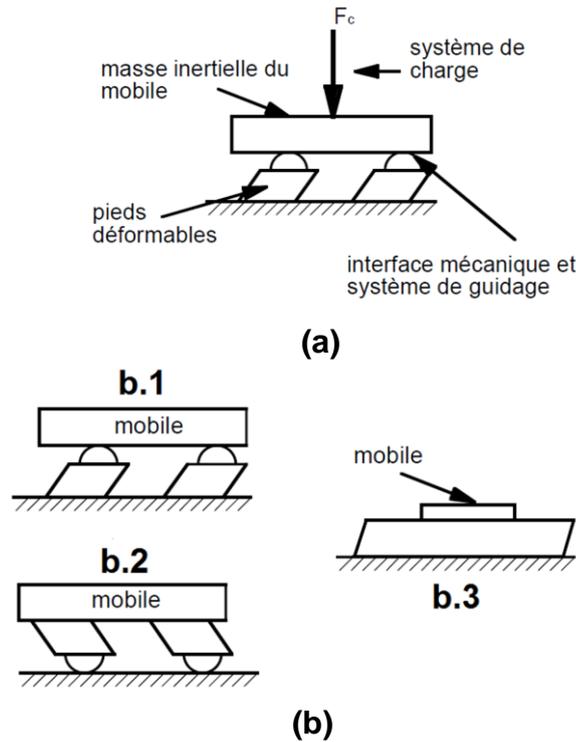


FIGURE 5.2 Les composants principaux (a) et les différentes configurations (b) de l'actionneur 'stick and slip' [1,2]

5.3.2 L'interface mécanique entre la glissière et les pieds

L'interface mécanique entre le curseur et les jambes doit être délicatement conçu à tout les niveaux. Cela permet d'éviter les contraintes excessives et converger à un bon fonctionnement. Notant que la sélection et le choix des matériaux de cette interface est une étape clé. Pratiquement, la pression de contact doit être élevée et les surfaces doivent être bien polies pour assurer le bon fonctionnement des deux modes précédemment décrits [1,2].

5.3.3 Masse inertielle du mobile (partie mobile)

Elle permet le mode pas à pas [1,2].

5.3.4 Le système de charge

Le système de charge ou de poids hausse la force de contact (i.e. à l'interface mécanique ou le mécanisme de frottement se fait) afin de booster la force motrice de l'actionneur tout en autorisant des mouvements perpendiculaire [2].

5.3.5 Le système de guidage

Le système de guidage obstrue tous les mouvements non-souhaitables. Afin de rendre plus simple la conception et éviter les contraintes excessives, il est généralement combiné avec la fonction de conduite [2].

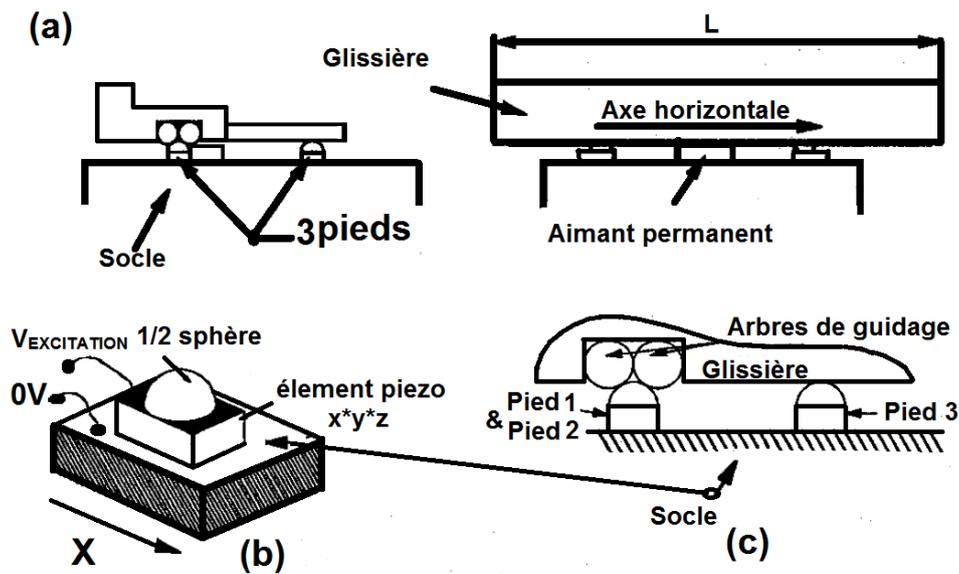


FIGURE 5.3 (a) Dessin d'un actionneur à un degré de liberté, (b) détail d'un pied, (c) système de guidage [2].

