

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix - Travail – Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN
SCIENCES TECHNOLOGIE
GEOSCIENCES

UNITE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN
PHYSIQUE ET APPLICATIONS

FACULTE DES SCIENCES

B.P.812 Yaoundé

Email :crfdstg@uvi.uninet.cm



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace - Work– Fatherland

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

POSTGRADUATE SCHOOL OF
SCIENCE AND TECHNOLOGY AND
GEOSCIENCES

RESEARCH AND POSTGRADUATE
TRAINING UNIT FOR PHYSICS AND
APPLICATIONS

FACULTY OF SCIENCES

P.O.812 Yaoundé

Email :crfdstg@uyi.uninet.cm

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

DEPARTMENT OF PHYSICS

Spécialité : MECHANIQUE, MATERIAUX ET STRUCTURES

Option : MECHANIQUE FONDAMENTALE ET SYSTEMES COMPLEXES

**FABRICATION ET ETUDE D'UN DISPOSITIF ELECTROMECHANIQUE A
TAPIS ROULANT MAGNETISE POUR LA RECUPERATION DE
L'ENERGIE ET LES ACTIVITES DE TRANSPORT**

Mémoire rédigé et présente en vue de l'obtention du :

Diplôme de Master en Physique

Par :

KENOU FOWA Sonia Angela

Matricule : 17F2706

Licenciée en Physique

Sous la direction de :

Dr. Tsapla Fotso Rolande

Charge de Cours, Université de Buea

Sous la direction de :

Pr. WOAFU PAUL

Professeur, Université de Yaoundé I

Année académique : 2023/2024



TABLE DES MATIERES

DEDICACE	iv
REMERCIEMENTS	iv
LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS	vi
RESUME	vii
ABSTRACT	viii
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES TABLEAUX	x
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : REVUE DE LITTERATURE	4
I.1 Introduction	4
I.2 Généralités sur les machines à courant continu.....	4
I.3 Généralités sur le système poulie-courroie.....	8
Quelques limites des systèmes de transmission poulie-courroie sont :.....	9
I.4 Généralités sur les tapis roulants	9
Inconvénients potentiels :	10
- Entretien : Les tapis roulants nécessitent un entretien régulier pour assurer un fonctionnement optimal.	10
- Coûts initiaux : L'installation d'un système de tapis roulant peut nécessiter des investissements initiaux importants.	10
- Sécurité : Les tapis roulants destinés au transport de personnes doivent respecter des normes de sécurité strictes pour éviter les accidents. Des dispositifs de sécurité tels que des capteurs d'arrêt d'urgence et des barrières de protection sont souvent intégrés.....	10
Applications spécifiques : Les tapis roulants peuvent être spécialisés pour des applications particulières, comme les tapis roulants inclinés pour les salles de sport	

ou les tapis roulants à grande vitesse dans les centres de tri de bagages et peuvent également être utilisé pour la récupération d'énergie.	11
I.5 Conclusion	11
CHAPITRE II : FABRICATION ET ETUDE EXPERIMENTALE D'UN TAPIS ROULANT POUR LES ACTIVITES DE TRANSPORT.....	12
II.1. Introduction	12
II.2. Conception des tapis roulants.....	12
II.2.1. Modèle physique	12
II.2.2. Principe de fonctionnement des tapis roulants	12
II.2.3. Réalisation d'un tapis roulant.....	13
II.3 Modélisation du tapis roulant.....	14
II.3.1. Partie électrique du tapis roulant	14
II.3.2. Partie mécanique du tapis roulant.....	15
II.4 Résultats expérimentaux et discussion.....	19
II.5. Conclusion.....	20
CHAPITRE III : RECUPERATION DE L'ENERGIE A PARTIR DU TAPIS ROULANT	21
III.1 Introduction.....	21
III.2 Réalisation et modélisation	21
III.2.1 Réalisation.....	21
III.2.2 Modélisation.....	22
Dans ce cas, nous modéliserons la force électromotrice induite dans le système, par la variation du flux à l'intérieur de la surface où règne le champ magnétique. Cette force électromotrice induite " <i>e</i> " sera définie d'après la loi de Lenz par :	22
$e_{(t)} = - \frac{d\Phi}{dt}$	(3.1) 22
III.3 Résultats et discussions.....	23
III.4 Conclusion	23

CONCLUSION GENERALE	24
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	25

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail qui marque la fin de mes études pour l'obtention de mon diplôme de Master à mes très chers parents, papa **FOWA BODELLEUR** et maman **TSAPI KENOU SEDOINE**, qui implorent DIEU au quotidien dans le travail et la patience pour ma réussite. Merci pour votre soutien et vos encouragements.

REMERCIEMENTS

Toute ma sincère gratitude va à l'endroit :

- De Dieu le père tout puissant qui ne cessera de faire grâce.
- De mon superviseur de mémoire **Professeur WOAFO Paul** qui m'a accueilli dans son laboratoire, a fait le suivi régulier de ce modeste travail, m'a prodigué de précieuses remarques qui ont contribué à enrichir et recarder ce travail. Merci beaucoup Professeur Pour vos conseils, votre rigueur scientifique et vos qualités humaines.
- De ma directrice de mémoire **Docteur TSAPLA FOTSA Rolande**, chargée de cours à l'Université de Buea qui a non seulement rigoureusement accompagné ce travail et a su démystifier les concepts flous, mais aussi a mis à contribution son savoir et son expérience. Merci madame pour votre disponibilité, votre dynamisme, vos multiples conseils pratiques et vos encouragements.
- Des honorables **membres du jury** qui auront la tâche d'apprécier ce travail.
- De **Professeur NDJAKA Jean Marie**, Chef de Département de Physique de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, pour ses multiples enseignements et conseils qui nous ont guidés tout au long de notre parcours.
- Du corps enseignant du Département de Physique et en particulier : aux **professeurs WOAFO Paul, TCHAWOUA Clément, NANA NBENDJO Blaise**.
- De tous mes aînés académiques du LaMSEBP : au **Docteur MBOU SOH** aux doctorants **TEMGOUA PAVEL, MBOYO René, MONKAM Ybriss, KOUNCHIE Prosper, KOUAM TAGNE, DONGMO Lowis, Mme NGATSA Nelly** et à **TEMGOUA LOIC, TCHOMWO Marlyse, MADAH Charlène, FOFU Merveille, KAMSEU Dior, KENTSA Kevin** pour leur solidarité qui ont contribué à rendre cette initiation à la recherche captivante. Merci.
- De tous mes promotionnaires pour le plus que chacun d'entre eux m'a apporté d'une manière ou d'une autre tant sur le plan social que sur le plan scientifique. Je pense à : **MOTAPON Moustapha, KITIO Gérold, KOUOH Martial, ASSENG Falone, MEFFOVOUNG Ornella**.
- De mes parents **M. et Mme FOWA**, pour leur soutien.
- De mes grands-parents **M. et Mme KENOU**, pour les efforts consentis.
- De mon oncle tonton **Adonis** et ma tante **Gaël**, pour leur soutien.

- De toute la famille **TEMGOUA**. Merci beaucoup à chaque membre de cette famille pour le soutien.
- De mes **frères et sœurs, mes cousins et cousines, mon neveu** pour le soutien. De mes amis **TEMFACK Oreste, TONLEU Raim, SIME Cyprien et DJOUDJA Cerena** pour le soutien.

Que ceux dont les noms n'ont pas été cités ici trouvent tout de même en ces mots la reconnaissance que je témoigne à leur égard.

