

Projet de Physique P6-3
STPI/P6-3/2011 – Groupe 32

Propulsion à sustentation magnétique



Etudiants :

Reda BELKEBIR MRANI Nicolas FLORENTIN

Houda LAHLOU

Mathilde MARIE

Simon MENAGER

Olivier PELIN

Enseignant-responsable du projet :

François GUILLOTIN

Date de remise du rapport : 17/06/11

Référence du projet : *STPI/P6-3/2011 – 32*

Intitulé du projet : *Propulsion à sustentation magnétique*

Type de projet : *Expérimental*

Objectifs du projet :

L'objectif de notre projet durant ce semestre est d'intégrer les principes de sustentation et de propulsion magnétique. Pour comprendre ces principes, l'objectif était de réaliser des maquettes représentant de façon simplifiée le principe de fonctionnement d'un train sustenté à propulsion magnétique.

Ce projet permet aussi de réutiliser et de mettre en pratique les connaissances acquises durant nos 3 premiers semestres de STPI (spécifiquement en électricité et en magnétisme).

Ce projet permet d'avoir une expérience supplémentaire en gestion de projet ainsi qu'une démarche scientifique appliquée en physique.

Mots-clefs du projet :

- sustentation
- propulsion
- magnétisme
- moteur pas à pas

TABLE DES MATIÈRES

<u>1. Introduction.....</u>	<u>6</u>
<u>2. Méthodologie / Organisation du travail.....</u>	<u>6</u>
<u>3. travail réalisé et résultats.....</u>	<u>8</u>
<u>3.1. Historique.....</u>	<u>8</u>
<u>3.1.1. Projets en développement.....</u>	<u>9</u>
<u>3.1.2. Projets futuristes.....</u>	<u>9</u>
<u>3.2. Lévitiation.....</u>	<u>9</u>
<u>3.2.1. Explication du principe.....</u>	<u>9</u>
<u>3.2.2. Mise en pratique: Maquette.....</u>	<u>11</u>
<u>3.3. Propulsion.....</u>	<u>13</u>
<u>3.3.1. Explication du principe.....</u>	<u>13</u>
<u>3.3.2. Mise en pratique : Maquette.....</u>	<u>17</u>
<u>4. Conclusions et perspectives.....</u>	<u>20</u>
<u>5. Bibliographie.....</u>	<u>21</u>

1. INTRODUCTION

Après une ou deux séances à réaliser des recherches concernant la sustentation et la propulsion magnétique, nous nous sommes rendus compte que l'application la plus courante de ces principes était celle du train. Nous avons donc axé nos recherches vers les applications du magnétisme dans le domaine des trains à sustentation et propulsion magnétique. Suite à quelques séances de projet physique consacrées à la recherche d'informations, nous avons décidé de diviser le groupe en 2 sous-groupes, l'un consacrant les séances de TP à la réalisation d'une maquette mettant en œuvre le principe de propulsion magnétique, l'autre à la réalisation d'une maquette mettant en œuvre le principe de sustentation. Cette séparation est due au fait qu'il nous a semblé trop difficile de faire une maquette réunissant les deux principes. Nous avons tout au long du semestre accompagné la réalisation de ces maquettes avec des séances de recherche afin de comprendre les principes physiques auxquels notre projet faisait appel.

Dans un premier temps, nous expliquerons en détail notre organisation interne. Nous mettrons ensuite l'accent sur la réalisation de notre projet, les difficultés que nous avons rencontrées et les résultats que nous avons réussi à obtenir. Nous conclurons ce dossier par un bilan de nos expériences de ce projet ainsi que les perspectives d'évolution de ce dernier.

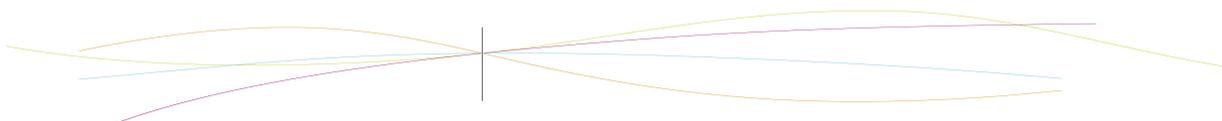
2. MÉTHODOLOGIE / ORGANISATION DU TRAVAIL

Description de l'organisation adoptée

Nous nous sommes répartis en deux groupes, l'un qui étudie la propulsion, l'autre la lévitation. Chaque groupe s'est donné pour objectif la réalisation d'une maquette. Nous avons commencé par une phase de documentation sur les différentes applications et projets ferroviaires en développement.

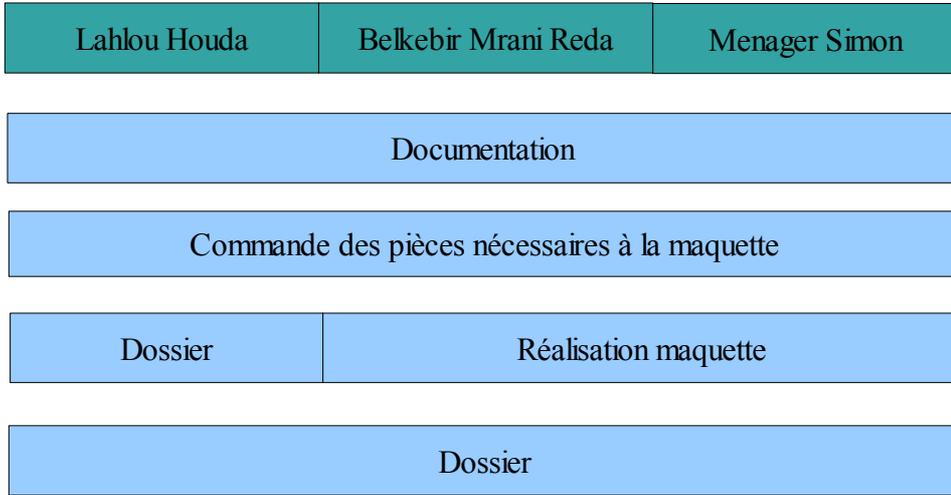
Le projet étant expérimental, nous avons débuté la réalisation de deux maquettes, représentant les phénomènes étudiés. Cependant, afin de compléter notre dossier, deux membres de chaque sous-groupe au maximum étaient assignés à la réalisation de la maquette. Bien sûr, selon les séances et le matériel disponible (pièces commandées, matériel rapporté) nous n'avons pas toujours pu avancer dans la réalisation des maquettes.

Pour finir, nous avons réservés la dernière séance à la finalisation du dossier et aux tests des maquettes.