La Fig. 5.2(b) montre les configurations les plus répandues des actionneurs 'stick and slip'. Dans la figure 5(2).b.1, les pieds sont bien fixés sur le socle, la gestion des fils est aisée car les éléments piézo sont fixes. Dans la figure 5(2).b.2, les pieds sont fixées au curseur, cette configuration permet un mouvement plus long car il n'est plus limité par la longueur du curseur, mais les fils doivent être libres et suivre le mobile [2]. Dans la figure 5(2).b.3, l'élément mobile est attaché au corps déformable, donc il s'agit d'un actionneurs 'stick and slip' à pieds continus [1].

5.4. Actionneur 'stick and slip' à un degré de liberté

La Fig. 5.3(a) montre un actionneur à un degré de liberté basé sur la configuration b.1 (Voir Fig. 5.2(b)). Cet actionneur est caractérisé par sa course, sa force de conduite et sa vitesse maximale. Pratiquement, chaque pied est constitué d'un élément piézo-électrique et d'une demi-sphère spécifique (Voir Fig. 5.3(b)) [2]. Le système de charge est un aimant permanent et le système de guidage est constitué de deux arbres de précision fixés au curseur. Notant que deux pieds guident le curseur le long de l'axe horizontale, tandis qu'une troisième empêche sa rotation, comme l'indique Fig. 5.3(c)). Ce système dispose de five points de contact, il n'est pas sur-contraint et les fonctions de guidage et de conduite sont combinées [2]. Il est important de noter que cet actionneur est conçu et caractérisé dans [2].

5.5. Modélisation

Pour une modélisation analytique, l'équation du mouvement des jambes, selon x est [1,2]:

$$m_{eq} \cdot a_{pied} = -F'_l + F_{Rp} + F_{Cp} - m_{eq} \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (5.1)$$

où F'_l dénote la force de contact ou de frottement entre le mobile et les jambes et:

$$F_{Cp} = C_p \cdot (x_p - x_{pied}) \quad (5.2)$$

$$F_{Rp} = -R_p \cdot v_{pied} \quad (5.3)$$

dénotent les forces attribuées respectivement à la compliance C_p et aux frottements visqueux internes R_p .

En effet, de ces 3 équations principales on peut calculer l'accélération des pieds a_{pied} et par intégrations successives leur vitesse v_{pied} et leur position x_{pied} . Il est à noter que ces équations ne considèrent pas de quelques facteurs constructifs, à savoir, les interfaces d'adhésif entre les composants des jambes, la rigidité de l'interface de contact ou l'effet de l'amortissement attribué à l'aimant de charge. Notant que C_p et R_p sont déterminable expérimentalement par l'analyse de la réponse indicielle du système [1,2].

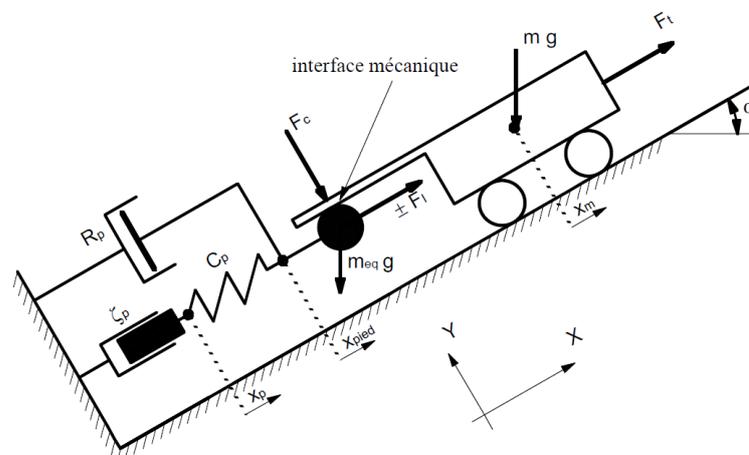


FIGURE 5.4 Model utilisé pour la simulations en [1 et 2]. Modèle flexible. Le mouvement des jambes ζ_p est considéré suivre idéalement le potentiel électrique issue de l'amplificateur. Le mobile bouge sans autre frottement que celui de l'interface entre les pieds et le mobile [1,2].