LISTE DES SIGLES ET ABBREVIATIONS

C_r : couple de frottement dynamique dans le système

f : Couple de frottement statique au niveau du moteur

J_m : Moment d'inertie du moteur

J_p : Moment d'inertie de la poulie

J_b : Moment d'inertie des barres

L_{barre} : longueur d'une barre

L_{tap} : longueur du tapis

l_{aimant} : largeur des aimants

L_{bobine} : longueur de la bobine

$M_{\Delta_1}(\vec{T}_1), M_{\Delta_1}(\vec{T}_1')$: Moment des tensions \vec{T}_1, \vec{T}_1' par rapport à l'axe de la poulie du moteur

$M_{\Delta_2}(\vec{T}_2), M_{\Delta_2}(\vec{T}_2')$: Moment des tensions \vec{T}_2, \vec{T}_2' par rapport à l'axe fixe de la poulie

$M_{\Delta_2}(\vec{T}_3), M_{\Delta_2}(\vec{T}_3')$: Moment des tensions \vec{T}_3, \vec{T}_3' par rapport à l'axe fixe de la poulie

$M_{\Delta_3}(\vec{T}_4), M_{\Delta_3}(\vec{T}_4')$: Moment des tensions \vec{T}_4, \vec{T}_4' par rapport à l'axe des barres

r_m : Rayon de la poulie au niveau du moteur =0,25 cm

r_p : Rayon de la poulie =0,7 cm

"V" : la vitesse de translation de l'aimant fixé sur le tapis roulant

"t" : le temps mis par l'aimant pour parcourir la bobine

\vec{T}_1, \vec{T}_2 : tensions au niveau du brin tendu de la courroie

\vec{T}_1', \vec{T}_2' : tensions au niveau du brin mou de la courroie

\vec{T}_3, \vec{T}_4 : tensions au niveau du brin tendu du tapis

\vec{T}_3', \vec{T}_4' : tensions au niveau du brin mou du tapis

θ_m : Position angulaire du moteur

θ_p : Position angulaire de la poulie

$\dot{\theta}_{tap}$: vitesse de rotation du tapis

η : rapport de transmission entre le moteur et la poulie

\emptyset : flux magnétique

RESUME

Dans ce travail, nous avons réalisé, étudié expérimentalement et analytiquement un modèle de tapis roulant électromécanique. Ce dispositif électromécanique peut servir d'une part aux activités de transport et d'autre part à la récupération de l'énergie électrique.

- Dans le cas des activités de transport, durant l'étude expérimentale nous avons mesuré la vitesse de rotation du tapis en fonction de la tension d'alimentation et comme résultat nous avons observé que la vitesse de rotation croît avec la tension d'alimentation.
- Dans le cas de la récupération de l'énergie, l'étude expérimentale nous a permis d'obtenir une tension maximale de 0,1V lorsque la vitesse de rotation du moteur est de 9940trs/min. Cette étude a été faite en utilisant quatre aimants plats dont chacun a 15cm de long et 5cm de large et une bobine plate faite de trois couches de cuivre ayant chacune 130 spires.

ABSTRACT

In this work, we designed, built, experimentally studied and modeled an electromechanical treadmill. This electromechanical device can be used on one hand for transportation activities and on the other hand for energy recovery.

- In the case of transportation activities, the experimental study showed that the rotation speed of the motor at no load and under load is measured as a function of the supply voltage. This speed is an increasing function of the voltage, albeit less pronounced when the motor is under load.
- In the case of energy recovery, the experimental study allowed us to obtain: a maximum voltage of 0.1V when the motor rotation speed is 9940 rounds/min using four flat magnets each 15cm long and 5cm wide and a plate coil made of three layers of copper or 130 arrows per layer.

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Schéma d'une Machine à courant continu.....	4
Figure 2: Schéma électrique équivalent du moteur à courant continu	5
Figure 3: Moteurs à courant continu: Moteur à excitation indépendante (a), Moteur à aimants permanents (b), Moteur shunt (excitation en dérivation) (c), Moteur à excitation en série (d), Moteur a excitation composée (e)	7
Figure 4: Inversibilité des machines à courant continue	7
Figure 5: Système de transmission par courroie	8
Figure 6: Modèles physiques des tapis roulants.....	12
Figure 7: Matériels utilisés pour la réalisation du dispositif électromécanique à tapis roulant pour les activités sportives. Alimentation stabilisée (a) ; le moteur DC(b) ; poulie à gorge(c) ; courroie dentée(d) ; roulements(e) ; vessie des pneus de véhicule	13
Figure 8: Dispositif expérimental du tapis roulant pour les activités de transport.....	14
Figure 9: Schéma de la partie électrique	14
Figure 10: Représentation schématique de la partie mécanique du tapis roulant	15
Figure 11: Courbe de la vitesse de rotation du moteur à vide en fonction de la tension d'alimentation $V=f(U)$	19
Figure 12: Courbe de la vitesse de rotation du moteur en charge en fonction de la tension d'alimentation $V=f(U)$	19
Figure 13: Matériels utilisés pour la récupération de l'énergie.....	21
Figure 14: Dispositif expérimental de récupération de l'énergie	22

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I: Paramètres et valeurs utilisés 18

INTRODUCTION GENERALE

Les systèmes électromécaniques sont des transducteurs qui assurent la conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique et vice versa. Plusieurs dispositifs domestiques et industriels tels que les tamis, les mélangeurs ou mixeurs, les centrifugeuses, les élévateurs, les machines à laver, les perceuses utilisent le principe de conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique. Les systèmes de transmission des mouvements assurent le passage d'une forme de mouvement (rotation, translation) en une autre ou en une forme de mouvement identique avec des caractéristiques différentes.

Parmi les systèmes de transmission de mouvement, nous pouvons citer :

- Le système poulie-courroie utilisé dans les ventilateurs, les tapis roulants qui est un mécanisme permettant de transmettre le mouvement et la puissance d'une source à une autre [1].
- Le système bielle-manivelle qui est un mécanisme qui transforme le mouvement circulaire en un mouvement linéaire utilisé dans les presses et les pompes.
- Le système pignon-crémaillère largement utilisé dans les véhicules, les portes, les ascenseurs. Lorsque le pignon tourne, la crémaillère se déplace linéairement dans une direction.
- Les engrenages, les roues et vis sans fin, les roues dentées et les chaînes, ceux-ci transfèrent le mouvement d'un arbre à un autre en utilisant soit les dents qui s'emboîtent, soit un filet de vis qui entre en contact avec une roue dentée. Ils sont utilisés dans les tracteurs, les motos et les machines industrielles.

Dans ce mémoire, nous utilisons le système poulie-courroie dans la conception et la fabrication d'un tapis roulant. Notons que les courroies sont utilisées aux XVII^e et XVIII^e siècles pour les tours, les meules d'atelier et les romains, les grecs utilisaient ces systèmes pour actionner les engins de guerre et les machines de théâtre [2].

De nos jours, le système poulie-courroie prend une place très importante dans presque tous les domaines de la vie quotidienne : l'industrie (imprimantes, fraiseuses, scies mécaniques, tapis de course) ; le bâtiment (les pelleteuses, les grues) ; l'agriculture

(tracteurs, moissonneuses-batteuses) ; la climatisation (réfrigérateurs, congélateurs) ; les transports (convoyeurs, trains, avions, bateaux, tapis roulants). A cause de son intérêt passé et actuel, le système poulie-courroie continue de faire l'objet de nombreuses études. Ces études récentes visent à mieux comprendre son fonctionnement dans les contextes variés d'utilisation en passant par l'étude expérimentale, la modélisation mathématique et les simulations numériques.

Depuis quelques années, des études sont engagées en vue de comprendre le comportement dynamique des systèmes électromécaniques utilisant des moteurs à courant continu et des systèmes poulie-courroie avec association des composants non linéaires, parmi celle-ci nous pouvons citer entre autres :

- X. Zhang, Z. Gao, "Dynamic Modeling and Simulation of a DC Motor-Driven Belt System." IEEE Transactions on Control Systems Technology, vol. 22, no. 4, 2014
- Y. Zhu, Y. Q. Chen, J. Lu, "Nonlinear Dynamics and Chaos in a DC Motor-Drive System with Belt Transmission» Nonlinear Dynamics, vol. 82, no. 1-2, 2015.
- A. A. Nassiraei, A. A. Shoulaie, "Nonlinear Control of a DC Motor-Driven Pulley-Belt System» 2016 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)
- A. Hosseinzadeh, M. J. Yazdanpanah, A. Khayati, M. R. Gholami, "Dynamic Modeling and Simulation of DC Motor-Driven Systems with Belt Transmission"» 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS)
- C. E. BEKKOUCHE & A. K. TOUGGOURTI, "Étude et simulation d'un variateur de vitesse commande un moteur à courant continu, " Mémoire de master académique, Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté des Sciences Appliquées, 2016.

