

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE MOSTEFA BEN BOULAID BATNA -2-

Faculté de Technologie

Département : Electrotechnique



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de

LICENCE EN ELECTROTECHNIQUE

Option : Électromécanique

Thème:

Les Trains à lévitation magnétique

Supervisée par :
Pr.S.BOUKHETTACHE

réaliser par :

- | | |
|---------------------------|-------|
| - BEKHOUCHE Sami | Gr:01 |
| - BENKORICHI Kaleb Eddine | Gr:02 |
| - AZEDINE Abderrezzaq | Gr:01 |
| - HAREK Abdelbasset | Gr:05 |
| - GUENDOUI Abd Elhak | Gr:05 |

Année universitaire :

2018/2019

Remerciements

*Au terme de ce travail, nous tiens à exprimer os
vifs remerciements : A dieu le tout puissant pour
la volonté, la santé et la patience qu'il nous a
données durant toutes ces années d'étude.*

*Pr. S. BOUKHETTACHE. Pour avoir accepté
de nos guider dans nos travaux et de nos avoir
accordé leur attention leur confiance, Leur patience.
Leur conseil et surtout pour leur gentillesse.*

Sommaire

Introduction générale

Chap I : Intérêt de la lévitation magnétique

I.1.Introduction

I.2: Avantages du TLM

I.3: Comparaison entre le TLM et le TGV

I.3.1 : Vitesse et accélération

I.3.2: Consommation d'énergie

I.3.3 : Motorisation

I.3.4 : Prix d'une rame et des rails

I.3.5 : Pente

I.3.6 : L'ascension

I.3.7 : Champ magnétique

I.3.8 : Le bruit

I.3.9 : La pollution

Chap II : Principe de fonctionnement d'un train à Lévitation magnétique

II.1: La lévitation

II.1.1 : Définition

II.1.2: Les trains à lévitation magnétique existants

II.1.2-1: Train à lévitation électromagnétique (EMS)

II.1.2.2:Train à lévitation électrodynamique (EDS)

II.1.2.2. 1: Historique de la supraconductivité

II.1.2.2.2 :Le principe

II.1.2.2.3 :L'effet Meissner

II.1.2.2.4:Paramètres permettant à un matériau d'être ou non supraconducteur

II.1.2.2.5:Application au train

II.2. Propulsion

II.2.1: Explication du principe

II.2.2: Transforme des signaux électriques en une action mécanique

II.2.3: Moteurs linéaires

II.2.3.1: Moteurs pas à pas polarisés et linéaires

II.2.3.2 :Moteurs pas à pas à réluctance variable linéaire.

II.2.4: Les moteurs rotatifs

II.2.4.1: Les moteurs pas à pas à réluctance variable rotatifs

II.2.4.2: Les moteurs pas à pas polarisés rotatifs

II.2.5:Mise en pratique : Maquette

II.2.6: La propulsion du véhicule

II.2.7: Principe de propulsion en Maglev :

II.2.8: Principe de propulsion en Transrapid

II.3. Le guidage

II.3.1 : Guidage pour la sustentation magnétique

II.3.2:Le guidage latéral

II.3.3: Voie de guidage

II.3.4: Les faisceaux

II.3.5:L'installation des panneaux

II.4. Freinage

Conclusion

Introduction générale

Depuis le tout premier chemin de fer, peu de chose ont changées en termes de concepts techniques de base : les trains sont toujours soutenus, guidés et propulsés par les roues.

Mais un nouveau système de trains pourrait bien révolutionner les transports ferroviaires : ce sont les trains à lévitation magnétique, qui sont soutenus, propulsés et guidés par la seule force électromagnétique.

Ce nouveau concept présente de nombreux avantages grâce à sa technologie révolutionnaire dite de « non-contact ». Mais concrètement, que peuvent apporter les trains magnétique dans le domaine ferroviaire ?

Il existe deux technologies de trains à lévitation magnétique : la lévitation par répulsion et la lévitation par attraction.

Deux pays, ont réalisé cette technologie de lévitation magnétique assez proche : le Japon avec le Maglev à sustentation (lévitation) électrodynamique (EDS) et l'Allemagne avec son Transrapid à sustentation magnétique (EMS) [1].

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 [2].

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 [2].

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

Introduction

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.

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.

- **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 [2].

La vitesse physique de 603 km/h, atteinte par le Maglev le **21 avril 2015** au Japon [3].

A propos du mémoire nous avons essayer de retracer le principe de fonctionnement d'un train à lévitation magnétique à base des supraconducteurs et les électroaimants dans deux chapitres distincts.

A travers le premier chapitre nous avons traité l'intérêt de la lévitation magnétique avec une comparaison entre le train à lévitation magnétique (TLM) et le train à grande vitesse (TGV).

Concernant le deuxième chapitre nous avons abordé le principe de fonctionnement de ce train à base des supraconducteurs et des électroaimants de la lévitation, propulsion, guidage et freinage.

Le mémoire se termine par une conclusion dans laquelle un résumé du travail réalisé est présenté ainsi que les horizons et le futur de la lévitation magnétique.

Chapitre I

Intérêt de la lévitation magnétique

Chapitre I

I.1. Introduction

Le **Maglev** est la première innovation majeure dans la technologie de la construction ferroviaire depuis la première industrie ferroviaire après **TGV**, le premier système ferroviaire à avancer sans nécessiter de roues ni d'axes et donc sans friction.

En d'autres termes, la technique mécanique adoptée par **TGV** est remplacée par la technologie électronique de **Maglev** ou nous comparerons **TGV** avec le **Maglev** avec les avantages et les inconvénients des deux trains.

I.2. Avantages du TLM :

Le Maglev est important pour quatre raisons:

1. Le Maglev est meilleur pour transporter les personnes et le fret que les modes existants. Il est moins cher, non engorgé et a une bien meilleure espérance de vie. Un rail de guidage de Maglev peut servir à transporter plusieurs dizaines de milliers de passagers par jour ainsi que des milliers de semi-remorques et d'automobiles. Les coûts d'utilisation du Maglev ne seront que de 0,03 dollar par passager par kilomètre et 0,07s dollar par tonne par kilomètre, comparé aux 0,15 dollar par passager par kilomètre pour les avions, et 0,30 dollar par tonnes par kilomètre pour les trajets interurbains en camions. La longévité des rails de guidage du Maglev seront de cinquante ans ou davantage avec une maintenance minimale, car il n'y a pas de contact physique ni d'usure et parce que la charge des véhicules est répartie uniformément au lieu d'être concentrée dans les roues. Pour la même raison, les Maglevs auront une plus grande durée de vie que les voitures, les camions ou les avions.
2. Le Maglev a un bon rendement en termes énergétiques. Contrairement aux automobiles, aux camions et aux avions, le Maglev ne consomme pas de pétrole mais de l'électricité qui peut être produite par le charbon, le nucléaire, les barrages, la fusion, le vent ou même les centrales solaires (la source la plus efficace étant bien sûr le nucléaire). A 480 km/h à l'air libre, le Maglev consomme 0,25 mégajoule par passager par kilomètre, comparé aux 2,5 mégajoules pour une voiture consommant 12 l d'essence aux 100 km et transportant 1,8 passager (la moyenne nationale) à 90km/h. A 240 km/h à l'air libre, le Maglev consomme 0,06 mégajoule par passager par kilomètre, ce qui représente que 2 % de la consommation d'une voiture roulant à 90 km/h. Dans des tunnels sous vide, comme ceux proposés pour le Swissmetro, la consommation d'énergie diminuerait jusqu'à l'équivalent de 0,023 l aux 100 km.
3. Les véhicules du Maglev n'émettent aucune pollution. Lorsqu'ils consomment l'électricité, ils n'émettent aucune molécule de dioxyde de carbone. Même si l'on utilise l'électricité produite à partir de charbon ou de gaz naturel, les émissions de CO₂ résultantes sont bien moindres que celles engendrées par les automobiles, les camions et les avions, car le Maglev a un très bon rendement énergétique. Le Maglev présente d'autres avantages environnementaux. Il est bien plus silencieux que les voitures, les camions et les avions, ce qui est particulièrement important pour les zones urbaines et suburbaines. De plus, comme il utilise des rails de guidage formés de poutres étroites et

Chapitre I

surélevées, son impact environnemental est plus faible que celui des autoroutes, des aéroports ou des voies de chemin de fer.

4. Le Maglev a de nombreux avantages sur les véhicules roulant sur routes, sur les trains et les avions. La distance séparant les Maglevs sur un rail de guidage ainsi que leur vitesse sont automatiquement contrôlées et maintenues grâce à la fréquence de la puissance électrique alimentant le rail de guidage. Il n'y a pas de possibilité de collision entre les véhicules sur le rail de guidage. De plus, comme les rails de guidage sont élevés, il n'y a pas de possibilité de collision avec des automobiles ou des camions sur des passages à niveaux [4].

I.3. Comparaison entre le TLM et le TGV :

I.3.1. Vitesse et accélération

Les Trains à lévitation atteints des vitesses très élevées et gagne du temps de trajet par rapport à d'autres trains. En effet, la vitesse de croisière des trains à lévitation est d'environ 430 km/h et sa vitesse de pointe maximale de 603Km/h alors que pour le TGV, qui est un train performant, elle est de 570km/h. De plus, et en dehors des vitesses très élevées, la technologie du train à lévitation permet d'avoir une meilleure capacité de relance et d'accélération, et ainsi de franchir sans problème des pentes fortes.

Exemples :

TGV

On peut lire dans une documentation relative à une rame de TGV que celle-ci a une masse $M = 380t$ à vide et $M = 525t$ en charge, une longueur $L = 200\text{ m}$, une vitesse de croisière en palier (mouvement uniforme horizontal) $v = 300\text{ km/h}$; alimentation $25kV-50Hz$; capacité : **516 places**.

On considère que le train roule sur un sol horizontal.

Sachant que le train met 7 minutes pour passer de l'arrêt à sa vitesse de croisière, quelle est son accélération supposée constante, pendant cette phase ?

La puissance électrique consommée étant de **2000 kW** en palier, les pertes thermiques et mécaniques dans les motrices étant estimées à 10 % de la puissance absorbée, en déduire l'intensité des forces de frottements opposées à l'avancement du train lorsqu'il roule à **300 km/h** en palier.

Accélération $a = \Delta v / \Delta t$ avec Δv en **m/s** et Δt en seconde.

$$\Delta v = 300/3,6 = 83,33\text{m/s}; \Delta t = 7 \times 60 = 420\text{s}; a = 83,33/420 = 0.198\text{m/s}^2.$$

Puissance (en valeur absolue) des frottements : **200 kW**

Puissance d'une force = vecteur vitesse scalaire vecteur force ($P = v \cdot F$)

D'où

$$200 = 83,33F \Rightarrow F = 200/83,33 = 2,4\text{kN}.$$

TLM

On peut lire dans une documentation relative à une rame de TLM que celle-ci a une masse $M = 380\text{ t}$ à vide et 425 t en charge, une longueur $L=200\text{ m}$, une vitesse de croisière en palier (mouvement uniforme horizontal) $v= 430\text{ km/h}$; alimentation **25kV-50Hz** ; capacité : **820 places**. On considère que le train roule sur un sol horizontal.

Chapitre I

Sachant que le train met 5 minutes pour passer de l'arrêt à sa vitesse de croisière, quelle est son accélération supposée constante, pendant cette phase ?

La puissance électrique consommée étant de **1000 kW** en palier, les pertes thermiques et mécaniques dans les motrices étant estimées à **10 %** de la puissance absorbée, en déduire l'intensité des forces de frottements opposées à l'avancement du train lorsqu'il roule à 430 km/h en palier.

Accélération $a = \Delta v / \Delta t$ avec Δv en m/s et Δt en seconde.

$\Delta v = 430 / 3,6 = 119.444 \text{ m/s}$; $\Delta t = 5 * 60 = 420 \text{ s}$; $a = 119.444 / 420 = 0,284 \text{ m/s}^2$.

Puissance (en valeur absolue) des frottements : **100 kW**

Puissance d'une force = vecteur vitesse scalaire * vecteur force

D'où $200 = v f$ soit $f = 100 / 119.444 = 0.837 \text{ kN}$.

$a(\text{TLM})/a(\text{TGV}) = 0.398 / 0.198 = 2,01$

donc le TLM accélère deux fois plus vite que le TGV ce qui lui confère un net avantage dans l'aspect vitesse.

$f(\text{TGV})/F(\text{TLM}) = 2.4 / 0.837 = 2.8$

donc il y a environs trois fois plus de forces de frottements entre le TGV, les rails et l'air qu'entre le TLM et l'air puisque le train n'est pas en contact avec les rails grâce a la lévitation [5].

I.3.2. Consommation d'énergie

La consommation énergétique de ces trains est assez faible. En effet, le TGV consomme 83 watts par personne et par kilomètre tandis qu'un train à lévitation magnétique consomme 47 watts par personne et par kilomètre.