- Pour plus de détails concernant la modélisation et la simulation, nous référons à [1,2]

5.6. Avantages

- Les actionneurs S-S sont simples (peu de composants, matériau à faible coût, etc.).
- Les actionneurs S-S possèdent une résolution et une rigidité intrinsèques élevées.
- Les fonctions de guidage et d'entraînement peuvent être combinées normalement.
- Des longs déplacements et une haute précision sont possibles et faisables.

5.7. Mise en échelle

Supposant que la taille de l'actionneur "S&S" est réduite, donc la masse de la glissière diminuera relativement aux dimensions. Il est donc logique de se demander si l'inertie du curseur sera suffisante pour permettre la phase de glissement du mouvement. Sur ce, il est faisable de démontrer qu'en théorie, la diminution de l'effet d'inertie sera compensée par l'amélioration du fonctionnement des jambes. En effet, les performances en terme de vitesse des actionneurs 'stick and slip' s'amélioreraient au fur et à mesure que leurs tailles diminuent [2]. Il est à noter que ces actionneurs miniaturisés forment un champ de recherche important et très attractif dans le monde actuel.

Références

[1] https://infoscience.epfl.ch/record/32233/files/EPFL_TH1756.pdf <http://www.technologuepro.com/cours-genie-electrique/cours-27-capteurs-actionneurs-instrumentation/>

[1] J.-M. Breguet, thèse "Actionneurs "stick and slip" pour micro-manipulateurs", Lausanne, EPFL 1998

[2] J.-M. Breguet and R. Clavel, "Stick and slip actuators: design, control, performances and applications," MHA'98. Proceedings of the 1998 International Symposium on Micromechatronics and Human Science. - Creation of New Industry - (Cat. No.98TH8388).

[3] Harmonisation offre de formation master académique, Canevas, M2, Sciences et Technologies, Electronique, Instrumentation, Dz, 2016 - 2017.

Chapitre 6

Actionneurs intelligents

6.1. Introduction

L'utilisation de l'électronique avancée dans l'ingénierie des actionneurs peut donner certaine intelligence au fonctionnement de l'actionneur [1-3]. Par exemple, un actionneur piézoélectrique est l'un des actionneurs qui se trouve dans des nombreuses applications. Cela est principalement attribué à leur avantages majeures, à savoir la très haute dynamique, la haute résolution, la faible consommation d'énergie, l'effort développable élevée, et également la construction compacte. En plus, les piézo-actionneurs ont la possibilité d'avoir un actionneur, un capteur de force et de position (peut être plus), et une unité miniaturisée de traitement, contenus dans une seule unité. Cela explique leur habilité comme des "actionneurs intelligents" [1].

6.2. Actionneurs intelligents : Composition et principe de fonctionnement

Nous traitons dans cette rubrique les piézo-actionneurs qui se composent, comme tous les actionneurs, de 2 systèmes connectés en série qui sont: un amplificateur de puissance électronique et un transducteur d'énergie électromécanique [1]. Notant que des nombreux transducteurs d'énergie populaires peuvent être décrits comme 3 ou 2

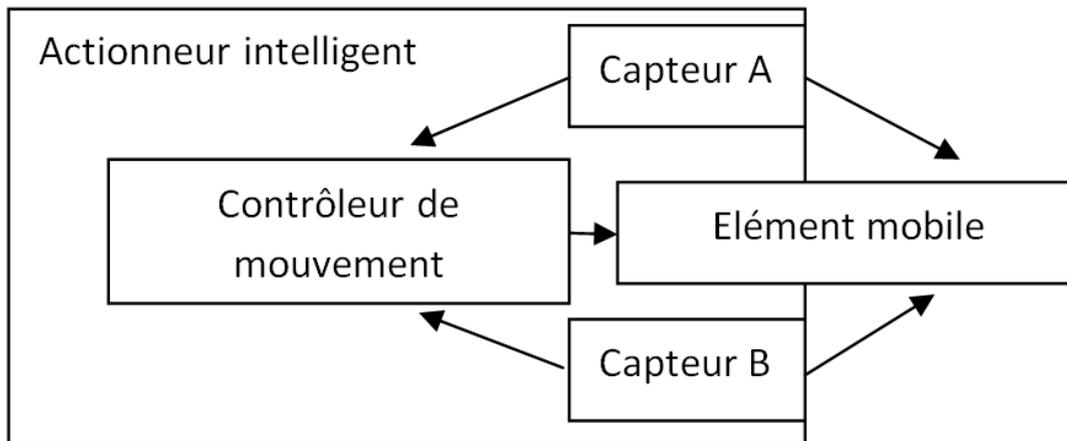


FIGURE 6.1 Exemple simplifié décrivant le principe d'un actionneur intelligent.