Ces études visent à élargir le champ d'application de ces systèmes, mais aussi à optimiser les applications déjà existantes. Cependant le nombre de travaux expérimentaux reste très limité. Il apparait donc important de se pencher sur ce volet expérimental. Mais avant d'associer les composants non-linéaires il faut déjà mener les études expérimentales sur les modèles de base.

L'objectif de ce mémoire de Master est de fabriquer puis étudier un dispositif électromécanique à tapis roulant magnétisé qui servira d'une part pour les activités de transport et d'autre part à produire l'énergie électrique. Le mémoire est organisé en trois chapitres.

Au chapitre 1, nous présenterons des informations sur le moteur à courant continu, le système poulie-courroie et les tapis roulants. Au chapitre 2, nous présenterons le dispositif expérimental à tapis roulant pour les activités de transport puis nous le modéliserons et ferons une étude expérimentale de la mesure de sa vitesse en fonction de la tension. Au chapitre 3, nous nous attèlerons sur l'utilisation du dispositif à tapis roulant pour la récupération de l'énergie. Une conclusion générale et des perspectives marqueront la fin de ce travail.

CHAPITRE I : REVUE DE LITTERATURE

I.1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, nous présenterons les généralités sur les machines à courant continu, les généralités sur les systèmes de transmission poulie-courroie et les généralités sur les tapis roulants puis nous allons terminer par une conclusion.

I.2 GENERALITES SUR LES MACHINES A COURANT CONTINU

Les machines à courant continu sont des convertisseurs électromécaniques qui reposent sur le principe de l'induction électromagnétique, découvert par Michael Faraday. Un courant électrique circulant dans une bobine (rotor ou armature) génère un champ magnétique. L'interaction entre ce champ magnétique et un autre champ magnétique fixe (stator) induit un couple mécanique, ce qui entraîne le mouvement de la machine. Le schéma d'une machine à courant continu est présenté à la figure 1.

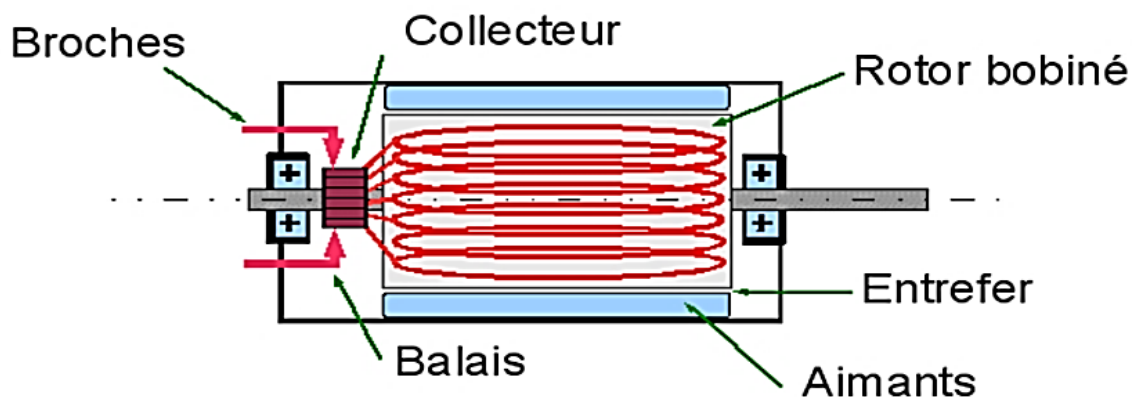


Figure 1: Schéma d'une Machine à courant continu

Le rotor, (partie tournante), est constitué d'un noyau métallique avec un bobinage de cuivre, le stator comporte des aimants permanents qui engendrent un champ magnétique dont le flux traverse le rotor. L'espace étroit entre le rotor et le stator est nommé entrefer. Le rotor est l'induit et le stator l'inducteur, dans d'autres moteurs, l'inducteur peut également être bobiné. Un collecteur avec des balais (charbons) permet de transmettre l'énergie électrique au rotor. Le rotor est donc constitué de fils électriques parcourus par un courant qui forment des spires, ces mêmes fils sont dans le flux magnétique des aimants. Ces conducteurs sont donc soumis à des forces de Laplace, un couple moteur est donc créé. Pour entretenir la rotation du moteur, le collecteur inverse le sens du courant dans les spires à chaque demi-tour.

La machine à courant continu se comporte comme une résistance interne en série avec un générateur de tension (f.é.m. : force électromotrice). Le Schéma équivalent d'une machine à courant continu est présenté à la figure 2.

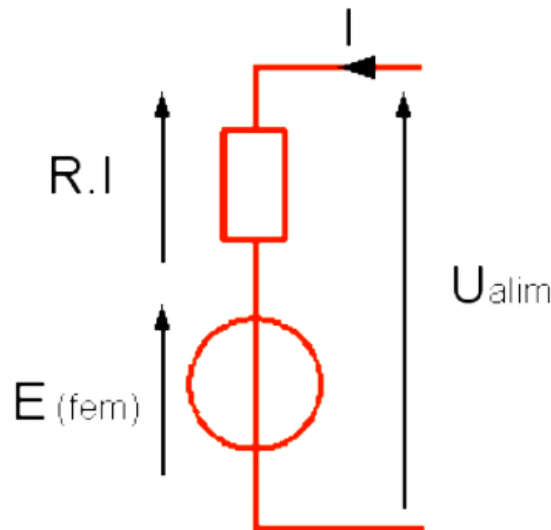


Figure 2: Schéma électrique équivalent du moteur à courant continu

Sur cette figure, **I** représente le courant consommé par le moteur, **U** la Tension d'alimentation, **E** la force électromotrice, **R** la résistance interne du bobinage. Il existe aussi une inductance **L** dans le circuit que nous avons négligé ici car le courant est en régime continu. En appliquant la loi des mailles au circuit de la figure 2, on obtient l'équation électrique caractéristique suivante :

$$U = E + R.I \quad (1.1)$$

L'expression de la f.é.m. induite est donnée par la loi de Faraday :

$$E = k\Phi\Omega \quad (1.2)$$

E : fém. induite (tension continue en V),

Φ : flux magnétique crée sous un pôle par l'inducteur,

Ω : vitesse de rotation (en rad/s),

K : constante qui caractérise le moteur considéré.

Pour faire varier la fréquence de rotation, il faut faire varier **E** et donc la tension d'alimentation **U**. Pour inverser le sens de rotation, il faut inverser **E** et donc la tension d'alimentation à ses bornes.

En combinant les équations (1) et (2), on obtient l'expression de la vitesse de rotation :

$$\Omega = \frac{U - R.I}{k\Phi} \quad (1.3)$$

En pratique, L'équation (1.3) devient :

$$\Omega \approx \frac{U}{k\Phi} \quad (1.4)$$

D'après l'équation (1.4), à excitation constante, la vitesse de rotation est proportionnelle à la tension d'alimentation. Par ailleurs, en faisant varier U, on travaille sur une large plage de vitesse de rotation.

Le fonctionnement d'une machine à courant continu est basé sur le principe de la force de Laplace. Le champ créé par l'inducteur agit sur les conducteurs de l'induit. Chacun des (N) conducteurs de longueur (L) et parcouru par un courant (I) est le siège d'une force électromagnétique.

$$F = B.I.L.|\sin \alpha| \quad (1.5)$$

L'intensité de cette force est proportionnelle à l'intensité I du courant induit, à l'intensité B du champ magnétique créé par l'inducteur et à la longueur L du conducteur. Le sens de cette force est donné par la règle des trois doigts de la main droite.