De plus, contrairement aux trains actuels, les voies ne sont pas toutes électrifiées, seule la portion de voie où se situe le train sera électrifiée et cela permettra donc une plus grande économie sur les dépenses énergétique.

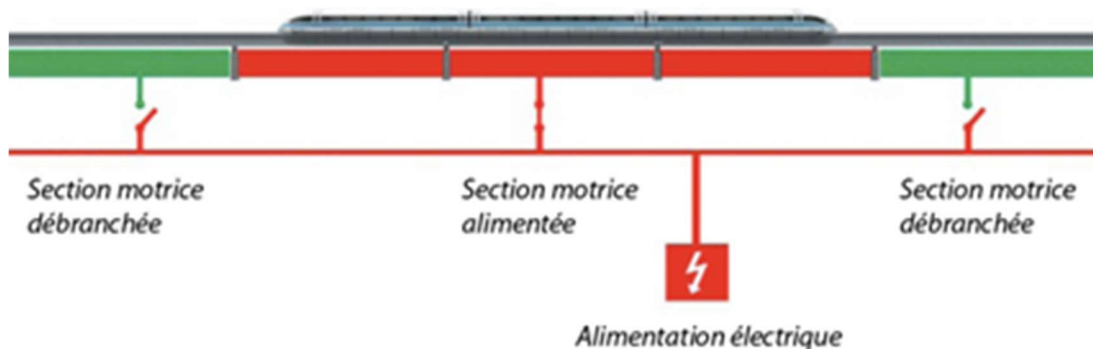


Figure I.1 : Schéma d'alimentation

Pour ce qui est de la faible consommation d'un TLM, elle n'est pas trop étonnante puisqu'une fois que le train a atteint sa vitesse de croisière, il s'agit juste de compenser les frottements or, par définition, il n'y a pas de frottements avec le sol mais seulement un déplacement d'air [5].

Exemple pour un TLM :

On peut estimer très grossièrement les pertes en imaginant un alignement de cubes

Chapitre I

d'air placés devant le train. Celui-ci doit effectuer un travail pour les soulever à hauteur du train pour se créer un passage. (Certes, le cube d'air est ensuite redescendu derrière le train mais, en première approche, on peut considérer que ce travail ne peut être récupéré). Connaissant le gabarit (largeur hauteur) de la section frontale du train et sa vitesse, et sachant que 1 m^3 d'air a une masse de **1.29 kg**, on peut estimer le travail.

Supposons que la face avant du train a une largeur de 3m et une hauteur de 2m, elle présente une section frontale de 6 m^2 . Supposons que le train roule à 360 km/h ou 100 m/s. Chaque seconde, il doit déplacer un volume de $6\text{ m}^2 \cdot 100\text{ m} = 600\text{ m}^3$ ou 774 kg

Cette masse doit être élevée à une hauteur de 2m pour laisser passer le train, ce qui représente un travail :

$$w = m \times g \times h = 774 \times 9.81 \times 2 = 15185\text{ J}$$

Comme ce travail est exécuté en une seconde, la puissance nécessaire est de **15 kW**.

Comme le train a parcouru **100 m** ou **0.1 km** pendant ce temps, la puissance brute est de l'ordre de **150 kW/km**.

Si la rame accepte 500 passagers la puissance spécifique tombe à 300 W/km/personne.

En jouant sur une bonne aérodynamique (qui permet précisément de récupérer le travail fourni), avec un coefficient de traînée

$C_x = 0,15$, on arriverait à réduire la dépense à $0,15 \cdot 300 = 45\text{ kW/km/personne}$.

Exemple pour un TGV :

Supposons que le train avance à **360 Km/h (100 m/s)** et consomme donc 83kW/km/personne. En jouant sur une bonne aérodynamique (qui permet précisément de récupérer le travail fourni), avec un coefficient de traînée $C_x = 0,15$, on arriverait à réduire la dépense à $0,15 \cdot x = 83\text{ kW/km/personne}$.

Donc : $x = 83/0.15 = 553\text{ W/Km/personne}$

Donc : Si la rame accepte **500** passagers la puissance spécifique est de 553 W/km/personne.

Sa puissance brute est de l'ordre de **276 KW/Km** comme le train a parcouru 100 m ou 0.1 km en une seconde la puissance nécessaire est de **27.6KW** $P(TGV)/P(TLM) = 27.6/15 = 1.84$

On remarque donc dans cette comparaison que le TGV consomme environs deux fois plus d'énergie que le TLM [5].

I.3.3. Motorisation :

Les trains à lévitation magnétique utilisent le même type de moteur électrique : moteur linéaire synchrone, tandis que les trains classiques (TGV, RER...) utilisent un moteur asynchrone. Le moteur synchrone est constitué d'un rotor (inducteur), et d'un stator (induit). Dans l'application des trains à lévitation magnétique : le rotor est un électroaimant parcouru par un courant d'excitation qui va créer un champ magnétique. Le stator est la pièce fixe dans laquelle sont placés les électroaimants et possède donc le même nombre de pôles que le rotor. Le stator est alimenté par des courants alternatifs triphasés pour alimenter le rotor qui va alors se comporter comme un aimant libre de tourner par rapport à son axe.

Chapitre I

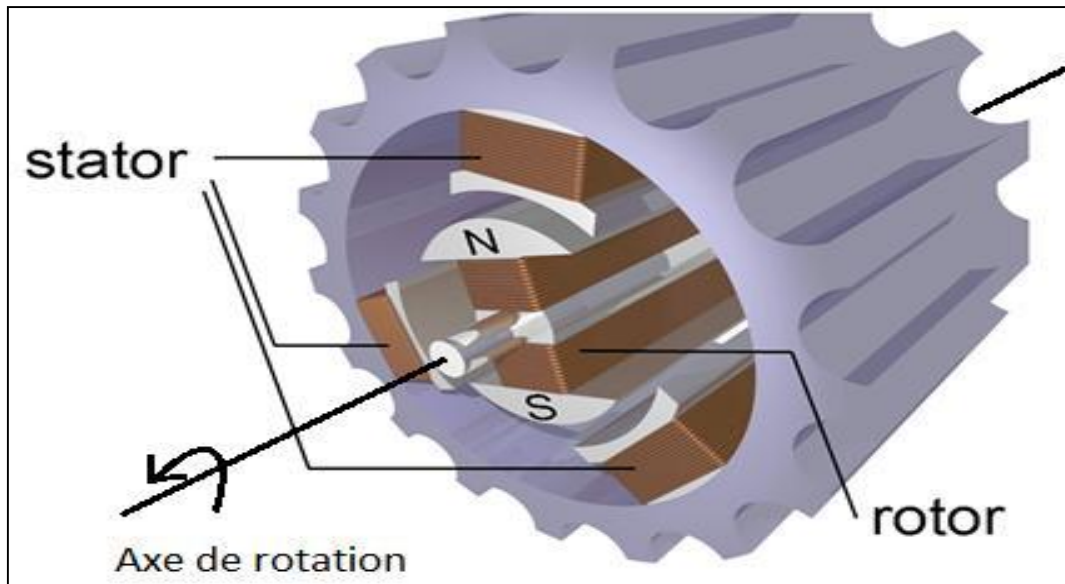


Figure I.2 : Moteur Asynchrone

Le moteur asynchrone est très proche par son fonctionnement du moteur synchrone. La vitesse de rotation du rotor n'est, contrairement au moteur synchrone, pas proportionnelle à la vitesse du champ tournant créé par le stator. Il y a donc un déphasage, aussi appelé "glissement" entre rotor et stator, d'où le terme "asynchrone". On note également, que le moteur asynchrone est constitué d'un élément particulier qu'on appelle "une cage d'écureuil". Cette cage est un bobinage supplémentaire aux trois bobinages statoriques, qui est balayé par le champ magnétique tournant (donc du stator). Des courants de Foucault sont alors induits dans les anneaux de la cage. Des forces de Laplace sont alors créées et agissent sur le rotor ; le rotor est alors animé d'un mouvement de rotation. Le rotor est libre (aucune force ne s'applique sur lui) lorsque le moteur est à l'arrêt.

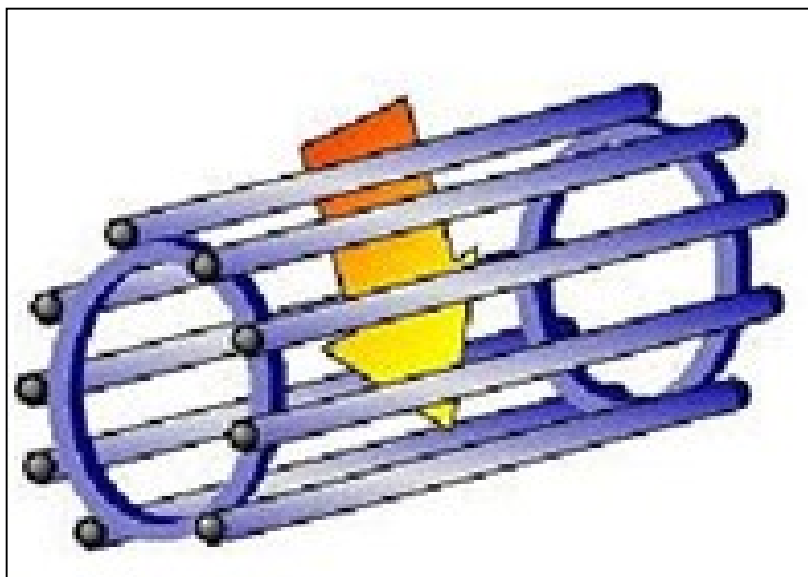


Figure I.3 : Schéma d'une cage à écureuil (le rotor est situé au centre)

Ces deux caractéristiques permettent de différencier le moteur asynchrone du moteur synchrone.

Chapitre I

Le moteur synchrone dispose d'une gestion de vitesse simplifiée car il est très facile de contrôler la vitesse en contrôlant le champ tournant, étant donné que la vitesse du rotor est égale à celle du champ tournant ; et d'un meilleur rendement car il n'y a pas de déphasage pour les mêmes raisons.

De plus un fort couple à l'arrêt permet une meilleure stabilité et un meilleur positionnement du train. En effet, le rotor constitué d'électroaimants est bloqué par magnétisme lorsque le train est à l'arrêt, tandis que le rotor du moteur asynchrone reste libre. Le TLM ne dispose donc pas de freins mécaniques.

Cependant ce dernier paramètre constitue un inconvénient pour le moteur synchrone sur le moteur asynchrone. Le moteur synchrone est difficile à démarrer, les champs tournants créés par le stator n'est pas assez puissant pour synchroniser le rotor. Pour résoudre ce problème, on peut utiliser le système de la cage d'écureuil. On démarre donc le moteur en asynchrone afin d'atteindre la vitesse suffisante du stator, la synchronisation entre le stator et le rotor a ensuite lieu.

Le moteur synchrone dispose donc de nombreux avantages, malgré un démarrage difficile, en ce qui concerne la propulsion et le guidage du train à lévitation magnétique, sans force de frottements. En revanche, le moteur asynchrone reste le plus performant en présence de forces de frottements [5].

I.2.4 : Prix d'une rame et des rails :

Une rame de TGV coûte environ 15 millions d'euros alors qu'une rame de train à lévitation magnétique coûte moins cher car il n'y a pas de moteur sur la rame (nous n'avons pas trouvé de prix).

Les rails des trains à sustentation sont plus chers car ils nécessitent d'être refondus à une température proche du zéro absolu (environ égale à $-269\text{ }^{\circ}\text{C}$) pour utiliser la supraconductivité.

Pour ce faire, on utilise des substances spéciales pour fabriquer les aimants qui les composent (niobium et titane) et on se sert de l'hélium liquide pour les refroidir. Et bien entendu, tout cela a un prix élevé comparé aux rails classiques [6].

I.2.5. Pente

Le **maglev** permet de gravir des pentes de 10 % alors que le TGV ne peut pas franchir des montées de plus de 3-4 % (selon les modèles)[6].

I.2.6 : L'ascension :

De plus, grâce à la technologie de non contact et à son faible poids, le Transrapid remporte la manche. Cet avantage dans la montagne est loin d'être négligeable au moment de calculer les tracés des futures voies [7].