portes. Notant que cette description donne un principe important dans la fabrication des actionneurs intelligents, qui peuvent calculer les caractéristiques de course de sortie et de courant d'entrée ainsi que la fonction de transfert force-tension via un processeur de signal incorporé, en conjonction avec un modèle de transducteur approprié [1].

Cette catégorie particulière d'actionneur intelligent est fondamentalement basé sur des matériaux et nanomatériaux spécifiques de transducteurs, caractérisés par des propriétés qui leur habilent de jouer le rôle d'un capteur et d'un actionneur simultanément et qui fournissent un sous-système mécatronique [1]. Donc, la détermination précise de la course et/ou la force de sortie est raisonnablement possible sans employer des capteurs supplémentaires pour les mêmes mesurandes pertinents. Sur ce, ces actionneurs sont convenable pour effectuer des fonctions plus complexes, ce qui explique l'appellation des "actionneurs intelligents" [1].

Le principe d'un actionneur intelligent est illustré dans la Figure 6.1. On peut voir clairement que l'actionneur est doté d'un ou plusieurs capteurs intégrés et aussi un contrôleur d'actionnement incorporé. Pratiquement, les capteurs supervisent les mesurandes pertinents et donnent des informations en temps réel au contrôleur tout en assurant un interfaçage intelligent et précis entre le mouvement et la partie commande. Donc, l'actionnement est contrôlé en temps réel via des composants intégrés dans l'actionneur lui même, ce qui donne le pouvoir au actionneur de se comporter

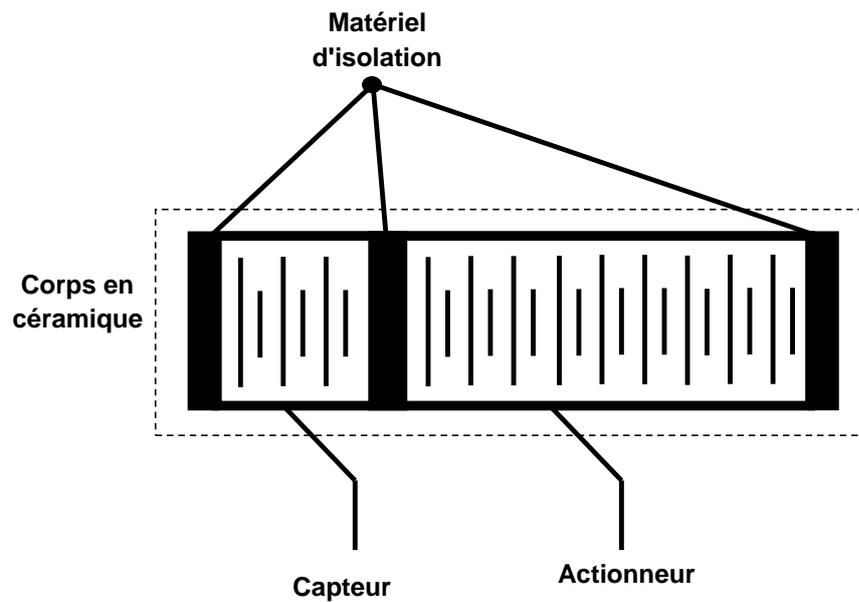


FIGURE 6.2 Piezo-actionneur intelligent. Le capteur et en conjonction avec l'actionneur [1].

intelligemment. Pour plus de détails, nous referons aux [1-3], où des exemples spécifiques ont été décrits en détail.

la figure 6.2 montre un autre moyen pour créer une sorte d'actionneur piézoélectrique intelligent. Cette gamme de composant hybride découle de l'assemblage de l'actionneur et du capteur/détecteur dans un dispositif hybride en monobloc, comme expliqué ci-dessus. L'ensemble de l'actionneur est constitué du fil de matériau céramique piézo-électrique à "titano-zirconates de plomb" (PZT). Notant que c'est l'un des matériaux les plus rentable lorsque l'on considère la densité d'énergie et les facteurs de conversion, basés sur des céramiques ferroélectriques qui possèdent une structure de pérovskite [1].