En fonction de la manière dont le stator est connecté au rotor, on distingue plusieurs types de machines à courant continu :

- **Machines à excitation indépendante (a) :** Le champ magnétique est fourni par une source d'alimentation externe.
- **Machines à aimants permanents (b) :** le flux magnétique est généré par les aimants permanents.
- **Machines à excitation parallèle (shunt c) :** Le flux magnétique est généré par un enroulement parallèle au rotor.
- **Machines à excitation série (d) :** Le flux magnétique est généré par le courant circulant dans le rotor lui-même.
- **Machines à excitation composée (e) :** Combinaison d'excitation série et parallèle.

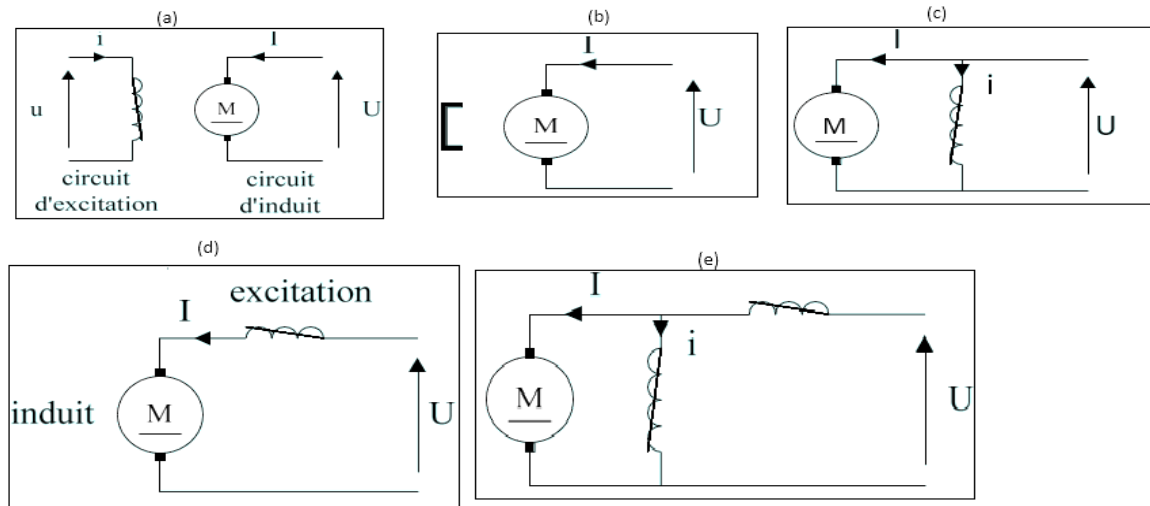


Figure 3: Moteurs à courant continu: Moteur à excitation indépendante (a), Moteur à aimants permanents (b), Moteur shunt (excitation en dérivation) (c), Moteur à excitation en série (d), Moteur à excitation composée (e)

Chacun de ces moteurs à courant continu a ses propres avantages et inconvénients, et ils sont utilisés dans différentes applications en fonction des exigences de vitesse, de couple et de contrôle. Le principal avantage d'un moteur DC est son faible coût et la capacité qu'il offre de régler ou de faire varier sa vitesse, son couple, son sens de rotation. Son problème principal se pose au niveau du collecteur qui impose des ruptures de contact provoquant des arcs, qui usent rapidement le commutateur et génèrent des parasites dans le circuit d'alimentation, ainsi que par rayonnement électromagnétique.

Une machine à courant continu peut convertir l'énergie électrique en énergie mécanique, comme tous les moteurs, mais il peut aussi faire le contraire, il se comporte alors en générateur.

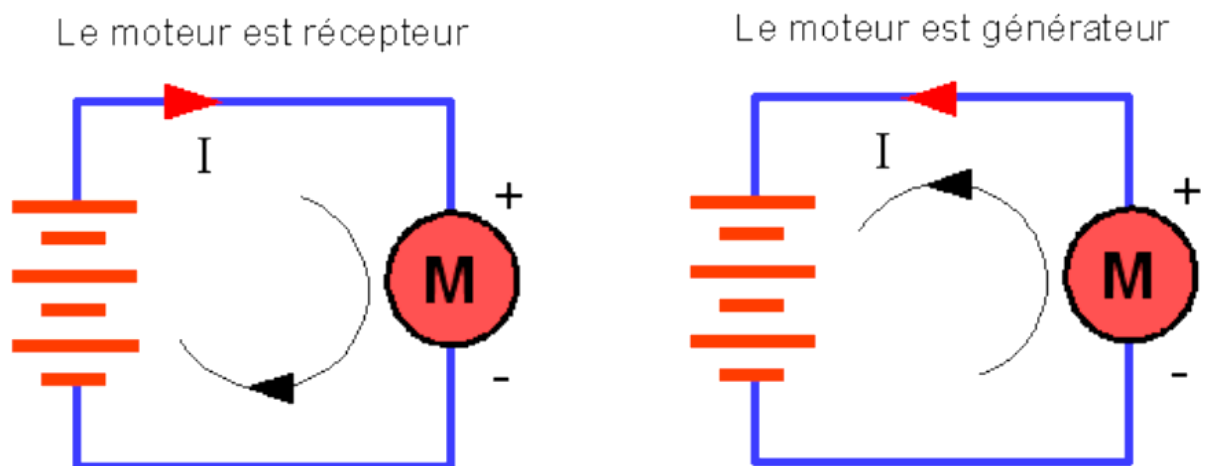


Figure 4: Inversibilité des machines à courant continu

Dans le premier cas, le moteur est alimenté par la batterie ce qui entraîne la mécanique, dans le second cas, c'est la mécanique qui entraîne le moteur et il peut charger la batterie.

Comme avantages, Ces machines ont généralement un bon rendement, ce qui signifie qu'elles convertissent efficacement l'énergie électrique en énergie mécanique.

Comme limite, La maintenance des balais peut être nécessaire, car ils ont tendance à s'user au fil du temps. Les machines à courant continu peuvent générer des arcs au niveau du collecteur, ce qui peut être un problème dans des environnements sensibles.

I.3 GENERALITES SUR LE SYSTEME POULIE-COURROIE

Les systèmes de transmission poulie-courroie sont des mécanismes largement utilisés pour transmettre la puissance entre deux arbres rotatifs, généralement dans des machines et des équipements industriels. Ces systèmes sont basés sur l'utilisation de poulies et de courroies pour transférer le mouvement de rotation d'un arbre à un autre.



Figure 5: Système de transmission par courroie

Les principales composantes sont :

Les poulies : ce sont des roues montées sur les arbres rotatifs. Il existe deux types de poulies : les poulies motrices (reliées à la source d'énergie) et les poulies réceptrices (reliées à la charge ou à la machine à entraîner). Les poulies peuvent avoir différentes dimensions, et leur rapport de diamètre influence la vitesse de rotation et le couple transmis.

Les courroies : Les courroies sont des bandes flexibles en matériau durable, généralement en caoutchouc ou en composite, qui relient les poulies. Elles sont conçues pour transmettre le mouvement de rotation d'une poulie à une autre. Les courroies peuvent être plates ou trapézoïdales, et le choix dépend des besoins spécifiques de la transmission.

On distingue trois grands types de transmission poulie-courroie :

- **Transmission simple** : Comprend une paire de poulie motrice et réceptrice avec une seule courroie. Utilisée dans des applications simples où la vitesse constante n'est pas cruciale.
- **Transmission croisée** : Utilise deux poulies motrices et deux poulies réceptrices. Les courroies croisent entre les poulies pour augmenter la stabilité et la précision de la transmission.
- **Transmission en V** : Courroies trapézoïdales s'adaptant à des poulies en forme de V. Améliore l'adhérence et la transmission de puissance par rapport aux courroies plates.

Les avantages des systèmes de transmission poulie-courroie sont :

- **Souplesse** : Les courroies flexibles permettent de compenser les variations mineures dans l'alignement des poulies.
- **Absorption des chocs** : Les courroies agissent comme des amortisseurs, absorbant les chocs et les vibrations.
- **Facilité d'installation et d'entretien** : Les systèmes poulie-courroie sont généralement simples à installer et nécessitent un entretien minimal.
- **Isolation des vibrations** : Réduit la transmission des vibrations entre les composants mécaniques.