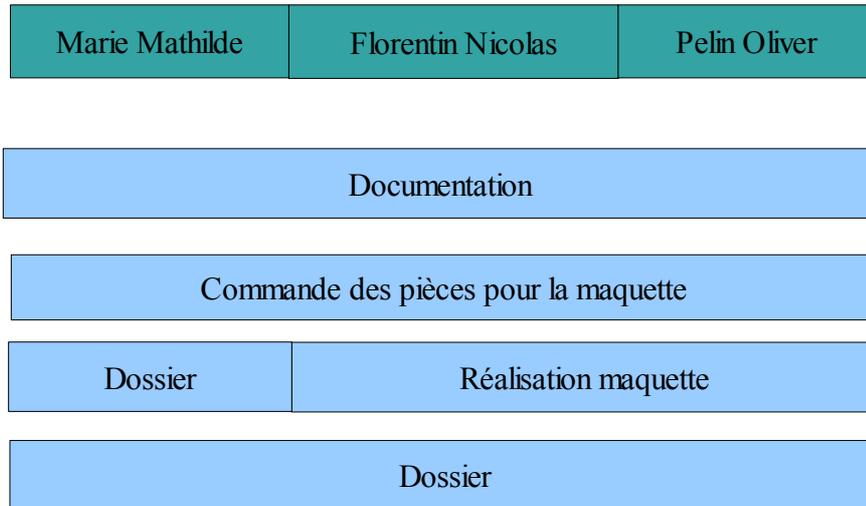


Organigramme des tâches réalisées et des étudiants concernés

Sous-groupe propulsion



Sous-groupe lévitation



3. TRAVAIL RÉALISÉ ET RÉSULTATS

3.1. Historique

Les débuts des recherches sur les trains à sustentation magnétique commencèrent en 1922 avec les travaux de l'Allemand Hermann Kemper. Celui-ci déposa un brevet le 14 août 1934. Ses travaux furent cependant interrompus à cause de la Seconde Guerre mondiale.

- 1962 : Le Japon se lance dans des recherches sur le Maglev qui bat régulièrement de nouveaux records de vitesse ;
- 1973 : L'Allemagne reprend les recherches à la Technische Universität de Braunschweig ;
- 1979 : Le Transrapid 05 fut mondialement le premier train à sustentation magnétique à transporter des passagers à l'occasion de l'exposition internationale des moyens de transport à Hambourg ;
- 1983 : Une ligne de 1,6 km fut construite à Berlin destinée à un service commercial de type métro (*Kabinentaxi*). Malgré le succès de cette ligne, elle fut fermée en 1992 ;
- De 1984 à 1995, une liaison de 600 mètres exista entre l'aérogare principale de l'aéroport international de Birmingham jusqu'à la station de chemin de fer à une vitesse de 15 km/h. L'une des raisons de son échec est le poids trop important de la voiture à cause d'une coque trop épaisse.
- 1984 : Mise en service de la ligne d'essai pour le Transrapid en Allemagne;
- 2003 : Mise en service commerciale du Transrapid de Shanghai.
- 2006 : Accident sur la ligne d'essai en Allemagne. Le train percute à près de 200 km/h un véhicule d'entretien stationné sur la voie. La technologie semble hors de cause (problème de manque de communication entre les services), le train n'a cependant pas déraillé.
- 2008 : Au terme d'une réunion de crise à Berlin, le dernier projet de Transrapid en Allemagne, portant sur la construction d'une ligne entre la gare principale et l'aéroport de Munich, a été enterré. Par suite, ThyssenKrupp et Siemens ont décidé la dissolution de la société de commercialisation *Transrapid International*. Une nouvelle tentative de projet de Transrapid en Allemagne n'est pas attendue.

Le Transrapid est un projet allemand réalisé par plusieurs sociétés dont MBB qui avait réalisé le premier prototype dans les années 70. Ce projet de liaison de la gare centrale de Munich avec l'aéroport a été abandonné en 2008. Un projet de ligne Berlin-Hambourg avait été approuvé en 1994 mais a aussi été abandonné par la suite, faute de soutien financier de l'État.

En mars 2006, le lancement d'une nouvelle ligne de 175 kilomètres est annoncé : elle doit prolonger la ligne existante jusqu'à la ville touristique de Hangzhou. Cependant, l'avenir



de cette ligne est menacé en raison de plaintes liées à l'impact du Transrapid sur la santé des populations voisines de la ligne.

Le Maglev (de l'anglais Magnetic Levitation) est un projet japonais, une ligne expérimentale a été construite au Japon, sur laquelle la vitesse record de 581 km/h a été atteinte en 2003. L'objectif serait de construire une ligne assurant la liaison Tokyo-Osaka (environ 400 km) en une heure.

3.1.1. Projets en développement

La Chine possèdera bientôt sa première ligne à sustentation magnétique brevetée, avec le début des travaux de construction de la S1 à Beijing. Il s'agira de la deuxième ligne de transport de ce genre au monde. La Chine a donc rattrapé le meilleur savoir-faire international dans le domaine. D'après le plan, la ligne S1 sera achevée début 2013 et mise en service à titre d'essai. Le prototype de train de troisième génération a déjà circulé sans encombre sur 60 000 km d'une ligne expérimentale. La capacité de charge maximale du train atteint quinze tonnes.

3.1.2. Projets futuristes

Le projet futuriste **Swissmetro** fait appel aux mêmes procédés mais les double par l'utilisation de tunnels sous vide partiel d'air. Ceci a l'avantage de réduire la friction de l'air qui devient très importante au-delà de 500 km/h.

3.2. Lévitiation

3.2.1. Explication du principe

Le principe de la lévitation magnétique est de chercher à compenser le poids du mobile par une force créée par des aimants. Cette compensation de la gravité permet la lévitation – élévation et maintient d'un objet au-dessus du sol sans l'intervention d'un quelconque appui.

Pour compenser cette gravité, 2 principes de lévitation existent par le biais du magnétisme :

- la suspension électromagnétique – attraction magnétique de solénoïdes (Transrapid)
- la suspension électrodynamique – répulsion par supraconductivité (Maglev)

Mais la lévitation par supraconductivité requiert une température des aimants maintenue constante à -200°C environ. On ne parlera donc ici que de suspension (ou sustentation) magnétique et nous réaliserons une maquette qui représentera le phénomène.

-Suspension électromagnétique :

Dans le cas de la suspension électromagnétique, le train est équipé de bobines dans lesquelles on induit du courant, contrôlé depuis le poste de conduite. La force de lévitation peut donc être contrôlée.



Le calcul de la force ressentie par la sphère se fait en considérant qu'une variation de l'énergie magnétique dW_{mag} peut être causée par un apport d'énergie électrique dW_{elec} et/ou un apport d'énergie mécanique dW_{mec} .