Chapitre I

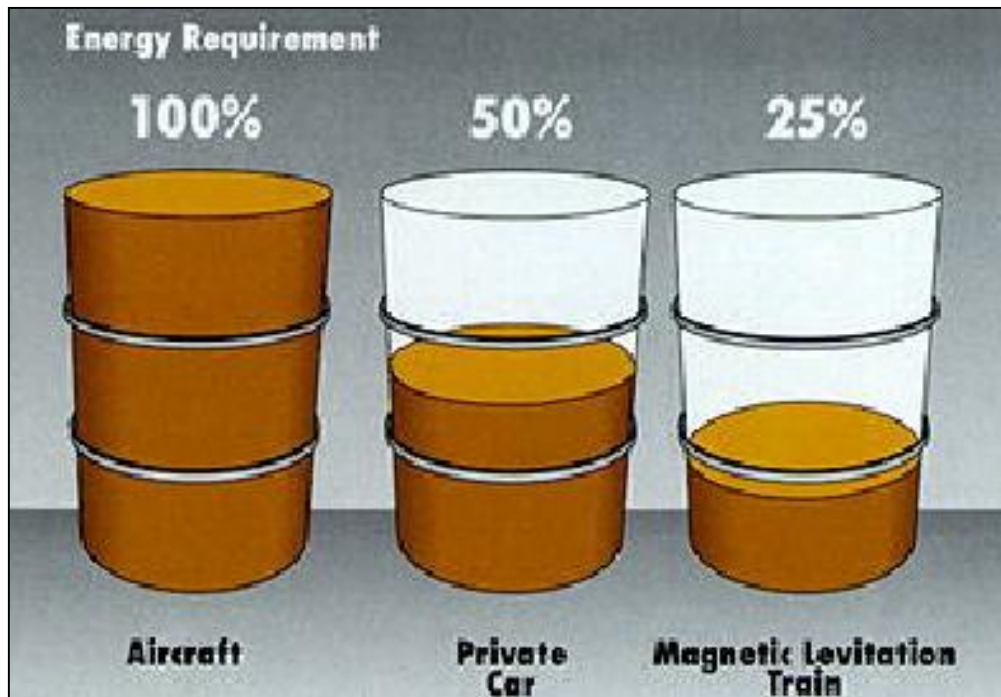


Figure I.4 : Besoins en énergie

I.2.7 : Champ magnétique:

Deux fois plus grand que celui créé par la Terre mais 5 fois plus petit que celui créé par la télévision. Les champs magnétiques et les ondes qui nous entourent sont un sujet de plus en plus inquiétant en raison du développement des nouvelles technologies. Ce graphique nous rassure en nous montrant à quel point le champ magnétique produit par le Transrapid est faible par rapport à d'autres objets usuels. Il est toutefois important de souligner qu'il n'en est pas de même pour le Maglev japonais dont le champ magnétique peut représenter un danger [7].

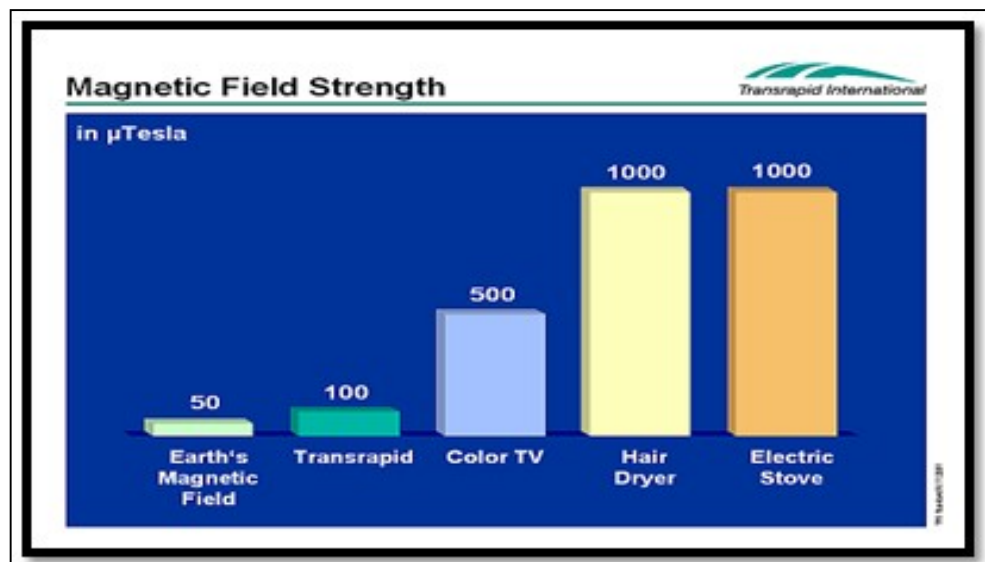


Figure I.5: Intensité du champ magnétique

I.2.8 : Le bruit :

On remarque ici que le Transrapid est nettement moins bruyant que tout ses concurrents quelle que soit sa vitesse (Le Transrapid peut aussi servir de train urbain). Cet avantage réduit aussi les coûts de structures antibruit [7].

Chapitre I

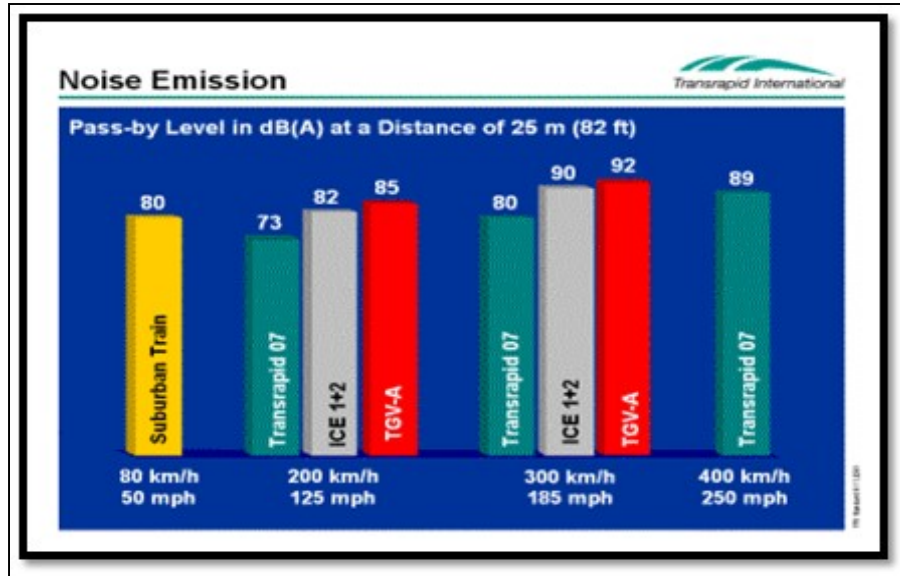


Figure I.6: Émissions sonores

I.2.9. La pollution

La pollution étant directement liée à la consommation d'énergie, il est normal que le Transrapid ait ici aussi l'avantage sur l'I.C.E qui était déjà très bien placé en la matière par rapport aux autres moyens de transport[7].

Chapitre II

Principe de fonctionnement d'un train à lévitation magnétique

Chapitre II

II.1. Lévitation

II.1.1. Définition

Si l'on sort du contexte scientifique, la lévitation est une **élévation** sans appui, ni intervention matérielle ou physique d'un corps au-dessus du sol. Le seul point commun entre cette définition et celle de la lévitation magnétique est l'« **élévation** ». Ici, nous traiterons donc du phénomène scientifique.

En physique, la lévitation est une technique permettant de soustraire un objet à l'action de la **pesanteur**. Pour cela, on cherche à compenser le poids de l'objet par une force créée par l'intermédiaire de différents procédés[8].

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

- la suspension électromagnétique – attraction magnétique de solénoïdes (Transrapid)
- la suspension électrodynamique – répulsion par supraconductivité (Maglev).[2]

II.1.2. trains à lévitation magnétique existants

Il existe deux types de train à sustentation magnétique dont la manière de léviter est différente. Nous avons d'un côté le transrapid et de l'autre le Maglev. Le Transrapid est d'abord un monorail qui lévite par attraction à l'aide d'électroaimants. Contrairement au Maglev, qui circule en lévitant par répulsion et attraction dans une voie en "U" à l'aide d'électroaimants supraconducteurs [9].

II.1.2.1: Train à lévitation électromagnétique (EMS)

Ce type de lévitation est présenté par le transrapid allemand

Le Transrapid est un train se déplaçant sur un unique rail grâce à un système de lévitation électromagnétique. Ce train allemand a sa piste d'essai à Lathen en Allemagne depuis 1987. En 2004, une ligne à usage commercial, a été construite à Shanghai puis mise en circulation. Cette ligne appelée Transrapid de Shanghai ou Maglev est la première ligne à sustentation magnétique commerciale du monde[12].

La technologie du Transrapid est simple : un champ électromagnétique circule entre le véhicule et le monorail permettant à celui-là de « flotter ».

Chapitre II



Figure II.1. Train à lévitation électromagnétique (EMS)

Pour léviter au dessus du rail, le transrapid utilise des électroaimants. Seize électroaimants sont placés dans chaque wagon, juste sous les bras du rail. Le champ magnétique qu'ils créent entre en interaction avec le champ magnétique des aimants du rail, créant ainsi une force d'attraction entre le rail et la partie inférieure du train[12].

Un électroaimant est composé d'un circuit électrique et d'un circuit dit magnétique. Le circuit électrique est un enroulement de fils conducteur et agit exactement comme une bobine. Parcouru par un courant, il va créer un champ magnétique similaire à celui des aimants droits. Les électroaimants sont souvent composés d'un noyau ferromagnétique qui a pour particularité de guider et multiplier par dix, voir par cent, le champ magnétique créé par le bobinage [12].

Le champ magnétique crée par des électroaimants en leur centre, avec un noyau ferromagnétique a pour expression :

$$B_{\text{à l'intérieur}} = K \cdot \mu_0 \cdot \frac{N}{l} I$$

k, la perméabilité relative du noyau ferromagnétique. C'est cette constante qui montre à quel point rajouter un noyau ferromagnétique peut multiplier le champ magnétique.

Le train à lévitation électromagnétique est équipé des bobines dont la force portante correspond à :

$$F = \frac{10^7}{8\pi} \cdot B^2 S$$

F : force portante en (N)

B : induction en teslas (T)

S : surface d'un disque formé par une spire

Chapitre II

Avec le poids du train on peut déterminer la taille des solénoïdes, l'intensité et la tension du courant appliqué afin que la force portante compense le poids total du train.

Etant donné que les frottements avec le support sont nuls, on peut atteindre des vitesses élevées dans une situation d'inertie.

On peut alors calculer la force portante des solénoïdes afin qu'ils puissent soulever le train. La résultante des forces se calcule d'après cette formule :

$$F = \frac{10^7}{8\pi} \left(\frac{\mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{d} \right)^2 \cdot S$$

Dans un train réel, il y a un ordinateur permettant de calculer l'intensité nécessaire aux bobines en fonction de la distance rail-train qui varie durant le trajet [12].

II.1.2.2: Train à lévitation électrodynamique (EDS):

Le Maglev est le seul prototype de train à sustentation électrodynamique aujourd'hui qui fonctionne dans le monde.[10]

La lévitation d'un train à sustentation électrodynamique est faite grâce à des bobines supraconductrices placées dans les wagons.[11]

La sustentation électrodynamique utilisée dans le TLM est due au principe de la supraconductivité. La supraconductivité est la propriété que possèdent certains matériaux de conduire le courant électrique sans résistance à condition que leur température soit inférieure à une certaine valeur appelée température critique (T_c). Le plus souvent ces températures sont très basses, de l'ordre de 1 ou 10K au dessus du zéro absolue soit -273°C [13].

II.1.2.2. 1.Historique de la supraconductivité :

Ce phénomène fut découvert en 1911 par un physicien néerlandais Heike Kamerlingh Onnes. En 1933, Meissner et Ochsenfeld découvrent que les supraconducteurs repoussent le champ magnétique, un phénomène connu sous l'appellation d'effet Meissner. Une théorie complète de la supraconductivité fut proposée en 1957 par John Bardeen, Leon Cooper et John Schrieffer. Connue comme théorie BCS, d'après leurs initiales, elle explique la supraconductivité par la formation de paires d'électrons (paires de Cooper) formant alors des bosons interagissant avec des phonons. Pour leur travail, les auteurs reçurent le prix Nobel de physique en 1972 [13].

Chapitre II

I.1.2.2.2. Principe

Il ya deux familles de particules : les fermions et les bosons que l'on distingue par leur magnétisme. Seuls les bosons peuvent former des condensats. Un condensat de Bose-Einstein est un état de la matière formé de bosons à une température suffisamment basse. Cependant les électrons libres qui forment le courant, sont des fermions. Donc il faut qu'ils s'assemblent en paire de Cooper pour devenir des bosons et ainsi former un condensat. Ainsi ils forment une onde qui circule plus rapidement que le courant[13].

Donc l'objet ou le câble en métal est un simple conducteur à une température ambiante, les électrons qui forment le courant rebondissent sur les atomes du métal qu'ils parcourent. Ils perdent de leur énergie sous forme de chaleur.

Tandis qu'à -273°C , soit le zéro absolu, certains métaux deviennent conducteurs. La supraconductivité permettrait notamment de transporter de l'électricité sans perte d'énergie, les applications potentielles sont donc stratégiques. En effet avec un câble supraconducteur on peut transporter 5 fois plus de courant qu'avec un câble normal[13].

La supraconductivité sert également à fabriquer des aimants surpuissants et lorsque que le courant électrique tourne dans une bobine, un champ magnétique apparaît. Lequel devient très puissant étant donné que les fils supraconducteurs entourant les bobines peuvent supporter des courants très intenses[13].