Quelques limites des systèmes de transmission poulie-courroie sont :

Glissement : Les courroies peuvent glisser sous des charges excessives, entraînant une perte d'efficacité.

Limitations de la puissance : Pour des applications nécessitant une transmission de puissance élevée, d'autres systèmes comme les engrenages peuvent être plus appropriés.

I.4 GENERALITES SUR LES TAPIS ROULANTS

Les tapis roulants sont des dispositifs de transport continus utilisés pour déplacer des objets, des personnes ou des charges d'un endroit à un autre. Ils sont largement utilisés dans divers domaines tels que le transport industriel, les aéroports, les centres commerciaux, les installations sportives et les centres de fitness.

Structure de base : Les tapis roulants consistent généralement en une surface en mouvement continu, appelée courroie ou bande transporteuse. La courroie est soutenue par des rouleaux ou des poulies motorisées qui permettent son déplacement.

On distingue trois types de tapis roulants :

- **Tapis roulants industriels :** Utilisés dans le transport de marchandises et de matériaux dans des installations industrielles.
- **Tapis roulants pour bagages :** Fréquemment utilisés dans les aéroports pour le transport des bagages des passagers.
- **Tapis roulants pour personnes :** Présents dans les centres commerciaux, les stations de métro, les aéroports et les salles de sport pour le déplacement des personnes sur de courtes distances.

Fonctionnement : Les tapis roulants peuvent être motorisés, alimentés par un moteur électrique, ou non motorisés, dépendant souvent de la charge transportée. Les systèmes motorisés utilisent des moteurs électriques pour entraîner les rouleaux, assurant ainsi un mouvement continu de la courroie.

Avantages des tapis roulants :

- **Efficacité :** Ils permettent le déplacement rapide et continu des marchandises ou des personnes.
- **Gain de temps :** Facilitent le transport sur de longues distances sans nécessiter d'effort physique important.
- **Automatisation :** Dans le cas des tapis roulants industriels, ils peuvent être intégrés dans des systèmes automatisés de production et de logistique.

Inconvénients potentiels :

- **Entretien :** Les tapis roulants nécessitent un entretien régulier pour assurer un fonctionnement optimal.
- **Coûts initiaux :** L'installation d'un système de tapis roulant peut nécessiter des investissements initiaux importants.
- **Sécurité :** Les tapis roulants destinés au transport de personnes doivent respecter des normes de sécurité strictes pour éviter les accidents. Des dispositifs de sécurité tels que des capteurs d'arrêt d'urgence et des barrières de protection sont souvent intégrés.

Applications spécifiques : Les tapis roulants peuvent être spécialisés pour des applications particulières, comme les tapis roulants inclinés pour les salles de sport ou les tapis roulants à grande vitesse dans les centres de tri de bagages et peuvent également être utilisés pour la récupération d'énergie.

I.5 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté les généralités sur les machines à courant continu, les généralités sur les systèmes de transmission poulie-courroie et les généralités sur les tapis roulants. Dans le chapitre suivant, nous allons étudier le dispositif à tapis roulant pour les activités de transport.

CHAPITRE II : FABRICATION ET ETUDE EXPERIMENTALE D'UN TAPIS ROULANT POUR LES ACTIVITES DE TRANSPORT

II.1. INTRODUCTION

Dans la première section de ce chapitre, nous présentons la conception d'un tapis roulant pour les activités de transport. Les sections 2 et 3 sont consacrées respectivement à la modélisation et aux résultats expérimentaux. La dernière section est réservée à la conclusion.

II.2. CONCEPTION DES TAPIS ROULANTS

II.2.1. Modèle physique



Figure 6: Modèles physiques des tapis roulants

La **figure 6** représente le modèle de tapis roulant pour les activités sportives (a), le modèle physique de tapis roulant pour les activités de transport(b). Ces modèles peuvent être rencontrés dans les entreprises telles que les aéroports, les brasseries, les raffineries.

II.2.2. Principe de fonctionnement des tapis roulants

Les tapis roulants motorisés fonctionnent grâce au système poulie-courroie qui transmet le mouvement de rotation du moteur à courant continu à la surface antidérapante (tapis) permettant ainsi le déplacement de ce dernier.

II.2.3. Réalisation d'un tapis roulant

A l'échelle du laboratoire, le matériel utilisé est le suivant :

- **L'alimentation stabilisée (a) :** Son rôle est de fournir une tension, ou encore une puissance constante aux bornes du moteur DC.
- **Le moteur DC (b) :** dont le mouvement de rotation de son arbre sera transmis via le système poulie-courroie au tapis.
- **Poulie à gorge (c) :** est utilisée pour entrainer la courroie et effectuer le transfert de mouvement.
- **Courroie dentée (d) :** assure la liaison ou la transmission du mouvement de la partie électrique vers la partie mécanique.
- **Les roulements (e) :** fixés de façon symétrique ils servent à faire roter les deux barres de fer qui portent le tapis.
- **Vessie des pneus de véhicules (f) :** Notre tapis roulant est fait à base de ce matériau car il est très proche du matériau dont est fait le tapis roulant des salles de sport.
- **Tachymètre (g) :** sert à mesurer la vitesse de déplacement d'un objet en mouvement.

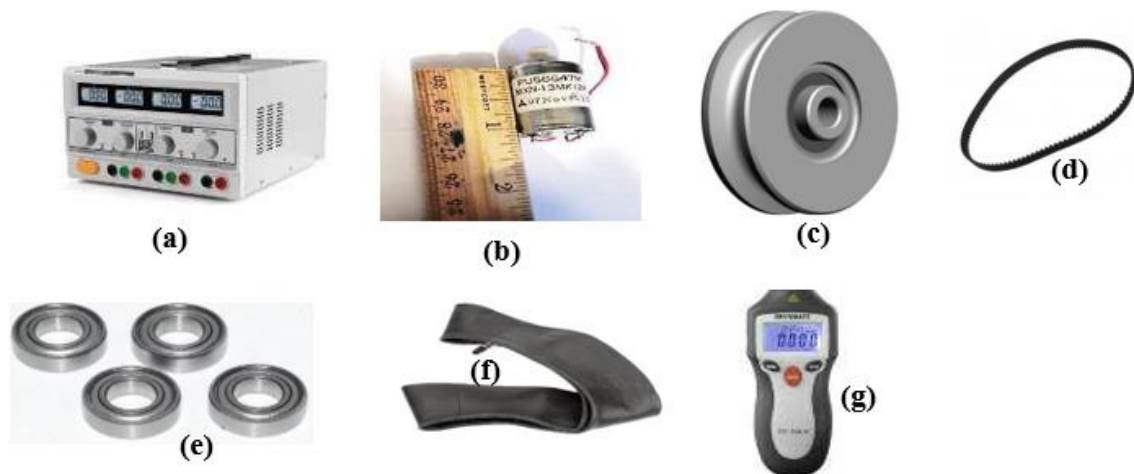


Figure 7: Matériels utilisés pour la réalisation du dispositif électromécanique à tapis roulant pour les activités sportives. Alimentation stabilisée (a) ; le moteur DC(b) ; poulie à gorge(c) ; courroie dentée(d) ; roulements(e) ; vessie des pneus de véhicule

Après avoir assemblé nos éléments, le tapis roulant obtenu est présenté à la **Figure 7**.

Le mouvement de rotation de l'arbre du moteur est transmis à la poulie par courroie et entraine la rotation du tapis.