La conservation de l'énergie permet alors d'écrire

$$dW_{mag} = dW_{elec} + dW_{mec}$$

La variation d'énergie magnétique vaut:

$$dW_{mag} = d\left(\frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2\right) = L \cdot I \cdot dI + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot dL$$

Les apports d'énergies mécanique et électrique

$$dW_{mec} = F \cdot dZ$$

$$dW_{elec} = U(t) \cdot I(t) \cdot dt$$

En tenant compte de la loi de Henz : $U(t) = d\frac{\psi}{dt}$ et la loi définissant l'inductance $\psi = L \cdot I$, la variation d'énergie mécanique s'écrit

$$\begin{aligned} dW_{elec} &= I \cdot (U(t) \cdot dt) = I \cdot d\psi \\ &= I \cdot (L \cdot dI + I \cdot dL) \\ &= L \cdot I \cdot dI + I^2 \cdot dL \\ &= dW_{mag} + \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot dL \end{aligned}$$

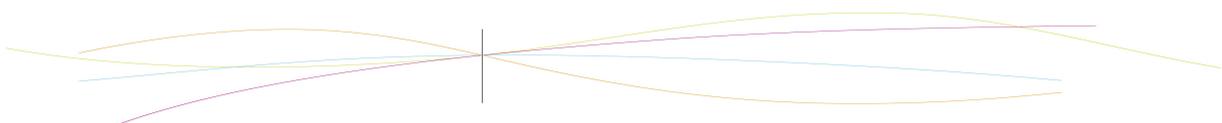
d'où:

$$dW_{mag} = dW_{elec} - \frac{1}{2} \cdot I^2 \cdot dL$$

Lorsque l'on connaît le poids du train et la taille des solénoïdes, nous pouvons déterminer l'intensité et la tension du courant à leur appliquer pour que la force portante compense totalement le poids. Ainsi on peut se trouver dans une situation d'inertie, qui permet d'atteindre des vitesses élevées puisque les frottements avec le support sont nuls.

Mais la répulsion magnétique est un phénomène assez peu stable qui demande d'être contrôlé. C'est pour cette raison que des électroaimants sont aussi disposés sur les côtés de rails de guidage. De cette façon, le train est forcé de rester au centre de son rail. La somme des vecteurs force de droite et de gauche est bien évidemment égale au vecteur nul, sans quoi le train ne resterait pas au centre. On est donc amené à construire des rails qui maintiennent la rame au centre, c'est le cas de l'image ci-dessous.

La force magnétique et le poids devant se compenser, on peut expérimentalement (en réalité le procédé est bien plus complexe) calculer la force portante que doivent atteindre les solénoïdes pour soulever le train.



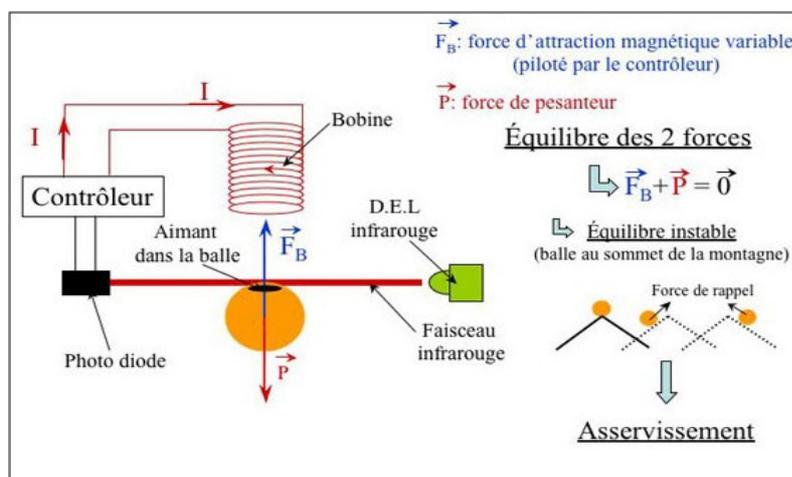
3.2.2. Mise en pratique: Maquette

Afin de mettre en évidence le principe de la lévitation magnétique, nous avons réalisé une maquette. Pour ce faire, nous nous sommes fortement inspirés d'un montage trouvé sur Internet, permettant de faire léviter une balle de ping-pong.

Le principe est simple. Pour maintenir la balle en lévitation, il faut compenser la force de pesanteur (poids) par une force de même intensité, de même direction mais de sens opposé. Ainsi, un électroaimant fixé sur un support attire l'aimant introduit dans la balle de ping-pong. La force magnétique est créée par une bobine dans laquelle circule un courant d'intensité électrique I (électroaimant). La variation de courant permet de modifier l'intensité de la force magnétique. Ainsi, il existe une valeur de I pour laquelle la force magnétique compense exactement le poids de la balle.

Pour éviter que la balle ne vienne se coller à l'électroaimant, on interpose une barrière lumineuse : lorsqu'elle est située sous le faisceau lumineux, la balle est attirée vers le haut, elle coupe alors le faisceau, l'attraction s'arrête, la balle redescend et le cycle recommence.

Dans la pratique le problème est qu'un tel dispositif ne fonctionne pas. En effet, le corps suspendu n'étant soumis à aucun frottement mécanique, à part celui de l'air qui est négligeable, les oscillations ont tendance à s'amplifier rapidement et finissent par provoquer la chute de l'objet. Pour obtenir un comportement stable, il faut agir sur le signal électrique de façon à limiter l'amplitude du mouvement. Ainsi, le circuit utilisé est muni d'une boucle d'asservissement.



Principe du montage

La boucle d'asservissement est notamment utilisée pour la régulation de vitesse des véhicules ainsi que le pilote automatique des avions. Il y a asservissement d'une grandeur Y à une grandeur de consigne X lorsqu'on force, par un dispositif particulier, la grandeur Y à suivre l'évolution de la grandeur X .

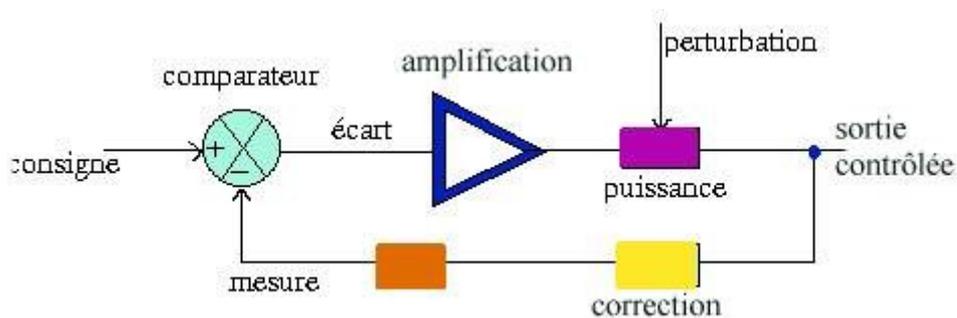
Le système est composé de plusieurs éléments:

- Le **comparateur** fait la différence entre la valeur mesurée de la grandeur que l'on veut asservir et la valeur, dite de consigne, que l'on voudrait obtenir. Le rôle de



l'asservissement est de maintenir cette différence la plus proche possible de zéro à tout instant.

- L'**amplificateur** est chargé d'amplifier l'écart mis en évidence par le comparateur afin d'apporter une solution le plus rapidement possible.
- L'**étage de puissance** est responsable de l'obtention de la grandeur pilotée.
- Le **capteur** mesure en permanence la valeur de la grandeur qu'on veut asservir.
- Le **correcteur** améliore le comportement d'ensemble en réduisant les oscillations susceptibles de se produire autour de la valeur de consigne.