II.1.2.2.3. Effet Meissner :

L'effet Meissner est l'exclusion totale de tout flux magnétique de l'intérieur d'un supraconducteur. Il a été découvert par Walther Meissner et Robert Ochsenfeld en 1933 et est souvent appelé l'effet Meissner-Ochsenfeld[13].

L'effet Meissner est l'une des propriétés définissant la supraconductivité et sa découverte a permis d'établir que l'apparition de la supraconductivité est une transition de phase. En physique, une transition de phase est une transformation du système étudié

Chapitre II

provoquée par la variation d'un paramètre extérieur particulier (température, champ magnétique...) [13].

En effet, si l'on refroidit un matériau supraconducteur en présence d'un champ magnétique, le champ est expulsé au moment de la transition supraconductrice. Tandis qu'un matériau hypothétique présentant seulement la propriété de résistance nulle maintiendrait l'intensité (et le sens) du champ magnétique, qu'il aurait possédé lors de la transition, constante en son sein ; tant que cette propriété se maintiendrait. L'effet Meissner est donc une propriété des supraconducteurs qui est distincte de la conductivité infinie. En fait, l'effet Meissner est la propriété caractéristique principale d'un supraconducteur. Mais, cela ne peut se comprendre seulement par le fait que la résistance électrique d'un supraconducteur est nulle[13].

II.1.2.2.4. Paramètres permettant à un matériau d'être ou non supraconducteur

Un matériau devient supraconducteur lorsqu'il est soumis à une température en-deçà d'une **température critique T_c** . Cependant, cette propriété peut disparaître si ce matériau est soumis à un champ magnétique trop intense, c'est-à-dire, au-delà d'un **champ magnétique critique H_c** : celui-ci dépend de la température mais n'est en aucun cas proportionnel à T_c . En effet, on peut citer comme autre critère intervenant dans la valeur H_c , la forme de l'objet supraconducteur : un supraconducteur carré aura une valeur H_c moins grande qu'un supraconducteur ovale [13].

Néanmoins, il existe deux types de supraconducteurs :

- **Les supraconducteurs de première espèce ou de premier type** : la résistance au courant du matériau, elle est totalement nulle lorsque celui-ci est dans l'état supraconducteur.
- **Les supraconducteurs de deuxième ordre** : la résistance au courant, est nulle à l'état supraconducteur, et à l'état mixte elle varie selon les matériaux.

Chapitre II

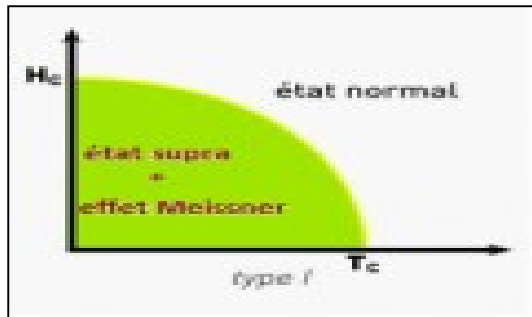


Figure. II.2. Supraconducteurs du premier type.

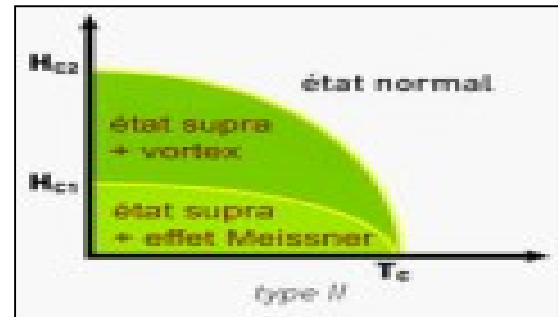


Figure. II.3. Supraconducteurs de deuxième type.

Les supraconducteurs de type 1 ne sont pas utilisés pour les trains car ceux-ci sont trop instables.

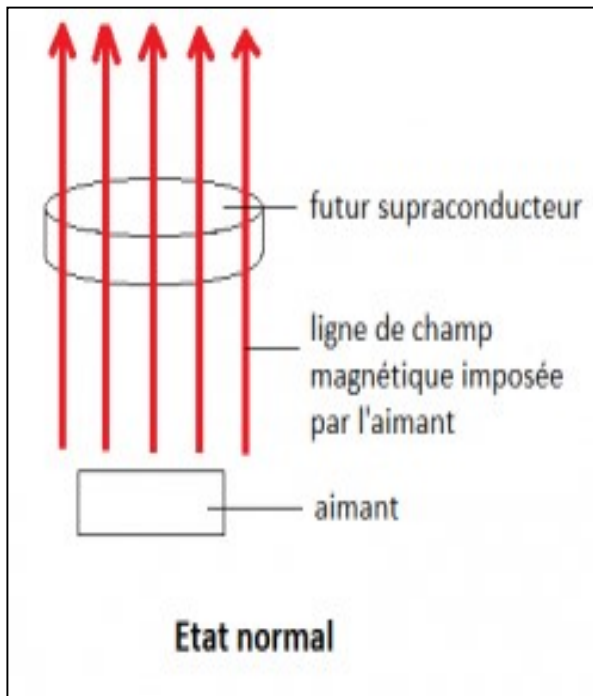


Figure II.4: Etat normal

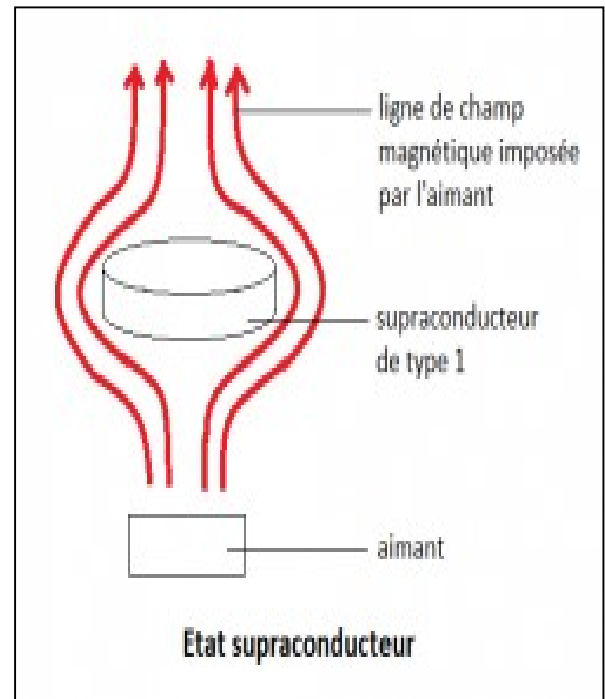


Figure II.5: Etat supraconducteur

En utilisant des supraconducteurs de type 2, lorsque le champ magnétique de l'aimant est suffisamment important, celui-ci va pénétrer le supraconducteur par des vortex, ce qui va rendre la lévitation très stable [13].

Chapitre II

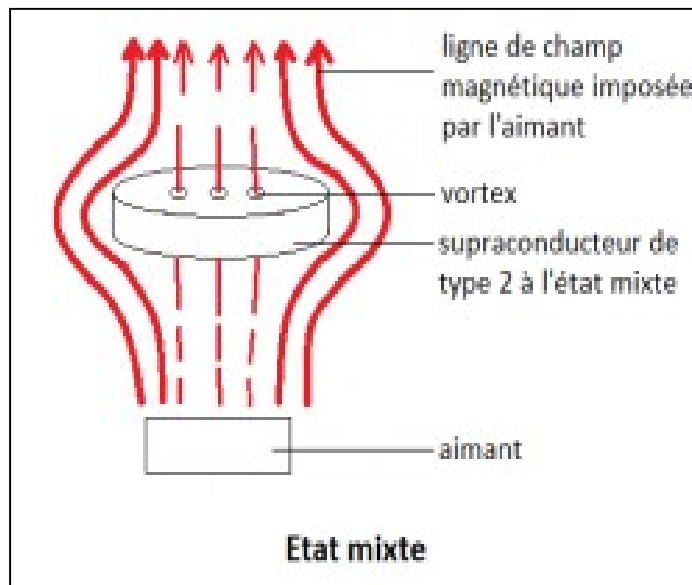


Figure II.5 : Etat mixte du supraconducteur de type 2

Voici quelques supraconducteurs de type 2 :

- *Nb* : $T_c=9K$, H_{c2} =quelques Tesla (T)
- *NbTi* : $T_c=9.2K$, $H_{c2}=10T$ (utilisé pour les IRM)
- *Nb₃Sn* : $T_c=15K$, $H_{c2}=25T$ (Ces matériaux ne sont pas utilisés pour les trains car leur H_{c2} n'est pas suffisamment élevé)
- *YBaCuO₇/Ag* : $T_c=92K$, $H_{c2}=50T$
- *Bi₂Sr₂CaCu₂O₈* : $T_c=85K$, $H_{c2}=100T$ (Ce dernier est le plus utilisé) .

II.1.2.2.5: Application au train

Ayant compris les propriétés des supraconducteurs et particulièrement ceux de types 2, nous allons pouvoir appliquer ce principe au train. Il existe, à nouveau, deux principes de fonctionnement. Celui du Maglev japonais fonctionne sur le même principe que les trains à sustentation électromagnétique : seulement, au lieu d'utiliser des électroaimants classiques, il contient des électroaimants supraconducteurs refroidis à l'hélium liquide. Une autre solution que celle proposée dans le cas de la sustentation électromagnétique, a donc été d'utiliser des bobines supraconductrices qui, lorsqu'elles sont parcourues par un courant, n'opposent aucune résistance à celui-ci . Le second est encore à l'état de prototype. Des aimants de néodyme sont disposés sur les rails, des aimants de pôle Nord sur l'extérieur et de pôle Sud à l'intérieur pour empêcher tout déraillement et pour garantir le maintien du train sur la voie[13].

Chapitre II



Figure II.6 : train à La lévitation électrodynamique

C'est comme si les lignes de champ enveloppaient le supraconducteur qui est lui, à l'intérieur du train, pour qu'il ne puisse pas dérailler et le fait d'utiliser des supraconducteurs de type 2 permet la stabilité du train . Le supraconducteur, placé à l'intérieur du train, a néanmoins besoin d'être refroidi tout au long du trajet[13].

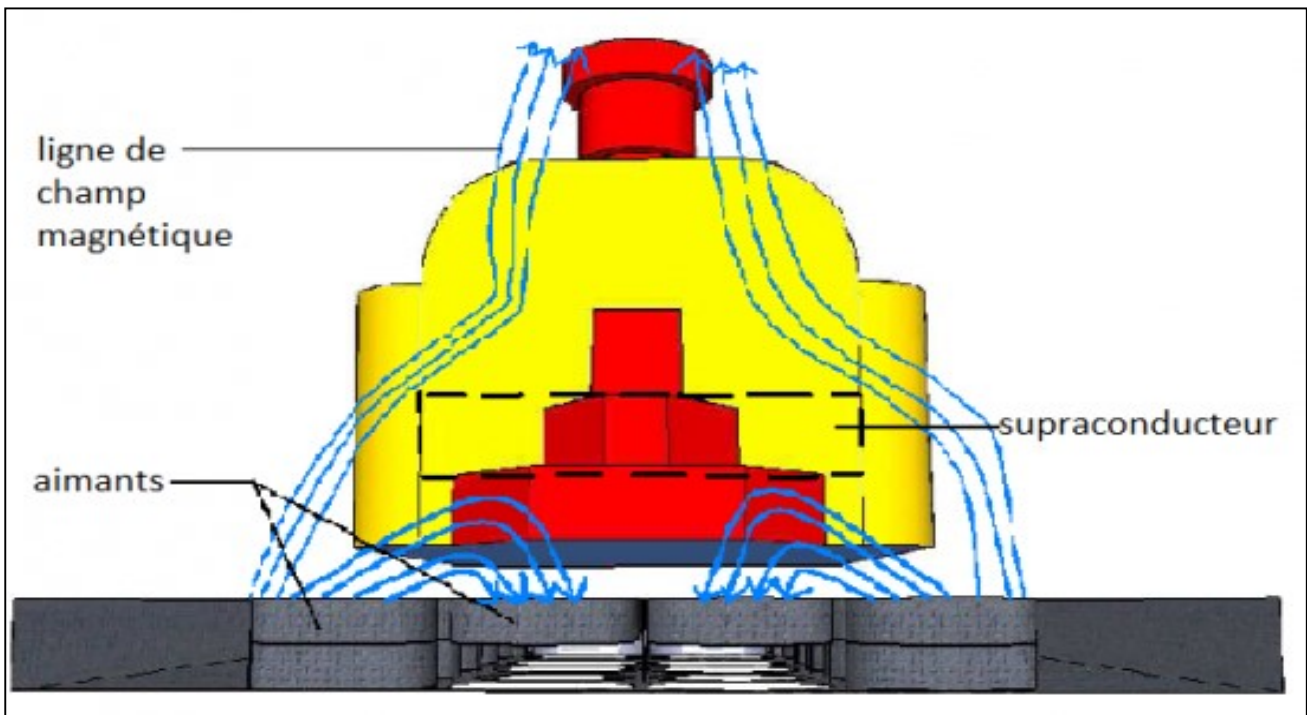


Figure II.7 : Les lignes de champ magnétique

Chapitre II

II.2. Propulsion

II.2.1. 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 électromécanique [Juger 95]. Le signal électrique peut commander deux types de mouvement, linéaire ou rotatif. La transformation du signal électrique en mouvement mécanique est créée 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 [Bignoliez 91] [Kant 89] [2].