Figure 8: Dispositif expérimental du tapis roulant pour les activités de transport

II.3 MODELISATION DU TAPIS ROULANT

II.3.1. Partie électrique du tapis roulant

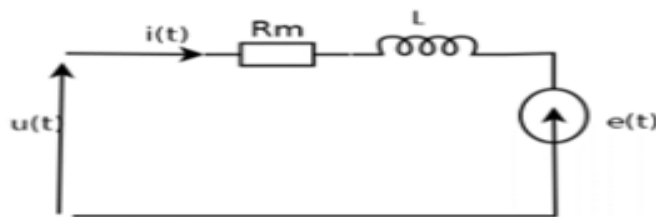


Figure 9: Schéma de la partie électrique

Selon le schéma de la **Figure 9**, un moteur électrique à courant continu est régi par les équations physiques découlant de ses caractéristiques électriques, mécaniques et magnétiques. D'après la loi des mailles dans le circuit de l'induit, nous obtenons :

$$L \frac{di}{dt} + R_m i + K_e \frac{d\theta_1}{dt} = U_0 \quad (2.1)$$

$L \frac{di}{dt}$ = La tension aux bornes de la bobine d'inductance L en Volt (V)

$R_m i$ = La tension aux bornes de la résistance en Volt (V)

$K_e \frac{d\theta_1}{dt}$ = La tension d'induction électromotrice de constante électromagnétique K_e

U_0 = La tension d'alimentation aux bornes du moteur en Volt (V)

$i(t)$ = Intensité du courant qui alimente le moteur en ampère (A)

II.3.2. Partie mécanique du tapis roulant

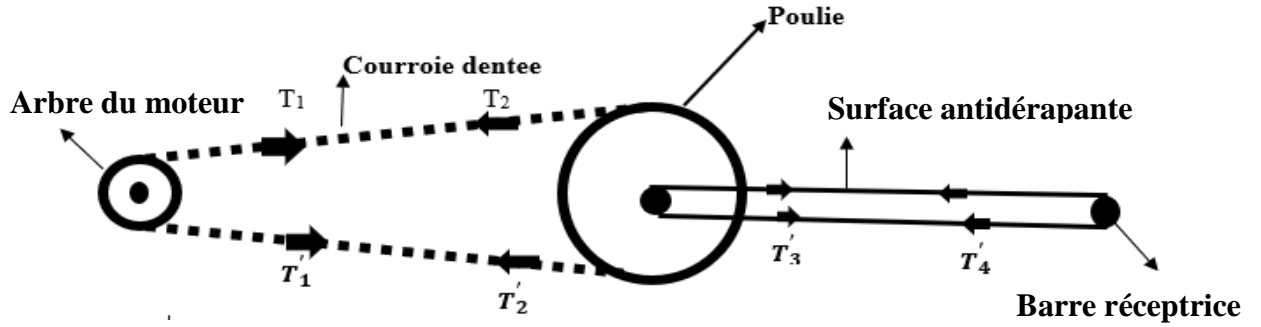


Figure 10: Représentation schématique de la partie mécanique du tapis roulant

Le système présenté à la **figure 10** est constitué de trois sous-systèmes. Lorsque nous appliquons la relation fondamentale de la dynamique en rotation dans chaque sous-système nous obtenons les équations suivantes :

$$\begin{cases} M_{\Delta_1}(\vec{T}_1) - M_{\Delta_1}(\vec{T}_1') = J_m \ddot{\theta}_m \\ M_{\Delta_2}(\vec{T}_2) - M_{\Delta_2}(\vec{T}_2') + M_{\Delta_2}(\vec{T}_3) - M_{\Delta_2}(\vec{T}_3') + M_{(\Delta_2) \text{ frottements}} = J_{\Delta_2} \ddot{\theta}_P \\ M_{\Delta_3}(\vec{T}_4) - M_{\Delta_3}(\vec{T}_4') + M_{(\Delta_3) \text{ frottements}} = J_b \ddot{\theta}_P \end{cases} \quad (2.2)$$

En posant :

$$\begin{cases} T_1 = T_2 \\ T_1' = T_2' \\ T_3 = T_4 \\ T_3' = T_4' \end{cases} \quad (2.3)$$

Le système d'équation (2.2) devient :

$$\begin{cases} (T_1' - T_1) r_m = J_m \ddot{\theta}_m \\ (T_2 - T_2') r_P + (T_3' - T_3) r_b - 2C_r \dot{\theta}_P = J_{\Delta_2} \ddot{\theta}_P \\ (T_4 - T_4') r_b - 2C_r \dot{\theta}_P = J_b \ddot{\theta}_P \end{cases} \quad (2.4)$$

$$\text{Avec : } J_{\Delta_2} = J_b + J_m$$

En tenant compte des expressions du système (2.3) dans le système (2.4) la deuxième équation du système (2.4) devient :

$$\frac{J_m}{r_m} r_P \ddot{\theta}_m - J_P \ddot{\theta}_P - 4C_r \dot{\theta}_P = (J_b + J_P) \ddot{\theta}_P \quad (2.5)$$

Sachant que l'équation de la partie mécanique du moteur est donnée par:

$$J_m \ddot{\theta}_m + f \dot{\theta}_m - k_c I(t) = 0 \quad (2.6)$$

Nous avons :

$$J_m \ddot{\theta}_m = -f \dot{\theta}_m + k_c I(t) \quad (2.7)$$

En remplaçant l'expression (2.6) dans l'équation (2.4) nous obtenons :

$$(2J_P + J_b) \ddot{\theta}_P + \left(4c_r + \frac{\eta f r_P}{r_m} \right) \dot{\theta}_P - \frac{r_P}{r_m} k_c I(t) = 0 \quad (2.8)$$

$$\Rightarrow \ddot{\theta}_P + \frac{\left(4c_r + \frac{\eta f r_P}{r_m} \right)}{(2J_P + J_b)} \dot{\theta}_P - \frac{r_P k_c}{r_m (2J_P + J_b)} I(t) = 0 \quad (2.9)$$

L'équation de la dynamique de notre système est donnée par :

$$\begin{cases} L \frac{dI}{dt} + r_m I + \eta K_e \frac{d\theta_P}{dt} = U_0 \\ \ddot{\theta}_P + \frac{\left(4c_r + \frac{\eta f r_P}{r_m} \right)}{(2J_P + J_b)} \dot{\theta}_P - \frac{r_P k_c}{r_m (2J_P + J_b)} I = 0 \end{cases} \quad (2.10)$$

En posant $\dot{\theta}_P = \omega$ et en considérant le régime permanent le système d'équations (2.10) devient:

$$\begin{cases} r_m I + \eta K_e \omega = U_0 \\ \left(4c_r + \frac{\eta f r_p}{r_m} \right) \omega - \frac{r_p k_c}{r_m (2J_p + J_b)} I = 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

Posons : $\phi = \frac{4c_r r_m + \eta f r_p}{r_p k_c}$; $\tau = \frac{\eta K_e}{R_m}$; $\gamma = \frac{U_0}{r_m}$; le système d'équations (2.11) devient :

$$\begin{cases} I + \tau \omega = \gamma \\ I - \phi \omega = 0 \end{cases} \quad (2.12)$$

En procédant par substitution nous obtenons respectivement $\omega_{\text{permanent}}$ et $I_{\text{permanent}}$ donné par:

$$\omega = \frac{\gamma}{(\tau + \phi)} \quad ; \quad I = \frac{\phi \gamma}{(\tau + \phi)}$$

Relation entre la vitesse de rotation du moteur et la vitesse de rotation de la barre motrice :

$$\frac{\dot{\theta}_m}{\dot{\theta}_b} = \eta = \frac{r_{\text{barre}}}{r_{\text{poulie-barre}}} = 2,8 \square 3 \quad (2.13)$$

La relation (2.13) nous montre que le moteur tourne trois (03) fois plus vite que la barre motrice ce qui était prévisible car le rayon de la roue menante (poulie du moteur) est inférieur au rayon de la roue menée (la barre).