Avec la considération d'une construction adéquate de l'électrode, la partie essentielle du l'organe en céramique travaille comme un actionneur tandis qu'une petite partie est adoptée pour la détection. Cela peut mener à un actionneur performant, par ex. linéarité, si le signal du capteur est renvoyé. Il est important de noter que l'utilisation d'une électronique appropriée, rend possible la mesure de la force de sortie et la déformation du piézo-actionneur. Sur ce, l'adjectif «intelligents» peut être donnée à tous systèmes hybrides qui fonctionnent de cette manière [1].

6.3. Applications en robotique

Pratiquement, les robots sont des appareils intelligents qui doivent préférablement dotés des composants intelligents. Par exemple, les mérites majeures des piezo-actionneurs, à savoir, la haute dynamique, la haute résolution (à l'échelle nanométrique), la faible consommation d'énergie, l'effort élevée, la construction compacte et le pouvoir d'agir en tant qu'un actionneur intelligent, les font très appropriés pour l'actionnement des tenailles et des articulations de bras de robot [1]. En utilisant une électronique appropriée, la position du bras du robot ou de la tenaille, ainsi que la force de transport et de saisie, pourraient être déterminées et surveillées délicatement sans la considération des capteurs supplémentaires. En plus, les articulations du bras et la pince pourraient être minimisées et le coût réduit. Ci-après, nous allons voir comment les piézo-actionneurs intelligents peuvent être employés avec succès en robotique [1].

6.4. Bras de robot avec articulations et poignet

Le comportement dynamique d'un bras en robotique, qui est constitué de liens et d'articulations, se distingue du mouvement de nos bras. Les articulations en robotiques peuvent se mouvoir selon des angles plus grands, mais avec des degrés de liberté réduits. En effet, le coude d'un robot peut se plier vers le haut ou vers le bas, tandis que nos coudes ne peuvent se plier que dans une seule direction par rapport à la position du bras droit. La large plage de mouvement accessible pour les articulations des bras de robots leur confère une plus grande flexibilité que les bras humains, mais cette flexibilité accrue augmente le degré de complexité des systèmes employés pour l'actionnement des articulations y compris les systèmes intelligents de commande [1].

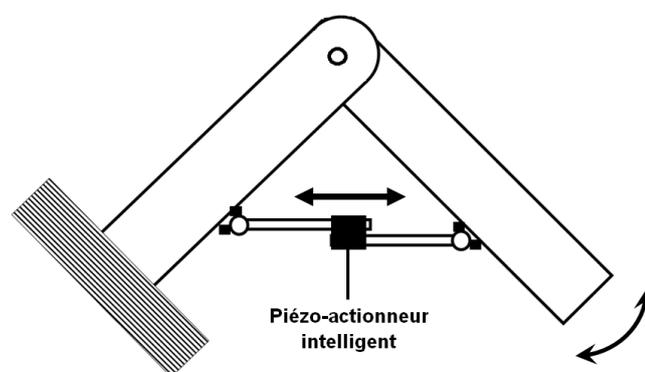


FIGURE 6.3 Actionnement d'une articulation de bras avec un piézo-actionneur linéaire [1].

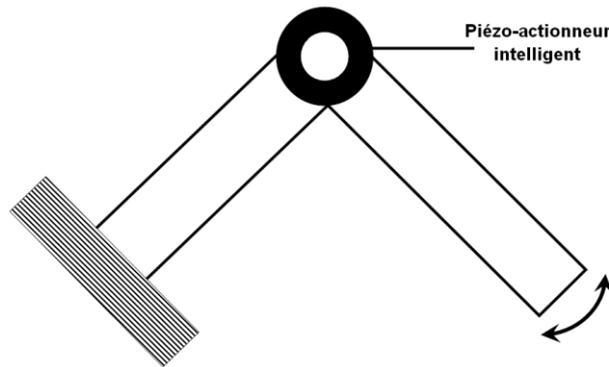


FIGURE 6.4 Moteur rotatif à ultrason smart [1].