II.2.2. 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 champ magnétique et donc de modifier la capacité de la bobine à attirer le fer [2].

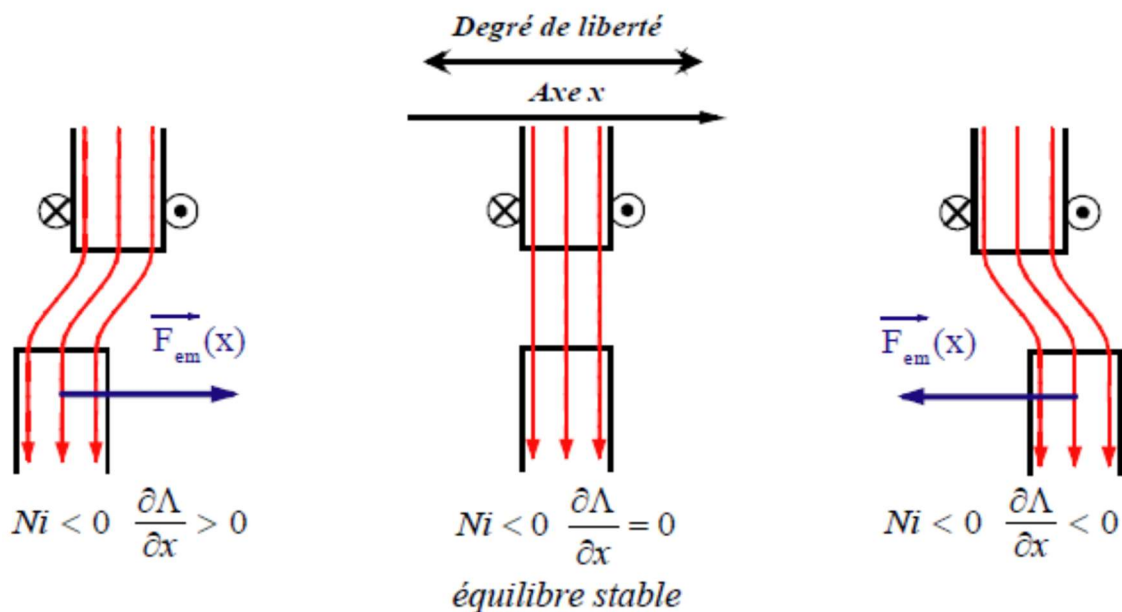


Figure.II.2.2 .équilibre stable

II.2.3. Moteurs linéaires

II.2.3.1 Moteurs pas à pas polarisés et linéaire

Chapitre II

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 dentée métallique, qui s'alignent naturellement sur l'axe magnétique de la paire de plot alimenté [2].

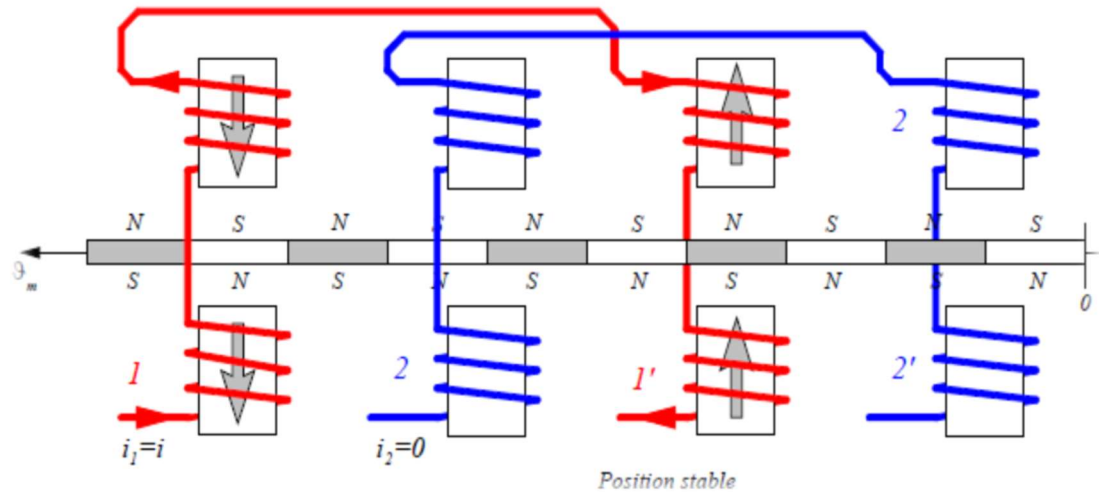


Figure.II.2.3.1 Moteur pas à pas polarisé linéaire

II.2.3.2 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 composée 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 composée des bobines [2].

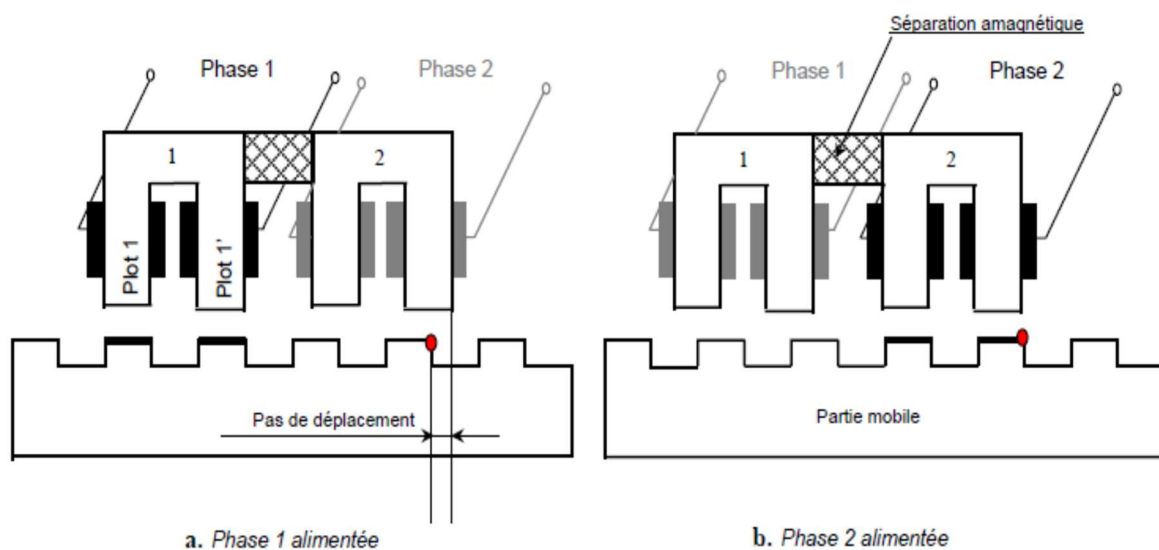


Figure.II.2.3.2 .Moteur pas à pas à réluctance variable linéaire

Chapitre II

II.2.4. Les moteurs rotatifs

II.2.4.1. 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 » [2].

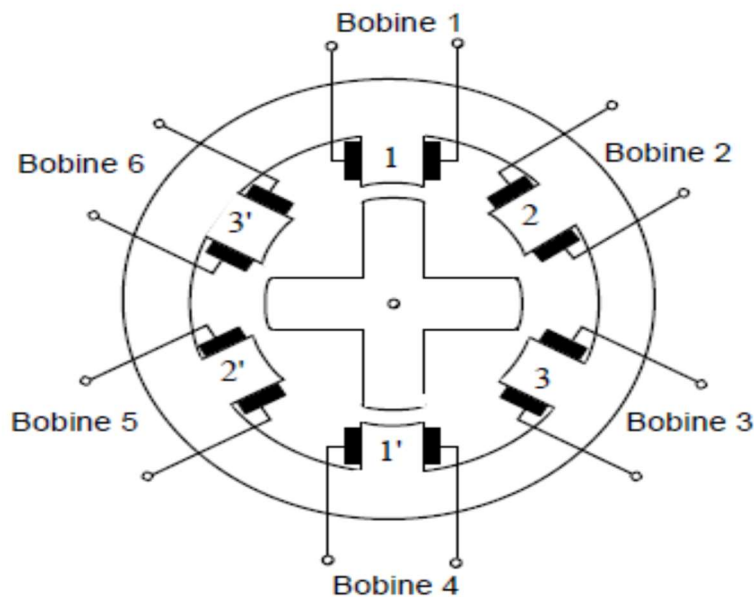


Figure. II.2.4.1. Moteur pas à pas à réluctance variable rotatif

II.2.4.2. 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 [2].

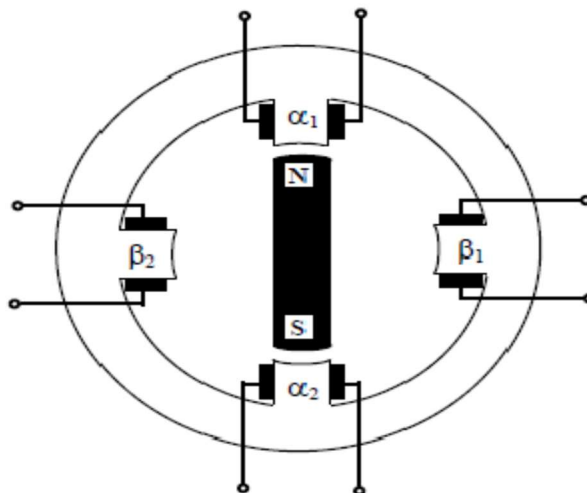


Figure. II.2.4.2 . Moteur pas à pas polarisé rotatif

Chapitre II

II.2.5. 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 Notre modèle de propulsion s'inspire d'un autre type de modèle déjà existant qui Utilise la réluctance variable

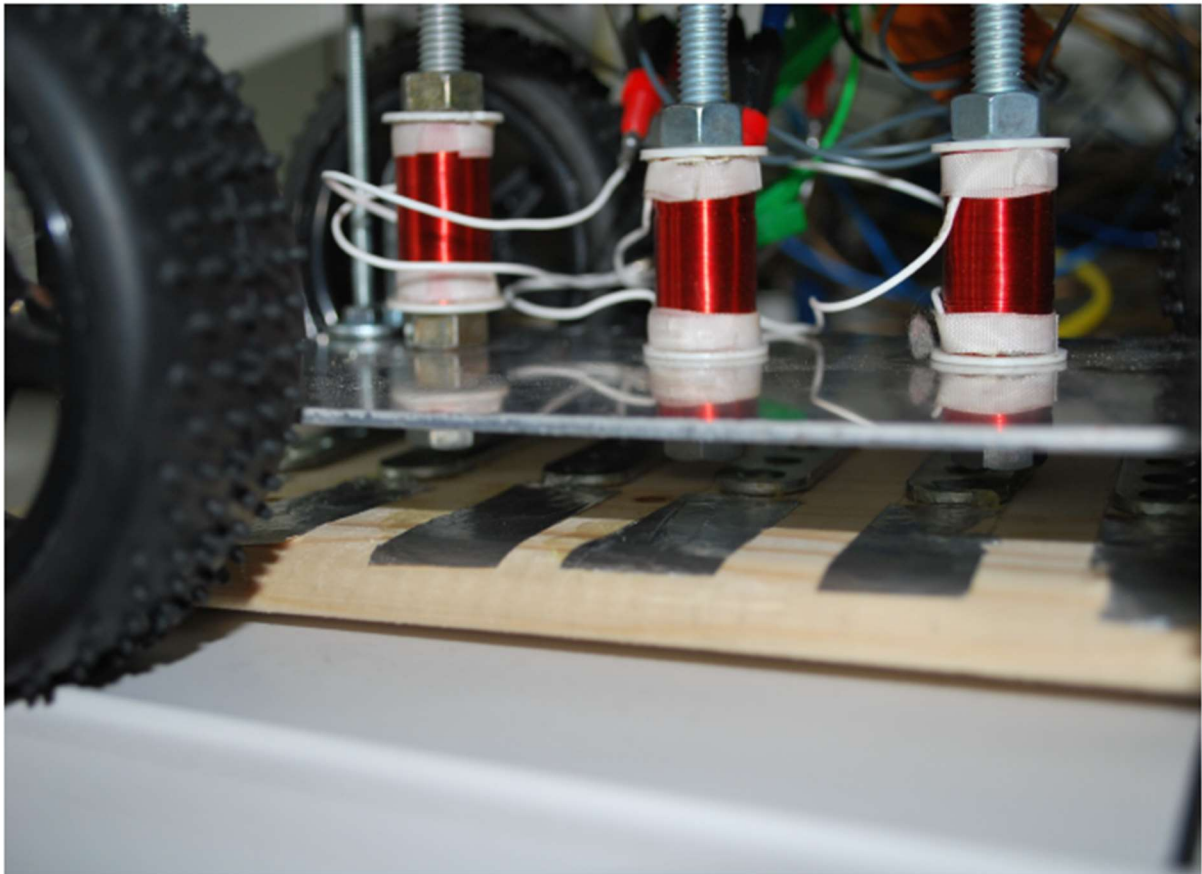
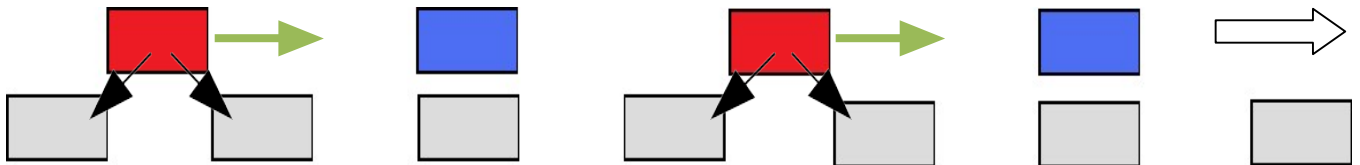


Figure.II.2.5. Commande d'une machine à réluctance variable linéaire.