Tableau I: Paramètres et valeurs utilisés

\vec{T}_1, \vec{T}_2 : tensions au niveau du brin tendu de la courroie	\vec{T}'_1, \vec{T}'_2 : tensions au niveau du brin mou de la courroie
\vec{T}_3, \vec{T}_4 : tensions au niveau du brin tendu du tapis	\vec{T}'_3, \vec{T}'_4 : tensions au niveau du brin mou du tapis
$M_{\Delta_1}(\vec{T}_1), M_{\Delta_1}(\vec{T}'_1)$: Moment des tensions \vec{T}_1, \vec{T}'_1 par rapport à l'axe de la poulie du moteur	$K_c = K_e$: constante électromotrice = 0,02 N.M/A
$M_{\Delta_2}(\vec{T}_3), M_{\Delta_2}(\vec{T}'_3)$: Moment des tensions \vec{T}_3, \vec{T}'_3 par rapport à l'axe fixe de la poulie	$M_{\Delta_2}(\vec{T}_2), M_{\Delta_2}(\vec{T}'_2)$: Moment des tensions \vec{T}_2, \vec{T}'_2 par rapport à l'axe fixe de la poulie
J_m : Moment d'inertie du moteur	$M_{\Delta_3}(\vec{T}_4), M_{\Delta_3}(\vec{T}'_4)$: Moment des tensions \vec{T}_4, \vec{T}'_4 par rapport à l'axe des barres
J_p : Moment d'inertie de la poulie	$J_{\Delta_2} = J_p + J_b$: coefficient de Frottement statique au niveau de la barre réceptrice
C_r : Couple de frottement dynamique dans le système	J_b : Moment d'inertie des barres
r_p : Rayon de la poulie = 0,7 cm	r_m : Rayon de la poulie au niveau du moteur = 0,25 cm
f : Couple de frottement statique au niveau du moteur	L_{barre} : longueur d'une barre = 4,4 cm
θ_m : Position angulaire du moteur	L_{tap} : longueur du tapis = 17,5 cm
$\dot{\theta}_{tapis}$: vitesse de rotation du tapis	θ_p : Position angulaire de la poulie
U_0 : tension continue d'alimentation du moteur	η : rapport de transmission entre le moteur et la poulie

II.4 RESULTATS EXPERIMENTAUX ET DISCUSSION

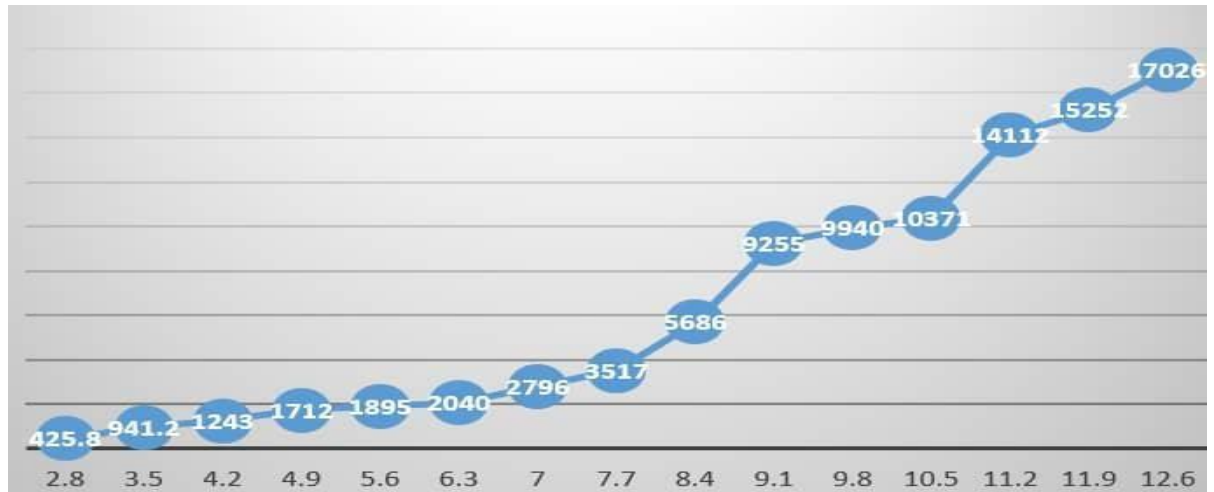


Figure 11: Courbe de la vitesse de rotation du moteur à vide en fonction de la tension d'alimentation $V=f(U)$.

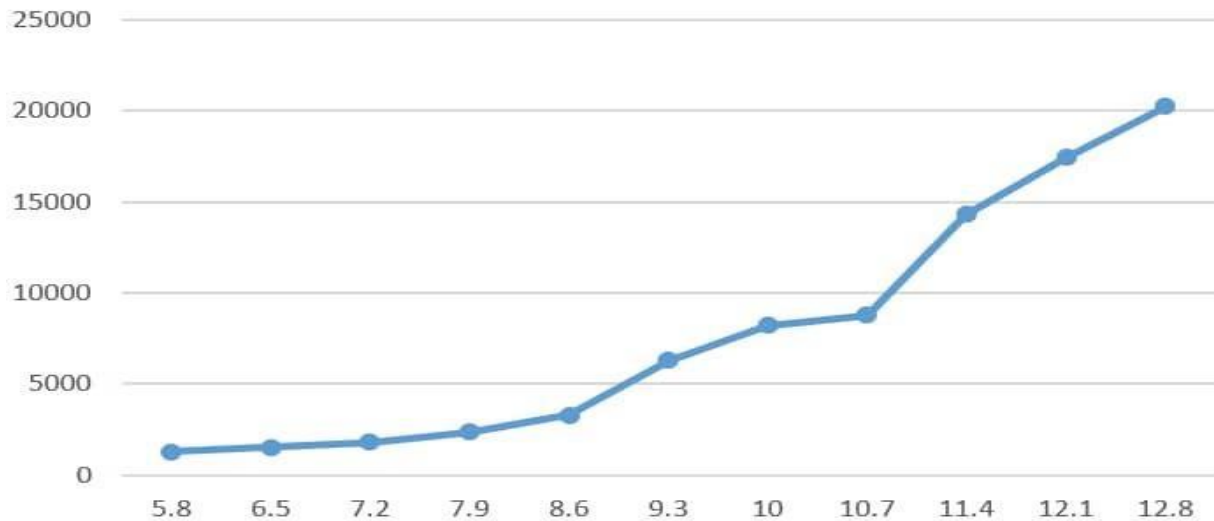


Figure 12: Courbe de la vitesse de rotation du moteur en charge en fonction de la tension d'alimentation $V=f(U)$.

Lorsque le moteur est à vide, la vitesse de rotation augmente progressivement avec la tension d'alimentation, ce qui est attendu car une tension plus élevée permet au moteur de tourner plus rapidement. Cependant, lorsque le moteur est sous charge, on observe également une augmentation de la vitesse de rotation avec la tension d'alimentation, bien que cette augmentation soit moins prononcée que lorsqu'il est à vide. Cela peut être dû à la résistance supplémentaire de la charge, qui limite légèrement l'augmentation de la vitesse de rotation par rapport au moteur à vide. En général, la courbe de la vitesse de rotation du moteur à vide et sous charge en fonction de la tension d'alimentation montre une tendance croissante, mais avec une augmentation moins marquée lorsque le moteur est sous charge.

II.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons présenté comment le dispositif à tapis roulant pour les activités de transport a été conçu, puis nous avons présenté sa modélisation mathématique et les résultats expérimentaux obtenus. Nous constatons que la vitesse de rotation du tapis roulant est proportionnelle à la tension d'alimentation de notre moteur. Dans le chapitre suivant, nous allons étudier la récupération de l'énergie dans un tapis roulant magnétisé.

CHAPITRE III : RECUPERATION DE L'ENERGIE A PARTIR DU TAPIS ROULANT

III.1 INTRODUCTION

Il sera question dans ce chapitre de récupérer l'énergie par un tapis roulant magnétisé. Nous présenterons en premier lieu la réalisation et la modélisation du dispositif et en second lieu les résultats expérimentaux.

III.2 REALISATION ET MODELISATION

III.2.1 Réalisation

Pour réaliser un tel dispositif au laboratoire, en plus du matériel utilisé pour la réalisation d'un tapis roulant destiné aux activités sportives, nous utilisons le matériel suivant :

- **Aimants néodymes (a) :** Le champ magnétique créé entre eux est très intense. Ceux-ci sont collés deux à deux sur la surface molle et sur la surface tendue du tapis. Leur association avec la bobine plate rend notre tapis magnétisé.
- **Bobine plate (b) :** fait à base d'une barre d'aluminium et (05) couches de cuivre soit 130 spires par couche. Dans ce travail, il assure la récupération de l'énergie.
- **Multimètre à affichage numérique (c) :** il cumule plusieurs fonctions de mesure de différents paramètres dans un circuit (la résistance du moteur DC, résistance de la bobine, la tension de sortie aux bornes de la bobine...).