Principe de la boucle d'asservissement

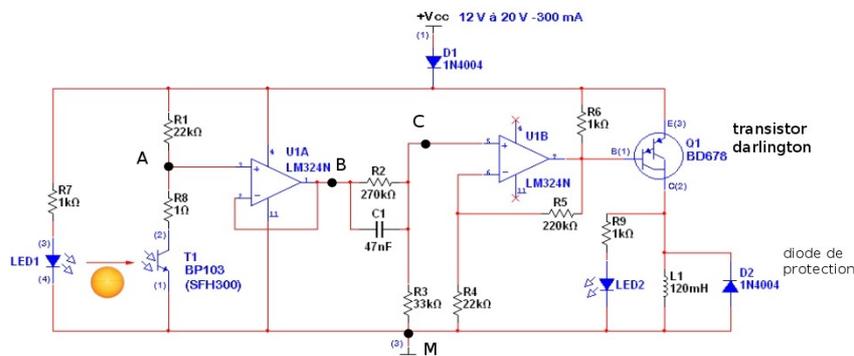
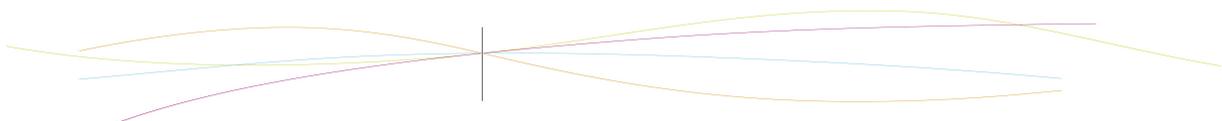


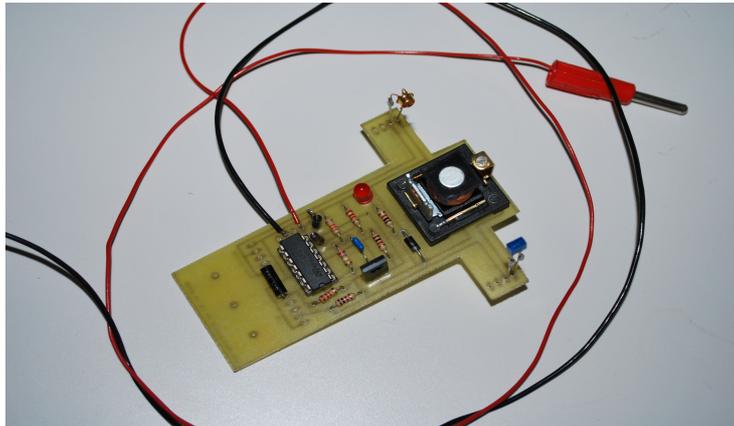
Schéma du circuit

Analyse du circuit : Étant donné que nous n'avons pas conçu le circuit électrique du sustentateur magnétique nous même, nous avons essayer de comprendre comment il fonctionne. Le premier amplificateur opérationnel est monté en suiveur, c'est à dire que les tensions $U(A)$ et $U(B)$ sont égales. Le régulateur du circuit correspond au couple de la résistance $R2$ et du condensateur $C1$, c'est un filtre passe haut, il laisse passer les hautes fréquences et atténue les basses fréquences. Le deuxième amplificateur opérationnel joue le rôle d'amplificateur de tension. Son coefficient multiplicateur vaut $(1 + R5 / R4)$. Le circuit est alimenté avec un courant de tension comprise entre 12 et 20V, et une intensité de 300mA.



C'est bien sûr la bobine (protégée par une diode) qui, alimentée en électricité, permet l'attraction de l'aimant.

Notre sustentateur magnétique n'a malheureusement pas fonctionné, sans doute à cause d'un problème de contact électrique d'un composant ou d'un court circuit. Pris par le temps, nous n'avons pu déceler le problème et le résoudre. Le montage et la compréhension de ce petit système de sustentation aura quand même été une expérience intéressante.



Maquette lévitation

3.3. Propulsion

3.3.1. Explication du principe

Le principe de la traction magnétique se base sur les technologies des moteurs pas à pas. Un moteur pas à pas est un transducteur électromécanique¹ [Jufer 95].

Le signal électrique peut commander deux types de mouvement, linéaire ou rotatif.

La transformation du signal électrique en mouvement mécanique est créé par l'alimentation de bobines présentes dans le moteur qui engendre un champ magnétique de direction précise. Le changement séquentiel des tensions à chaque bobinage permet de déplacer la position du champ selon une résolution élémentaire appelée pas. Il existe 2 principaux types de moteur pas à pas :

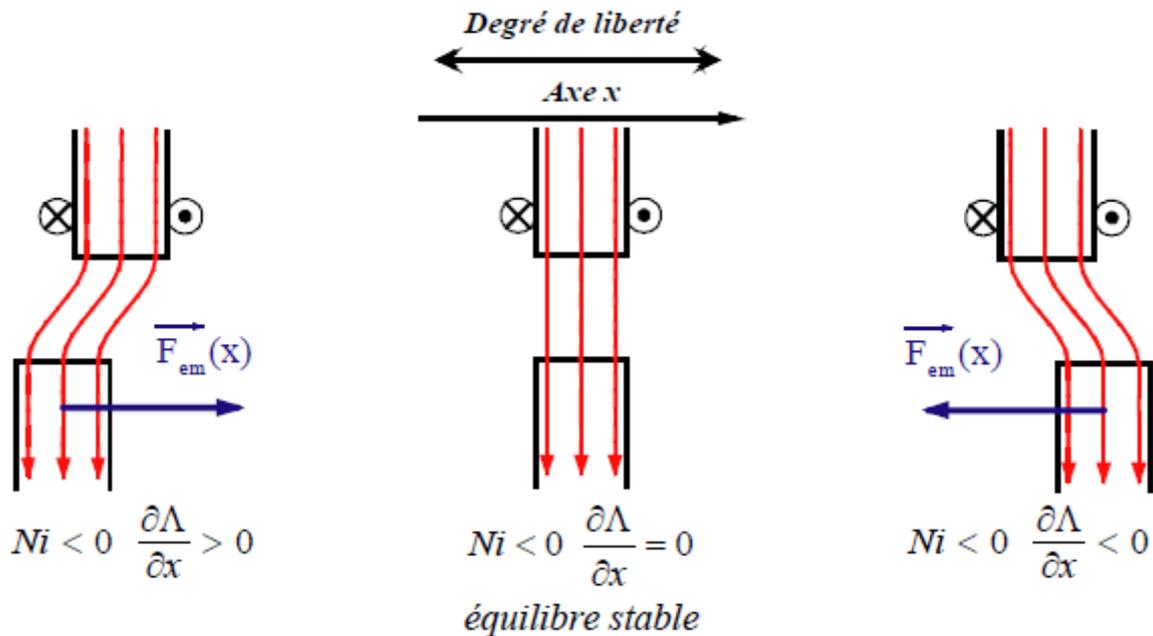
- Le moteur pas à pas à réluctance variable.
- Le moteur pas à pas polarisé .