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 [2].

Chapitre II

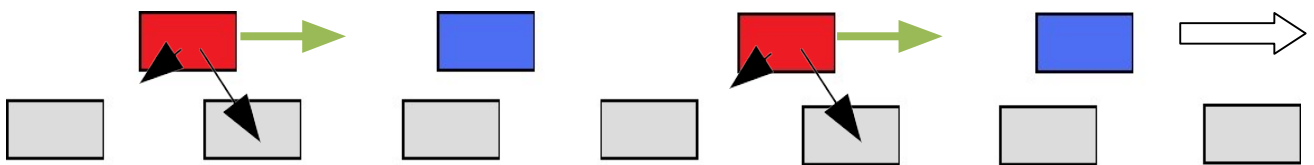
supplémentaire (sur le nôtre, on a deux couples de Bobines en action simultanée : donc gain de force mais perte de précision). Sur ce schéma, on voit la position des bobines à la commutation : les bobines en rouge Sont alimentées. Comme elles sont à égale distance des plaquettes de fer, les forces se 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 :

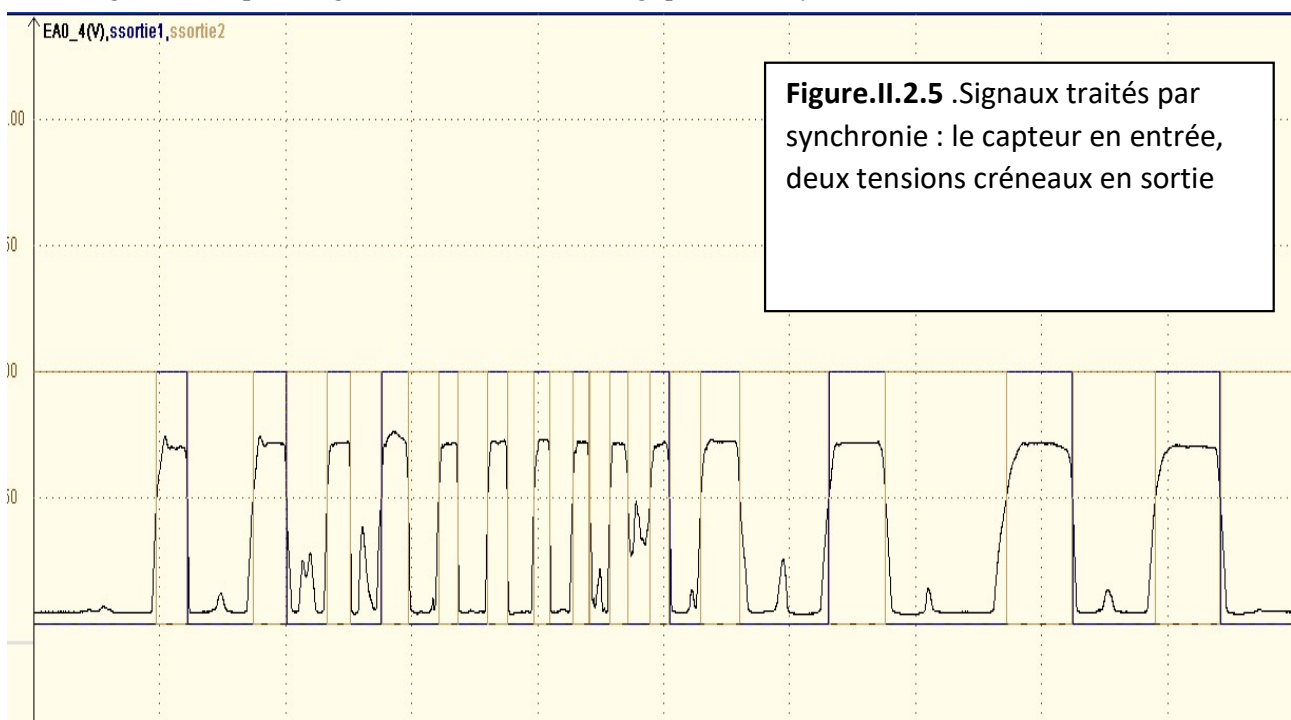


Sur ce schéma, le train a progressé et on voit clairement que la force est déséquilibrée et va entraîner le train vers la droite. Lorsque les positions sont de nouveau au point d'équilibre, il y a une nouvelle commutation.



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 réfléchi 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

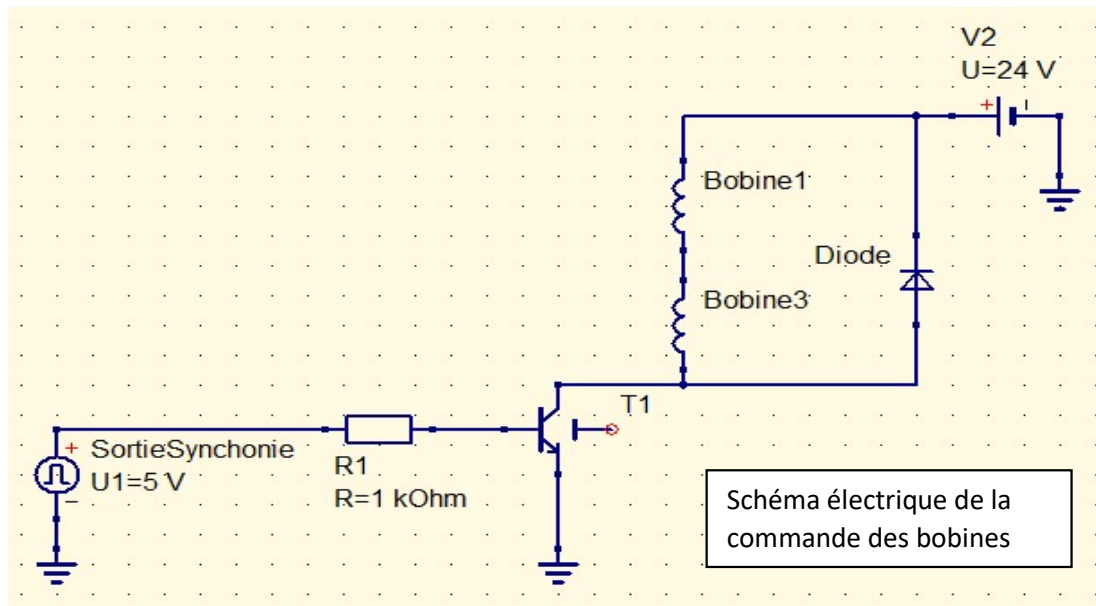


Chapitre II

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 [2].

Chapitre II

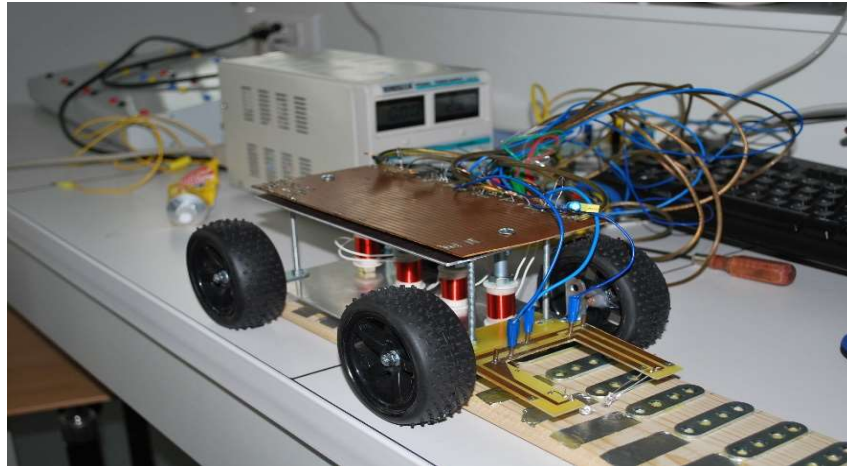


Figure.II.2.5. Maquette propulsions

II.2.6. La propulsion du véhicule.

Les enroulements de propulsion situés sur les parois latérales des deux côtés de la voie de Guidage figure (I.12) sont alimentés par courant alternatif triphasé, créant un champ

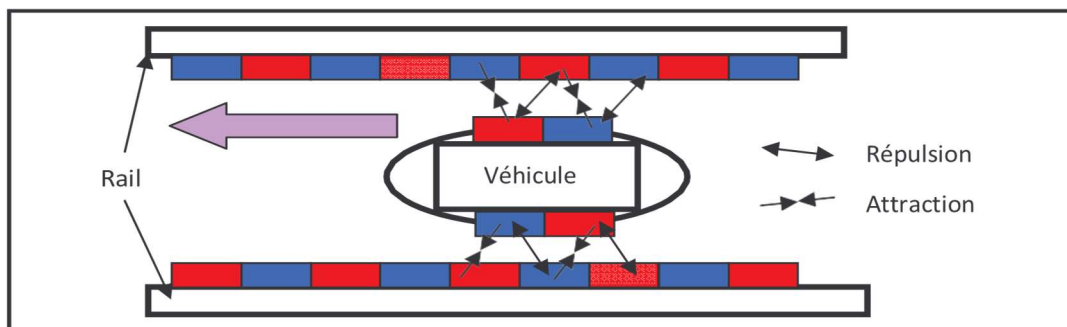


Figure.II.2.6. Technique de propulsion dans les systèmes de répulsion électrodynamique

Magnétique lissant sur la voie de guidage. Une force répulsive et une force d'attraction induite entre les Aimants supraconducteurs sont responsables de la propulsion du véhicule. Les aimants de supraconducteurs à bord, sont attirés et poussés par le champ glissant Pour propulser le véhicule de Mage. IL s'agit d'un fonctionnement similaire à celui du LSM [14].

II.2.7. Principe de propulsion en Maglev :

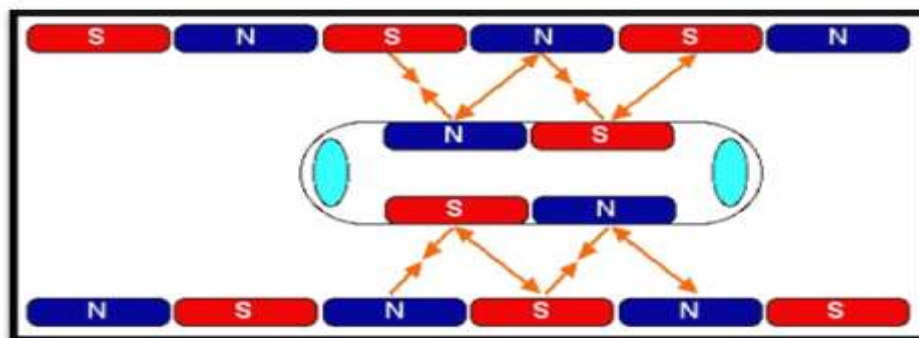


Figure II.2.7. Technique de propulsion dans les systèmes de répulsion électrodynamique

Chapitre II

Une force répulsive est une force attrayante induite entre les aimants qui sont employés pour propulser le véhicule. Les enroulements de propulsion situés sur les parois latérales des deux côtés des voies de guidage sont activés par un courant alternatif triphasé. Les aimants de supraconduction à bord sont attirés et repoussés par la zone de décalage, propulsant alors le véhicule Maglev. Le train à sustentation magnétique japonais fonctionne avec un moteur linéaire synchrone et dispose de bobines magnétiques positionnées le long de la rame avec les pôles nord et sud disposés alternativement de l'avant vers l'arrière du train. Des bobines de propulsion sont situées tout le long de la voie. Elles sont alimentées en courant alternatif dont la fréquence est proportionnelle à la vitesse du train. Ainsi, chaque bobine voit ses pôles s'inverser de manière à ce qu'elle repousse la bobine du train qui vient de passer devant elle et attire celle qui vient vers elle. Toutes les forces exercées sur le train concourent ainsi à le propulser dans le même sens. Le déplacement du train induit alors un courant électrique dans les bobines de sustentation situées au sol. Quand le champ magnétique de ces dernières devient suffisamment important, c'est-à-dire quand le train dépasse les 100 à 150 Km/h, celui-ci lève de 10 cm du fait de l'interaction entre les bobines sur les bords du train et sur les faces latérales de la voie de guidage. Les aimants embarqués par le train sont des bobines supraconductrices. Autrement dit, elles sont maintenues à une température très basse pour supprimer leur résistance électrique. Par conséquent, toute variation d'un champ magnétique ici celui des bobines situées au sol induit dans les bobines embarquées un courant qui n'est pas amorti et qui crée un champ magnétique et cela sans apport extérieur de courant [16].