En effet, malgré les mérites que possèdent les piézo-actionneurs intelligents, il existe un démerite majeur qui rend leur utilisation pour l'actionnement direct d'une articulation de bras de robot impossible - une très petite déformation ou extension du piézo-actionneur. Normalement, les piézo-actionneurs peuvent atteindre une extension d'environ 0,1 à 0,15% de leur longueur. Une telle petite extension d'environ 40 à 60 μm pourrait être utilisée efficacement pour l'actionnement direct dans les micro-robots, tandis que dans les plus grands robots, d'autres solutions devraient être trouvées pour élargir l'extension des piézo-actionneurs intelligents [1].

6.4.1 Moteur intelligent piézoélectrique linéaire

Généralement, toutes les articulations d'un bras de robot, d'un poignet et d'une pince sont des articulations rotatives. Sur la figure 6.3, on peut voir comment un moteur piézoélectrique linéaire utilise des piézo-actionneurs intelligents pour l'actionnement des articulations de bras de robot. Ce principe est très connu et déjà utilisé dans la pratique [1].

6.4.2 Moteur intelligent piézoélectrique rotatif

Le principe de base décrivant comment un moteur piézoélectrique rotatif pourrait être utilisé pour l'actionnement des articulations du bras du robot est illustré à la figure 6.4. Le moteur piézoélectrique rotatif, généralement appelé moteur à ultrasons, peut être monté normalement dans l'articulation (i.e. directement), et rend l'actionnement de l'articulation du bras très simple et pratique [1].

6.5. Avantages des actionneurs intelligents

- L'actionneur, le capteur/détecteur, et le contrôleur sont entièrement intégrés, pour un système d'actionnement léger, compact et optimisé.
- Efficacité avec un rapport puissance/poids élevé (i.e. puissance importante et poids réduit) pour un fonctionnement plus long sur une application d'actionnement mobile alimentée par batterie (e.g. la robotique).
- Une dynamique élevée et une commande de force précise offrant un bon contrôle global du système.
- Fiabilité améliorée même sous des conditions extrêmes (e.g. application spatiale).

Références

- [1] N. Heraković *et al.*, “Smart Actuators in Robotics,” IFAC Proceedings Volumes, vol. 31, no. 7, pp. 177–182, May 1998.
- [2] R. Isermann *et al.*, “Intelligent actuators ways to autonomous actuating systems,” Motion Control for Intelligent Automation, pp. 65–76, 1992.
- [3] H. W. Overkott *et al.*, “„Intelligenter“ Aktor für universelle Fahrzeuganwendungen,” ATZ - Automobiltech Z, vol. 108, no. 7–8, pp. 586–590, Jul. 2006.

Références

Chapitre 1: Les actionneurs électriques

➤ Les pré-actionneurs électriques

- [1] C. Christopoulos et A. Wright " Electrical Power System Protection 2nd Edition", Springer, 1999.
- [2] <http://www.technologiepro.com/cours-genie-electrique/cours-27-capteurs-actionneurs-instrumentation>
→<https://www.technologiepro.com/cours-capteurs-actionneurs-instrumentation-industrielle/ch31-les-preactionneurs-electriques.html>
(par B. J. Riadh et M. Lotfi).
- [3] Datasheet, MOC3041. (<https://www.digchip.com/datasheets/parts/datasheet/161/MOC3041-pdf.php>)
- [4] http://jean.david.delord.free.fr/Dossier_ressource/maintenance/s5/schema_elec/technologie_composant_demarr_mot.pdf
(par J. D. Delord).
- [5] Stage de sécurité électrique 2001- Aix Marseille. Equipe des formateurs de Physique appliquée.
→https://www.pedagogie.ac-aix-marseille.fr/jcms/c_79543/fr/stage-de-securite-electrique-2001-aix-marseille
- [6] Canevas, Harmonisation - Offre de Formation - Master Académique, Domaine: Sciences et Technologies, Filière: Electronique, Spécialité: Instrumentation, 2016 - 2017.