Cette classification prend en compte le phénomène physique qui est à l'origine de leur mouvement [Abignolie 91] [Kant 89].

¹ Il transforme des signaux électriques en une action mécanique



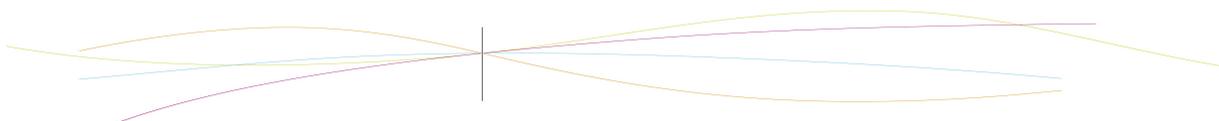
Pour les moteurs à réluctance variable, le mouvement, ou la force responsable du mouvement résulte de l'interaction champ magnétique des bobines et du fer du rotor, lorsque ce dernier présente une structure dentée passive. La « variation de réluctance » consiste à modifier le champs magnétique et donc de modifier la capacité de la bobine à attirer le fer.

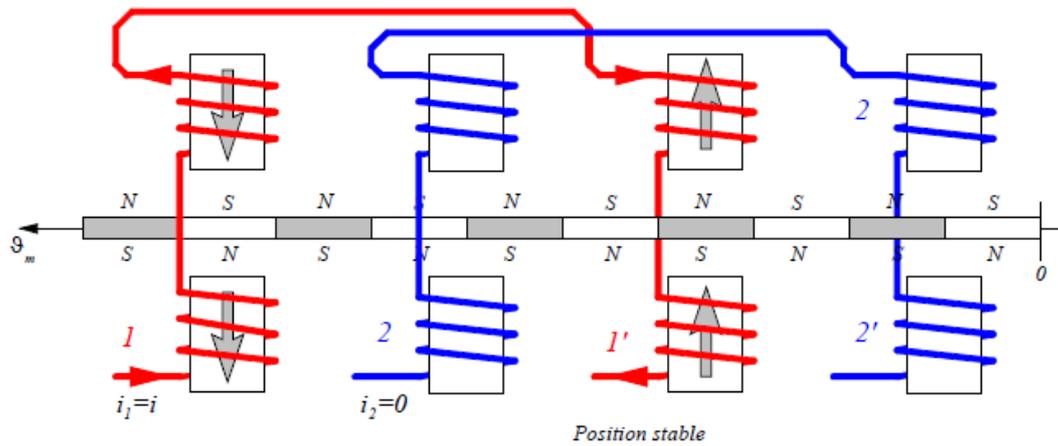


3.3.1.1 Les moteurs linéaires

3.3.1.1.1. Les moteurs pas à pas polarisés et linéaires

Les moteurs pas à pas polarisés linéaires sont constitués de plusieurs aimants avec une face nord et une face sud, à la place de la barre denté métallique, qui s'alignent naturellement sur l'axe magnétique de la paire de plot alimenté.





Moteur pas à pas polarisé linéaire

3.3.1.1.2. Les moteurs pas à pas à réluctance variable linéaire.

Le moteur pas à pas linéaire est composé d'une partie mobile et d'une partie fixe. La partie fixe est composé de deux ou plusieurs modules de bobine indépendants. La partie mobile est partiellement métallisée de façon régulière. La machine fonctionne en deux phases, qui consistent en la mise sous tension de l'un des modules qui imposera la position d'équilibre entre la partie fixe et la partie mobile, et donc l'alignement entre la partie fixe métallique et le module mis sous tension.

Les autres modules étant en face d'une partie non métallique et étant plus proche d'un des bouts métalliques, attireront ce dernier dans un sens plutôt qu'un autre.

Le système que nous utilisons est inversé, la partie mobile est celle composé des bobines.

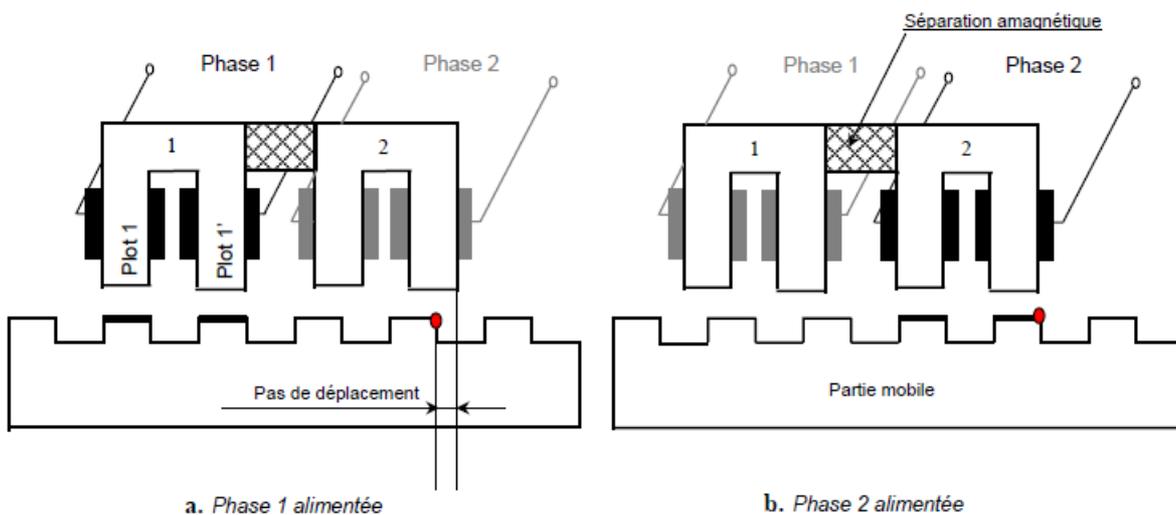


Illustration 1: Moteur pas à pas à réluctance variable linéaire



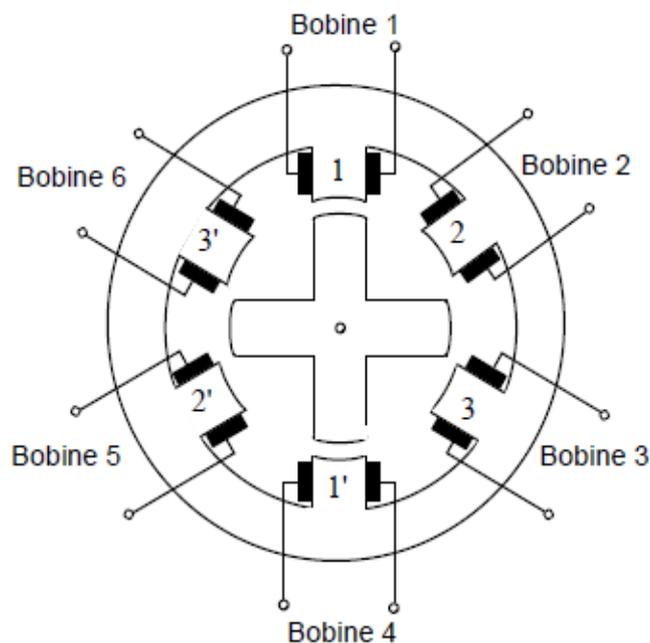
3.3.1.2 Les moteurs rotatifs

3.3.1.2.1. Les moteurs pas à pas à réluctance variable rotatifs

La rotation d'un moteur à réluctance variable est engendrée par la réaction entre un champ magnétique et un bout métallique, qui conduit à l'alignement du bout métallique avec la bobine.