II.2.8. Principe de propulsion en Transrapid

La voie est équipée d'aimants de sustentation. Le déplacement du train est dû au champ généré par les aimants de la voie qui repoussent ceux du train. Le train est alimenté électriquement. La charge électrique traverse les bobines installées sur la voie et les magnétise. Le courant électrique qui passe dans chaque bobine fait changer la polarité. Les aimants de la voie sont situés dans des guides. Ils sont construits en acier ou en béton renforcé pour apporter de la stabilité, solidité et de la longévité.

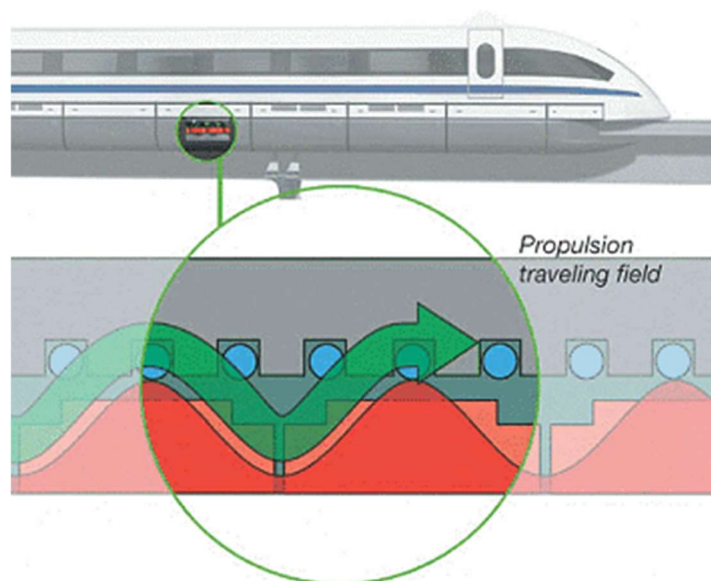


Figure.II.2.8. Technique de propulsion dans les systèmes de répulsion électromagnétiques

Chapitre II

Le train peut donc avancer grâce aux aimants du train qui sont attirés vers une bobine de pôle opposé à eux et repoussés quand le pôle est identique. Le système élaboré du train lui confère une grande stabilité avec un jeu qui reste constant (nominalement 10 mm). Pour planer, le Transrapid nécessite moins d'énergie que ses équipements de climatisation. Le système de lévitation est alimenté par des batteries embarquées et donc indépendant du système de propulsion. Le véhicule est capable de planer jusqu'à une heure sans énergie externe. Pendant le voyage, les batteries embarquées sont rechargées par des générateurs linéaires intégrés à la voie [16].

II.3. Le guidage

II.3.1. GUIDAGE POUR LA SUSTENTATION MAGNETIQUE

Le principe le plus utilisé pour faire " voler " ces trains est le système de sustentation. Le train n'est pas poussé, mais attiré vers le haut par des bobines situées sous la voie (en rouge) qui attirent les bobines situées sur le train (en bleu), et réciproquement, car elles sont de même sens. Le train lévite alors environ 1 cm au-dessus de la voie [15].

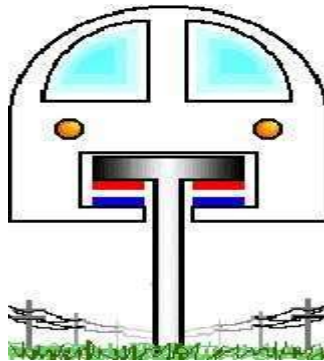


Figure.II.3.1 . Le guidage du train parallèlement à la voie se fait encore parades forces électromagnétiques, sans contact

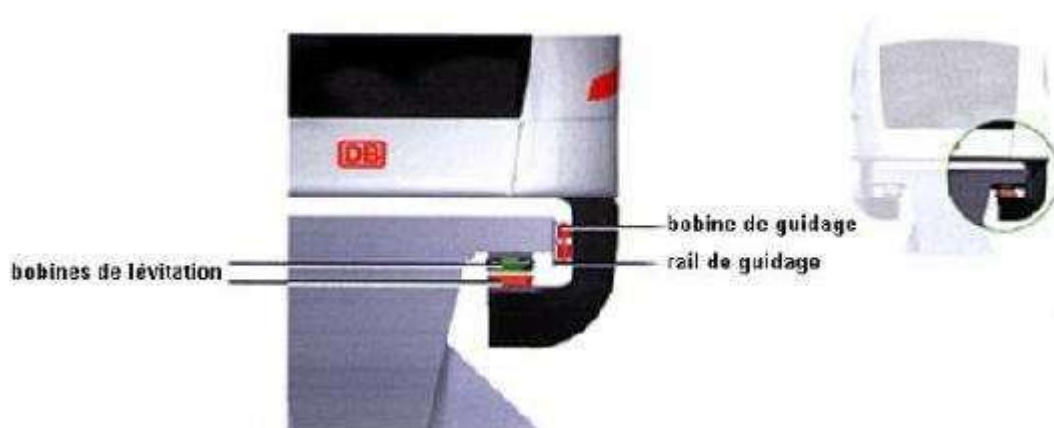


Figure.II.3.1 . Les bobines de guidage de la voie sont situées sur les côtés de celles-ci, en face des bobines de guidage du train.

Chapitre II



Figure. II.3.1 : Voici un exemple de train à sustentation magnétique : Le Transrapid.

L'autre principe utilisé est la lévitation magnétique. Cette fois ci, le train est repoussé par la voie vers le haut grâce à des bobines situées sur la voie et sous le train. Ces bobines sont de sens contraires, donc, elles se repoussent.

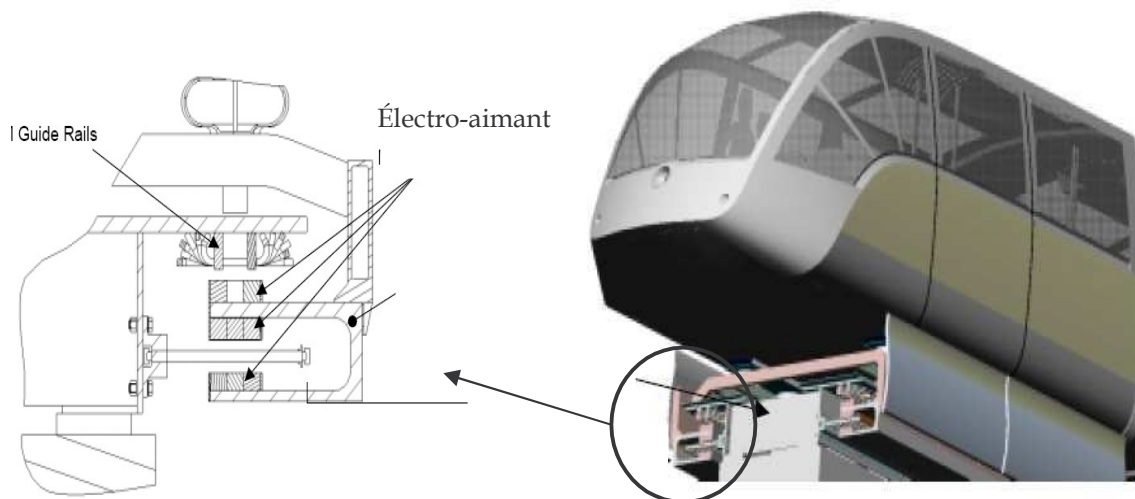


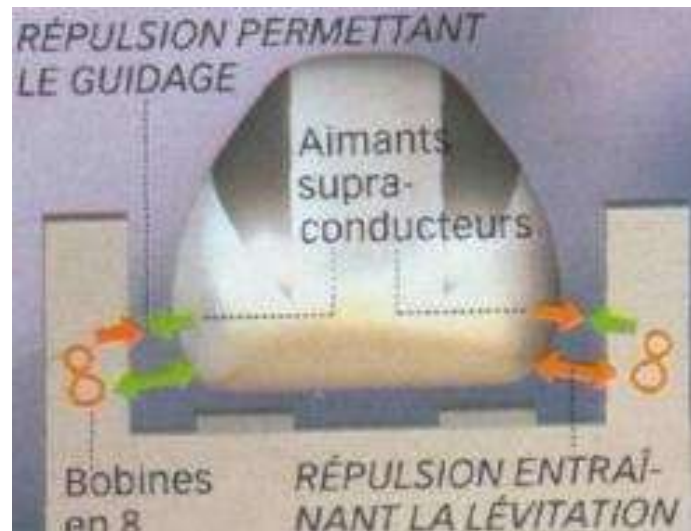
Figure.II.3.1 .Véhicule TRANSRAPID

Contrairement au système de sustentation, le guidage est assuré par les mêmes bobines que celles qui assurent la lévitation.

Ces bobines sont en fait en forme de 8 et ne sont pas alimentées en électricité. C'est le passage des aimants supraconducteurs du train (faits d'un alliage de niobium et de titane refroidis à -69°C par de l'hélium liquide) qui crée en elles un courant électrique, selon le principe d'induction électromagnétique.

Tandis que la partie inférieure de la bobine située sous la voie assure, comme nous l'avons vu, la lévitation par répulsion, la partie supérieure de la bobine, située sur les côtés de la voie, assure le guidage, également par répulsion [15].

Chapitre II



Avec ce système, pour des raisons de consommation, et surtout parce que le train doit déjà être en mouvement pour voler, la propulsion se fait par des roues d'avions pour des vitesses inférieures à 100 km/h. Voici un exemple de train à lévitation magnétique : Le mage japonais :



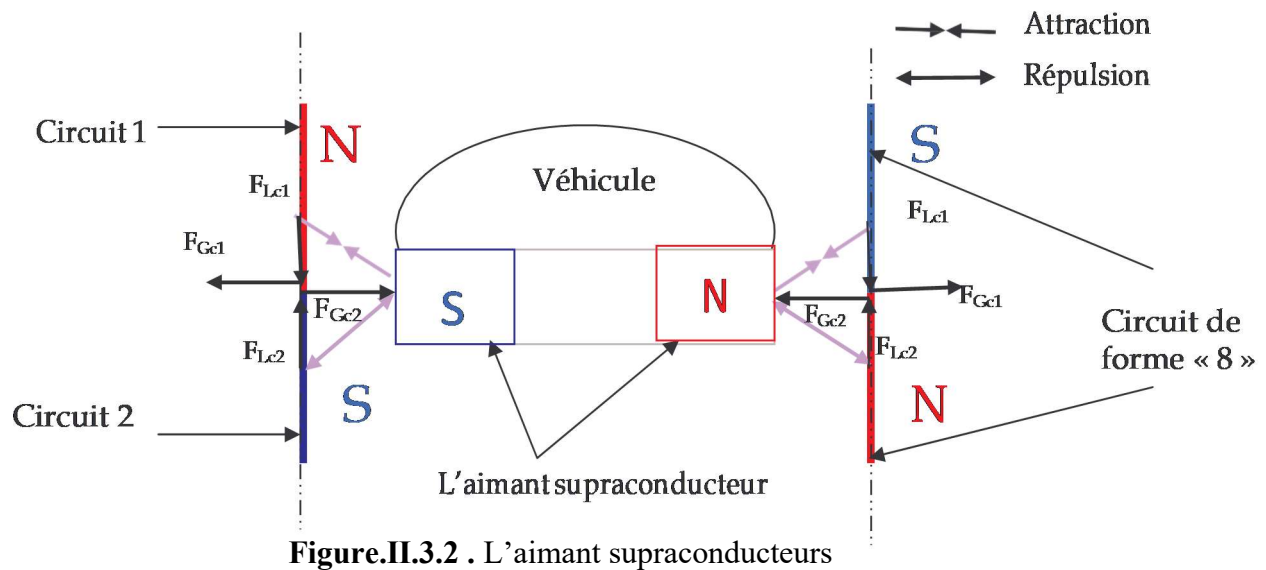
Figurier.II.3.1 . Voici un exemple de train à lévitation magnétique : Le maglev japonais

Grâce à ces jeux de bobines, les trains sont maintenant soulevés et guidés. Des ordinateurs reliés à des capteurs situés sur le train calculent automatiquement l'intensité de courant nécessaire à la sustentation et au guidage [15].