➤ Convertisseur électromécanique

- [1] L. Lasne , "exercices et problèmes d'électrotechnique, Notions de base et machines électriques", Dunod, 2005.
- [2] <http://www.technologiepro.com/cours-genie-electrique/cours-27-capteurs-actionneurs-instrumentation>
→<https://www.technologiepro.com/cours-capteurs-actionneurs-instrumentation-industrielle/ch32-convertisseur-electromecanique.html>
(par B. J. Riadh et M. Lotfi).
- [3] C. Antonin, K. Pierre, D. Rodrigue, C. Louis, rapport du projet, PDF, Le moteur à courant continu, INSA, 2017.

➤ Les moteur pas à pas (Stepper motors)

- [1] P. Mayé, Moteurs électriques pour la robotique, 3^{ème} édition, Dunod, Fev. 2016.
- [2] <http://www.technologiepro.com/cours-genie-electrique/cours-27-capteurs-actionneurs-instrumentation>
→<https://www.technologiepro.com/cours-capteurs-actionneurs-instrumentation-industrielle/ch33-les-moteurs-pas-a-pas.html>
(par B. J. Riadh et M. Lotfi).

Chapitre 2: Les actionneurs pneumatiques et hydrauliques

- [1] <http://sitelyceejdarc.org/autodoc/cours/010%201S/Sciences%20de%201%20ingenieur/Ressources/001%20Chaine%20energie%20.pdf>
- [2] <https://energieplus-lesite.be/techniques/froid-alimentaire7/compresseurs-frigorifiques-d1/>
- [3] http://lycees.ac-rouen.fr/maupassant/Melec/co/Techno/Pneumatique/res/Constituants_pneumatiques.pdf
- [4] <http://www.technologiepro.com/cours-genie-electrique/cours-27-capteurs-actionneurs-instrumentation/>
→(par B. J. Riadh et M. Lotfi, partie 2: Actionneurs pneumatiques et hydrauliques.)
- [5] J. Faisandier, Mécanismes hydrauliques et pneumatiques, Dunod, 1999.
- [6] R. Labonville, Conception des circuits hydrauliques, une approche énergétique, Editions de l'Ecole Poly technique de Montréal, 1991.

Chapitre 3: Actionneurs électrostatiques

- [1] B. E. Schubert, "Design, Fabrication and Testing of Angled Fiber Suspension for Electrostatic Actuators", *UC Berkeley Electronic Theses and Dissertations*, May 2012.
- [2] R. W. Johnstone *et al.*, "Electrostatic actuators", Book Chapter In: *An introduction to surface-micromachining*, pp. 135-152, Springer, Boston, MA, 2004.
- [3] S. M. Bobbio *et al.*, Integrated force arrays. Micro Electro Mechanical Systems, pages 149–154, 1993.

Chapitre 4: Actionneurs ultrasonores ('ultrasonic motors')

- [1] K. Nakamura, "Ultrasonic motors", chapter 20, book: Ultrasonic transducers, pp. 677-704, 2012.
- [2] K. Uchino, "Piezoelectric ultrasonic motors: review", *smart mater. struct.* 7 (1998), pp. 273-285.
- [3] C. Zhao, "Ultrasonic Motors, Technologies and Applications", Book, Springer, 2011.
- [4] K. Nakamura, "Ultrasonic motors", chapter 17, Book: Power ultrasonics, pp. 511-541, 2015.

Chapitre 5: Actionneurs Stick and slip': l'effet collé-glissé

- [1]https://infoscience.epfl.ch/record/32233/files/EPFL_TH1756.pdf<http://www.technologiepro.com/cours-genie-electrique/cours-27-capteurs-actionneurs-instrumentation/>
- [1] J.-M. Breguet, thèse "Actionneurs "stick and slip" pour micro-manipulateurs", Lausanne, EPFL 1998
- [2] J.-M. Breguet and R. Clavel, "Stick and slip actuators: design, control, performances and applications," MHA'98. Proceedings of the 1998 International Symposium on Micromechatronics and Human Science. - Creation of New Industry - (Cat. No.98TH8388).
- [3] Harmonisation offre de formation master académique, Canevas, M2, Sciences et Technologies, Electronique, Instrumentation, Dz, 2016 - 2017.

Chapitre 6: Actionneurs Intelligents

- [1] N. Heraković *et al.*, "Smart Actuators in Robotics," IFAC Proceedings Volumes, vol. 31, no. 7, pp. 177–182, May 1998.
- [2] R. Isermann *et al.*, "Intelligent actuators ways to autonomous actuating systems," Motion Control for Intelligent Automation, pp. 65–76, 1992.
- [3] H. W. Overkott *et al.*, "„Intelligenter“ Aktor für universelle Fahrzeuganwendungen," ATZ - Automobiltech Z, vol. 108, no. 7–8, pp. 586–590, Jul. 2006.