Ce type de moteur est constitué d'une partie appelée rotor (le bout métallique), et d'une partie dite statorique (qui contient le bobinage).

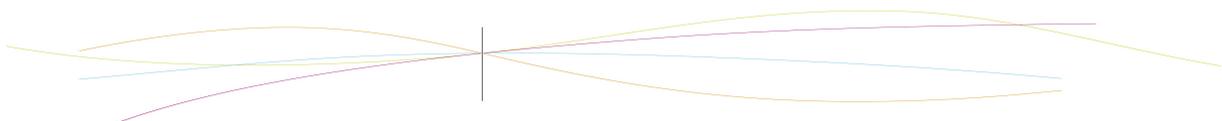
C'est en fait le même système que les moteurs pas à pas à réluctance variable linéaires mais que l'on aurait « enroulé ».



Moteur pas à pas à réluctance variable rotatif

3.3.1.2.2. Les moteurs pas à pas polarisés rotatifs

Les moteurs pas à pas polarisés rotatifs sont constitués d'un aimant à la place du rotor métallique, qui s'aligne naturellement sur l'axe magnétique du plot alimenté. Le fait de mettre sous tension la bobine Beta à la place de Alpha va provoquer le déplacement du rotor.



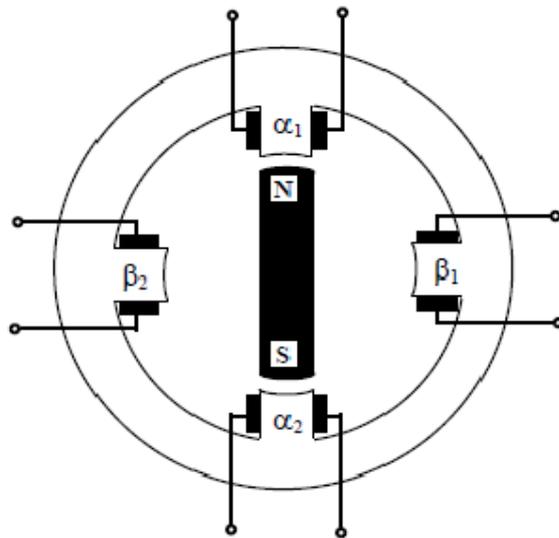
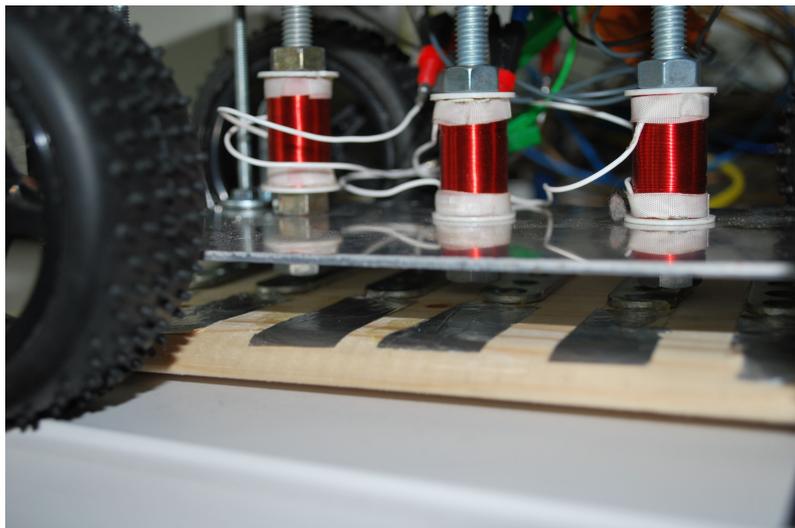


Illustration 2: Moteur pas à pas polarisé rotatif

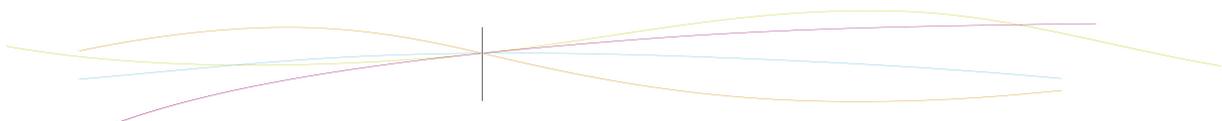
3.3.2. Mise en pratique : Maquette

L'objectif de la maquette réalisée est d'illustrer le principe de propulsion électromagnétique à un coût moindre et sur un modèle adaptable à grande échelle. Parmi les modèles déjà existants, on retrouve des maquettes utilisant de l'hélium liquide pour rendre un métal supraconducteur (voir http://www.dailymotion.com/video/x14cfr_train-a-levitation-magnetique_creation).

Notre modèle de propulsion s'inspire d'un autre type de modèle déjà existant qui utilise la réluctance variable (<http://www.baghli.com/dspic.php#MRVlin>).

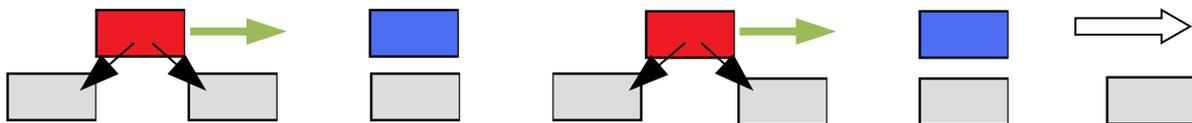


Le champ magnétique créé par la bobine permet grâce au noyau de fer de cette même bobine (une simple vis) d'être attiré vers la plaque métallique du rail afin de déplacer la



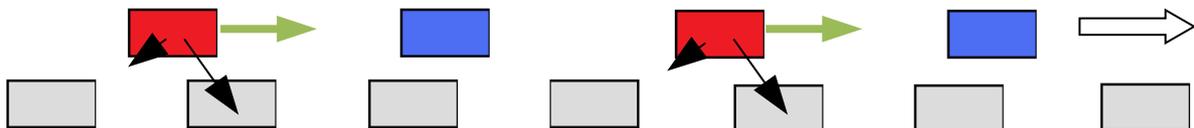
maquette, mais la répulsion est impossible. Ainsi pour déplacer la maquette, on alterne l'attraction entre deux couples de bobines : lorsque les têtes de vis aimantées sont localisées juste au dessus des plaques, le couple de bobines n'est plus alimenté et c'est un autre couple qui prend la relève. L'objectif est de fournir une force en continu qui compense toutes les forces de frottements, afin que la maquette accélère ou garde sa vitesse constante. Sur certaines maquettes, ce sont des aimants qui remplacent les plaques de fer, on a donc une inversion du courant dans les bobines plutôt qu'un arrêt du courant, ce qui permet une répulsion additionnelle (Cf : moteur pas à pas polarisé). Sur d'autres, on travaille avec trois bobines : leur géométrie fait en sorte qu'il y a toujours une bobine en action. Ce modèle peut donc avancer sans impulsion préalable (il n'a pas une position indéfinie comme sur notre maquette) mais il nécessite une bobine supplémentaire (sur le notre, on a deux couples de bobines en action simultanée : donc gain de force mais perte de précision).