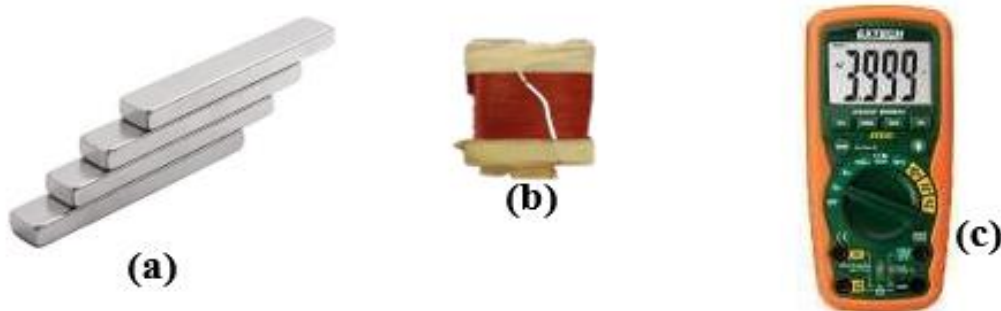


Figure 13: Matériels utilisés pour la récupération de l'énergie : Aimants néodymes (a), Bobine plate (b), Multimètre à affichage numérique (c)

Afin de récupérer l'énergie mécanique produite au laboratoire, notre tapis dans ce cas sera magnétisé. Lorsque notre tapis est en mouvement, celui-ci se déplace dans le champ magnétique produit par les aimants permanents, la variation du flux magnétique donne naissance à un courant induit puis à une tension que nous mesurons à l'aide du multimètre.



Figure 14: Dispositif expérimental de récupération de l'énergie

III.2.2 Modélisation

Dans ce cas, nous modéliserons la force électromotrice induite dans le système, par la variation du flux à l'intérieur de la surface où règne le champ magnétique. Cette force électromotrice induite " e " sera définie d'après la loi de Lenz par :

$$e_{(t)} = - \frac{d\Phi}{dt} \quad (3.1)$$

Les aimants étant permanents, le champ magnétique l'est également. Ainsi :

$$\Phi = N.B.S(t) \quad (3.2)$$

Où : N représente le nombre total de spires de la bobine, B le champ magnétique permanent aux bornes de la bobine et $S(t)$ la surface balayée par les aimants.

$$S(t) = L.l(t) \quad ; \quad l(t) = V.t \quad (3.3)$$

La bobine étant plus large que les aimants permanents considérés, la surface balayée par les aimants varie ainsi :

$$- \text{ si } t < \frac{l_{\text{aimant}}}{V} \text{ , alors } S = L.V.t \text{ et } e(t) = -N.B.L.V$$

- Si $\frac{l_{aimant}}{v} < t < \frac{L_{bobine} - l_{aimant}}{v}$ alors $S = S_{aimant}$ et $e(t) = 0v$
- Si $\frac{L_{bobine} - l_{aimant}}{v} < t < \frac{L_{bobine}}{v}$ alors $S = -L.V.t$ et $e(t) = N.B.L.V$

Où "V" représente la vitesse de translation de l'aimant fixé sur le tapis roulant ; "t" est le temps mis par l'aimant pour parcourir la bobine ; l_{aimant} : largeur des aimants ; L_{bobine} : longueur de la bobine ; L : longueur des aimants.

III.3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

L'étude expérimentale au laboratoire montre que la tension électrique récupérée aux bornes de la bobine est alternative. Nous récupérons une tension maximale de 0,1v lorsque la vitesse de translation des aimants est de 36,413 m/s expérimentalement et une tension maximale de 0,123v numériquement. En dessous de cette valeur de la vitesse, la tension récupérée expérimentalement est de l'ordre de 10^{-2} voir 10^{-3} mais au-delà de celle-ci, la tension maximale est la même. Nous pouvons également noter après cette étude expérimentale que l'énergie électrique récupérée croît avec le champ magnétique créé dans la bobine et la valeur de la tension maximale obtenue numériquement se rapproche de celle obtenue expérimentalement .

III.4 CONCLUSION

En définitive, dans ce chapitre où il était question pour nous de récupérer l'énergie dans un tapis roulant, il en ressort que la conception et la réalisation d'un dispositif électromécanique à tapis roulant pour la récupération de l'énergie nécessite une compréhension approfondie du principe de récupération de l'énergie électrique dans un dispositif électromécanique. Il est essentiel de prendre en compte les besoins des utilisateurs, les exigences de sécurité et les normes de qualité pour garantir une énergie fiable et efficace. La réalisation d'un tel dispositif exige une attention particulière à la qualité des matériaux, à la précision de la fabrication et à la robustesse de l'assemblage afin de mieux appréhender la tension aux bornes de la bobine.

CONCLUSION GENERALE

Notre travail de recherche a porté sur la conception, la réalisation et la modélisation d'un dispositif électromécanique à tapis roulant. Ce dispositif peut être utilisé pour les activités de transport d'une part et être adapté pour la récupération de l'énergie d'autre part. Les principaux résultats obtenus sont articulés ainsi qu'il suit :

- Dans le cas des activités de transport nous avons constaté pendant l'étude expérimental que la vitesse de rotation du tapis est une fonction croissante de la tension d'alimentation tel que prédit théoriquement.
- Pour la récupération de l'énergie, nous avons obtenu expérimentalement une tension maximale de 0,1v et numériquement celle-ci vaut 0,123v pour un tapis roulant dont la vitesse de translation de l'aimant est 36,413 m/s.

En perspectives, nous nous proposerons de concevoir un tapis roulant à vitesse variable et d'étudier la dynamique non linéaire pour le cas des activités sportives et le transport.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] : <https://braidwoodgear.com/systemes-transmission-mecanique/> consulté le (28/06/2023)
- [2] : <https://eric-Bruno.francoid@centralemille.fr> consulte le (28/06/2023)
- [3] : <https://www.keyence.fr/ss/products/measure-sys/machinig/cutting/ncgear.jsp>
- [4]: M. Erkaya, M. Cakan, "Dynamic Modeling and Simulation of a DC Motor-Driven Belt System with Backlash and Friction" *Mechatronics*, vol. 18, no. 6, 2008
- [5] : X. Zhang, Z. Gao, "Dynamic Modeling and Simulation of a DC Motor-Driven Belt System." *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 22, no. 4, 2014
- [6] : Y. Zhu, Y. Q. Chen, J. Lu, "Nonlinear Dynamics and Chaos in a DC Motor-Drive System with Belt Transmission" *Nonlinear Dynamics*, vol. 82, no. 1-2, 2015.
- [7] : A. A. Nassiraei, A. A. Shoulaie, "Nonlinear Control of a DC Motor-Driven Pulley-Belt System" 2016 Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE)
- [8] : A. Hosseinzadeh, M. J. Yazdanpanah, A. Khayati, M. R. Gholami, "Dynamic Modeling and Simulation of DC Motor-Driven Systems with Belt Transmission" 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS)
- [9]: - C. E. BEKKOUCHE & A. K. TOUGGOURTI, "Étude et simulation d'un variateur de vitesse commande un moteur à courant continu," *Mémoire de master académique*, Université Kasdi Merbah Ouargla, Faculté des Sciences Appliquées, 2016.
- [10]:<https://maintautomatisme.free.fr/index.php/electrotechnique/composantsactifs/24avantages-et-inconvenients-des-moteurs-continus.html> consulté le (28/06/2023)
- [11] : www.pearl.fr.at/ch/de consulte le (10/07/2023)
- [12] : <https://www.tanals.com/fr/lhistoire-des-courroies> consulté le (14/07/2023)
- [13] : AZIZ DEROUICH, *Module électrotechnique I : machine a courant continu*, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah de FES, Ecole Supérieure de technologie, 2022.
- [14] : <https://www.techno-science.net/definition/6737.html>, consulte en 2023