P.S.: Pour les chapitres 3, 4, 5, et 6, il a été noté qu'il y a très peu de documents en français liés aux sujets de ces chapitres. Par conséquent, nous nous sommes appuyés sur des sources en anglais tout en donnant un intérêt particulier à la terminologie pertinente pendant la traduction à la langue de travail à l'aide des traducteurs en ligne. Sur ce, il est recommandé de consulter la documentation en anglais pour plus de détails concernant les chapitres précités.

ANNEXE

-Canevas-

Semestre : 3
Unité d'enseignement : UEF 2.1.1
Matière 2 : Actionneurs industriels
VHS : 45h00 (Cours : 1h30, TD : 1h30)
Crédits : 4
Coefficient : 2

Objectifs de l'enseignement :

Donner aux étudiants les notions nécessaires sur les actionneurs les plus répandus dans l'instrumentation industrielle.

Connaissances préalables recommandées :

Notions d'électronique de puissance, d'électrotechnique.

Contenu de la matière :

Chapitre 1 : Les actionneurs électriques

1.1 Les pré-actionneurs électriques : Le relais, Le contacteur, Le sectionneur, Les fusibles, Le relais thermique.

1.2 Les convertisseurs électromécaniques : Organisation de la machine, Principe de fonctionnement, Démarrage du moteur à courant continu, Bilan des puissances, Réversibilité de la machine à courant continu, Alimentation du moteur, Fonctionnement à vitesse variable

1.3 les moteurs pas à pas : Moteur à aimant permanent, Moteur à reluctance variable, Moteur hybride

Chapitre 2 : Les actionneurs pneumatiques et hydrauliques

2.1 L'énergie pneumatique : Constitution d'une installation pneumatique, Production de l'énergie pneumatique, Principes physiques.

2.2 Les pré-actionneurs pneumatiques : Fonction, Constituants d'un distributeur, Les principaux distributeurs pneumatiques, Les dispositifs de commande, Application : presse pneumatique.

2.3 Les actionneurs pneumatiques : Les vérins, Le générateur de vide ou venturi.

2.4 Les actionneurs hydrauliques : Définition, Principaux types de vérins, Dimensionnement des vérins, Applications.

Chapitre 3 : Actionneurs électrostatiques

Chapitre 4 : Actionneurs à déformation de matériaux

Chapitre 5 : Actionneurs ultrasonores ('ultrasonicmotors')

Chapitre 6 : Actionneurs Inertiels ('impact drives')

Chapitre 7 : Actionneurs Stick and slip' : l'effet collé-glissé

Chapitre 8 : Actionneurs intelligents

Mode d'évaluation:

Contrôle continu: 40% ; Examen: 60%.

Références bibliographiques:

1. Guy Clerc, Guy Grellet, *Actionneurs électriques, Modèles, Commande*, Eyrolles, 1999.
2. Gérard Lacroux, *Les actionneurs électriques pour la robotique et les asservissements*, 1994.
3. Yves Granjon, *Automatique : Systèmes linéaires, non linéaires, temps continu, temps discret, représentation d'état*, Dunod, 2010.
4. J. Faisandier, *Mécanismes hydrauliques et pneumatiques*, Dunod, 1999.
5. R. Labonville, *Conception des circuits hydrauliques, une approche énergétique*, Editions de l'Ecole Poly technique de Montréal, 1991.
6. P. Maye, *Moteurs électriques pour la robotique*, Dunod, 2000.
7. Michel Grout, Patrick Salaun, *Instrumentation industrielle*, 3^e édition, Dunod, 2012.

8. Michel Pinard, *Commande des moteurs électriques*, Dunod collection l'usine nouvelle 2004
9. M. Portelli, *La technologie d'hydraulique industrielle, cours et exercices résolus*, Educavivres, Casteila, 2005.

https://infoscience.epfl.ch/record/32233/files/EPFL_TH1756.pdf

<http://www.technologuepro.com/cours-genie-electrique/cours-27-capteurs-actionneurs-instrumentation/>

Cette page a été laissée intentionnellement blanche