Sur ce schéma, on voit la position des bobines à la commutation : les bobines en rouge sont alimentées. Comme elles sont à égale distance des plaquettes de fer, les forces se compensent. Mais le train progresse (par exemple vers la droite) par inertie (c'est pour cela que ce modèle a besoin d'une impulsion).

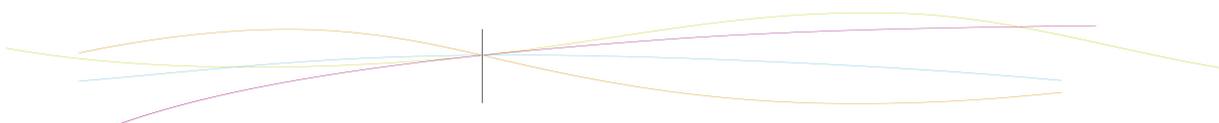
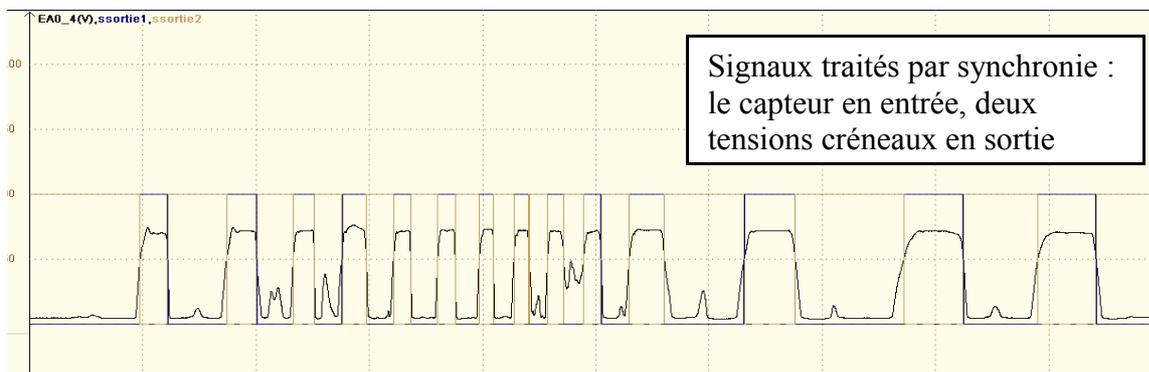


Force d'inertie : 

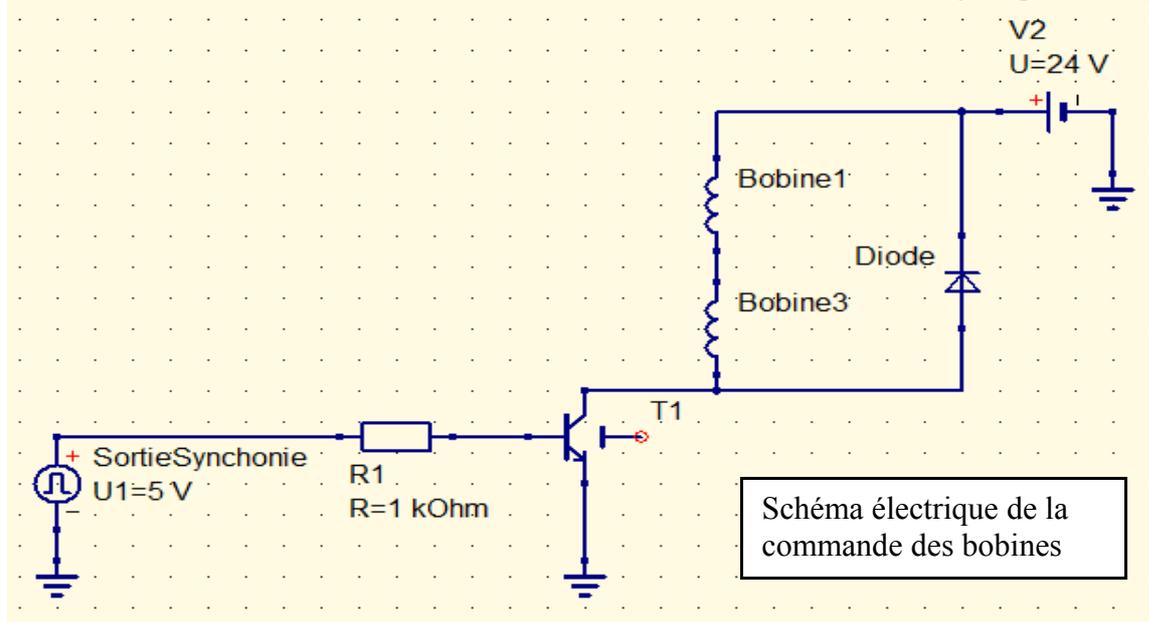
Sur ce schéma, le train a progressé et on voit clairement que la force est déséquilibrée et va entraîner le train vers la droite. Lorsque les positions sont de nouveau au point d'équilibre, il y a une nouvelle commutation.



L'alternance de l'alimentation des bobines est détectée grâce à deux diodes (une émettrice et une réceptrice) et à une alternance de bandes l'aluminium réfléchissant. La DEL émet une onde qui est plus ou moins réfléchiée par la piste. Le signal est récupéré par le logiciel Synchronie. C'est un signal de forme rectangulaire d'amplitude 4 Volts en moyenne.



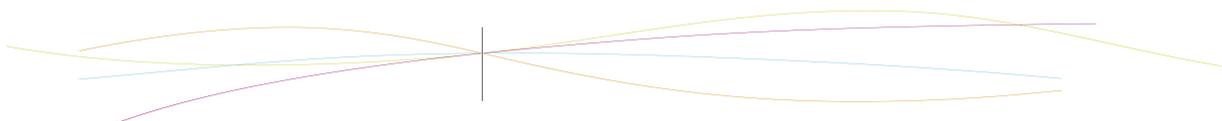
Ce logiciel nous permet grâce à deux sorties analogiques d'envoyer une tension de commande alternativement sur deux transistors en fonction de la tension renvoyée par le capteur.