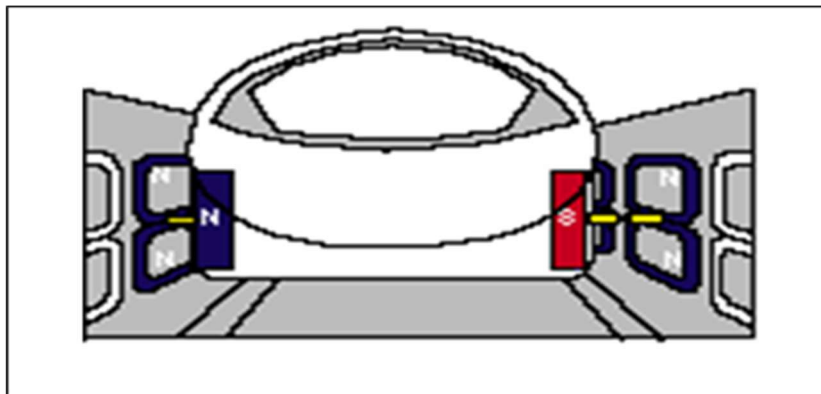
II.3.2. Le guidage latéral

L'interaction de l'aimant supraconducteur avec les enroulements en forme de '8'. Se traduit aussi par une action latérale qui assure le guidage du véhicule le long de la voie. Cette force de guidage est produite par la composante horizontale de l'induction magnétique Résultant de la réaction des enroulements [14]. Les références [14] et [14] contiennent la conception et la modélisation du deux techniques

Chapitre II



Les enroulements de lévitation se faisant face, sont reliés sous la voie de guidage, constituant alors une boucle. Quand le véhicule, contenant l'aimant, se déplace transversalement, un courant électrique est induit dans la boucle, ayant pour résultat une force répulsive agissant sur les enroulements de lévitation les plus proches du wagon et une force attractive agissant sur les enroulements de lévitation les plus loin. Ainsi, une voiture courante est toujours située bien au centre de la voie de guidage [14].



FigureII.3.2 . Guidage latéral

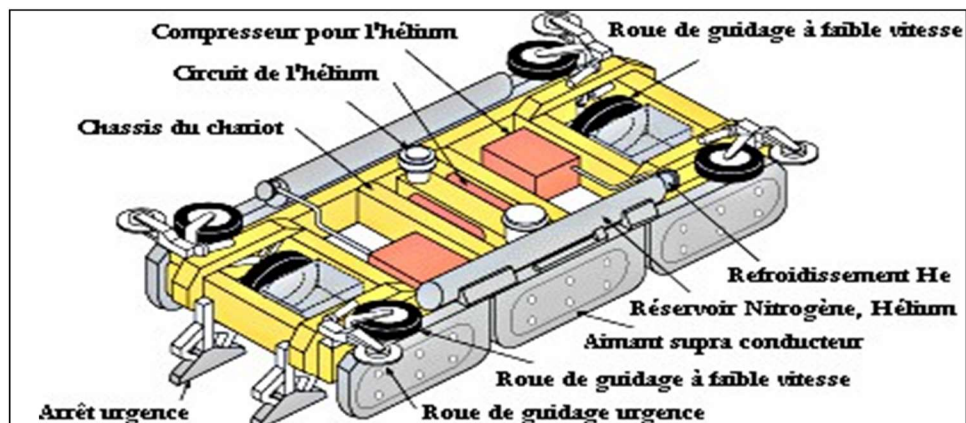


Figure II.3.2 .Chariot de guidage

Chapitre II

II.3.3. Voie de guidage

La voie de guidage se compose d'une structure correspondant à la piste conventionnelle, et d'enroulement au sol correspondant au moteur conventionnel. C'est un élément essentiel du Maglev. Pour la ligne d'essai de Yamanashi, les trois étapes d'installations suivantes des enroulements au niveau du rail de guidage pour la propulsion, la lévitation, et le guidage latéral sur la voie sont celles adoptés, répondant alors à la meilleure approche commerciale [1].



Figure II.3.3 . Voie de guidage

II.3.4. Les faisceaux

Dans l'étape dite des faisceaux, la partie de paroi latérale sera constituée seulement de faisceaux en béton. Le processus entier du faisceau fabriqué à l'installation des enroulements a lieu à l'usine sur le site (yard temporaire). Un faisceau terminé est transporté sur le site de travail sans les enroulements, pour être placé sur deux lits de béton installés à l'avance [1].

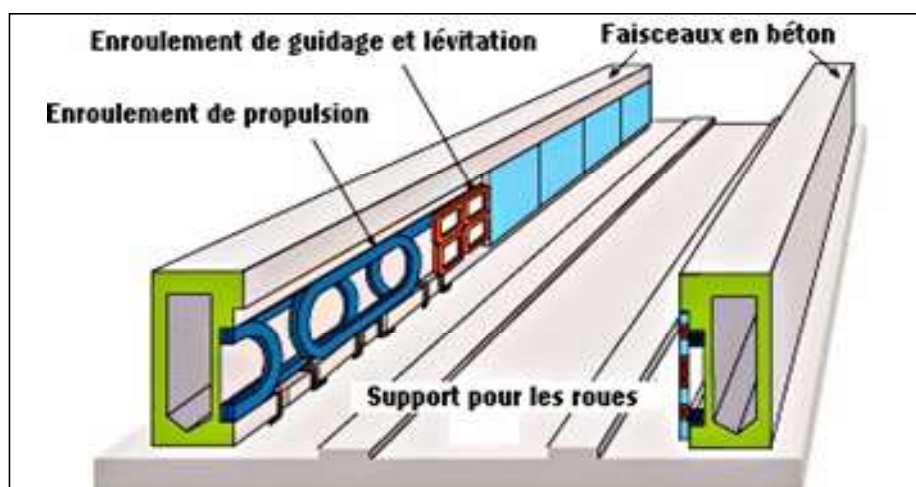


Figure.II.3.4 . Les Faisceaux

Chapitre II

II.3.5. L'installation des panneaux

Dans l'usine installée sur place (yard temporaire) le panneau de béton est produit et attaché avec les enroulements. L'assemblage terminé est porté sur le site de travail, où il est fixé, avec 10 boulons, à la paroi latérale érigée à l'avance [1].

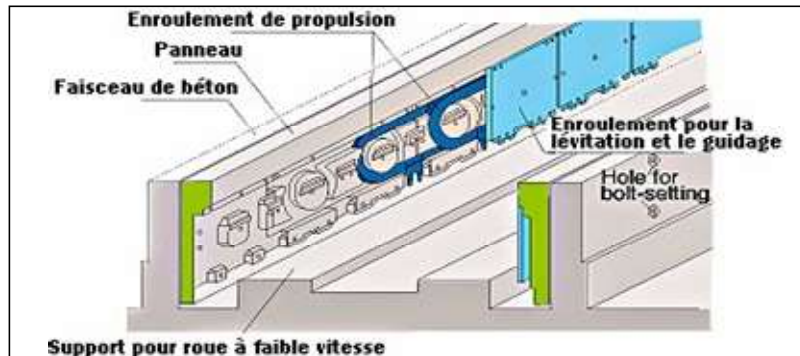


Figure II.3.5 . Les panneaux en béton

II.4. Freinage

Une fois le train lancé, il faut pouvoir l'arrêter efficacement, étant donnée sa très grande vitesse. Ce freinage se fait encore sans contact. Il existe deux façons de générer une force de freinage :

La première façon consiste à créer un champ glissant en sens inverse du sens de déplacement.

La seconde façon, plus simple, est de créer un champ fixe, grâce au déplacement du train, qui induit des courants qui s'oppose au déplacement. Dans le cas du système de lévitation, le freinage s'effectue par des aérofreins (en jaune) situés sur le train [1].

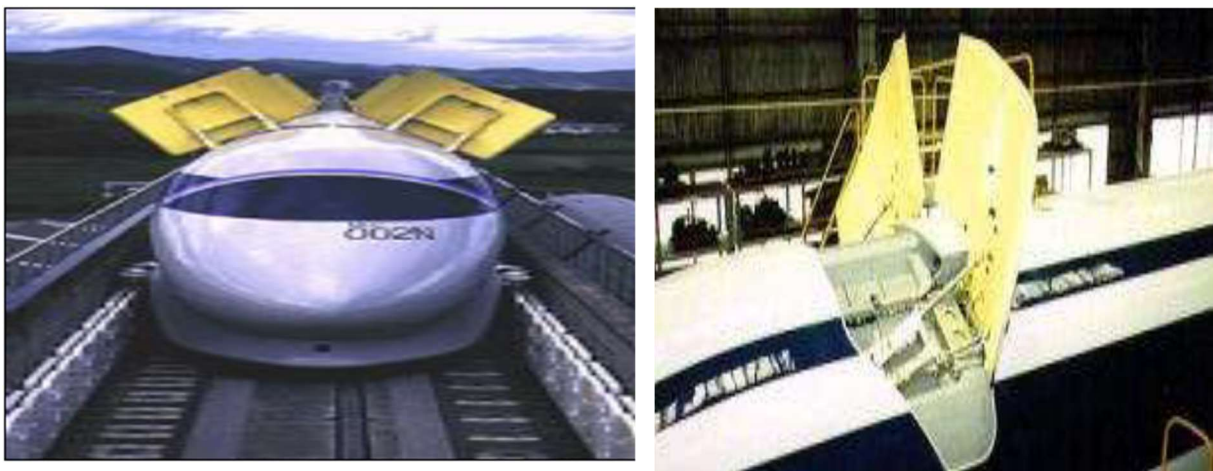


Figure II.4 aérofreins

Conclusion

Conclusion

Pendant cette mémoire , nous avons identifié l'intérêt d TLM avec une comparaison entre elle et le TGV , aussi le principe de fonctionnement à base des supraconducteur et des électroaimant.

Ces trains à lévitation présentent plusieurs avantages : outre le fait qu'ils circulent à de très hautes vitesses (ce qui raccourcit la durée des trajets), ils n'usent pas les voies (car il n'y a pas de contact direct). Les contraintes des trains sur rails (contact pantographe caténaire, adhérence, freinage, signalisation) n'autorisent pas aujourd'hui des vitesses commerciales au-delà de 350 km/h. Les trains à lévitation semblent donc prometteurs.

Malgré tous les avantages cités plus haut, le train à lévitation magnétique reste difficile à mettre en place du fait des moyens qu'il faut déployer et notamment le système de refroidissement des aimants ainsi que l'alimentation électrique. C'est pourquoi la découverte de nouveaux supraconducteurs à des T_c plus élevées permettrait à ces recherches d'avancer et ainsi trouver un usage commercial à ce nouveau type de transports.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] HAMANI Saddek , ZEGHOUANI Fares : Mémoire de fin d'études "Etude de la lévitation magnétique des trains à lévitation magnétique" Université A. MIRA-Bejaia Faculté de Technologie Département de Génie électrique Promotion 2015-2016
- [2] Reda BELKEBIR MRANI, Nicolas FLORENTIN, Houda LAHLOU ,Mathilde MARIE, Simon MENAGER ,Olivier PELIN:"Projet de physique P6-STPI/P6-3/2011 – Groupe 32; Propulsion à sustentation magnétique".
- [3] : Source: Yves Crozet : "Maglev (603 km/h), Hyperloop (1102 km/h). Vers un "retour sur terre" de la très grande vitesse ?
- [4] : Source : MAGLEV Powell et danby page 25/26
- [5] <http://tpe-tlm-sfa-bam.e-monsite.com/pages/iii-impacts-et-comparaisons/>
- [6] : <http://tpe-train.over-blog.com/article-27856954.html>
- [7] <https://trainalevitationmagnetique.wordpress.com/avantagesdesavantages/>
- [8] <http://levitation-magnetique.e-monsite.com/pages/introduction/rappels.html>
- [9] <http://letpetrain.e-monsite.com/pages/page.html>
- [10] <http://les-supraconducteurs.e-monsite.com/pages/le-maglev/fonctionnement-du-maglev.html>
- [11] " Axel, Paul, Morgan" et CésarTPE – Trains à Sustentation Magnétique2012/2013
- [12] <http://tpe-tlm-sfa-bam.e-monsite.com/pages/i-fonctionnement/i-fonctionnement-des-deux-trains.html>
- [13] : <http://tpe-tlm-sfa-bam.e-monsite.com/pages/i-fonctionnement/b-la-sustentation-electrodynamique.html>
- [14] LAHOUESSA Fayçal, TABAKHI ABDELMALEK MEMOIRE DE FIN D. ETUDES EN VUE DE L. OBTENTION DU DIPLÔME D. INGENIEUR D. ETAT EN GENIE ELECTROTECHNIQUE " Réglage de position de l.inducteur de sustentation magnétique applique dans les systèmes de Maglev"
- [15] Lepot Alex Morel Winny Undi Maxime travaux personnels encadrées Le train sur rail magnétique Année Scolaire 2006-2007
- [16] <https://trainalevitationmagnetique.wordpress.com/principes-de-fonctionnement/>