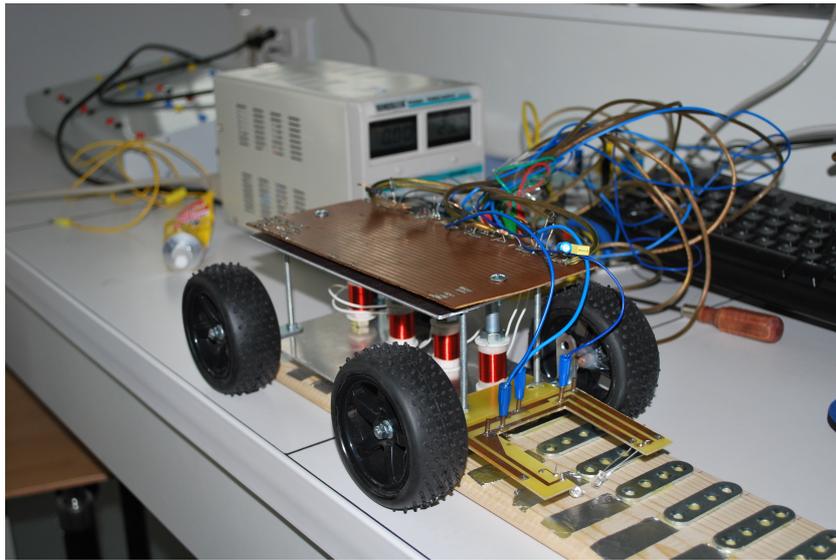


Par exemple si la tension d'entrée est supérieure à 2 Volts, alors la sortie 1 uniquement est alimentée, donc le transistor 1 est passant et le transistor 2 est bloqué. Ces deux transistors permettent ou non l'alimentation en puissance des deux couples de bobines, ce qui permet la création du champ magnétique et donc l'attraction du noyau en fer alors aimanté de la bobine avec les plaques de métal sur la piste. Tout le circuit électrique a été récupéré sur un autre projet et adapté à nos besoins.

Dans l'état actuel des choses, le système de détection et de commutation des bobines est efficace. Cependant, la propulsion ne fonctionne pas pour plusieurs raisons : premièrement, les bobines récupérées sont très mal adaptées et produisent très peu de force (les relais commandés au préalable n'ayant pas été reçus à temps). Ensuite, même si la traction était suffisante, le rail se collerait aux têtes de vis d'une part parce que le rail lui-même se soulève (il faudrait qu'il soit vissé ou collé à une surface), mais aussi car les roues trop molles s'écrasent sous la force (il faudrait opter pour des roues plus dures). Enfin, d'après les premières observations, il semblerait que le système à alternance de trois bobines décrit précédemment serait plus facile à mettre en œuvre dans notre cas malgré la perte de force pour des questions de précision.

Afin d'améliorer encore cette maquette, il existe plusieurs choix possibles : par exemple, on pourrait adapter les opérations que fait le logiciel Synchronie sur un circuit qui serait intégré à la maquette et ainsi limiter le nombre de fils entre la maquette et l'environnement extérieur. On pourrait également configurer une vitesse constante de déplacement en mesurant le temps que met le capteur à détecter une bande d'aluminium entière et en stoppant l'alimentation des bobines si ce temps est trop court (par exemple en mesurant la charge d'un condensateur). Si on réussissait à coupler ce système de propulsion avec un système de lévitation, on pourrait faire de très grosses économies d'énergie dans la propulsion puisque les frottements seraient drastiquement diminués. Enfin, il faudrait insérer un système de frein à la maquette, ce qui consisterait à inverser l'ordre d'alimentation des bobines jusqu'à l'arrêt de la maquette.



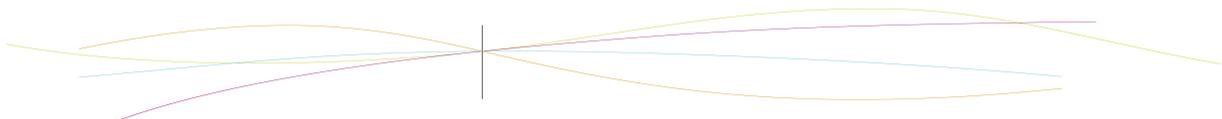


Maquette propulsion

4. CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Ce projet nous a permis d'acquérir des connaissances sur la propulsion et lévitation magnétique. En effet, ces phénomènes font l'objet de nombreuses recherches depuis quelques années de la part des scientifiques. Nous avons aussi acquis quelques connaissances théoriques en nous intéressant à d'autres projets portant sur les deux phénomènes.

Nous nous sommes rendus compte que l'absence de solides bases dans ces domaines de compétences a rendu difficile la réalisation de ce projet scientifique et expérimental. En effet, nous n'avons que « bricoler » et pas réellement réaliser un travail de conception préalable. Cependant, pour la réalisation de la maquette propulsion, nous avons tout de même réussi à réaliser le système de détection et de commutation des bobines même si l'objectif final de la maquette n'a pas été atteint. Notre objectif était de faire avancer la partie mobile de la maquette propulsion.



5. BIBLIOGRAPHIE

Sites :

<http://tpetrainmagnetique.free.fr/?p=conclu>

<http://rodeon.voila.net/levitation.htm>

<http://newgentransp.e-monsite.com/rubrique,train-a-levitation-magnetique,1125686.html>

<http://energiesdedemain.e-monsite.com/rubrique,la-levitation-magnetique,585733.html>

<http://www.ebooks-gratuit.org/livres/pdf/levitation-magnetique>

<http://www.mesures.com/archives/774solmoteurlineaire.pdf>

http://fr.wikipedia.org/wiki/Propulsion_magn%C3%A9tique

<http://tpetrainmagnetique.free.fr/?p=accel>

Moteur réluctance rotative :

http://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_pas_%C3%A0_pas

http://starpsi.free.fr/TIPE/ressources_tipe/Bo%EeEte%20E0%20id%E9e/Moteurs%20E9lectriques/Moteur%20E9lectrique%20E0%20double%20saillance.pdf

<http://www.thierry-lequeu.fr/data/THESE102.HTM>

http://hal.archives-ouvertes.fr/docs/00/24/52/23/PDF/ajp-rphysap_1984_19_7_533_0.pdf

<http://www.green.uhp-nancy.fr/?>

[Production_Scientifique:Avant_Octobre_2008:Th%26egrave%3Bses:Oct_2003_-_Sept_2006](http://www.green.uhp-nancy.fr/?Production_Scientifique:Avant_Octobre_2008:Th%26egrave%3Bses:Oct_2003_-_Sept_2006)

<http://l2ep.univ-lille1.fr/fileupload/file/theses/ElAmraoui.pdf>

<http://l2ep.univ-lille1.fr/fileupload/file/theses/ElAmraoui.pdf>

Définition :

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Stator>

<http://l2ep.univ-lille1.fr/fileupload/file/theses/ElAmraoui.pdf>

<http://www.vgies.com/downloads/Cours1.pdf>

<http://www.chireux.fr/mp/cours/electromecanique/Chap2.pdf>

<http://www.chireux.fr/mp/cours/electromecanique/Chap7.pdf>

